



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΣΥ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΑΣ

Διπλωματική εργασία

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΥ
ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΔΥΣΚΑΜΠΤΩΝ
ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ

ΚΑΦΙΡΗ ΔΗΜΗΤΡΑ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Α. ΛΟΪΖΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2017

Στη μνήμη του πατέρα μου

Γεωργίου Α. Καφίρη

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Έχοντας ολοκληρώσει τη διπλωματική μου εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Ανδρέα Λοΐζο, επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας εργασίας, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου με την ανάθεση της εργασίας αλλά και για την ουσιαστική καθοδήγηση του. Επιπλέον, για τη δυνατότητα που μου παρείχε να παρευρεθώ στο Διεθνές Συνέδριο για τη Φέρουσα Ικανότητα Οδοστρωμάτων Οδών, Αεροδρομίων και Σιδηροδρομικής Υποδομής BCRRA 2017 που διοργανώθηκε υπό την αιγίδα του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ, στα πλαίσια του οποίου διεύρυνα τις γνώσεις μου και ενημερώθηκα πληρέστερα σχετικά με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας ώστε να ολοκληρώσω την εκπόνηση της.

Θερμές ευχαριστίες, επίσης, θα ήθελα να απευθύνω στην κα Αρμένη, επιστημονική συνεργάτιδα του Εργαστηρίου Οδοποιίας, για την πολύτιμη συμβολή της σε όλα τα στάδια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη μητέρα μου Ευστρατία για τη διαρκή της υποστήριξη και την υπομονή της και πάνω απ' όλα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον αείμνηστο πατέρα μου Γεώργιο, που συνεχίζει να καθοδηγεί τα βήματά μου και σε εκείνον χρωστάω όλα όσα έχω καταφέρει.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	1
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	6
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	7
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	11
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
2. ΕΜΠΕΙΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ FAA	16
2.1 Εισαγωγή.....	16
2.2 Βασικές Αρχές Μεθόδου	16
2.2.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	16
2.2.2 Μοντέλο αστοχίας.....	20
2.2.3 Κυκλοφορία	23
2.2.4 Τυπικά υλικά FAA.....	27
2.3 Διαδικασία Σχεδιασμού	29
3. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ FAA.....	39
3.1 Εισαγωγή.....	39
3.2 Βασικές αρχές.....	39
3.2.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	39
3.2.2 Μοντέλο αστοχίας.....	45
3.2.3 Δείκτης Φθοράς CDF.....	51
3.2.4 Τυπικά υλικά FAA.....	55
3.3 Λογισμικό FAARFIELD	57
3.3.1 Μεταβλητές εισόδου λογισμικού.....	58

3.3.2	Διαδικασία σχεδιασμού	66
4.	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΗΣ FAA ..	68
4.1	Εισαγωγή.....	68
4.2	Σύγκριση βασικών αρχών και παραδοχών	68
4.3	Διαστασιολόγηση διατομής δύσκαμπτου οδοστρώματος	69
4.3.1	Δεδομένα σχεδιασμού	69
4.3.2	Διαστασιολόγηση οδοστρώματος με την εμπειρική μέθοδο.....	71
4.3.3	Διαστασιολόγηση οδοστρώματος με την αναλυτική μέθοδο	73
4.4	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	77
5.	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΑΡΧΩΝ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ FAA ...	79
5.1	Εισαγωγή.....	79
5.2	Διερεύνηση επιρροής παραμέτρων σχεδιασμού στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος.....	79
5.2.1	Ανάλυση ευαισθησίας πάχους πλάκας σκυροδέματος ως προς την εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος	80
5.2.2	Ανάλυση ευαισθησίας πάχους πλάκας σκυροδέματος ως προς το πάχος της σταθεροποιημένης στρώσης υπόβασης.....	81
5.2.3	Ανάλυση ευαισθησίας πάχους πλάκας σκυροδέματος ως προς το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης σταθεροποιημένης υπόβασης.....	83
5.2.4	Ανάλυση ευαισθησίας πάχους πλάκας σκυροδέματος ως προς το δείκτη αντίδρασης στρώσης έδρασης	85
5.3	Διερεύνηση επίδρασης παραμέτρων σχεδιασμού στο δείκτη αθροιστικής φθοράς.....	89
5.3.1	Επίδραση πάχους πλάκας σκυροδέματος στο δείκτη αθροιστικής φθοράς	91
5.3.2	Επίδραση εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος στο δείκτη αθροιστικής φθοράς.....	93
5.3.3	Επίδραση του πάχους σταθεροποιημένης υπόβασης στο δείκτη αθροιστικής φθοράς.....	99
5.3.4	Επίδραση του δείκτη αντίδρασης στρώσης έδρασης στο δείκτη αθροιστικής φθοράς.....	102

6. ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	106
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	110
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	113
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	124

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της μεθόδου διαστασιολόγησης δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων της FAA. Για το σκοπό αυτό, εντοπίστηκαν και διερευνήθηκαν οι βασικές αρχές της αναλυτικής μεθόδου, μέσω της συγκριτικής ανάλυσης της με την προγενέστερη εμπειρική μέθοδο και διενεργήθηκε διαστασιολόγηση διατομής δύσκαμπτου οδοστρώματος ώστε να σχολιαστούν τα συγκριτικά αποτελέσματα. Στη συνέχεια ακολούθησε εμβάθυνση στις αρχές της αναλυτικής μεθόδου. Στο πλαίσιο αυτό, διενεργήθηκε ανάλυση ευαισθησίας του αποτελέσματος της διαστασιολόγησης ως προς τις παραμέτρους σχεδιασμού. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση του δείκτη αθροιστικής φθοράς που αποτελεί το θεμελιώδες κριτήριο σχεδιασμού για την αναλυτική μέθοδο. Η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με τη σύνοψη των αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων που προέκυψαν από την εν λόγω διερευνητική προσέγγιση.

Λέξεις κλειδιά: Δύσκαμπα οδοστρώματα αεροδρομίων, διαστασιολόγηση δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, δείκτης αθροιστικής φθοράς, FAARFIELD

ABSTRACT

In the present diploma thesis, a research is conducted about FAA's analytical method for thickness design of rigid airfield pavements. For this purpose, the basic principles have been detected and analyzed through comparative analysis with the previous empirical method of FAA. Additionally, a rigid pavement design has been implemented using both methods in order to comment the comparative results. Subsequently, a thorough investigation in the considerations of the analytical method was carried out. Within this context, a sensitivity analysis of concrete slab thickness to the design inputs was performed. An investigation of the cumulative damage factor followed, which is the fundamental design criterion of the analytical method. This diploma thesis was completed with the results and the conclusions drawn from the above investigative approach.

Key words: rigid airfield pavements, rigid thickness design, cumulative damage factor, FAARFIELD

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Αναπτυσσόμενες τάσεις σε πλάκα από σκυρόδεμα κατά Westergaard	17
Σχήμα 2.2: Έδαφος τύπου Winkler	17
Σχήμα 2.3: Σχέσεις μοντέλου αστοχίας εμπειρικής μεθόδου	20
Σχήμα 2.4 : Μοντέλο αστοχίας εμπειρικής μεθόδου ενός σταδίου	21
Σχήμα 2.5: Περιοχή συλλογής δεδομένων στο Διεθνές Αεροδρόμιο του Ντένβερ των Ηνωμένων Πολιτειών	23
Σχήμα 2.6: Έννοια καλύψεων – διελεύσεων C αεροσκαφών.....	26
Σχήμα 2.7: Τυπική διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος	28
Σχήμα 2.8: Υπολογισμός K στην επιφάνεια υπόβασης από σταθεροποιημένα υλικά	30
Σχήμα 2.9: Υπολογισμός K στην επιφάνεια της υπόβασης από ασύνδετο υλικό	31
Σχήμα 2.10: Διάγραμμα υπολογισμού για τυπικό φορείο μονού τροχού (σειρά 1&2).....	33
Σχήμα 2.11: Διάγραμμα υπολογισμού δύσκαμπτου οδοστρώματος για τυπικό φορείο διπλού τροχού (σειρά 1&2).....	34
Σχήμα 2.12: Διάγραμμα υπολογισμού δύσκαμπτου οδοστρώματος για τυπικό φορείο διπλού τροχού διπλού άξονα (σειρά 1: διάδρομοι-τροχόδρομοι)	35
Σχήμα 2.13: Διάγραμμα υπολογισμού δύσκαμπτου οδοστρώματος για τυπικό φορείο διπλού τροχού διπλού άξονα (σειρά 2: δάπεδα στάθμευσης - δάπεδα αναμονής).....	36
Σχήμα 2.14: Διάγραμμα ροής εμπειρικής μεθόδου.....	38
Σχήμα 3.1: Πορεία μοντελοποίησης οδοστρώματος προς ανάλυση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων	41
Σχήμα 3.2: Κάνναβος διακριτοποίησης δύσκαμπτου οδοστρώματος	42
Σχήμα 3.3: Προσομοίωση συστημάτων τροχών αεροσκαφών με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων	42
Σχήμα 3.4: Ανάλυση τάσεων με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων	43
Σχήμα 3.5: Στοιχεία ανάλυσης κάνναβου διακριτοποίησης θεωρίας πεπερασμένων στοιχείων	44
Σχήμα 3.6: Τύπος φόρτισης αναλυτικής μεθόδου για εύρεση μέγιστης οριζόντιας τάσης.....	45

Σχήμα 3.7: Σχέση μεταξύ δείκτη SCI και λογαρίθμου των καλύψεων-διελεύσεων (Rollings 1988)	46
Σχήμα 3.8: Το όχημα των πειραματικών δοκιμών στο NAPTF	47
Σχήμα 3.9 : Μοντέλο αστοχίας αναλυτικής μεθόδου (FAA)	48
Σχήμα 3.10 : Έννοια Δείκτης Αθροιστικής Φθοράς CDF	51
Σχήμα 3.11: Ενεργό πλάτος ελαστικού σε δύσκαμπτο οδόστρωμα.....	52
Σχήμα 3.12: Διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος-Κρίσιμη θέση αστοχίας	53
Σχήμα 3.13 : Γράφημα Δείκτη Αθροιστικής Φθοράς οδοστρώματος.....	54
Σχήμα 3.14 : Διάταξη τροχών αεροσκάφους στο αναλυτικό σύστημα.....	55
Σχήμα 3.15: Επιφάνεια εργασίας λογισμικού FAARFIELD	58
Σχήμα 3.16 : Βάση αεροσκαφών λογισμικού FAARFIELD	61
Σχήμα 3.17 : Διάγραμμα Ροής αναλυτικής μεθόδου	67
Σχήμα 4.1: Διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος – εμπειρική μέθοδος	73
Σχήμα 4.2: Προβλεπόμενη κυκλοφορία οδοστρώματος	73
Σχήμα 4.3: Υλικά στρώσεων και ιδιότητες	74
Σχήμα 4.4: Διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος- αναλυτική μέθοδος	75
Σχήμα 4.5: Γράφημα αθροιστικής φθοράς κυκλοφορίας σε σχέση με τον άξονα του διαδρόμου	75
Σχήμα 4.6: Διάταξη τροχών αεροσκάφους B737-800 στο αναλυτικό σύστημα	76
Σχήμα 4.7: Πληροφορίες αεροσκαφών σχετικές με τη φθορά του εξεταζόμενου δύσκαμπτου οδοστρώματος	77
Σχήμα 4.8: Συγκριτικά αποτελέσματα μεθόδων σχεδιασμού FAA	77
Σχήμα 5.1: Διατομή διερεύνησης για την επίδραση της μεταβολής της εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος... ..	80
Σχήμα 5.2: Επίδραση της μεταβολής της εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος.....	81
Σχήμα 5.3 : Διατομή διερεύνησης για την επίδραση της μεταβολής του πάχους σταθεροποιημένης υπόβασης στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος	82
Σχήμα 5.4 : Επίδραση της μεταβολής του πάχους σταθεροποιημένης υπόβασης στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος.....	83
Σχήμα 5.5: Διατομή διερεύνησης για την επίδραση της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας σταθεροποιημένης υπόβασης στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος.....	84
Σχήμα 5.6: Επίδραση της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας σταθεροποιημένης υπόβασης στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος	85

Σχήμα 5.7: Διατομή διερεύνησης για την επίδραση της μεταβολής του δείκτη αντίδρασης K της στρώσης έδρασης στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος....	86
Σχήμα 5.8: Επίδραση της μεταβολής του δείκτη αντίδρασης εδάφους K στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος.....	86
Σχήμα 5.9: Σύγκριση βαθμού ευαισθησίας πάχους πλάκας σκυροδέματος ως προς την εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος και το πάχος σταθεροποιημένης υπόβασης.....	88
Σχήμα 5.10: Ποσοστιαία μείωση πάχους πλάκας σκυροδέματος για κάθε παράμετρο διερεύνησης	89
Σχήμα 5.11: Διατομή διερεύνησης για την επίδραση της μεταβολής του πάχους της πλάκας σκυροδέματος στο δείκτη αθροιστικής φθοράς.....	91
Σχήμα 5.12 : Επίδραση της μεταβολής του πάχους της πλάκας σκυροδέματος στο δείκτη αθροιστικής φθοράς.....	92
Σχήμα 5.13 : Μεταβολή οριζόντιων εφελκυστικών τάσεων σε σχέση με το πάχος της πλάκας σκυροδέματος	93
Σχήμα 5.14 : Διατομή διερεύνησης για την επίδραση της μεταβολής της εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος στο δείκτη αθροιστικής φθοράς	94
Σχήμα 5.15 : Επίδραση της μεταβολής της εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος στο δείκτη αθροιστικής φθοράς.....	94
Σχήμα 5.16 : Μεταβολή οριζόντιων εφελκυστικών τάσεων σε σχέση με την εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος.....	95
Σχήμα 5.17: Σχέση μεταξύ συντελεστή σχεδιασμού DF και καλύψεων – διελεύσεων C έως την αστοχία υπό τη μεταβολή της εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος.....	97
Σχήμα 5.18: Σχέση μεταξύ συντελεστή σχεδιασμού DF και επιτρεπόμενων διελεύσεων υπό τη μεταβολή της εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος	98
Σχήμα 5.19: Διατομή διερεύνησης για την επίδραση της μεταβολής του πάχους της σταθεροποιημένης υπόβασης στο δείκτη αθροιστικής φθοράς	99
Σχήμα 5.20: Επίδραση της μεταβολής του πάχους στρώσης σταθεροποιημένης υπόβασης στο δείκτη αθροιστικής φθοράς.....	100
Σχήμα 5.21 : Μεταβολή οριζόντιων εφελκυστικών τάσεων σε σχέση με το πάχος της στρώσης σταθεροποιημένης υπόβασης.....	101
Σχήμα 5.22: Σύγκριση βαθμού ευαισθησίας δείκτη αθροιστικής φθοράς ως προς το πάχος πλάκας σκυροδέματος και το πάχος σταθεροποιημένης υπόβασης .	102
Σχήμα 5.23: Διατομή διερεύνησης για την επίδραση της μεταβολής του δείκτη αντίδρασης K στρώσης έδρασης στο δείκτη αθροιστικής φθοράς	103

Σχήμα 5.24: Επίδραση της μεταβολής του δείκτη αντίδρασης K στρώσης έδρασης στο δείκτη αθροιστικής φθοράς	103
Σχήμα 5.25: Μεταβολή οριζόντιων εφελκυστικών τάσεων σε σχέση με το δείκτη K στρώσης έδρασης.....	104

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 : Συντελεστές ισοδυναμίας συστημάτων τροχών	24
Πίνακας 2.2: Τιμές λόγων διελεύσεων προς καλύψεις – διελεύσεις C (pass-to-coverage ratio) για δύσκαμπτα οδοστρώματα.....	27
Πίνακας 2.3: Τυπικά υλικά υπόβασης δύσκαμπτου οδοστρώματος εμπειρικής μεθόδου.....	29
Πίνακας 3.1: Είδη φθορών που σχετίζονται με το δείκτη δομικής κατάστασης SCI	50
Πίνακας 3.2 : Τυπικά υλικά υπόβασης δύσκαμπτου οδοστρώματος αναλυτικής μεθόδου.....	56
Πίνακας 3.3 : Ιδιότητες τυπικών υλικών υπόβασης δύσκαμπτου οδοστρώματος αναλυτικής μεθόδου.....	57
Πίνακας 3.4: Τυπικά συστήματα τροχών αεροσκαφών	63
Πίνακας 3.5: Τυπικά συστήματα τροχών αεροσκαφών	64
Πίνακας 4.1: Προβλεπόμενη κυκλοφορία οδοστρώματος.....	70
Πίνακας 4.2: Απαιτούμενο πάχος πλάκας σκυροδέματος για κάθε αεροσκάφος.....	71
Πίνακας 4.3 : Ισοδύναμες ετήσιες διελεύσεις R1 για κάθε αεροσκάφος.....	72
Πίνακας 5.1: Προβλεπόμενη κυκλοφορία διερευνήσεων	80

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι αεροπορικές μεταφορές αποτελούν έναν από τους πλέον σημαντικούς μοχλούς για την κοινωνική, οικονομική, χωροταξική και πολιτιστική ανάπτυξη ενός τόπου. Οι αερομεταφορές εξυπηρετούνται μέσω των αεροδρομίων, που αποτελούν σύνθετες δομές και διαθέτουν τις απαραίτητες εγκαταστάσεις για την εξυπηρέτηση των επιβατών και τη μεταφορά αγαθών και εμπορευμάτων.

Η περιοχή κίνησης των αεροσκαφών αποτελείται από πολλά διαφορετικά καταστρώματα όπως τους διαδρόμους προσγείωσης-απογείωσης, τους τροχοδρόμους, τους συνδετήριους διαδρόμους, τα δάπεδα στάθμευσης, αναμονής, συντήρησης. Συνέπεια των διαφορετικών λειτουργικών απαιτήσεων των καταστροφικών αεροδρομίων αποτελεί η χρήση διαφορετικών τύπων οδοστρωμάτων, που παρουσιάζουν την ίδια δομή με εκείνα των οδών και διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες (Λοΐζος, Πλατή, 2015):

- Εύκαμπτα, τα οποία αποτελούνται από στρώσεις ασφαλτομίγματος και βάση - υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο.
- Ημιάκαμπτα, που αποτελούνται από στρώσεις ασφαλτομίγματος, βάση από κατεργασμένο με υδραυλικές κονίες αμμοχάλικο και στρώση υπόβασης από κατεργασμένο ή ασύνδετο αμμοχάλικο.
- Δύσκαμπτα, που αποτελούνται από πλάκα σκυροδέματος, εδραζόμενη σε υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο ή αμμοχάλικο κατεργασμένο με υδραυλικές κονίες.
- Σύνθετα, αποτελούν συνδυασμούς των παραπάνω κατηγοριών.

Στα δάπεδα αναμονής, στάθμευσης και συντήρησης αεροσκαφών συνήθως επιλέγεται η κατασκευή δύσκαμπτου οδοστρώματος το οποίο παρουσιάζει καλή συμπεριφορά έναντι στατικών φορτίων, έναντι χημικής διάβρωσης αλλά και ανθεκτικότητα. Αντίθετα, σε διαδρόμους, τροχοδρόμους και συνδετήριους

διαδρόμους συνήθως χρησιμοποιούνται ασφαλικά οδοστρώματα ώστε να παρέχουν καλύτερη ποιότητα κύλισης, απόσβεσης κραδασμών και ευελιξία σε θέματα συντήρησης και αποκατάστασης βλαβών.

Τα οδοστρώματα αεροδρομίων και τα αεροσκάφη που κυκλοφορούν σε αυτά, αντιπροσωπεύουν ένα διαδραστικό σύστημα που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό. Οι απαιτήσεις σχεδιασμού που συσχετίζονται τόσο με τα αεροσκάφη όσο και με τα οδοστρώματα πρέπει να αναγνωρισθούν ώστε να επιτευχθεί ένας ικανοποιητικός σχεδιασμός και το οδόστρωμα να μπορεί να φέρει τις ιδιάζουσες καταπονήσεις των φορτίων των αεροσκαφών.

Η διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων συνίσταται στον καθορισμό των παχών των στρώσεων του οδοστρώματος και αποτελεί ένα σύνθετο μηχανικό πρόβλημα. Τα οδοστρώματα υπόκεινται σε ένα μεγάλο εύρος φορτίσεων και κλιματικών συνθηκών. Η διαδικασία σχεδιασμού εμπεριέχει έναν μεγάλο αριθμό συσχετιζόμενων μεταβλητών που συχνά είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν, όπως το μέγεθος και το είδος των φορτίων αεροσκαφών, την κυκλοφορία τους, τη συγκέντρωση της κυκλοφορίας σε συγκεκριμένες περιοχές, την αντοχή του εδαφικού υλικού της στρώσης έδρασης καθώς και την ποιότητα των υλικών που συνθέτουν τη δομή του οδοστρώματος. Παρά τη σημαντική έρευνα επί του αντικειμένου ήταν αδύνατο να βρεθεί μία ακριβής λύση για τις απαιτήσεις διαστασιολόγησης. Για αυτόν το λόγο, οι μηχανικοί οδοστρωμάτων έπρεπε να προχωρήσουν στο σχεδιασμό με βάση τη θεωρητική ανάλυση της μετάδοσης φορτίου στα οδοστρώματα και στα εδάφη, στην ανάλυση των πειραματικών δοκιμών και στη μελέτη συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων σε πραγματικές συνθήκες φόρτισης.

Διεθνώς έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται διάφορες μεθοδολογίες διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων, όπως η μέθοδος της Ομοσπονδιακής Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας FAA (Federal Aviation Administration) , της Διεύθυνσης Υπηρεσιών Πολιτικού Μηχανικού (Directorate of Civil Engineering Services,1989) της Μεγάλης Βρετανίας, του Κέντρου Ανάπτυξης και Έρευνας Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής ERDC (Engineer Research and Development Center,2001), της Ένωσης Σκυροδέματος PCA (Portland Cement Association,1966) που αφορά μόνο τα δύσκαμπτα οδοστρώματα και άλλες. Ωστόσο, η πλέον διαδεδομένη μέθοδος τόσο σε παγκόσμιο όσο και εθνικό επίπεδο είναι η μέθοδος σχεδιασμού και αξιολόγησης της FAA, που αποτελεί και αντικείμενο της παρούσας διερεύνησης.

Η αρχική μορφή της μεθόδου διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων της FAA δημοσιεύθηκε το 1958, υιοθετώντας αεροσκάφος σχεδιασμού μέγιστου βάρους 159.000 kg και με τυπικό σύστημα διάταξης τροχών αυτό του DC-S-50. Η FAA επιδίωξε να διασφαλίσει ότι τα μελλοντικά αεροσκάφη δεν θα καταπονούν τα οδοστρώματα περισσότερο από το αεροσκάφος σχεδιασμού των 159.000 kg. Οι κατασκευαστές αεροσκαφών προσπάθησαν να εφαρμόσουν την οδηγία αυτή, αυξάνοντας τον αριθμό και την απόσταση των τροχών των αεροσκαφών, ωστόσο τα φορτία σύντομα σχετικά υπερέβησαν κατά πολύ το όριο των 159.000 kg. Οι τροποποιήσεις της μεθόδου που ακολούθησαν τα επόμενα χρόνια οδήγησαν στη διαμόρφωση της εμπειρικής μεθόδου της FAA που εκδόθηκε το 1995 (FAA,1995).

Η συνεχής αύξηση της μεταφορικής ζήτησης και της εισαγωγής νέων μεγαλύτερων και βαρύτερων αεροσκαφών έθεσε νέες απαιτήσεις και προδιαγραφές για το σχεδιασμό των οδοστρωμάτων, καθιστώντας ιδιαίτερα δυσχερή την εκτίμηση των αναπτυσσομένων τάσεων από τα εμπειρικά πρότυπα. Η FAA, ακολουθώντας τις εξελίξεις, ανέπτυξε μια νέα αναλυτική μέθοδο σχεδιασμού και αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων (FAA,2009). Η μέθοδος εισήχθη πειραματικά το 2009 και μέχρι σήμερα εξακολουθεί να εξελίσσεται. Ο σχεδιασμός με την αναλυτική μέθοδο πραγματοποιείται μέσω του λογισμικού FAARFIELD (Federal Aviation Administration Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design).

Οι εξελίξεις αυτές συνθέτουν ένα μεταβατικό στάδιο για τον τομέα του σχεδιασμού οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Με την πάροδο των χρόνων, η αναλυτική μέθοδος της FAA εδραιώνεται ως η πλέον διαδεδομένη σε ευρεία κλίμακα μέθοδος, ωστόσο η προγενέστερη εμπειρική αποτέλεσε και συνεχίζει να αποτελεί βασικό εργαλείο για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση οδοστρωμάτων αεροδρομίων σε πολλές χώρες. Επομένως, υπό αυτές τις μεταβατικές συνθήκες, η διερεύνηση της νέας αναλυτικής μεθόδου καθίσταται ιδιαίτερα ουσιαστική.

Στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η επισήμανση και διερεύνηση των βασικών αρχών και θεωρήσεων της αναλυτικής μεθόδου, μέσω της συγκριτικής αξιολόγησής της με την προγενέστερη εμπειρική μέθοδο. Υπό το πρίσμα αυτό, θα πραγματοποιηθεί εμβάθυνση στις παραμέτρους που κρίνονται καθοριστικές για το σχεδιασμό. Επισημαίνεται, πως η παρούσα διερεύνηση προσανατολίζεται στη μελέτη σχεδιασμού των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων

αεροδρομίων, ωστόσο στα πλαίσια της μεθόδου εντάσσονται οδηγίες και για το σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, για τα οποία έχουν διεξαχθεί στο παρελθόν αντίστοιχες διερευνήσεις.

Η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας περιγράφεται συνοπτικά ως ακολούθως:

- Στο 2^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση των βασικών αρχών της εμπειρικής μεθόδου για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων και περιγράφεται η μεθοδολογία σχεδιασμού.
- Στο 3^ο κεφάλαιο αναπτύσσονται εκτενώς οι βασικές αρχές της αναλυτικής μεθόδου για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων και παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδιασμού.
- Στο 4^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται σύγκριση των δύο μεθόδων και επισημαίνονται οι διαφορές τους. Προκειμένου, να διαφανεί η επίδραση των διαφορών τους στα αποτελέσματα σχεδιασμού πραγματοποιείται διαστασιολόγηση δύσκαμπτου οδοστρώματος και με τις δύο μεθόδους και σχολιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα.
- Στο 5^ο κεφάλαιο περιλαμβάνεται διερεύνηση των βασικών αρχών σχεδιασμού της αναλυτικής μεθόδου. Σε πρώτο στάδιο, διενεργείται ανάλυση ευαισθησίας του πάχους της πλάκας σκυροδέματος ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού και στη συνέχεια, διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων σχεδιασμού στην αθροιστική φθορά. Ακολουθεί συνοπτικός σχολιασμός και ερμηνεία των αποτελεσμάτων.
- Στο 6^ο κεφάλαιο διατυπώνονται συγκεντρωτικά τα σχόλια και συμπεράσματα που προέκυψαν από τη συγκριτική ανάλυση των δύο μεθόδων αλλά και από την εμβάθυνση στις αρχές της αναλυτικής μεθόδου σχεδιασμού.

2. ΕΜΠΕΙΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ FAA

2.1 Εισαγωγή

Τα οδοστρώματα αεροδρομίων αποτελούν ένα διαδραστικό σύστημα πολλών διαφορετικών παραμέτρων που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό και υπόκεινται σε ένα μεγάλο εύρος εξωτερικών φορτίσεων και θερμοκρασιακών μεταβολών. Για αυτόν το λόγο, οι μηχανικοί οδοστρωμάτων έπρεπε να προχωρήσουν στην ανάλυση των πειραματικών δοκιμών και στη μελέτη συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων σε πραγματικές συνθήκες φόρτισης. Σε αυτό το πλαίσιο, η FAA ανέπτυξε την εμπειρική μέθοδο.

Η εμπειρική μέθοδος παρέχει οδηγίες για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται οι βασικές αρχές και οι διαδικασίες σχεδιασμού της υπόψη μεθόδου για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα, όπως αυτές περιγράφονται στο εγχειρίδιο που εκδόθηκε από την FAA το 1995 (FAA,1995).

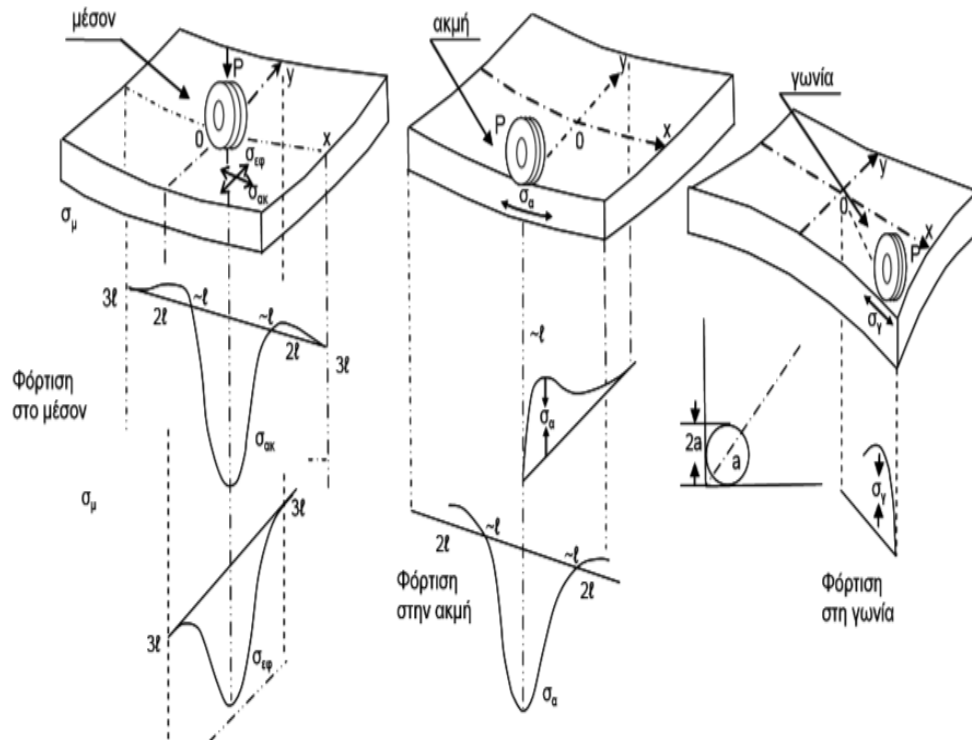
2.2 Βασικές Αρχές Μεθόδου

2.2.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο

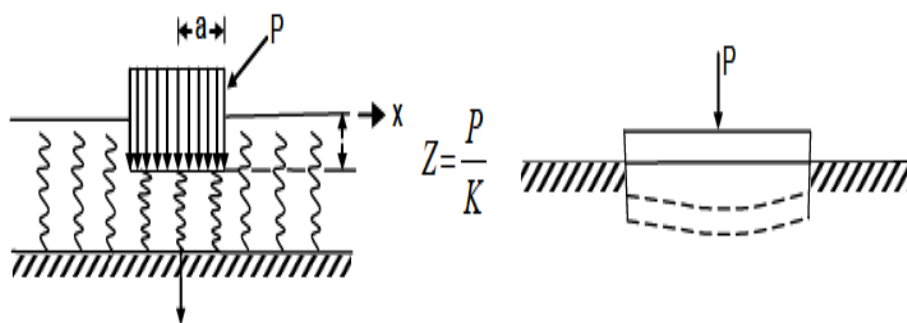
Η εκτίμηση του πάχους της πλάκας των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων με την εμπειρική μέθοδο πραγματοποιείται με μια σειρά από διαγράμματα που αποτελούν μια γραφική λύση των εξισώσεων του Westergaard για φόρτιση πλάκας σκυροδέματος στην ακμή της, εδραζόμενης σε έδαφος Winkler (ελατηριωτό έδαφος- άπειρα ελατήρια –αντίδραση ανάλογη της βύθισης). Το 1926, ο Westergaard παρουσίασε τις πρώτες του εξισώσεις υπολογισμού των τάσεων στη γωνία, στην ακμή και στο μέσον (μακριά από τα άκρα) τις οποίες βελτίωσε το 1929 και το 1947 (σχήμα 2.1)

$$\sigma_{\mu} = \frac{0,275 \cdot P}{h^2} (1 + \mu) \cdot \left[\lg \left(\frac{E \cdot h^3}{k \cdot b^4} \right) - 0,436 \right] \quad [\text{N/mm}^2] \quad \sigma_{\alpha} = \frac{0,529 \cdot P}{h^2} \cdot (1 + 0,54 \mu) \cdot \left[\lg \left(\frac{E \cdot h^3}{k \cdot b^4} \right) + \lg \left(\frac{b}{1 - \mu^2} \right) - 2,484 \right] \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$\sigma_{\gamma} = \frac{3P}{h^2} \left\{ 1 - \left[\frac{12(1 - \mu^2)k}{Eh^3} \right]^{0,15} \left[a\sqrt{2} \right]^{0,6} \right\} \quad \ell = \left(\frac{E \cdot h^3}{12(1 - \mu^2) \cdot k} \right)^{0,25}$$



Σχήμα 2.1: Αναπτυσσόμενες τάσεις σε πλάκα από σκυρόδεμα κατά Westergaard



Σχήμα 2.2: Έδαφος τύπου Winkler

Οι εξισώσεις Westergaard υπέστησαν ορισμένες τροποποιήσεις από τους Teller και Sutherland (1936-1943) μετά από εκτεταμένα πειράματα σε πλάκες που εδράζονται στο έδαφος για να ληφθεί υπόψη, με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων από τα πειράματα, το γεγονός ότι οι πλάκες συνήθως δεν βρίσκονται καθ' όλη την επιφάνειά τους σε πλήρη επαφή με το έδαφος. Έκτοτε, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός εξισώσεων που αποδίδονται στον Westergaard ή τροποποιημένων εξισώσεων Westergaard.

Οι εξισώσεις Westergaard για υπολογισμό της οριζόντιας τάσης στην ακμή της πλάκας σκυροδέματος είναι οι εξής :

Τάση στην ακμή

(Westergaard – Teller and Sutherland – Eisenmann)

$$\sigma_a = \frac{0.529 \cdot Q}{h^2} \cdot (1 + 0.54\mu) \cdot \left[1g \cdot \frac{E \cdot h^3}{k \cdot b^4} + 1g \frac{b}{1 - \mu^2} - 2.484 \right]$$

Westergaard – Losberg

$$\sigma_a = (6Q / h^2) (1 + 0.5 \mu) [0.489 \log(a/1) - 0.012 - 0.063(a/1)]$$

όπου:

Q είναι το φορτίο του τροχού σε N

μ είναι ο λόγος του poisson του σκυροδέματος

E είναι το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος σε Μpa ή N/mm²

K είναι το μέτρο αντιστάσεως της στρώσεως έδρασης της πλάκας από

Σκυρόδεμα σε N/mm³

a είναι η ακτίνα επαφής του τροχού σε mm που λαμβάνεται ίση προς

$$a = (Q / p\pi)^{1/2}$$

b είναι διορθωμένη ακτίνα επαφής φορτίου με τιμή

b= a όταν a>1,724 h και

$$b = (1.6a^2 + h^2)^{1/2} - 0.675h \text{ όταν } a < 1,724 h \quad [\text{mm}]$$

είναι ακτίνα σχετικής ακαμψίας (η ελαστικό μήκος) και βρίσκεται από τη

$$\text{σχέση: } = \{E h^3 / [12 k(1 - \mu^2)]\}^{1/4}$$

Κύρια παραδοχή αποτελεί η εμφάνιση της μέγιστης οριζόντιας τάσης στην ακμή της πλάκας σκυροδέματος, καθώς η έρευνα έδειξε πως οι περισσότερες ρωγμές που προκλήθηκαν από φορτία κοντά στους αρμούς επεκτάθηκαν και στο εσωτερικό της πλάκας. Οι τάσεις στην ακμή της πλάκας μειώνονται κατά 25% για να ληφθεί υπόψη και η μεταφορά φορτίου λόγω αρμών.

Η στατική ανάλυση των τάσεων και των υποχωρήσεων που παρουσίασε ο Westergaard βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

- Η πλάκα του σκυροδέματος είναι ελαστική ομογενής και ισότροπη.
- Οι αντιδράσεις της στρώσης στην οποία εδράζεται η πλάκα είναι μόνο κατακόρυφες (δεν αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις) και είναι ανάλογες των υποχωρήσεων. Οι παραδοχές αυτές ισοδυναμούν με έδραση της πλάκας σε μία σειρά άπειρων ελατηρίων (έδαφος τύπου Winkler - σχήμα 2.2). Η παραδοχή αυτή δεν ανταποκρίνεται στην πραγματική συμπεριφορά των συμπυκνωμένων εδαφικών υλικών αλλά θεωρείται ότι στις εξεταζόμενες περιπτώσεις δεν επιφέρει σημαντικά υπολογιστικά σφάλματα.
- Οι υποχωρήσεις της πλάκας και του εδάφους είναι συμβιβαστές, η πλάκα βρίσκεται συνεχώς σε επαφή με το έδαφος. Η παραδοχή αυτή, αντίθετα με την προηγούμενη, είναι δυνατόν να επιφέρει σημαντικά υπολογιστικά σφάλματα γιατί έχει διαπιστωθεί ότι η πλάκα, κυρίως λόγω θερμοκρασιακών διαφορών δεν βρίσκεται σε επαφή με την υποκείμενη για ένα σημαντικό ποσοστό του 24ώρου. Αυτός είναι και ο λόγος των διαφόρων τροποποιήσεων των εξισώσεων Westergaard που προαναφέρθηκαν.

Μερικά από τα μειονεκτήματα της μεθόδου των εξισώσεων Westergaard είναι πως ο δείκτης αντίδρασης εδάφους κάτω από την πλάκα προκύπτει από εμπειρικές μεθόδους προτού γίνει η διαστασιολόγηση της πλάκας, το μέγεθος της πλάκας δεν συμπεριλαμβάνεται στις εξισώσεις και η μεταβίβαση φορτίου λόγω αρμών δεν μπορεί να προσομοιωθεί, για αυτό και θεωρείται ως ένα ποσοστό 25 % για την FAA.

2.2.2 Μοντέλο αστοχίας

Το μοντέλο αστοχίας της εμπειρικής μεθόδου στο οποίο βασίζονται οι διαδικασίες σχεδιασμού περιγράφεται από τις σχέσεις του σχήματος 2.3 (Garg et al, 2004)

$$\begin{aligned} COV &= 5000 \times 10^{\left(\sqrt{\frac{R_F}{\sigma \times 1.3}} - 1\right) / 0.15603} && (Coverage > 5000) \\ COV &= 5000 \times 10^{\left(\sqrt{\frac{R_F}{\sigma \times 1.3}} - 1\right) / 0.07058} && (Coverage \leq 5000) \end{aligned}$$

Σχήμα 2.3: Σχέσεις μοντέλου αστοχίας εμπειρικής μεθόδου

όπου:

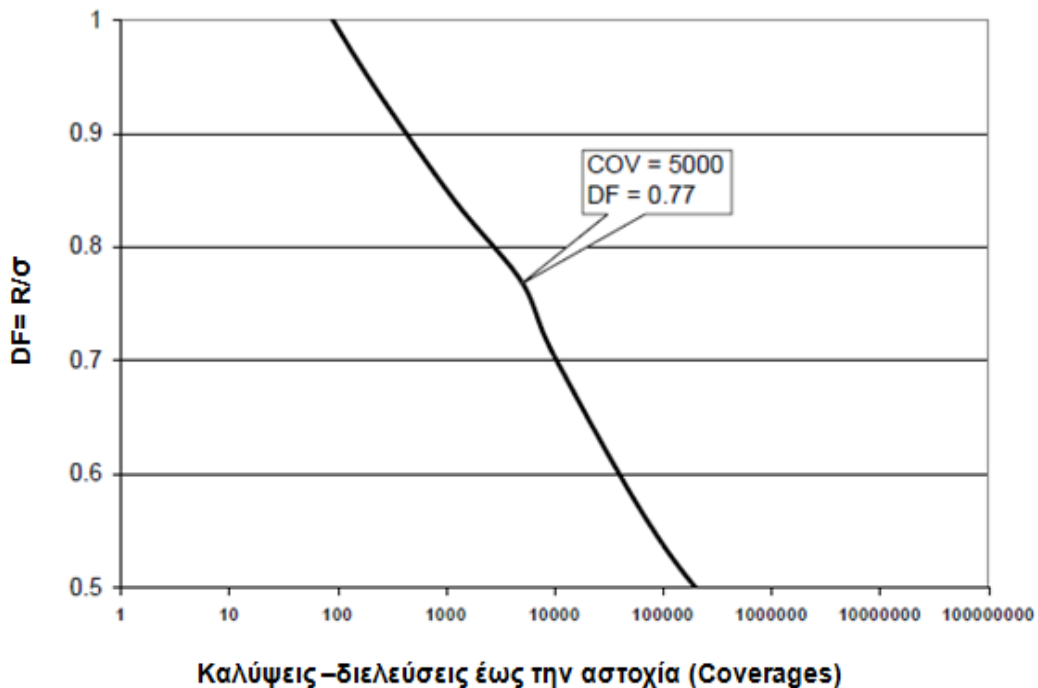
σ = η υπολογιζόμενη τάση σχεδιασμού

R_F = η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος

COV = οι καλύψεις- διελεύσεις

Η έννοια των καλύψεων –διελεύσεων C εισάγεται ώστε να ληφθεί υπόψη η εγκάρσια κατανομή της κυκλοφορίας των αεροσκαφών ως προς τον άξονα του διαδρόμου προσγείωσης – απογείωσης. Οι καλύψεις – διελεύσεις ενέχουν την έννοια των « διελεύσεων μέγιστης επιπόνησης», ώστε μια κάλυψη –διέλευση να αντιστοιχεί σε μία μέγιστη φόρτιση του οδοστρώματος. Εκτενέστερη ανάλυση της έννοιας των καλύψεων – διελεύσεων περιλαμβάνεται στην ενότητα 2.2.2.

Η εκτίμηση του νόμου κοπώσεως της πλάκας σκυροδέματος του δύσκαμπτου οδοστρώματος στην εμπειρική μέθοδο της FAA βασίζεται σε μοντέλο αστοχίας «ενός σταδίου», όπου η ζωή του οδοστρώματος μελετάται σαν μία ενιαία φάση και μπορεί να εκφρασθεί από τον αριθμό των καλύψεων διελεύσεων. Το μοντέλο αστοχίας αποτυπώνει τη σχέση του συντελεστή σχεδιασμού DF που ισούται με το λόγο της υπολογιζόμενης τάσης (σ) προς την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος (R) και τροποποιείται για καλύψεις διελεύσεις που ξεπερνούν τις 5000, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.4 .



Σχήμα 2.4 : Μοντέλο αστοχίας εμπειρικής μεθόδου ενός σταδίου

Εναλλακτική αλλά ισοδύναμη έκφραση του μοντέλου αστοχίας της εμπειρικής μεθόδου δίνεται από τη σχέση 2.1.

$$\frac{\sigma}{R} \leq \frac{1}{1.3 \times a^2} \quad \text{σχέση 2.1}$$

Με $\alpha = 1 + 0.15603 \times \log\left(\frac{C}{5000}\right)$ για $(C \geq 5000)$

Και $\alpha = 1 + 0.07058 \times \log\left(\frac{C}{5000}\right)$ για $(C < 5000)$

Όπου

σ = η υπολογιζόμενη τάση σχεδιασμού

R = η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος

C = οι καλύψεις- διελεύσεις (coverages)

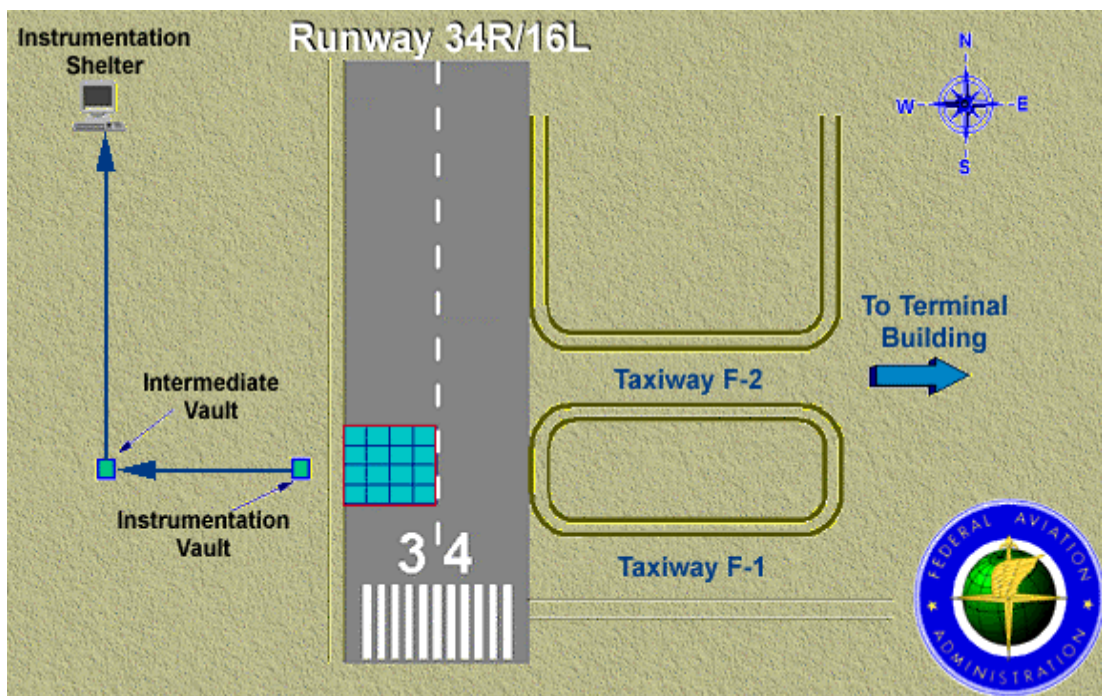
Σημειώνεται πως για το σχεδιασμό θεωρείται πως η αντοχή κοπώσεως του σκυροδέματος είναι ίση με την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος για 5000

καλύψεις-διελεύσεις, για αυτόν το λόγο το μοντέλο τροποποιείται σε αυτόν το αριθμό καλύψεων διελεύσεων (C). Επιπλέον, ο συντελεστής ασφαλείας στο σχεδιασμό θεωρείται ίσος με 1,3.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί πως για τη διερεύνηση του μοντέλου αστοχίας της εμπειρικής μεθόδου και τη σύνταξη του σχετικού εγχειριδίου χρειάστηκαν πολλά έτη έρευνας και πειραματικών δοκιμών. Προκειμένου, όμως, να προκύπτουν αξιόπιστα αποτελέσματα ήταν απαραίτητη η συλλογή δεδομένων. Υπό την κατεύθυνση αυτή, σημαντική ήταν η συνεισφορά του προγράμματος DIA (Denver International Airport), που έλαβε χώρα στο Διεθνές Αεροδρόμιο του Ντένβερ των Ηνωμένων Πολιτειών.

Συγκεκριμένα, το 1992 η Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Αεροπορίας (FAA) ξεκίνησε μια σημαντική ερευνητική προσπάθεια ώστε να μελετήσει την επιτόπου συμπεριφορά του οδοστρώματος από σκυρόδεμα με τσιμέντο Portland. Για αυτόν τον σκοπό, εγκαταστάθηκε ένας ολοκληρωμένος μηχανολογικός εξοπλισμός με 460 αισθητήρες στον διάδρομο απογείωσης 34R του Denver International Airport, προκειμένου να συλλέγονται τα απαραίτητα δυναμικά και στατικά δεδομένα από τις φορτίσεις των αεροσκαφών και του περιβάλλοντος και έπειτα να αξιολογούνται. Τα δεδομένα αυτά καθώς και οι δοκιμές που διεξήχθησαν, χρησιμοποιήθηκαν ωστόσο και για την ανάπτυξη της αναλυτικής μεθόδου της FAA που ακολούθησε τα επόμενα χρόνια και αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Σχηματική απεικόνιση της περιοχής συλλογής δεδομένων στο Διεθνές Αεροδρόμιο του Ντένβερ των Ηνωμένων Πολιτειών φαίνεται στο σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Περιοχή συλλογής δεδομένων στο Διεθνές Αεροδρόμιο του Ντένμπερ των Ηνωμένων Πολιτειών

2.2.3 Κυκλοφορία

Βασικό στοιχείο για τη διαστασιολόγηση ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος αποτελεί η εκτίμηση της κυκλοφορίας που πρόκειται να καταπονήσει το οδόστρωμα. Η FAA προχώρησε σε ομαδοποίηση των αεροσκαφών ανάλογα με τον τύπο και τη γεωμετρία του συστήματος προσγείωσης τους, καθώς δεν θα ήταν πρακτική η σύνταξη διαγραμμάτων για κάθε διαφορετικό τύπο αεροσκάφους. Έπειτα από διερεύνηση σχετικά με τις διατάξεις των τροχών, την επιφάνεια επαφής των τροχών με το οδόστρωμα και την πίεση του ελαστικού, προέκυψαν οι ακόλουθες κατηγορίες:

1. Αεροσκάφος μονού τροχού (S)
2. Αεροσκάφος διπλού τροχού (D). Η απόσταση μεταξύ των τροχών είναι 20 inches (51 cm) για ελαφρά αεροσκάφη και 34 inches (86 cm) για βαριά αεροσκάφη.
3. Αεροσκάφος διπλού δίδυμου τροχού (2D). Η απόσταση μεταξύ των τροχών είναι 20 inches (51 cm) και μεταξύ των αξόνων των τροχών 45 inches

(114cm) για ελαφρά αεροσκάφη. Για βαριά αεροσκάφη η απόσταση των τροχών είναι 30 inches (76 cm) και των αξόνων 55 inches (140 cm).

4. Αεροσκάφη ευρείας ατράκτου. Πρόκειται για τύπους αεροσκαφών όπως το B-747 ,DC-10 και το L-101, που λόγω των μεγάλων διαφοροποιήσεων τους στο μεικτό βάρος και στη διάταξη των τροχών τους σε σχέση με τα αεροσκάφη διπλού δίδυμου τροχού, συντάχθηκαν διαφορετικά διαγράμματα σχεδιασμού για αυτά.

Με γνώμονα το γεγονός πως η κυκλοφορία σε ένα αεροδρόμιο αποτελείται από πολλούς διαφορετικούς τύπους αεροσκαφών και σχεδόν ποτέ μόνο από ένα αεροσκάφος, οι υπολογισμοί στην εμπειρική μέθοδο διεξάγονται με βάση το αεροσκάφος σχεδιασμού. Ως αεροσκάφος σχεδιασμού, επιλέγεται ο τύπος του αεροσκάφους της προβλεπόμενης κυκλοφορίας που απαιτεί το μέγιστο πάχος της πλάκας σκυροδέματος για το δύσκαμπτο οδόστρωμα. Για το λόγο αυτό έχουν προσδιοριστεί συντελεστές αναγωγής της μεικτής κυκλοφορίας σε κυκλοφορία του α/φ σχεδιασμού.

Πίνακας 2.1 : Συντελεστές ισοδυναμίας συστημάτων τροχών

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

Με τη βοήθεια του πίνακα 2.1, οι ετήσιες διελεύσεις όλων των υπόλοιπων τύπων αεροσκαφών πολλαπλασιάζονται με τον κατάλληλο συντελεστή αναγωγής και συνεπώς μετατρέπονται σε διελεύσεις του ίδιου συστήματος τροχών με το αεροσκάφος σχεδιασμού. Ωστόσο, για την μετατροπή τους σε ετήσιες διελεύσεις του αεροσκάφους σχεδιασμού είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί το φορτίο τροχού του κάθε αεροσκάφους που καταπονεί το οδόστρωμα. Για το λόγο αυτό,

πολλαπλασιάζεται το συνολικό βάρος του κάθε αεροσκάφους με 0,95, με βάση την παραδοχή ότι το 95% του μεικτού βάρους κατανέμεται στα κύρια φορεία και το 5% στο ρινιαίο φορείο των τροχών. Ακολούθως, διαιρείται με τον αριθμό των τροχών του κύριου συστήματος. Σημειώνεται, πως για τα αεροσκάφη ευρείας ατράκτου, θεωρείται πως έχουν συνολικό φορτίο ίσο με 300.000 lbs (136.100 kg) και γίνεται η ίδια κατανομή φορτίου στους τροχούς.

Αφότου καθορισθεί το φορτίου τροχού, οι διελεύσεις του κάθε αεροσκάφους μετατρέπονται σε διελεύσεις του αεροσκάφους σχεδιασμού μέσω της παρακάτω σχέσης :

$$\log R1 = \log R2 \times \left(\frac{W2}{W1} \right)^{1/2} \quad (\text{σχέση 2.2})$$

Όπου:

- W_1 : φορτίο τροχού του αεροσκάφους σχεδιασμού
- W_2 : φορτίο τροχού του αεροσκάφους που μετατρέπονται οι διελεύσεις
- R_1 : ισοδύναμες ετήσιες διελεύσεις αεροσκάφους σχεδιασμού
- R_2 : διελεύσεις του αεροσκάφους μετά την μετατροπή τους σε ισοδύναμες του ίδιου συστήματος τροχών με το αεροσκάφος σχεδιασμού (από συντελεστές αναγωγής)

Αθροίζοντας τις διελεύσεις που προκύπτουν από τη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω, προκύπτει ο συνολικός αριθμός ετήσιων διελεύσεων του αεροσκάφους σχεδιασμού που θα χρησιμοποιηθεί στα διαγράμματα υπολογισμού και αποτελεί παράμετρο σχεδιασμού στην εμπειρική μέθοδο.

Ωστόσο, αξίζει να επισημανθεί πως στα οδοστρώματα αεροδρομίων τα φορεία των τροχών των αεροσκαφών σπανίως κινούνται κατά μήκος του ίδιου ίχνους. Οι κινήσεις τους κατανέμονται γύρω από τον άξονα του διαδρόμου του αεροδρομίου (lateral wander) και μπορεί να χρειαστούν περισσότερες από μία διελεύσεις προκειμένου ένα συγκεκριμένο σημείο του οδοστρώματος να δεχτεί τη μέγιστη φόρτιση.

Η εμπειρική μέθοδος της FAA θεωρεί πως η κυκλοφορία των αεροσκαφών στην εγκάρσια διεύθυνση ακολουθεί κανονική κατανομή. Μια κάλυψη - διέλευση C κατά την FAA προκύπτει από έναν ορισμένο αριθμό διελεύσεων και αντιστοιχεί

σε μία μέγιστη φόρτιση του οδοστρώματος. Κατά συνέπεια οι καλύψεις-διελεύσεις C ισοδυναμούν με διελεύσεις μέγιστης επιπόνησης. Η έννοια των καλύψεων διελεύσεων C μπορεί να επεξηγηθεί ποιοτικά μέσω του σχήματος 2.6.



Σχήμα 2.6: Έννοια καλύψεων – διελεύσεων C αεροσκαφών

Στο σχήμα 2.6 απεικονίζονται τρεις διελεύσεις ενός φορείου διπλού τροχού αεροσκάφους οι οποίες δεν πραγματοποιούνται στο ίδιο ίχνος. Αν ορισθεί ένα σημείο διερεύνησης (κρίσιμο σημείο) για το οποίο είναι επιθυμητό να προσδιοριστεί η επιπόνηση που αυτό δέχεται, τότε για κάθε τρεις διελεύσεις του υπόψη φορείου επιβάλλεται μια φορά η μέγιστη φόρτιση στο σημείο διερεύνησης. Κατά συνέπεια, στην περίπτωση που απεικονίζεται στο σχήμα 2.6, μια κάλυψη – διέλευση προκύπτει από τρεις διελεύσεις του φορείου και προκαλεί τη μέγιστη φόρτιση του οδοστρώματος στο σημείο διερεύνησης.

Στα διαγράμματα που αναπτύχθηκαν, ο αριθμός των καλύψεων διελεύσεων έχει συμπεριληφθεί για μια διάρκεια ζωής του οδοστρώματος ίση με 20 έτη έπειτα από μετατροπή των διελεύσεων σε καλύψεις-διελεύσεις (C) με την εισαγωγή της έννοιας του λόγου P/C. Ο λόγος P/C έχει καθοριστεί για κάθε

αεροσκάφος και η τιμή του για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα φαίνεται στον πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2: Τιμές λόγων διελύσεων προς καλύψεις – διελύσεις C (pass-to-coverage ratio) για δύσκαμπτα οδοστρώματα

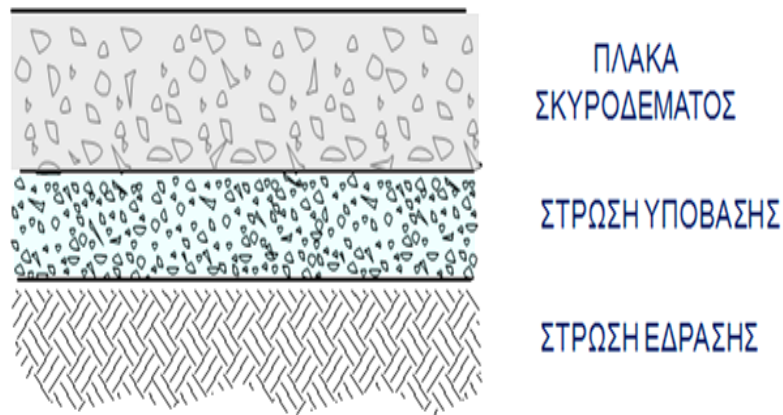
Διάγραμμα σχεδιασμού	Λόγος διελύσεων προς καλύψεις-διελύσεις C (pass-to-coverage ratio)
Μονού τροχού	5,18
Διπλού τροχού	3,48
Διπλού τροχού- διπλού άξονα	3,68
A -300 model B2	3,50
A -300 model B4	3,45
B-747	3,70
B-757	3,88
B-767	3,90
C-130	4,15
DC10-10	3,64
DC10-30	3,38
L-1011	3,62

Σημειώνεται πώς ο λόγος P/C εξαρτάται από το φορτίο του αεροσκάφους, την κατανομή του βάρους, τον τύπο του φορείου και τις αποστάσεις μεταξύ των φορείων και έχει καθοριστεί για κάθε αεροσκάφος μέσω στατιστικής ανάλυσης.

2.2.4 Τυπικά υλικά FAA

Ένα δύσκαμπτο οδόστρωμα αεροδρομίου συνίσταται στην πλάκα σκυροδέματος, τη στρώση υπόβασης και τη στρώση έδρασης, κατά το σχεδιασμό

με την εμπειρική μέθοδο. Η τυπική διατομή ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος απεικονίζεται στο σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7: Τυπική διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος

Σύμφωνα με την FAA, οι απαιτήσεις για την πλάκα σκυροδέματος καλύπτονται από το τυπικό υλικό P-501 , δηλαδή σκυρόδεμα από τσιμέντο Πόρτλαντ (Cement Concrete Pavement). Η πλάκα του σκυροδέματος, κάτω από ορισμένες συνθήκες, μπορεί να εδράζεται απευθείας στη στρώση έδρασης. Προϋποθέσεις για αυτό, είναι η επαρκής φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης, δηλαδή δείκτης αντίδρασης εδάφους K μεγαλύτερος από 80 MN/m^3 και επαρκής αποστραγγιστική ικανότητα.

Όσον αφορά τη στρώση υπόβασης , το ελάχιστο πάχος της είναι οι 4 ίντσες (10 cm). Σε ορισμένες όμως περιπτώσεις είναι απαραίτητη η αύξηση του πάχους υπόβασης ή η χρήση σταθεροποιημένων υλικών. Στον πίνακα 2.3 παρουσιάζονται τα τυπικά υλικά της FAA που ενδείκνυνται ως στρώση υπόβασης για ένα δύσκαμπτο οδόστρωμα.

**Πίνακας 2.3: Τυπικά υλικά υπόβασης δύσκαμπτου
οδοστρώματος εμπειρικής μεθόδου**

Υλικό	Περιγραφή	
P-154	Subbase course	Στρώση υπόβασης
P-208	Aggregate Base Course	Στρώση βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο
P-209	Crushed Aggregate Base Course	Στρώση βάσης από θραυστό αμμοχάλικο
P-211	Lime Rock Base Course	Στρώση βάσης από ασβεστόλιθο
P-301	Soil Cement Base	Εδαφικό υλικό κατεργασμένο με τσιμέντο
P-304	Cement Treated Base Course	Βάση από σταθεροποιημένο με τσιμέντο υλικό
P-306	Econocrete Subbase Course	Υπόβαση από σταθεροποιημένο με τσιμέντο υλικό
P-401	Plant Mix Bituminous Pavements	Θερμό ασφαλτόμιγμα

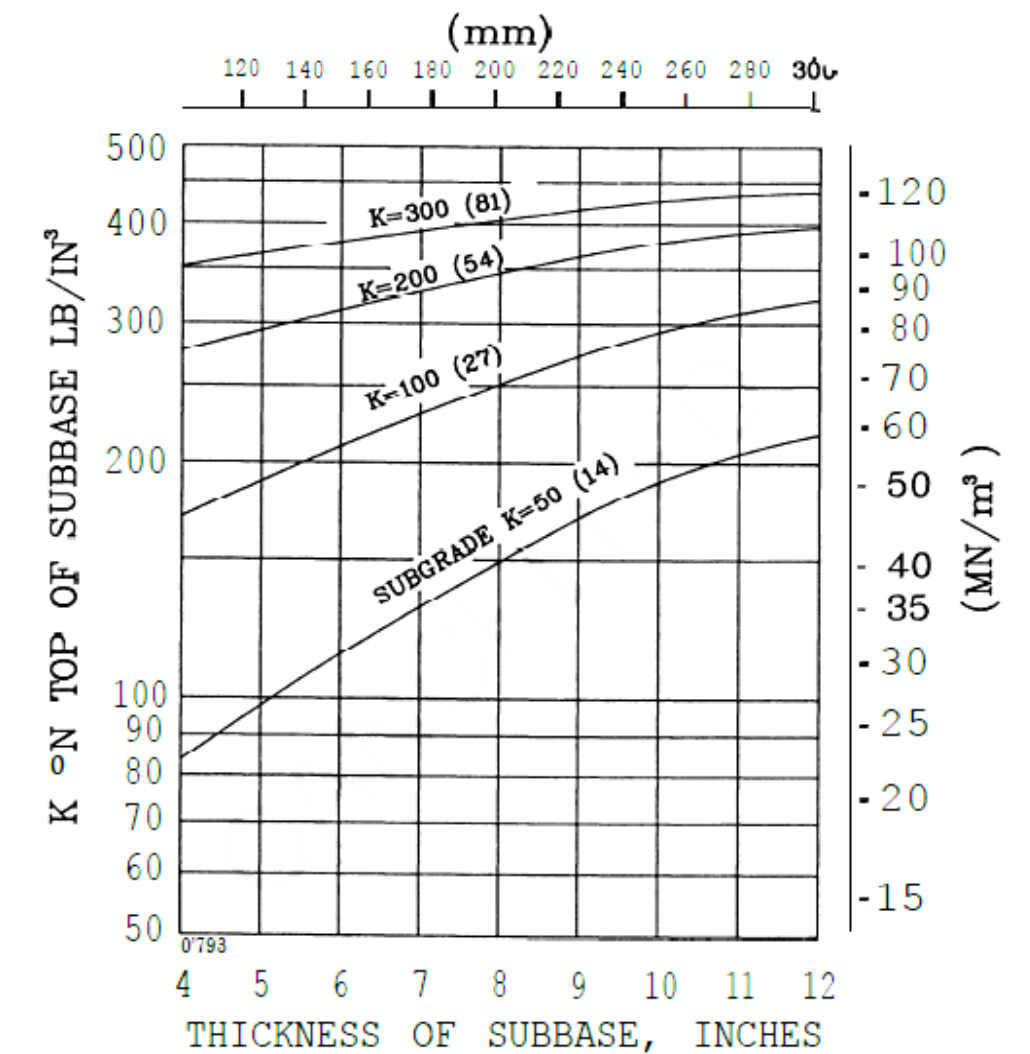
Τα στοιχεία P-304, P-306, P-401 αποτελούν στρώσεις από σταθεροποιημένα υλικά και η χρήση τους είναι απαραίτητη εφόσον προβλέπεται κυκλοφορία από αεροσκάφη βάρους 100.000 lbs (45.400 kg) και άνω.

2.3 Διαδικασία Σχεδιασμού

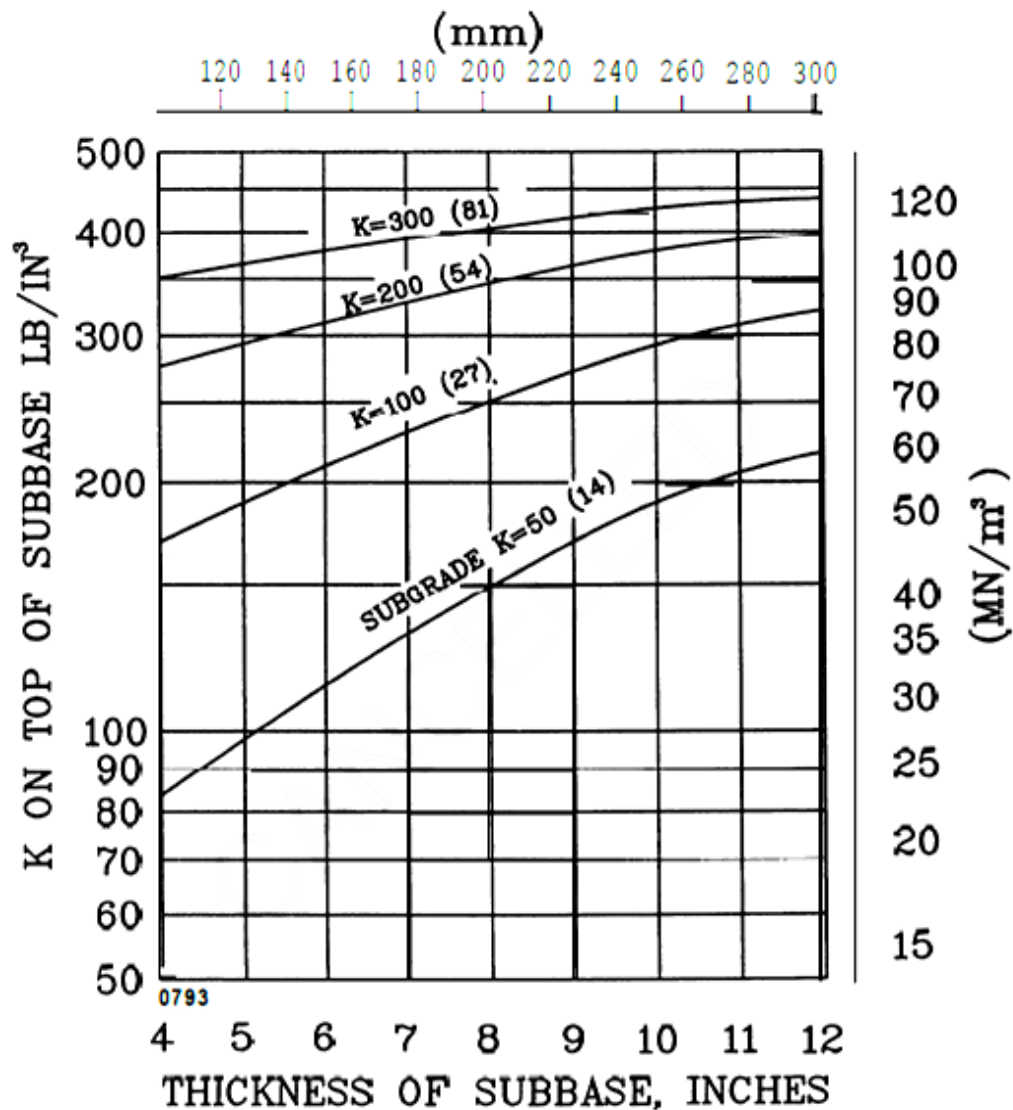
Οι παράμετροι που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό με την εμπειρική μέθοδο είναι οι εξής:

1. Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος. Η φέρουσα ικανότητα του σκυροδέματος στο σχεδιασμό οδοστρωμάτων χαρακτηρίζεται από την αντοχή του σε εφελκυσμό. Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να πληροί τις προδιαγραφές της FAA και να καθορίζεται με κριτήριο την ηλικία του σκυροδέματος και την αντοχή που θα έχει αυτό αποκτήσει όταν το οδόστρωμα είναι προγραμματισμένο να δοθεί στην κυκλοφορία.

2. Δείκτης αντίδρασης K στρώσης υπόβασης . Χαρακτηρίζει τη φέρουσα ικανότητα της στρώσης στην οποία εδράζεται η πλάκα σκυροδέματος. Καθώς οι δοκιμές στην επιφάνεια της στρώσης υπόβασης συνήθως είναι δυσχερείς, ο δείκτης K στην επιφάνεια της υπόβασης προσδιορίζεται με τη χρήση των διαγραμμάτων που φαίνονται στα σχήματα 2.8 και 2.9 για στρώση από σταθεροποιημένα και ασύνδετα υλικά αντίστοιχα.



Σχήμα 2.8: Υπολογισμός K στην επιφάνεια υπόβασης από σταθεροποιημένα υλικά



Σχήμα 2.9: Υπολογισμός K στην επιφάνεια της υπόβασης από ασύνδετο υλικό

3. Μεικτό βάρος αεροσκάφους σχεδιασμού. Για τον καθορισμό του μεικτού βάρους του αεροσκάφους σχεδιασμού ακολουθείται η κατανομή που περιγράφηκε στην ενότητα 2.2.3.

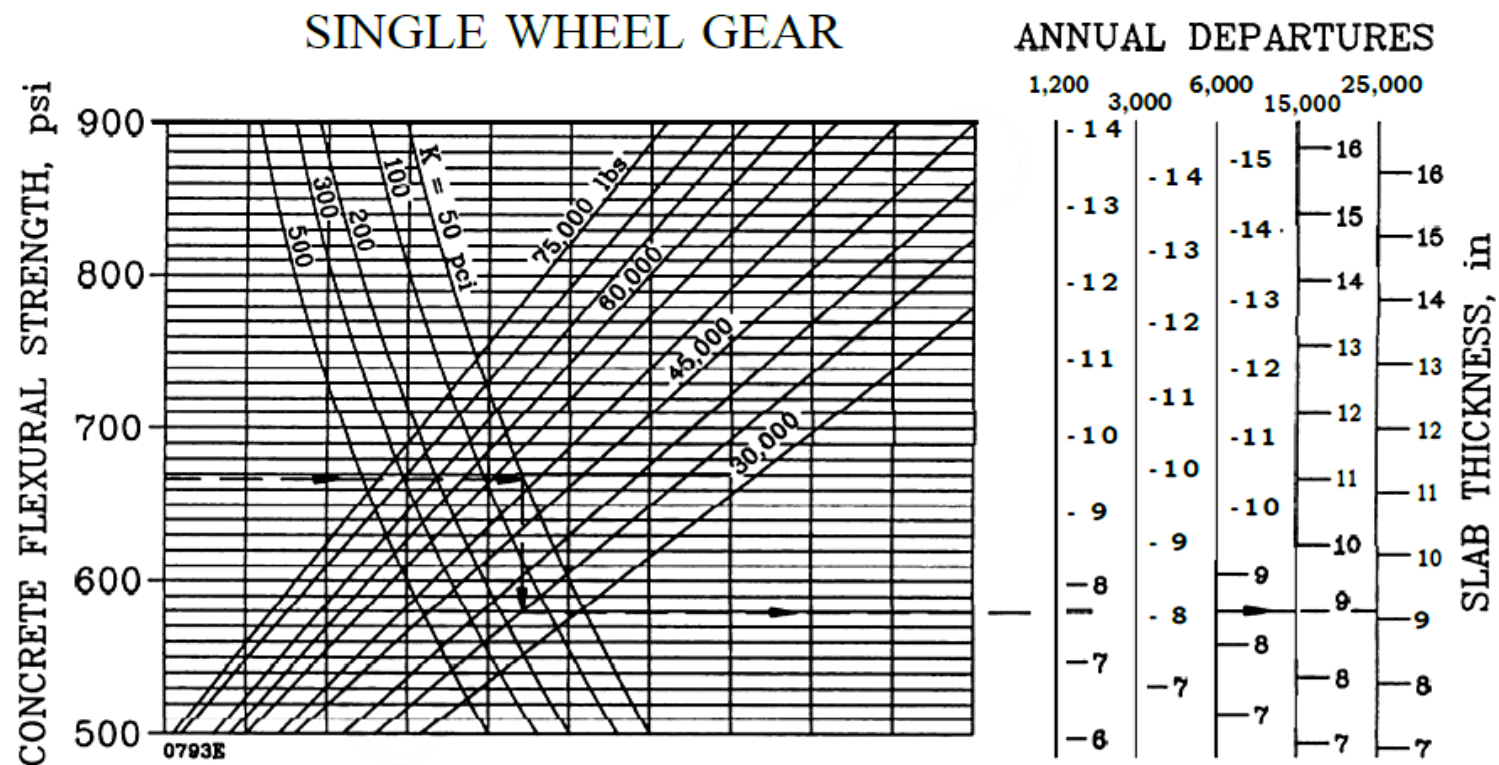
4. Ετήσιες αναχωρήσεις αεροσκαφών σχεδιασμού. Για την εκτίμηση τους ακολουθείται η διαδικασία που αναλύεται στην ενότητα 2.2.3.

Η διαδικασία σχεδιασμού ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος συνίσταται στη διαστασιολόγηση της πλάκας σκυροδέματος μέσα από 2 σειρές διαγραμμάτων που έχουν αναπτυχθεί για διαφορετικές περιπτώσεις φόρτισης:

1^η περίπτωση φόρτισης : όταν το σύστημα τροχών κινείται είτε κάθετα σε εγκάρσιο αρμό είτε εφαπτομενικά σε κατά μήκος αρμό, όποια από τις δύο διατάξεις δίνει τη μεγαλύτερη καταπόνηση. Πρακτικά, αφορά αεροσκάφη με μονό ή διπλό τροχό και οδοστρώματα κυρίως διαδρόμων και τροχοδρόμων, όπου τα αεροσκάφη κινούνται κάθετα ή εφαπτομενικά με τις άκρες των πλακών.

2^η περίπτωση φόρτισης : αφορά κυρίως τα αεροσκάφη διπλού τροχού διπλού άξονα (dual tandem), όπου η μέγιστη φόρτιση της πλάκας προκύπτει από την επαφή των τροχών υπό γωνία με τον αρμό. Η γωνία στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη ένταση για διάφορα αεροσκάφη διερευνήθηκε με βήμα ελέγχου τη μία μοίρα. Πρακτικά, αφορά περισσότερο τα οδοστρώματα των δαπέδων αναμονής , στάθμευσης , συντήρησης όπου τα αεροσκάφη κινούνται ή σταθμεύουν με τυχαίες διευθύνσεις.

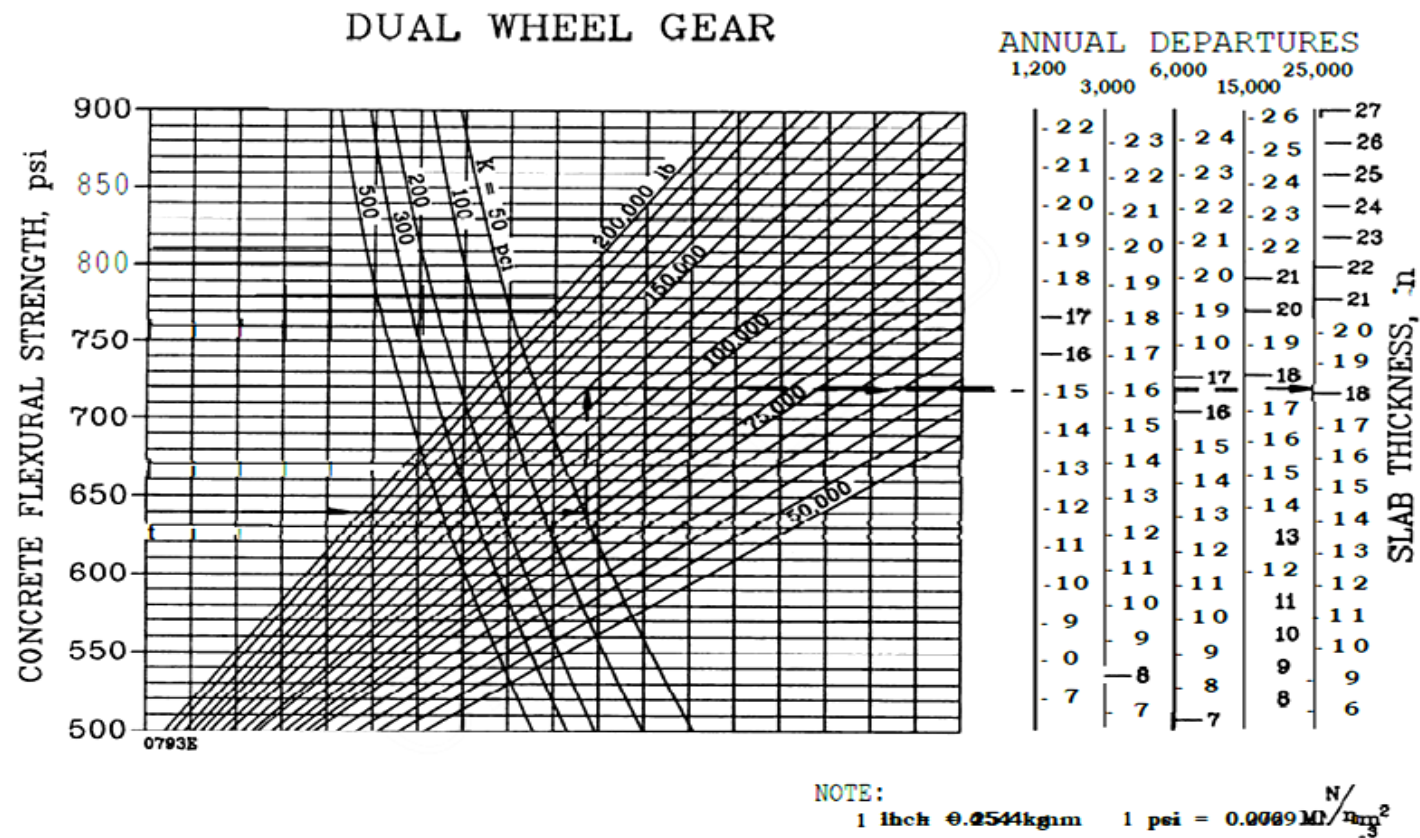
Στη συνέχεια παρατίθενται διαγράμματα της εμπειρικής μεθόδου για διάφορα συστήματα τροχών αεροσκαφών και από τις 2 σειρές, τα οποία φαίνονται στα σχήματα 2.10, 2.11, 2.12, 2.13. Διαγράμματα υπολογισμού για τους υπόλοιπους τύπους αεροσκαφών και περιπτώσεων φόρτισης παρατίθενται στο παράρτημα Α.



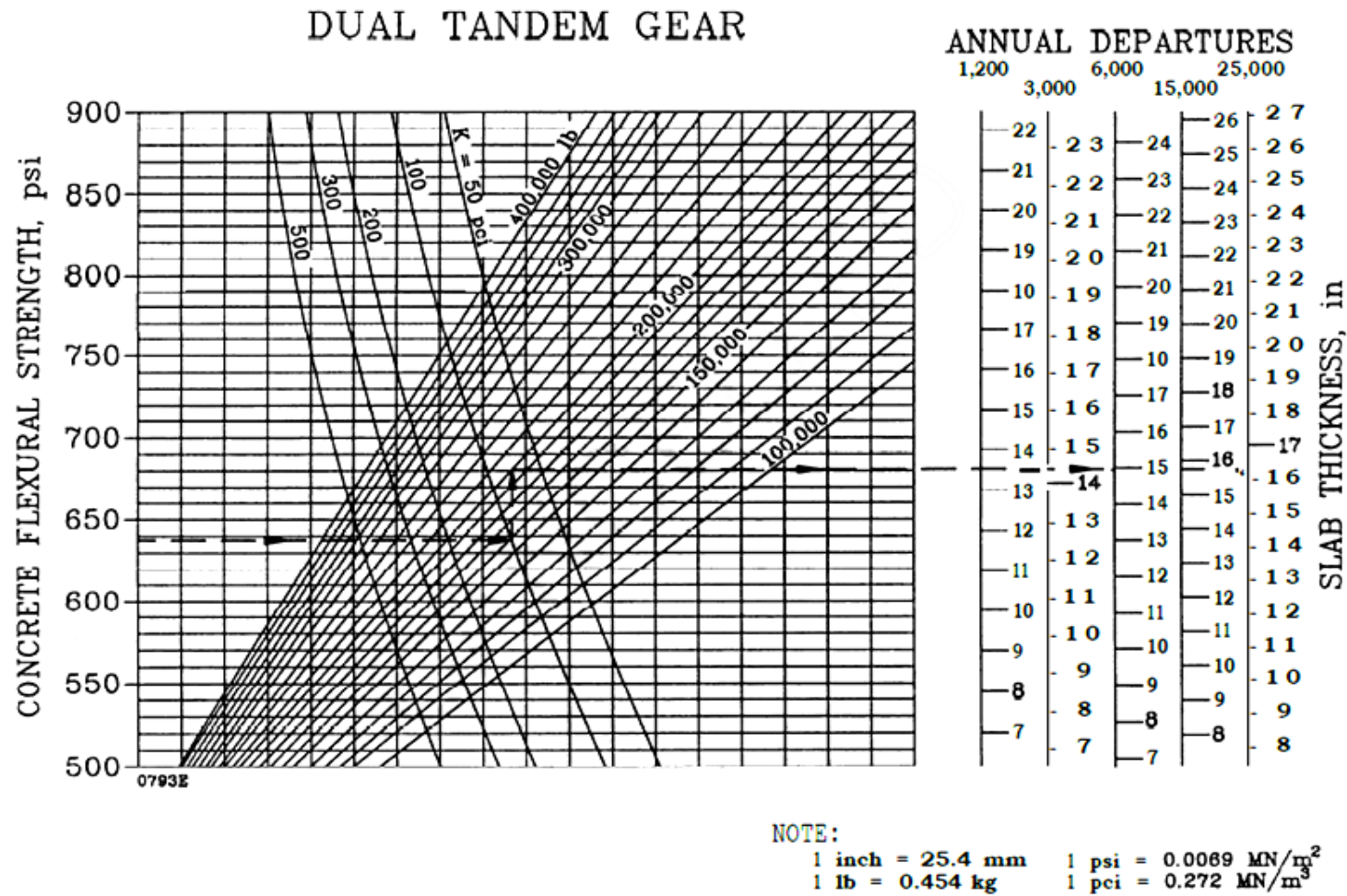
NOTE:

1 inch = 25.4 mm 1 psi = 0.0069 MN/m²
 1 lb = 0.454 kg 1 pci = 0.272 MN/m³

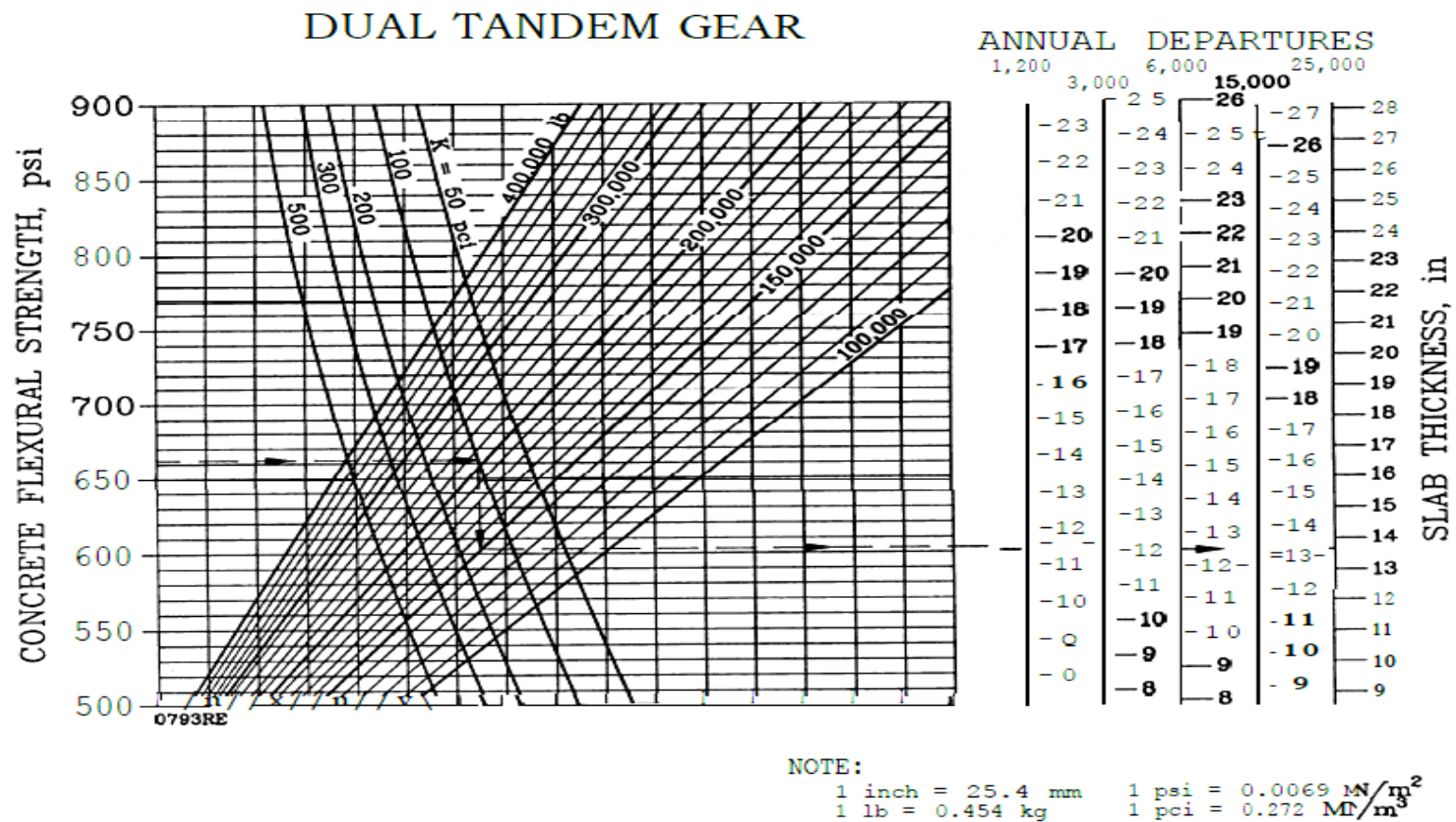
Σχήμα 2.10: Διάγραμμα υπολογισμού για τυπικό φορείο μονού τροχού (σειρά 1&2)



Σχήμα 2.11: Διάγραμμα υπολογισμού δύσκαμπτου οδοστρώματος για τυπικό φορείο διπλού τροχού (σειρά 1&2)



Σχήμα 2.12: Διάγραμμα υπολογισμού δύσκαμπτου οδοστρώματος για τυπικό φορείο διπλού τροχού διπλού άξονα (σειρά 1: διάδρομοι-τροχόδρομοι)



Σχήμα 2.13: Διάγραμμα υπολογισμού δύσκαμπτου οδοστρώματος για τυπικό φορείο διπλού τροχού διπλού άξονα (σειρά 2: δάπεδα στάθμευσης - δάπεδα αναμονής)

Οι παράμετροι σχεδιασμού εισάγονται στα διαγράμματα με τη σειρά που αναλύθηκαν και η διαδικασία συνοπτικά περιγράφεται από τα εξής βήματα:

1. Εισάγεται η τιμή της εφελκυστικής αντοχής στον κατακόρυφο άξονα και από το σημείο αυτό φέρεται ευθεία παράλληλη προς τον οριζόντιο άξονα.
2. Στο σημείο τομής της ευθείας του βήματος 1 με την καμπύλη που χαρακτηρίζει το δείκτη K της υπόβασης, φέρεται ευθεία παράλληλη προς τον κατακόρυφο άξονα.
3. Από το σημείο που η ευθεία του βήματος 2 τέμνει την ευθεία που χαρακτηρίζει το συνολικό φορτίο του αεροσκάφους σχεδιασμού, φέρεται ευθεία παράλληλη προς τον οριζόντιο άξονα.

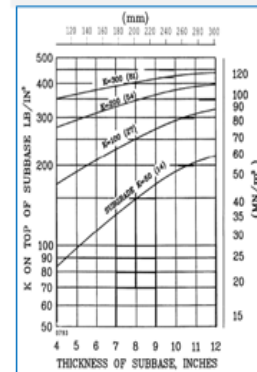
Από το σημείο τομής της ευθείας του βήματος 3 με την ευθεία που δίνει τις συνολικές ετήσιες απογειώσεις του αεροσκάφους σχεδιασμού, προκύπτει το απαιτούμενο πάχος πλάκας σκυροδέματος σε ίντσες.

Στο σχήμα 2.14 φαίνεται το διάγραμμα ροής της διαδικασίας σχεδιασμού ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος με την εμπειρική μέθοδο της FAA.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

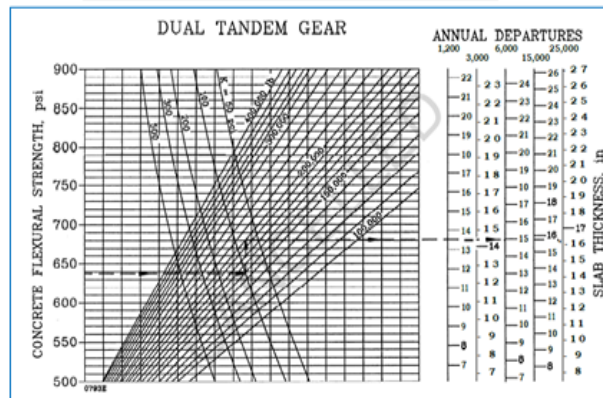
1. Εφελκυστική αντοχή
2. Ετήσια Κυκλοφορία α/φ και μεικτό βάρος
3. Υλικό στρώσης
4. Δείκτης K στρώσης
5. Διάρκεια ζωής σχεδιασμού

ΕΞΑΓΩΓΗ ΔΕΙΚΤΗ K ΣΤΡΩΣΗΣ ΥΠΟΒΑΣΗΣ



ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ WESTERGAARD

ΝΟΜΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ



ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ
Α/Φ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

ΝΟΜΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ
ΕΞΑΓΩΓΗ
ΠΑΧΟΥΣ ΠΛΑΚΑΣ

Σχήμα 2.14: Διάγραμμα ροής εμπειρικής μεθόδου

3. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ FAA

3.1 Εισαγωγή

Η συνεχής αύξηση της μεταφορικής ζήτησης και η εισαγωγή νέων τύπων αεροσκαφών οδήγησε και σε αύξηση των απαιτήσεων της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων των αεροδρομίων, συνεπώς και εξέλιξη των προδιαγραφών σχεδιασμού τους, προκειμένου να φέρουν τις ολοένα και αυξανόμενες καταπονήσεις.

Καθώς τα νομογραφήματα της εμπειρικής μεθόδου είναι επαρκή μόνο για αεροσκάφη έως διπλού δίδυμου τροχού και ορισμένους τύπους ευρείας ατράκτου, η FAA ανέπτυξε την αναλυτική μέθοδο, ικανή για να προσομοιώσει τα πολύπλοκα συστήματα προσγείωσης των νέων τύπων αεροσκαφών.

Ακολουθεί ανάλυση των βασικών αρχών και δυνατοτήτων της αναλυτικής μεθόδου σχεδιασμού και αξιολόγησης δύσκαμπτων οδοστρωμάτων της FAA που κυκλοφόρησε το 2009 (FAA,2009).

3.2 Βασικές αρχές

3.2.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Η αναλυτική μέθοδος βασίζεται στη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων (3D FINITE ELEMENT). Ο όρος F.E.M. (Finite Element Method) χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Clough το 1960 στην μελέτη της εντατικής κατάστασης στερεού σώματος που το ανέλυσε σε λίγα σχετικά τριγωνικά στοιχεία. Η διαδικασία που ακολουθείται σε μια ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε κάποιο λογισμικό πακέτο αποτελείται από τα εξής στάδια :

- Την προ-επεξεργασία: σε αυτό το στάδιο γίνεται η διακριτοποίηση και η δημιουργία του προς ανάλυση μοντέλου. Γίνεται η εισαγωγή των εξισώσεων που διέπουν τους κόμβους, με την κατάλληλη επιλογή των στοιχείων που θα

χρησιμοποιηθούν και στο τέλος εισάγονται τα χαρακτηριστικά των υλικών και οι συνοριακές συνθήκες.

- Την επεξεργασία: αποτελεί το μαθηματικό μέρος της μεθόδου και εκτελείται κυρίως από ηλεκτρονικό υπολογιστή με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού. Γίνεται ο υπολογισμός των μητρώων και των διανυσμάτων κάθε στοιχείου χωριστά και στη συνέχεια πραγματοποιείται η σύνδεση των επιμέρους πινάκων και διανυσμάτων, ώστε να δημιουργηθούν οι εξισώσεις που περιγράφουν όλο το μοντέλο. Από τις εξισώσεις αυτές δημιουργείται το μητρώο ακαμψίας και τα διανύσματα όλου του μοντέλου. Εισάγονται οι συνοριακές συνθήκες που επιδρούν στο μοντέλο και στο τελευταίο μέρος του σταδίου πραγματοποιείται η επίλυση των εξισώσεων και η εύρεση των άγνωστων μεταβλητών στους κόμβους.
- Την μετα-επεξεργασία, κατά την οποία γίνεται η επεξεργασία των αποτελεσμάτων για να παρασταθούν στο μοντέλο οι τάσεις και οι παραμορφώσεις, τόσο με αριθμητικές τιμές όσο και με γραφικές παραστάσεις.

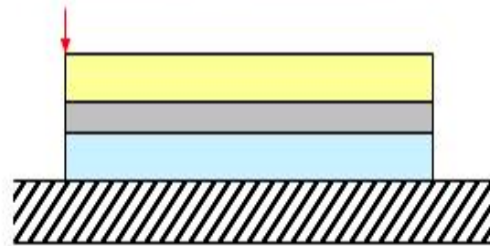
Στο λογισμικό FAARFIELD της αναλυτικής μεθόδου χρησιμοποιείται το υποπρόγραμμα NIKE3D FAA για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο αναπτύχθηκε στις εγκαταστάσεις του Lawrence Livermore National Laboratory(LLNL), U.S. Department of Energy για αποκλειστική χρήση από την FAA.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων παρέχει μια ακριβή επίλυση για την καταπόνηση που υφίσταται η ακμή της πλάκας σκυροδέματος σε ένα στατικό προσομοίωμα επάλληλων στρώσεων. Προγράμματα ελαστικών στρώσεων (όπως το LEAF) θεωρούν πάντα συνεχείς, ομοιόμορφες στρώσεις χωρίς κενά, όπως για παράδειγμα οι αρμοί στις πλάκες σκυροδέματος. Επιπρόσθετα, η θεωρία πεπερασμένων στοιχείων είναι κατάλληλη για να προσομοιώσει πολύπλοκες διατάξεις φορέων τροχών αεροσκαφών και την απόκριση του συστήματος του οδοστρώματος στη φόρτιση που αυτά προκαλούν. Τέλος, δεν τίθεται περιορισμός στον αριθμό των στρώσεων και των υλικών τους. Η μοντελοποίηση του οδοστρώματος που ακολουθείται για την ανάλυση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων φαίνεται στο σχήμα 3.1.

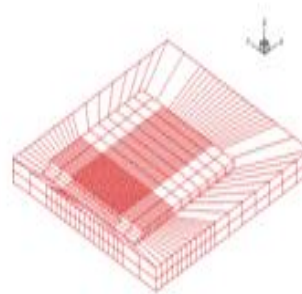
ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΔΟΜΗ



ΠΡΟΤΥΠΗ ΙΔΕΑΤΗ
ΔΟΜΗ

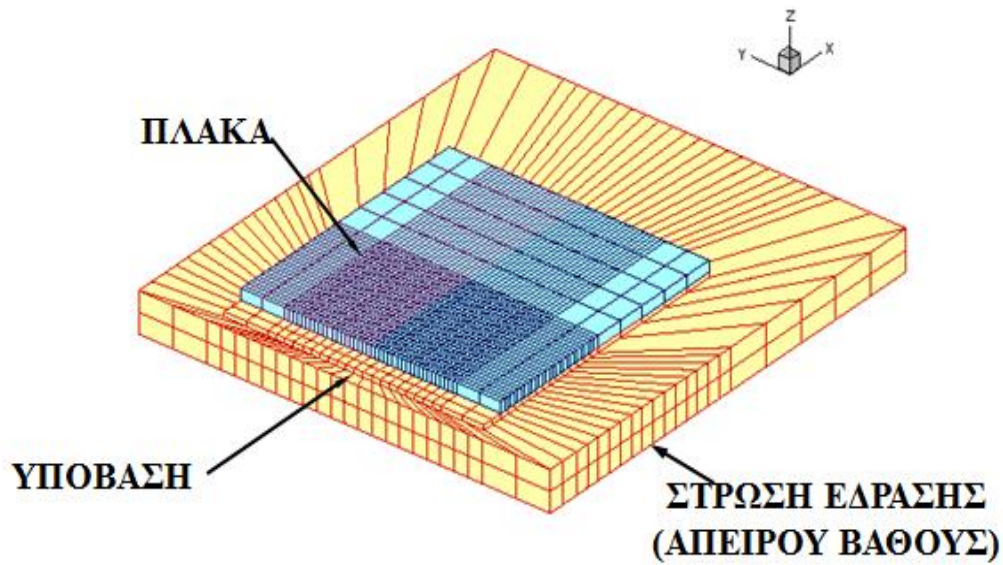


ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ
ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΗ ΔΟΜΗ



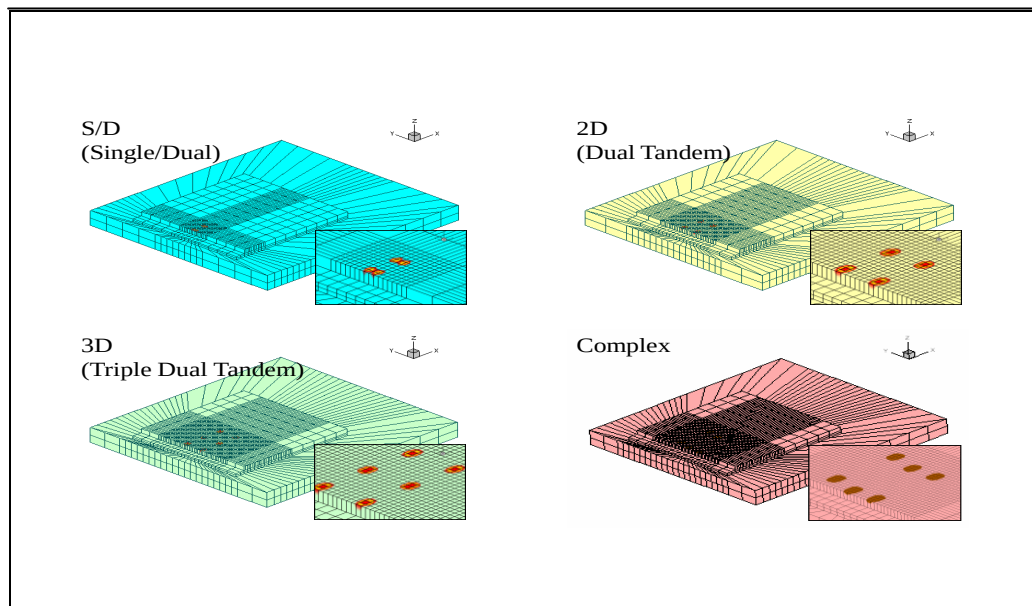
**Σχήμα 3.1: Πορεία μοντελοποίησης οδοστρώματος προς
ανάλυση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων**

Ο κάνναβος διακριτοποίησης του δύσκαμπτου οδοστρώματος αποτελείται από την πλάκα σκυροδέματος, τη στρώση υπόβασης και τη στρώση έδρασης που θεωρείται απείρου βάθους στη διαδικασία της ανάλυσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.



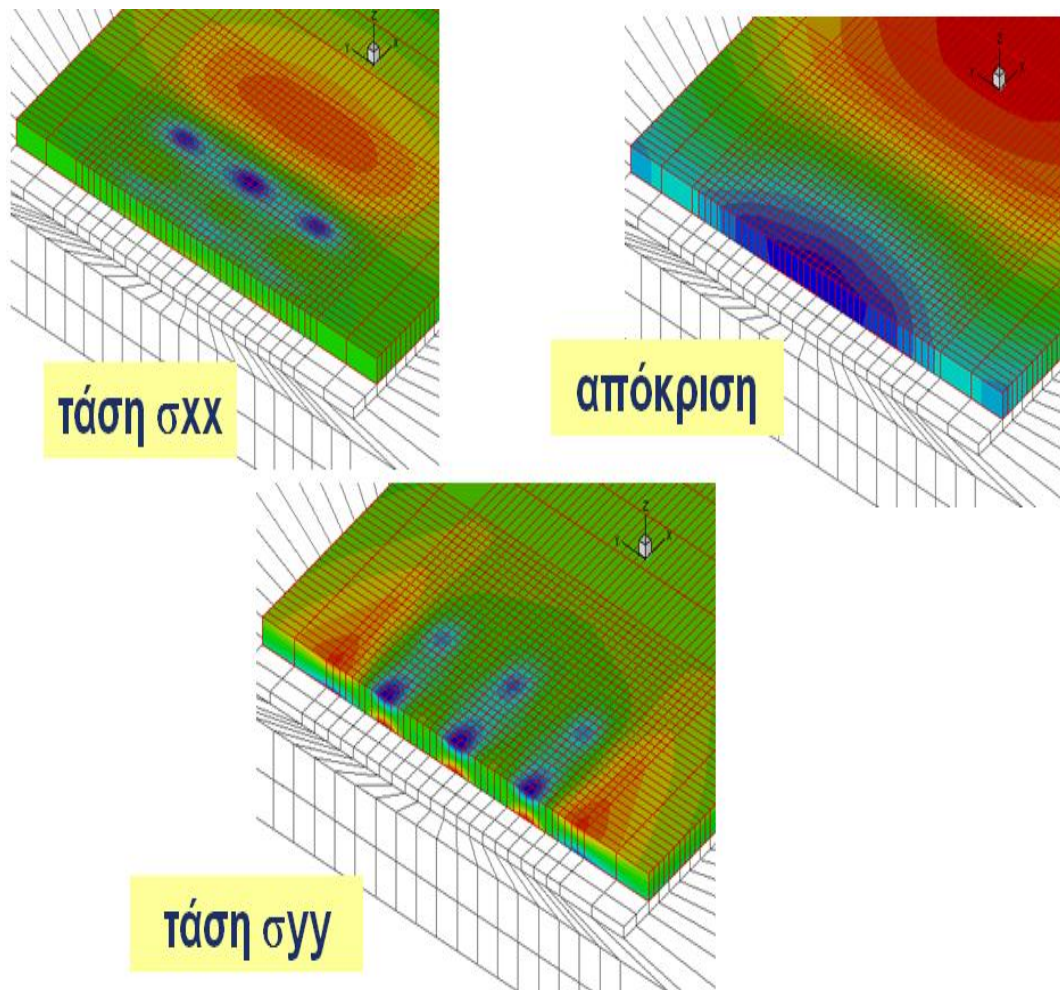
Σχήμα 3.2: Κάνναβος διακριτοποίησης δύσκαμπτου οδοστρώματος

Τα συστήματα των τροχών των αεροσκαφών που κινούνται στην πλάκα και η φόρτιση τους προσομοιώνονται με τη μέθοδο πετρερασμένων στοιχείων, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.



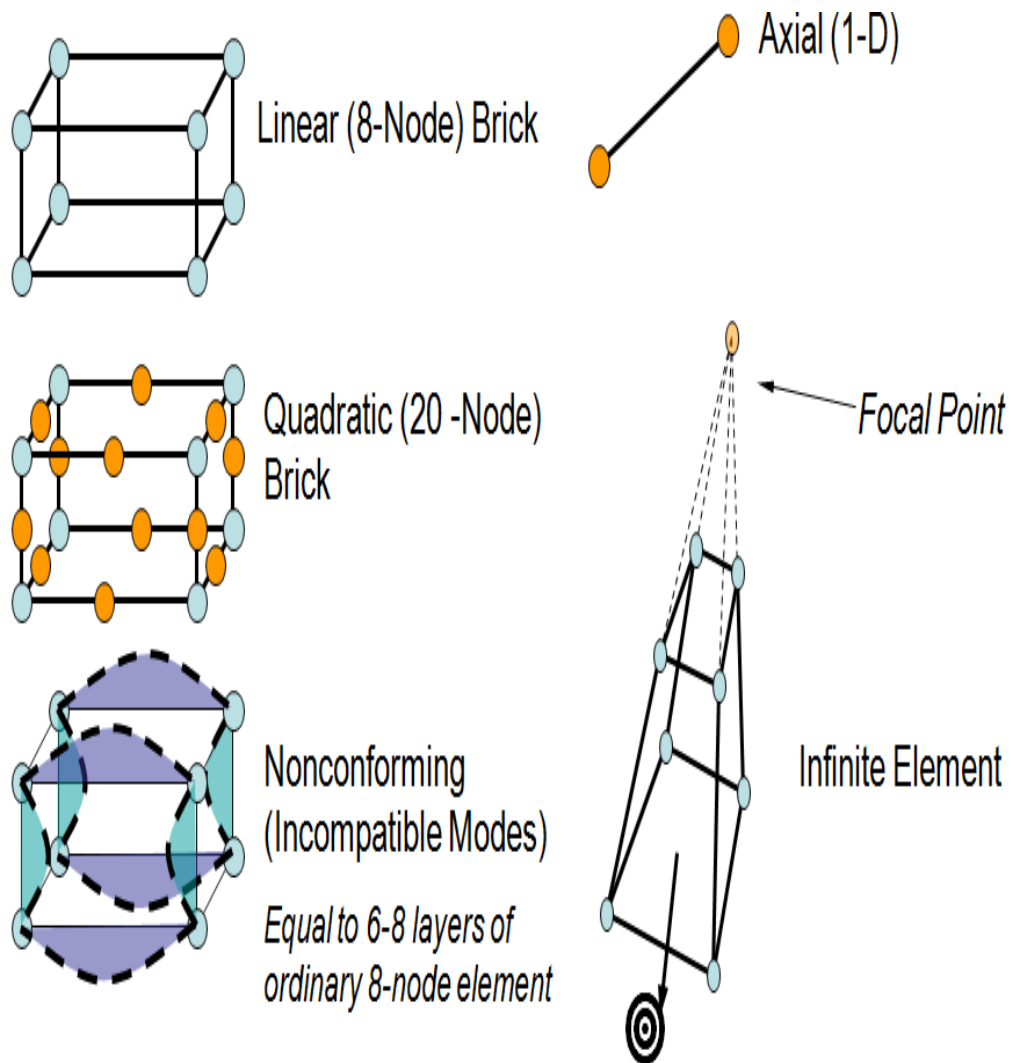
Σχήμα 3.3: Προσομοίωση συστημάτων τροχών αεροσκαφών με τη μέθοδο πετρερασμένων στοιχείων

Η ανάλυση των τάσεων σε κάθε άξονα που αναπτύσσονται στην πλάκα σκυροδέματος από την επιβολή φόρτισης του κάθε αεροσκάφους που συμμετέχει στην κυκλοφορία διεξάγεται από το υποπρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων της FAA. Το περιβάλλον του υπόψη υποπρογράμματος απεικονίζεται στο σχήμα 3.4 (FAA). Σημειώνεται πως η διαδικασία ανάλυσης των τάσεων με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων δεν είναι ορατή στο χρήστη.



Σχήμα 3.4: Ανάλυση τάσεων με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

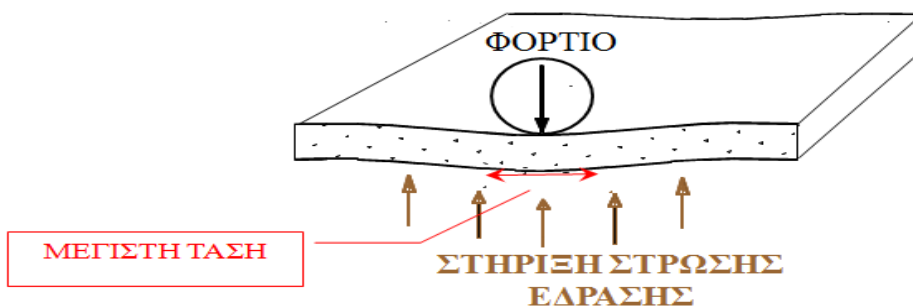
Τα στοιχεία ανάλυσης (elements) με τους κόμβους (nodes) του κάρναβου διακριτοποίησης της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων φαίνονται στο σχήμα 3.5 (FAA).



Σχήμα 3.5: Στοιχεία ανάλυσης κάρναβου διακριτοποίησης θεωρίας πεπερασμένων στοιχείων

3.2.2 Μοντέλο αστοχίας

Για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα, η αναλυτική μέθοδος χρησιμοποιεί τη μέγιστη εφελκυστική τάση στην άκρη της πλάκας σκυροδέματος PCC ως κρίσιμο μέγεθος για τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος. Η μέγιστη οριζόντια τάση καθορίζεται από την επιβολή φόρτισης στην ακμή της πλάκας, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6. Επιπλέον, οι τάσεις στην ακμή της πλάκας σκυροδέματος μειώνονται κατά 25% για να ληφθεί υπόψη και η μεταφορά φορτίου λόγω των αρμών της πλάκας κατ' αντιστοιχία με την προγενέστερη εμπειρική μέθοδο. Επιπροσθέτως, αξίζει να επισημανθεί πως υπολογίζονται οι τάσεις που προκαλούνται στην πλάκα σκυροδέματος μόνο από τα φορτία και όχι από άλλες αιτίες επιπονήσεων όπως για παράδειγμα οι θερμοκρασιακές μεταβολές.

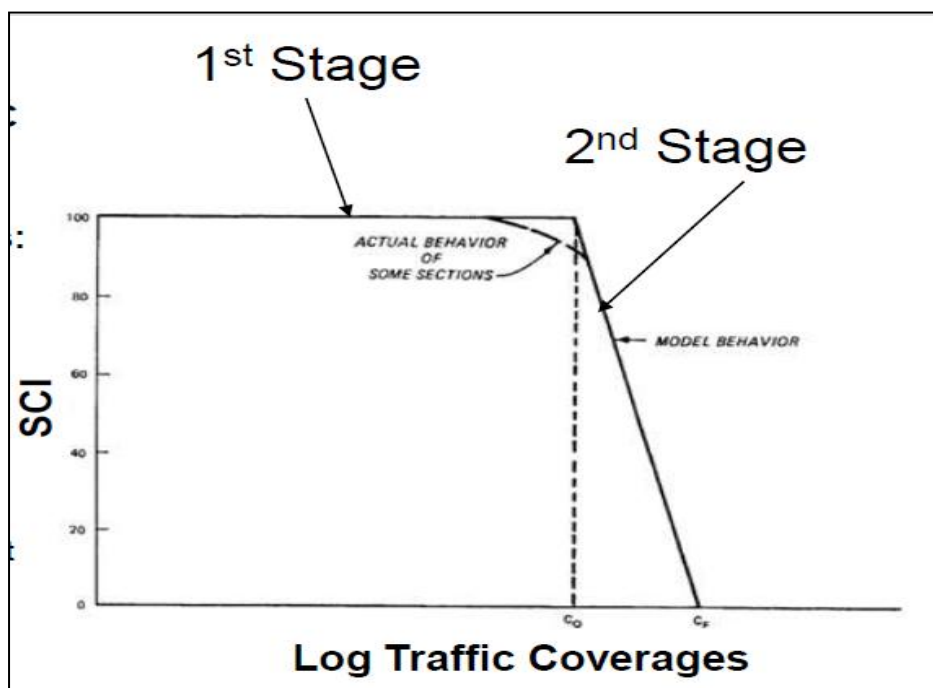


Σχήμα 3.6: Τύπος φόρτισης αναλυτικής μεθόδου για εύρεση μέγιστης οριζόντιας τάσης

Το απαιτούμενο πάχος της πλάκας σκυροδέματος του δύσκαμπτου οδοστρώματος για να υποστηρίξει την προβλεπόμενη κυκλοφορία αεροσκαφών με δεδομένες τις στρώσεις υπόβασης και τη στρώση έδρασης, προσδιορίζεται από το μοντέλο αστοχίας της αναλυτικής μεθόδου με βάση το νόμο κοπώσεως του σκυροδέματος.

Το 1995 η FAA υιοθετεί μοντέλο αστοχίας «2 σταδίων», με πρώτο στάδιο από την αρηγμάτωση πλάκα έως την ανάπτυξη της πρώτης ρωγμής και δεύτερο στάδιο από την πρώτη διαμπερή ρωγμή έως το πέρας ζωής του οδοστρώματος. Η αρχική ιδέα ανήκει στον Witczak το 1976 και η διαδικασία ολοκληρωμένα

προτάθηκε από τον Rollings το 1988 (σχήμα 3.7). Το μοντέλο αστοχίας συνέχισε να χρησιμοποιείται στην αναλυτική μέθοδο με κάποιες τροποποιήσεις για τις σταθεροποιημένες βάσεις (σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.7: Σχέση μεταξύ δείκτη SCI και λογαρίθμου των καλύψεων-διελεύσεων (Rollings 1988)

Ο Rollings εισάγει την έννοια του Δείκτη Δομικής Κατάστασης SCI (Structural Condition Index) ως κριτήριο για την αστοχία του οδοστρώματος, συσχετίζοντας τις καλύψεις - διελεύσεις με τον δείκτη SCI. Συγκεκριμένα, οι καλύψεις- διελεύσεις C_0 αντιστοιχούν στην εμφάνιση της πρώτης ρωγμής με $SCI=100$. Μετά την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής (αρχή δεύτερου σταδίου) ο δείκτης SCI αρχίζει να μειώνεται γραμμικά έως ότου μηδενίζεται για καλύψεις – διελεύσεις C_F που αντιστοιχούν στην πλήρη αστοχία του δύσκαμπτου οδοστρώματος, όπως διακρίνεται στο σχήμα 3.7

Η βελτιστοποίηση του μοντέλου αστοχίας «2 σταδίων» (Construction Cycle 2 – CC2) για την ανάπτυξη της νέας αναλυτικής μεθόδου βασίστηκε σε δοκιμές πλήρους κλίμακας που διεξήχθησαν το 2004 στην εγκατάσταση NAPTF (National Airport Pavement Test Facility) σε 6 διαφορετικά πειραματικά

δύσκαμπτα οδοστρώματα με διαφορετικούς συνδυασμούς υλικού υπόβασης που υποβλήθηκαν σε φόρτιση έως την πλήρη αστοχία.



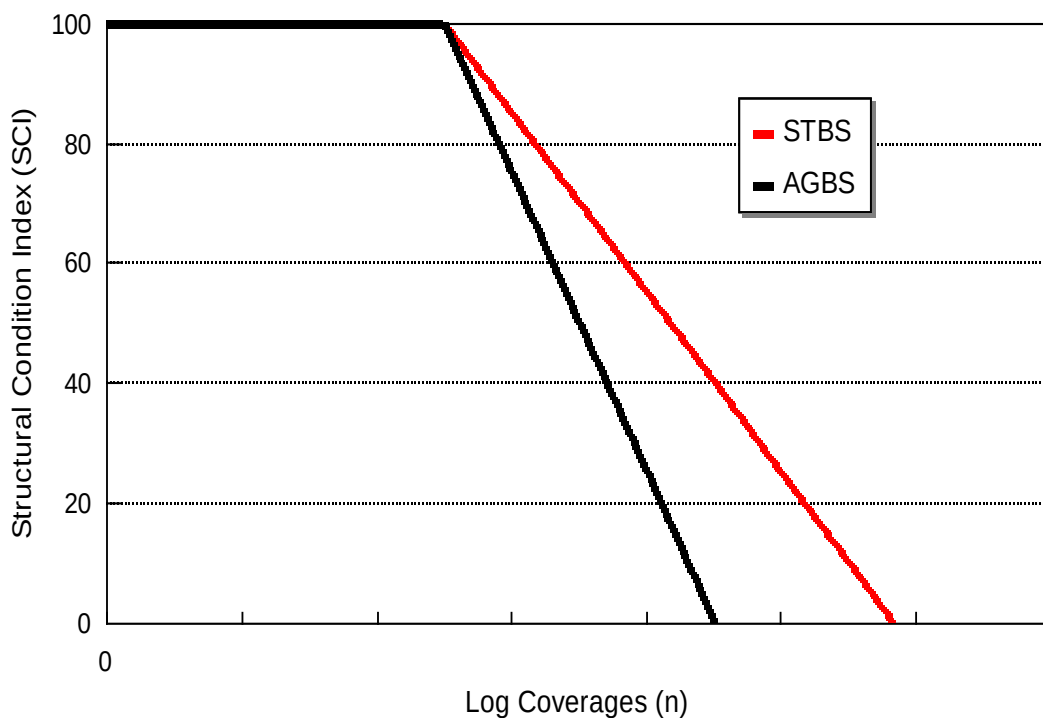
Σχήμα 3.8: Το όχημα των πειραματικών δοκιμών στο NAPT

Το NAPT ξεκίνησε τη λειτουργία του το 1999 στο Τεχνικό Ερευνητικό Κέντρο της FAA στο New Jersey των Η.Π.Α. (FAA William J. Hughes Technical Center, Atlantic City International Airport, NJ.). Δημιουργήθηκε για να προκύπτουν αξιόπιστα αποτελέσματα σχετικά με τη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων έως την αστοχία, τις αντοχές των στρώσεων έδρασης και των διάφορων τύπων διάταξης τροχών αεροσκαφών.

Το χρησιμοποιούμενο όχημα δοκιμών - προσομοιωτής κινείται μέσω σιδηροτροχιών επί του δαπέδου δοκιμών και οι αποκρίσεις του δαπέδου καταγράφονται από ενσωματωμένους αισθητήρες. Το όχημα των δοκιμών μπορεί να προσομοιώσει επαναλαμβανόμενες φορτίσεις αεροσκαφών με μέγιστο φορτίο τροχού τα 335 KN και ταχύτητες δοκιμών κυκλοφορίας από 4 έως 8 χιλιόμετρα την ώρα. Στο σχήμα 3.8 φαίνεται η εγκατάσταση του NAPT και ο προσομοιωτής των φορτίσεων.

Το μοντέλο αστοχίας της αναλυτικής μεθόδου (2009) είναι το εξής:

$$\frac{DF}{F_c} = \left[\frac{F_s' b d}{\left(1 - \frac{SCI}{100}\right)(d - b) + F_s' b} \right] \times \log C + \left[\frac{\left(1 - \frac{SCI}{100}\right)(ad - bc) + F_s' b c}{\left(1 - \frac{SCI}{100}\right)(d - b) + F_s' b} \right]$$



Σχήμα 3.9 : Μοντέλο αστοχίας αναλυτικής μεθόδου (FAA)

Όπου

SCI: Δείκτης δομικής κατάστασης – SCI=100 στην αρχή της περιόδου σχεδιασμού και SCI=80 στο πέρας της διάρκειας σχεδιασμού (ΑΣΤΟΧΙΑ)

DF: Συντελεστής σχεδιασμού με $DF=R/\sigma$, όπου R η εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος και σ η υπολογιζόμενη τάση

STBS: Σταθεροποιημένη υπόβαση

AGBS: υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο

F_c : Συντελεστής βαθμονόμησης (calibration factor) με τιμή 1,13

F's : Συντελεστής για σταθεροποιημένη βάση

Παράμετροι : $a=0.5878$, $b=0.2523$, $c=0.7409$, $d=0.2456$

Κατά το μοντέλο αστοχίας, ένα δύσκαμπτο οδόστρωμα θεωρείται πως έχει αστοχήσει όταν ο δείκτης SCI φτάσει στην τιμή 80. Επομένως, οι καλύψεις – διελεύσεις έως την αστοχία προκύπτουν για $SCI=80$ για οποιαδήποτε τιμή του $DF= R/\sigma$.

Ο δείκτης F's αφορά τη στρώση υπόβασης και χρησιμοποιείται για να προσαρμόζει την κλίση του φθίνοντος κλάδου στο διάγραμμα $SCI - \log C$ (σχήμα 3.6), όταν η υπόβαση αποτελείται από σταθεροποιημένο υλικό. Όταν η πλάκα σκυροδέματος εδράζεται σε στρώση από θραυστό αμμοχάλικο πάχους 20 cm ή σε στρώση από σταθεροποιημένο υλικό πάχους 10 cm, η τιμή του δείκτη είναι 1. Σε αντίθετη περίπτωση, με μεγαλύτερα πάχη στρώσης υπόβασης από σταθεροποιημένο ή μη υλικό, ο δείκτης F's μειώνεται και ο αριθμός των επιτρεπόμενων καλύψεων – διελεύσεων αυξάνεται. Με το δείκτη F's λαμβάνεται υπόψη το γεγονός πως στις δοκιμές πλήρους κλίμακας, τα δύσκαμπτα οδοστρώματα με σταθεροποιημένες βάσεις παρουσίαζαν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής μετά την πρώτη ρωγμή.

Οι παράμετροι a , b , c , d έχουν προκύψει από γραμμική παλινδρόμηση ελαχίστων τετραγώνων του συντελεστή σχεδιασμού DF στο λογάριθμο των καλύψεων διελεύσεων έως την αστοχία, που παρατηρήθηκαν στις δοκιμές πλήρους κλίμακας που διεξήχθησαν από το WES (US Army Engineer Waterways Experiment Station) αλλά και στο NAPTF.

Ο συντελεστής βαθμονόμησης F_c (calibration factor) δεν προκύπτει από την ανάλυση των δοκιμών πλήρους κλίμακας, αλλά από τη σύγκριση του μη βαθμονομημένου μοντέλου αστοχίας με τα αποτελέσματα της εμπειρικής μεθόδου από τα νομογραφήματα, με σκοπό την επίτευξη συμβατότητας μεταξύ των διατομών σχεδιασμού που προκύπτουν από τις 2 μεθόδους. Αξίζει να σημειωθεί πως δεν πρόκειται για ένα συντελεστή ασφαλείας, αλλά για ένα συντελεστή στάθμισης των αποκλίσεων των αποτελεσμάτων από την προγενέστερη μέθοδο σχεδιασμού.

Ο Δείκτης Δομικής Κατάστασης SCI που υπεισέρχεται στο μοντέλο αστοχίας και διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο σε αυτό, προκύπτει από το Δείκτη Κατάστασης Οδοστρώματος PCI (Pavement Condition Index). Ο δείκτης PCI παρέχει τη δυνατότητα εκτίμησης της κατάστασης του οδοστρώματος μέσω της οπτικής επισκόπησης των φθορών που παρατηρούνται στην επιφάνεια και η τιμή του κυμαίνεται από 100 (άριστη κατάσταση) έως 0 (πλήρης αστοχία). Έχει υιοθετηθεί από τα πρότυπα της ASTM D 5340 και λαμβάνει υπόψη 15 είδη φθορών για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα. Ωστόσο, μόνο 6 είδη φθορών συνδέονται με τη δομική κατάσταση του οδοστρώματος - συνεπώς και με το δείκτη SCI - και φαίνονται στον Πίνακα 3.1. Αξίζει να προστεθεί, πως ο δείκτης SCI μπορεί να εκτιμηθεί αυτόματα με ειδικά λογισμικά, όπως το MicroPAVER και καθώς περιλαμβάνει μόνο έναν αριθμό από το σύνολο των φθορών που λαμβάνονται υπόψη για να εκτιμηθεί ο PCI, η τιμή του SCI θα προκύπτει πάντα ίση ή μεγαλύτερη της τιμής του PCI για αξιολόγηση του ίδιου οδοστρώματος.

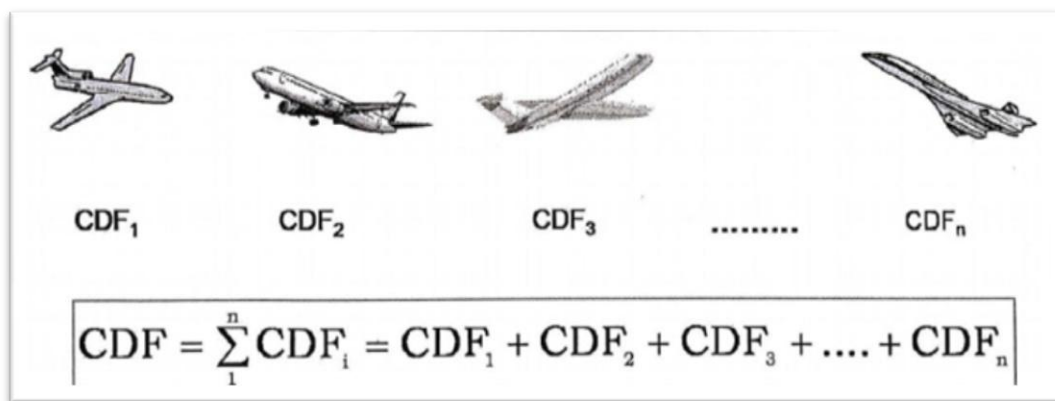
Πίνακας 3.1: Είδη φθορών που σχετίζονται με το δείκτη δομικής κατάστασης SCI

ΕΙΔΟΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΦΘΟΡΑΣ
Ρωγμή στο άκρο
Διαμήκης/Εγκάρσια/Διαγώνια Ρωγμή
Καταρηγματωμένη πλάκα
Ρωγμές συρρίκνωσης χαμηλής σοβαρότητας (σε μικρό εύρος της πλάκας)
Τοπικές θραύσεις στα χείλη του αρμού
Τοπικές θραύσεις στο άκρο

Σύμφωνα με την FAA, τιμή του δείκτη SCI ίση με 80 συνιστά δομική αστοχία του δύσκαμπτου οδοστρώματος και ισοδυναμεί με το 50 % των πλακών σκυροδέματος του οδοστρώματος να παρουσιάζουν φθορά δομικής φύσεως.

3.2.3 Δείκτης Φθοράς CDF

Στην αναλυτική μέθοδο, για το σχεδιασμό ενός οδοστρώματος εισάγεται η έννοια της αθροιστικής φθοράς που προκαλούν τα αεροσκάφη στο υπόψη οδόστρωμα και καταργείται η έννοια του αεροσκάφους σχεδιασμού που βασιζόταν η εμπειρική μέθοδος. Η αθροιστική φθορά προκύπτει ως το άθροισμα των επιμέρους φθορών που προκαλεί το κάθε αεροσκάφος ξεχωριστά και εκφράζεται μέσω του δείκτη αθροιστικής φθοράς CDF (Cumulative Damage Factor). Η έννοια του δείκτη φθοράς αποτυπώνεται στο σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10 : Έννοια Δείκτης Αθροιστικής Φθοράς CDF

Ο δείκτης CDF για κάθε αεροσκάφος ορίζεται ως ο λόγος των προβλεπόμενων διελεύσεων προς τις επιτρεπόμενες διελεύσεις έως την αστοχία. Ο δείκτης αθροιστικής φθοράς υπολογίζεται για κάθε αεροσκάφος από τις παρακάτω σχέσεις:

$$CDF = \frac{\text{προβλεπόμενες διελεύσεις}}{\text{επιτρεπόμενες διελεύσεις}} \quad (\text{σχέση 3.1})$$

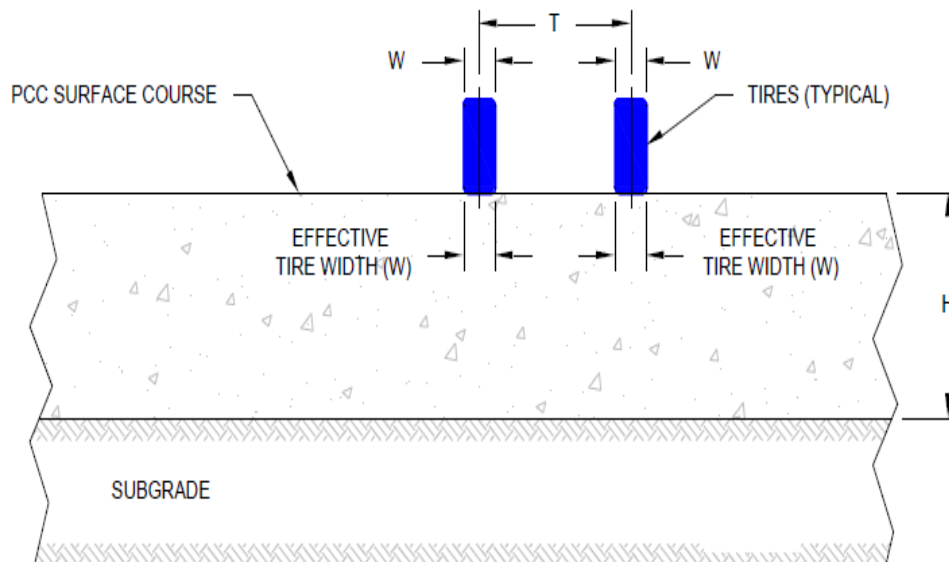
$$CDF = \frac{(\text{ετήσιες απογειώσεις}) * (\text{περίοδος σχεδιασμού σε έτη})}{\left(\frac{P}{C}\right) * (\text{καλύψεις} - \text{διελεύσεις έως την αστοχία})} \quad (\text{σχέση 3.2})$$

$$CDF = \frac{\text{προβλεπόμενες καλύψεις} - \text{διελεύσεις}}{\text{καλύψεις} - \text{διελεύσεις έως την αστοχία}} \quad (\text{σχέση 3.3})$$

Όπου:

- Ετήσιες απογειώσεις: οι προβλεπόμενες διελεύσεις του αεροσκάφους ανά έτος
- Περίοδος σχεδιασμού σε έτη: η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος (τυπική διάρκεια ζωής οδοστρώματος για την FAA τα 20 έτη)
- Καλύψεις – διελεύσεις έως την αστοχία: ενέχουν την έννοια των «διελεύσεων μέγιστης επιπόνησης». Είναι οι επιτρεπόμενες καλύψεις - διελεύσεις έως την αστοχία και προκύπτουν από το μοντέλο αστοχίας της αναλυτικής μεθόδου για δείκτη SCI=80.
- $\frac{P}{C}$: Λόγος των διελεύσεων προς τις καλύψεις- διελεύσεις C.

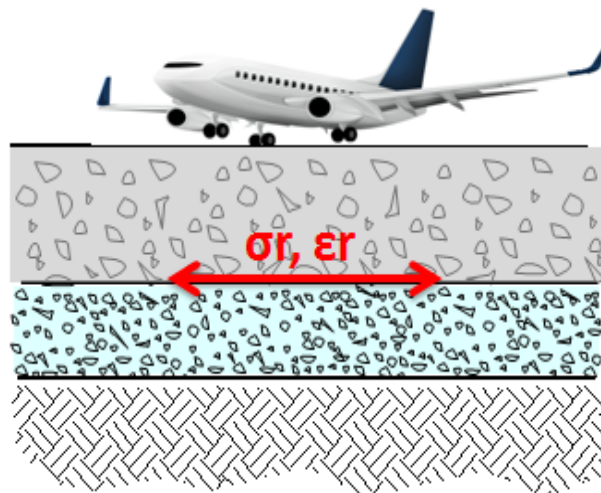
Ο αριθμός των καλύψεων – διελεύσεων δεν είναι εύκολο να μετρηθεί όπως ο αριθμός των διελεύσεων ενός αεροσκάφους και βασίζεται στον καθορισμένο λόγο P/C για κάθε αεροσκάφος, από τον οποίο προσδιορίζεται μαθηματικά. Η αναλυτική μέθοδος χρησιμοποιεί την έννοια του ενεργού πλάτους του ελαστικού (effective tire width) για την εκτίμηση του λόγου P/C. Στα δύσκαμπτα οδοστρώματα, το ενεργό πλάτος του ελαστικού ορίζεται στην επιφάνεια της πλάκας σκυροδέματος και ισούται με το πραγματικό πλάτος του ελαστικού, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.11: Ενεργό πλάτος ελαστικού σε δύσκαμπτο οδόστρωμα

Ο δείκτης αθροιστικής φθοράς CDF υπολογίζεται στην κρίσιμη θέση του δύσκαμπτου οδοστρώματος, στη βάση της πλάκας σκυροδέματος, με κρίσιμο εντατικό μέγεθος την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Υπολογίζεται κατά μήκος του οδοστρώματος σε λωρίδες πλάτους 10 ιντσών (25,4 εκατοστά) σε συνολικό πλάτος οδοστρώματος 820 ιντσών (2082,8 εκατοστά). Για το σχεδιασμό λαμβάνεται υπόψη η μέγιστη τιμή του δείκτη CDF που προκύπτει και για τις 82 λωρίδες του οδοστρώματος. Είναι πιθανό, ακόμη και με ίδια γεωμετρία τροχών, αεροσκάφη που έχουν διαφορετικά ίχνη τροχών να έχουν διαφορετικούς δείκτες P/C, επομένως και διαφορετική συνεισφορά στον τελικό δείκτη CDF.

Ο λόγος P/C υπολογίζεται για κάθε λωρίδα θεωρώντας πως η κυκλοφορία ακολουθεί κανονική κατανομή στην εγκάρσια διεύθυνση με τυπική απόκλιση ίση με 30.435 inches (773 mm) και αξίζει να σημειωθεί πως εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά του αεροσκάφους και δεν επηρεάζεται από άλλες παραμέτρους σχεδιασμού.



Σχήμα 3.12: Διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος-Κρίσιμη θέση αστοχίας

Ο δείκτης CDF διέπεται από την αρχή Miner (Miner's law) που ισχύει για τα οδοστρώματα οδών. Για να μην αστοχήσει η κρίσιμη θέση του οδοστρώματος (σχήμα 3.12) πρέπει η αθροιστική φθορά της να είναι μικρότερη της μονάδας ($CDF < 1$). Σε αντίθετη περίπτωση, που η αθροιστική φθορά προκύπτει μεγαλύτερη ή ίση της μονάδας ($CDF \geq 1$), το οδόστρωμα δεν επαρκεί για να φέρει την προβλεπόμενη φόρτιση. Επιπροσθέτως, στη φάση αξιολόγησης ενός

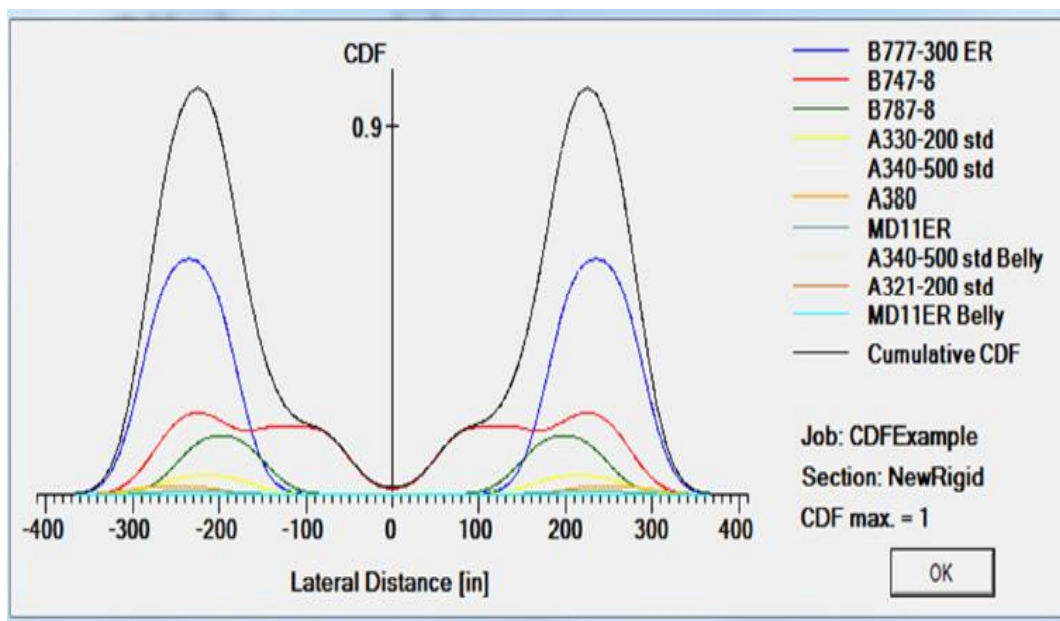
οδοστρώματος με την αναλυτική μέθοδο, ο δείκτης CDF εκφράζει την εναπομένονσα διάρκεια ζωής του υπόψη οδοστρώματος:

$CDF < 1 \rightarrow$ Το οδόστρωμα έχει εναπομένονσα διάρκεια ζωής.

$CDF = 1 \rightarrow$ Το οδόστρωμα έχει ολοκληρώσει την διάρκεια ζωής του.

$CDF > 1 \rightarrow$ Το οδόστρωμα έχει υπερβεί την διάρκεια ζωής του.

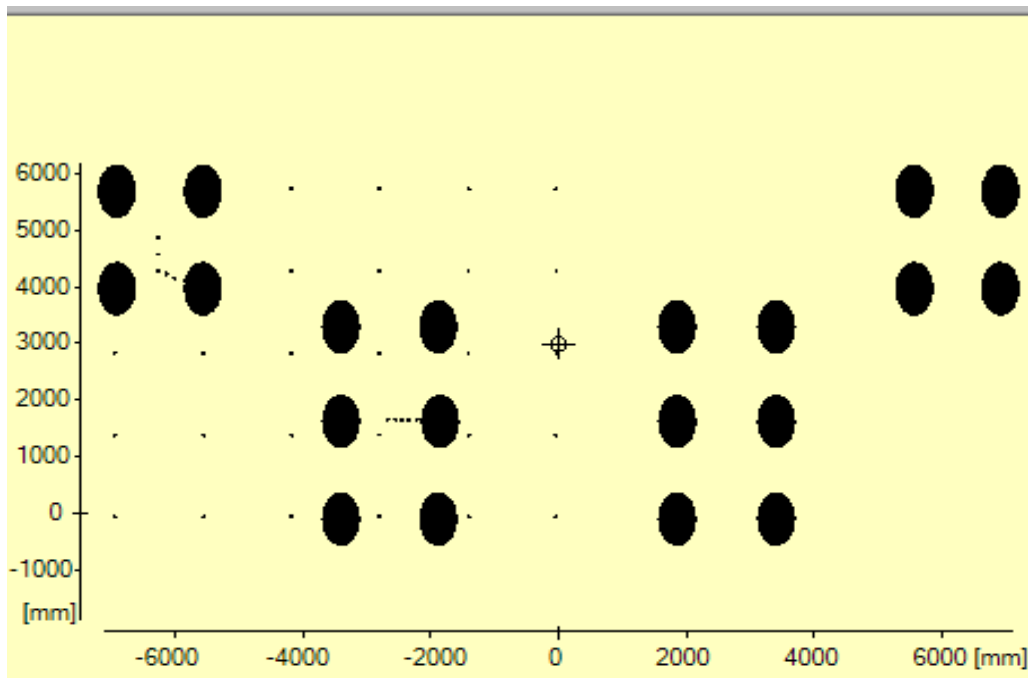
Με την εισαγωγή του δείκτη αθροιστικής φθοράς και την κατάργηση της έννοιας του αεροσκάφους σχεδιασμού της εμπειρικής μεθόδου, καθίσταται δυνατή η εκτίμηση της φθοράς του οδοστρώματος καθώς και η συνεισφορά του κάθε αεροσκάφους σε αυτήν. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνεται υπόψη η θέση των τροχών σε σχέση με τον κεντρικό άξονα του διαδρόμου και εντοπίζεται το κρίσιμο σημείο της ανάλυσης, για το οποίο ο δείκτης αθροιστικής φθοράς του δύσκαμπτου οδοστρώματος μεγιστοποιείται, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13 : Γράφημα Δείκτη Αθροιστικής Φθοράς οδοστρώματος

Επιπρόσθετα, στο αναλυτικό σύστημα οι διαδικασίες της διαστασιολόγησης και οι υπολογισμοί εκτελούνται λαμβάνοντας υπόψη το πραγματικό σύστημα τροχών του κάθε αεροσκάφους που απαρτίζει την κυκλοφορία σχεδιασμού. Στο

σχήμα 3.14 απεικονίζονται τα φορεία των τροχών του αεροσκάφους νέας γενιάς Airbus A380 -800F στο αναλυτικό σύστημα.



Σχήμα 3.14 : Διάταξη τροχών αεροσκάφους στο αναλυτικό σύστημα

3.2.4 Τυπικά υλικά FAA

Όπως έχει προαναφερθεί, η τυπική διατομή ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος αποτελείται από την πλάκα σκυροδέματος, τη στρώση υπόβασης και τη στρώση έδρασης. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό με την αναλυτική μέθοδο, συνίσταται να ακολουθούν τις προδιαγραφές της FAA, με σκοπό τη διασφάλιση της ποιότητας του έργου.

Όσον αφορά την πλάκα σκυροδέματος, η FAA ορίζει ως τυπικό υλικό το P-501 που πρόκειται για σκυρόδεμα από τσιμέντο Πόρτλαντ (Portland Cement Concrete Pavement) με μέτρο ελαστικότητας $E = 27.580 \text{ MPa}$ και δείκτη Poisson $\nu = 0,15$, με το οποίο καλύπτονται όλες οι απαιτήσεις ποιότητας, κατασκευής και διαχείρισης. Η επιφάνεια του σκυροδέματος θα πρέπει να παρέχει επαρκή δομική

αντοχή στις επαναλαμβανόμενες φορτίσεις από την κυκλοφορία των αεροσκαφών, καλή συμπεριφορά έναντι χημικής διάβρωσης και θερμοκρασιακών μεταβολών καθώς και προστασία από το φαινόμενο της διήθησης του νερού στη στρώση έδρασης και της άντλησης.

Για την στρώση υπόβασης του δύσκαμπτου οδοστρώματος, στην οποία εδράζεται η πλάκα σκυροδέματος, τα υλικά που χρησιμοποιούνται καθώς και οι ιδιότητές τους, όπως το μέτρο ελαστικότητας και ο δείκτης Poisson, παρουσιάζονται στους πίνακες 3.2 και πίνακα 3.3 αντίστοιχα.

Πίνακας 3.2 : Τυπικά υλικά υπόβασης δύσκαμπτου οδοστρώματος αναλυτικής μεθόδου

Υλικό	Περιγραφή	
P-154	Subbase course	Στρώση υπόβασης
P-208	Aggregate Base Course	Στρώση βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο
P-209	Crushed Aggregate Base Course	Στρώση βάσης από θραυστό αμμοχάλικο
P-211	Lime Rock Base Course	Στρώση βάσης από ασβεστόλιθο
P-301	Soil Cement Base	Εδαφικό υλικό κατεργασμένο με τσιμέντο
P-304	Cement Treated Base Course	Βάση από σταθεροποιημένο με τσιμέντο υλικό
P-306	Econocrete Subbase Course	Υπόβαση από σταθεροποιημένο με τσιμέντο υλικό
P-401	Plant Mix Bituminous Pavements	Θερμό ασφαλτόμιγμα
P-403	HMA Base Course	Ασφαλτική Βάση Θερμού ασφαλτομίγματος

Πίνακας 3.3 : Ιδιότητες τυπικών υλικών υπόβασης δύσκαμπτου οδοστρώματος αναλυτικής μεθόδου

Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας E (MPa)	Δείκτης Poisson ν
P-154	276	0,35
P-208	518	0,35
P-209	518	0,35
P-301	1724	0,20
P-304	3447	0,20
P-306	4826	0,20
P-401	1379	0,35
P-403	2758	0,35

Οι απαιτήσεις για τη στρώση έδρασης του δύσκαμπτου οδοστρώματος συναντώνται στο τυπικό υλικό της FAA P-152, με μέτρο ελαστικότητας E να κυμαίνεται από 7 έως 350 MPa και δείκτη Poisson $\nu = 0,35$ με καθορισμένα κριτήρια συμπίκνωσης.

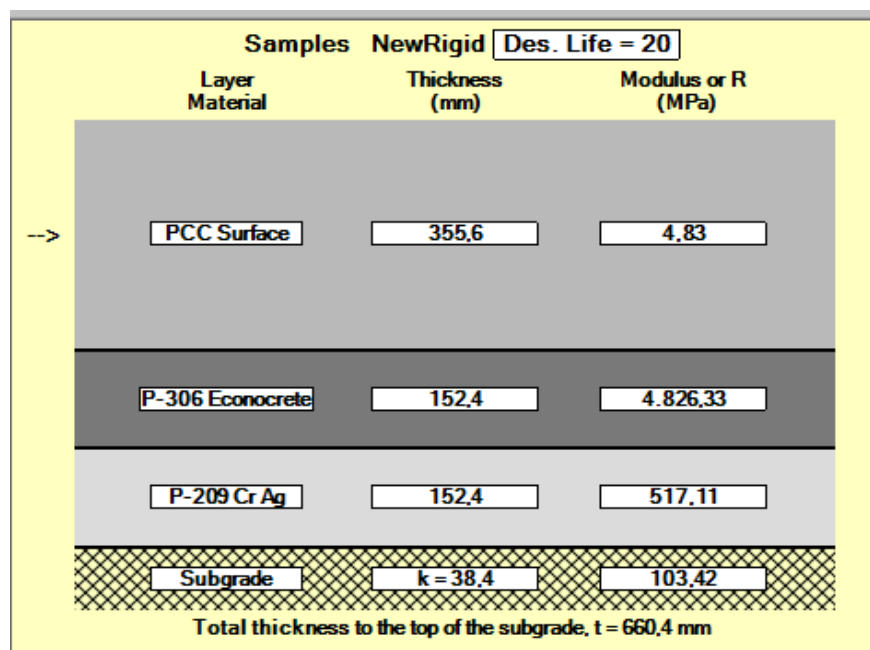
3.3 Λογισμικό FAARFIELD

Η διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων αεροδρομίων αποτελεί ένα πολύπλοκο μηχανικό πρόβλημα. Η διαδικασία σχεδιασμού εμπεριέχει πολλές αλληλένδετες μεταβλητές, οι οποίες είναι συχνά δύσκολο να εκτιμηθούν, όπως η κυκλοφορία και η συγκέντρωση της σε συγκεκριμένες περιοχές, το είδος των υλικών αλλά και η φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος. Παράλληλα, με τη ραγδαία αύξηση της αεροπορικής ζήτησης και της εξέλιξης των αεροσκαφών κατέστη αναγκαία η ανάπτυξη εξελιγμένων υπολογιστικών προγραμμάτων για το σχεδιασμό των οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Η FAA ανέπτυξε το λογισμικό FAARFIELD (FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design) χρησιμοποιώντας μοντέλα αστοχίας που βασίστηκαν σε δοκιμές

πλήρους κλίμακας από το 1940 έως και σήμερα. Ο σχεδιασμός αλλά και η αξιολόγηση με την αναλυτική μέθοδο ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος πραγματοποιείται με τη βοήθεια του υπόψη λογισμικού που κυκλοφόρησε μετά από πολλά χρόνια έρευνας του τμήματος Airport Technology R & D της FAA.

Τα οδοστρώματα που σχεδιάζονται και κατασκευάζονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις της FAA προβλέπεται να παρέχουν κατ' ελάχιστο δομική επάρκεια 20 χρόνων χωρίς να χρειάζονται σημαντικές εργασίες, αν δεν συντελεστούν μεγάλες αλλαγές στην προβλεπόμενη κυκλοφορία. Ωστόσο, αποκατάσταση της επιφάνειας ή της αντιστοιχισμένης επίστρωσης μπορεί να χρειαστεί και νωρίτερα λόγω των καταστρεπτικών συνθηκών και των εκφυλιστικών επιδράσεων της κανονικής χρήσης.

Άποψη της επιφάνειας εργασίας του λογισμικού κατά τη φάση σχεδίασης ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος αποτυπώνεται στο σχήμα 3.15.



Σχήμα 3.15: Επιφάνεια εργασίας λογισμικού FAARFIELD

3.3.1 Μεταβλητές εισόδου λογισμικού

Οι παράμετροι που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος και καθορίζουν το τελικό αποτέλεσμα είναι οι εξής:

α. Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος. Το απαιτούμενο πάχος του δύσκαμπτου οδοστρώματος συνδέεται με την ποιότητα του σκυροδέματος που χρησιμοποιείται στην κατασκευή. Για το σχεδιασμό οδοστρωμάτων, η φέρουσα ικανότητα του σκυροδέματος χαρακτηρίζεται από την αντοχή του σε εφελκυσμό, καθώς κρίσιμο εντατικό μέγεθος και ακολούθως κρίσιμη ενδεχόμενη αστοχία του οδοστρώματος είναι σε εφελκυσμό. Για την κατασκευή σύμφωνα με τις προδιαγραφές της FAA, η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος που θα χρησιμοποιηθεί, θα πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις που περιγράφονται στη μέθοδο ASTM C78 (2002).

Το τυπικό υλικό P-501 της FAA, δηλαδή το σκυρόδεμα από τσιμέντο Πόρτλαντ με το οποίο συνίσταται να κατασκευάζεται η πλάκα σκυροδέματος, χρησιμοποιεί την αντοχή των 28 ημερών ως ένα πρακτικό κατασκευαστικό μέτρο, ως είθισται γενικότερα στις κατασκευές από σκυρόδεμα. Ωστόσο, η μακροχρόνια αντοχή του σκυροδέματος που επιτυγχάνεται συνήθως είναι τουλάχιστον κατά 5% μεγαλύτερη από την αντοχή των 28 ημερών. Προκειμένου να καθορισθεί η εφελκυστική αντοχή με την οποία θα γίνει η μελέτη της κατασκευής ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος θα πρέπει να ληφθούν υπόψη από το μελετητή κι άλλοι παράγοντες, όπως η ικανότητα της βιομηχανίας στη συγκεκριμένη περιοχή να κατασκευάσει σκυρόδεμα καθορισμένης εφελκυστικής αντοχής, καθώς και η ανάγκη αποφυγής χρήσης μεγάλου ποσοστού τσιμέντου, το οποίο μπορεί να επηρεάσει την ανθεκτικότητα του μπετόν.

Οι συνιστώμενες τιμές της FAA για την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος είναι από 4.14 έως 4.83 MPa (600 έως 700 psi) για τις περισσότερες περιπτώσεις κατασκευής οδοστρωμάτων αεροδρομίου.

β. Δείκτης k στρώσης έδρασης. Ο καθορισμός του δείκτη αντίδρασης εδάφους της στρώσης έδρασης είναι απαραίτητος για το σχεδιασμό και προκύπτει έπειτα από γεωτεχνική έρευνα και ανάλυση και ακολούθως ταξινόμηση των εδαφικών υλικών. Η φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης μπορεί να εκφρασθεί και μέσω του μέτρου ελαστικότητας E. Όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί από το λογισμικό γίνονται με το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης και εφόσον η φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης εκφρασθεί μέσω του δείκτη αντίδρασης K, μετατρέπεται αυτόματα σε ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας E μέσω της ακόλουθης σχέσης :

$$E_{sg} = 26k^{1.284} \quad (\text{σχέση 3.1})$$

Όπου

Esg= μέτρο ελαστικότητας στρώσης έδρασης σε psi

k = Δείκτης αντίδρασης εδάφους σε pci (lbs/in3)

Όταν οι δοκιμές στο εδαφικό υλικό είναι δυνατές, ο δείκτης αντίδρασης εδάφους k συστήνεται να καθορίζεται με τη δοκιμή φόρτισης πλάκας και μπορεί να εισαχθεί κατευθείαν στο λογισμικό, χωρίς να προηγηθεί η μετατροπή του σε μέτρο ελαστικότητας E. Οι προδιαγραφές των δοκιμών φόρτισης πλάκας περιγράφονται στη μέθοδο AASHTO T222 (AASHTO,1981).

Επιπλέον, η εκτίμηση του δείκτη k της στρώσης έδρασης, όταν δεν είναι δυνατές οι πυρηνοληψίες ενός αντιπροσωπευτικού δείγματος του εδαφικού υλικού, μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω του διαθέσιμου δείκτη CBR με χρήση της ακόλουθης σχέσης :

$$k = \left[\frac{1500 \times CBR}{26} \right]^{0.7788} \quad (\text{σχέση 3.2})$$

K= δείκτης αντίδρασης εδάφους (pci)

CBR= California Bearing Ratio – Καλιφορνιακός Δείκτης

γ. Διάρκεια σχεδιασμού. Ο σχεδιασμός των οδοστρωμάτων γίνεται συνήθως για 20 έτη, που είναι η τυπική διάρκεια ζωής της FAA. Ωστόσο, μέσω του προγράμματος, δίνεται η δυνατότητα σχεδιασμού για διάρκεια ζωής μεγαλύτερη από 20 έτη.

δ. Κυκλοφορία αεροσκαφών . Για τον καθορισμό της κυκλοφορίας του αεροδρομίου για το οποίο γίνεται ο σχεδιασμός του οδοστρώματος , το λογισμικό παρέχει μια ευρεία βάση δεδομένων αεροσκαφών, κατηγοριοποιημένα στις εξής ομάδες: Γενικά (Generic), Airbus, Boeing, άλλα Εμπορικά, Γενικής Αεροπορίας και Στρατιωτικά – άποψη της οποίας φαίνεται στο σχήμα 3.16.

Aircraft Group

- Generic
- Airbus
- Boeing
- Other Commercial
- General Aviation
- Military
- External Library
- Library Aircraft
- FWD
- SWL-50
- SWL-1.57
- Sngl Whl-30
- B-737-800
- B-747-4whl
- B-757
- B-777-200 A
- A380 1 Body
- A380 1 Wing
- Dual-54
- DT-54
- Triple-Dual-Tand-54

Aircraft Name (7)	Gross Taxi Weight (tns)	Annual Departures	% Annual Growth
A340-600 std	365.200	1,200	0.00
A340-600 std Belly	365.200	1,200	0.00
A380-800	562.001	1,200	0.00
B747-200B Combi Mixd	395.986	832	0.00
B777-200 ER	287.804	425	0.00
DC10-10	207.745	2,263	0.00
Triple-Dual-Tand-54	315.127	1,200	0.00

Float Aircraft

- DC10-10
- B747-200B Combi Mixd
- B777-200 ER
- A340-600 std
- A340-600 std Belly
- A380-800
- Triple-Dual-Tand-54

Buttons: Add, Remove, Save List, Clear List, Save to Float, Add Float, Back, Help, View Gear

Σχήμα 3.16 : Βάση αεροσκαφών λογισμικού FAARFIELD

Για κάθε αεροσκάφος της κυκλοφορίας που καταπονεί το οδόστρωμα, μέσω της βάσης δεδομένων του λογισμικού, παρέχονται τα εξής στοιχεία :

1. Φορτίο αεροσκάφους . Η μέθοδος σχεδιασμού βασίζεται στο μεικτό βάρος του αεροσκάφους. Πιο συγκεκριμένα, θεωρείται πως το 95% του μεικτού βάρους παραλαμβάνεται από τα πίσω φορεία και το 5% από το ρινιαίο φορείο τροχών. Στη βάση δεδομένων του λογισμικού, παρέχονται προτεινόμενα μεικτά βάρη για κάθε αεροσκάφος που επιλέγεται, ωστόσο, είναι στην ευχέρεια του χρήστη να ορίσει το μεικτό βάρος κάθε αεροσκάφους μέσα στο εύρος των επιτρεπόμενων τιμών.

Το οδόστρωμα συνίσταται να μελετηθεί για το μέγιστο αναμενόμενο βάρος απογείωσης του αεροσκάφους στην εγκατάσταση, θεώρηση η οποία οδηγεί σε συντηρητικό σχεδιασμό του οδοστρώματος. Ωστόσο, η θεώρηση αυτή αντισταθμίζει μία άλλη βασική παραδοχή της αναλυτικής μεθόδου της FAA που αφορά την κυκλοφορία: Για τον καθορισμό του αριθμού των διελεύσεων λαμβάνονται υπόψη μόνο οι αναχωρήσεις των αεροσκαφών και αγνοούνται οι αφίξεις τους. Η παραδοχή αυτή βασίζεται στο γεγονός πως τα αεροσκάφη στις περισσότερες περιπτώσεις έχουν σημαντικά μικρότερο βάρος στις αφίξεις σε

σχέση με τις αναχωρήσεις, λόγω της κατανάλωσης του καυσίμου κατά τον κύκλο κίνησης τους.

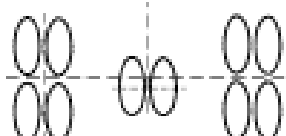
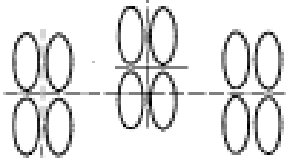
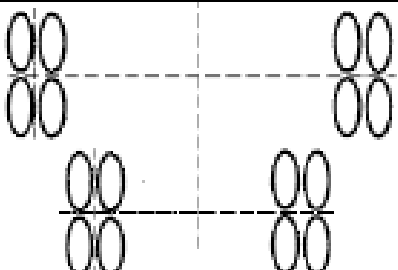
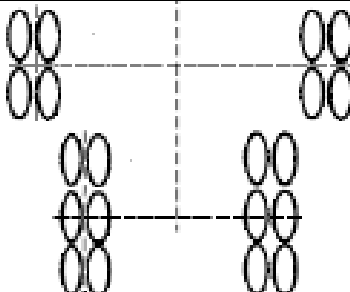
Σύμφωνα με την FAA, ο κύκλος κίνησης ενός αεροσκάφους (TC) ορίζεται από μία απογείωση και μία προσγείωση του ίδιου αεροσκάφους. Σε αυτήν την περίπτωση, ένας κύκλος κίνησης αποτελείται από μία διέλευση το οποίο συνεπάγεται λόγος pass-to-traffic cycle (P/TC) ίσος με 1. Προκειμένου να προσδιοριστούν οι ετήσιες διελεύσεις που απαιτούνται για τη διαδικασία σχεδιασμού, πολλαπλασιάζεται ο αριθμός των αναχωρούντων αεροσκαφών με το λόγο P/TC . Συνήθως, για το σχεδιασμό των περισσότερων οδοστρωμάτων γίνεται η παραδοχή $P/TC = 1$. Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου οι αφίξεις δεν είναι αμελητέες ή όταν το αεροσκάφος πρέπει να κινηθεί στο οδόστρωμα για περισσότερες από μία φορές , συνίσταται να ληφθεί υπόψη ο λόγος P/TC για τον υπολογισμό των ετήσιων διελεύσεων.

2. Τύπος και γεωμετρία συστήματος προσγείωσης . Ο τύπος και η διάταξη του συστήματος των τροχών του αεροσκάφους καθορίζουν την κατανομή του βάρους του και τον τρόπο με τον οποίο το οδόστρωμα θα ανταποκριθεί στην επιβαλλόμενη φόρτιση. Στους πίνακες 3.4 και 3.5 παρουσιάζονται οι συμβολισμοί για τις τυπικές διατάξεις των τροχών σύμφωνα με τις προδιαγραφές της FAA.

Πίνακας 3.4: Τυπικά συστήματα τροχών αεροσκαφών

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

Πίνακας 3.5: Τυπικά συστήματα τροχών αεροσκαφών

Gear Designation	Gear Designation	Airplane Example
2D/D1	 Two Dual Wheels in Tandem Main Gear/Dual Wheel Body Gear	DC10-30/40
2D/2D1	 2D/2D1 Two Dual Wheels in Tandem Main Gear/Two Dual Wheels in Tandem Body Gear	A340-600 std
2D/2D2	 Two Dual Wheels in Tandem Main Gear/Two Dual Wheels in Tandem Body Gear	B747-400
2D/3D2	 Two Dual Wheels in Tandem Main Gear/Three Dual Wheels in Tandem Body Gear	A380-800
5D	 Five Dual Wheels in Tandem Main Gear	An-124

3. Πίεση των ελαστικών . Η πίεση των ελαστικών ποικίλλει ανάλογα με τη διάταξη του συστήματος των τροχών του αεροσκάφους, το μεικτό βάρος και το μέγεθος του ελαστικού.

4. Ετήσιες διελεύσεις. Η πρόβλεψη των ετήσιων διελεύσεων για κάθε αεροσκάφος είναι αναγκαία για το σχεδιασμό του οδοστρώματος. Πληροφορίες σχετικά με τις κινήσεις των αεροσκαφών είναι διαθέσιμες από τα Master plans των αεροδρομίων, τις στατιστικές αναφορές της εναέριας κυκλοφορίας από την εθνική πολιτική αεροπορία του κάθε κράτους στο οποίο υπάγεται το αεροδρόμιο. Για τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, όπου αναπτύχθηκε η αναλυτική μέθοδος, πληροφορίες των κινήσεων των αεροσκαφών διατίθενται από την Terminal Area Forecast (TAF) που είναι η επίσημη πρόβλεψη της αεροπορικής δραστηριότητας της FAA για τα αεροδρόμια των ΗΠΑ, το Εθνικό Σχέδιο Ολοκληρωμένων Συστημάτων Αεροδρομίων (National Plan of Integrated Airport Systems), τα Στατιστικά της Δραστηριότητας των Αεροδρομίων (Airport Activity Statistics) και τις Αναφορές των Δραστηριοτήτων της Εναέριας Κυκλοφορίας της FAA (FAA Air Traffic Activity Reports).

5. Πάχη και ιδιότητες στρώσεων υπόβασης. Έως 3 στρώσεις υπόβασης μπορούν να επιλεγούν για το σχεδιασμό με την αναλυτική μέθοδο. Ο αριθμός των στρώσεων υπόβασης είναι περιορισμένος καθώς έχει αποδειχθεί πως επιλογή περισσότερων από 3 στρώσεις δεν επιφέρει μεγάλη αλλαγή στο εξαγόμενο πάχος της πλάκας, ωστόσο ο υπολογιστικός χρόνος αυξάνεται σημαντικά. Ακολουθεί ο καθορισμός των παχών κάθε στρώσης, με ελάχιστο επιτρεπόμενο πάχος υπόβασης τα 10 cm. Όσον αφορά τα υλικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σταθεροποιημένα (P-301, P-304, P-306, P-401, P-403) και ασύνδετα (P-154, P-208, P-209) , των οποίων οι ιδιότητες εμπεριέχονται στον πίνακα της ενότητας 3.2.3. Ωστόσο, δίνεται και η δυνατότητα της επιλογής στρώσης υπόβασης μεταβλητού μέτρου ελαστικότητας, με ελάχιστη τιμή τα 1723,69 MPa και μέγιστη τιμή τα 4826,33 MPa. Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης σταθεροποιημένης υπόβασης μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στο τελικό πάχος του δύσκαμπτου οδοστρώματος. Σημειώνεται πως για περιπτώσεις αεροσκαφών που υπερβαίνουν τα 45.359 kg (100.000 pounds) , είναι επιτακτική η χρήση στρώσεων υπόβασης από σταθεροποιημένα υλικά με ελάχιστο πάχος στρώσης τα 10 cm.

3.3.2 Διαδικασία σχεδιασμού

Η διαστασιολόγηση ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος έγκειται στον καθορισμό του πάχους της πλάκας σκυροδέματος PCC (Portland Cement Concrete) με δεδομένα τα χαρακτηριστικά των υποκείμενων στρώσεων (στρώσεις υπόβασης και στρώση έδρασης), δεδομένη ετήσια κυκλοφορία, εφελκυστική αντοχή και διάρκεια ζωής σχεδιασμού.

Η μέθοδος λαμβάνει υπόψη μόνο ένα είδος αστοχίας για το δύσκαμπτο οδόστρωμα – τη ρηγμάτωση της πλάκας σκυροδέματος (bottom up cracking) , η οποία ελέγχεται με τον περιορισμό των οριζόντιων εφελκυστικών τάσεων στη βάση της πλάκας σκυροδέματος και δεν λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό ενδεχόμενη αστοχία της στρώσης υπόβασης ή της στρώσης έδρασης για το δύσκαμπτο οδόστρωμα.

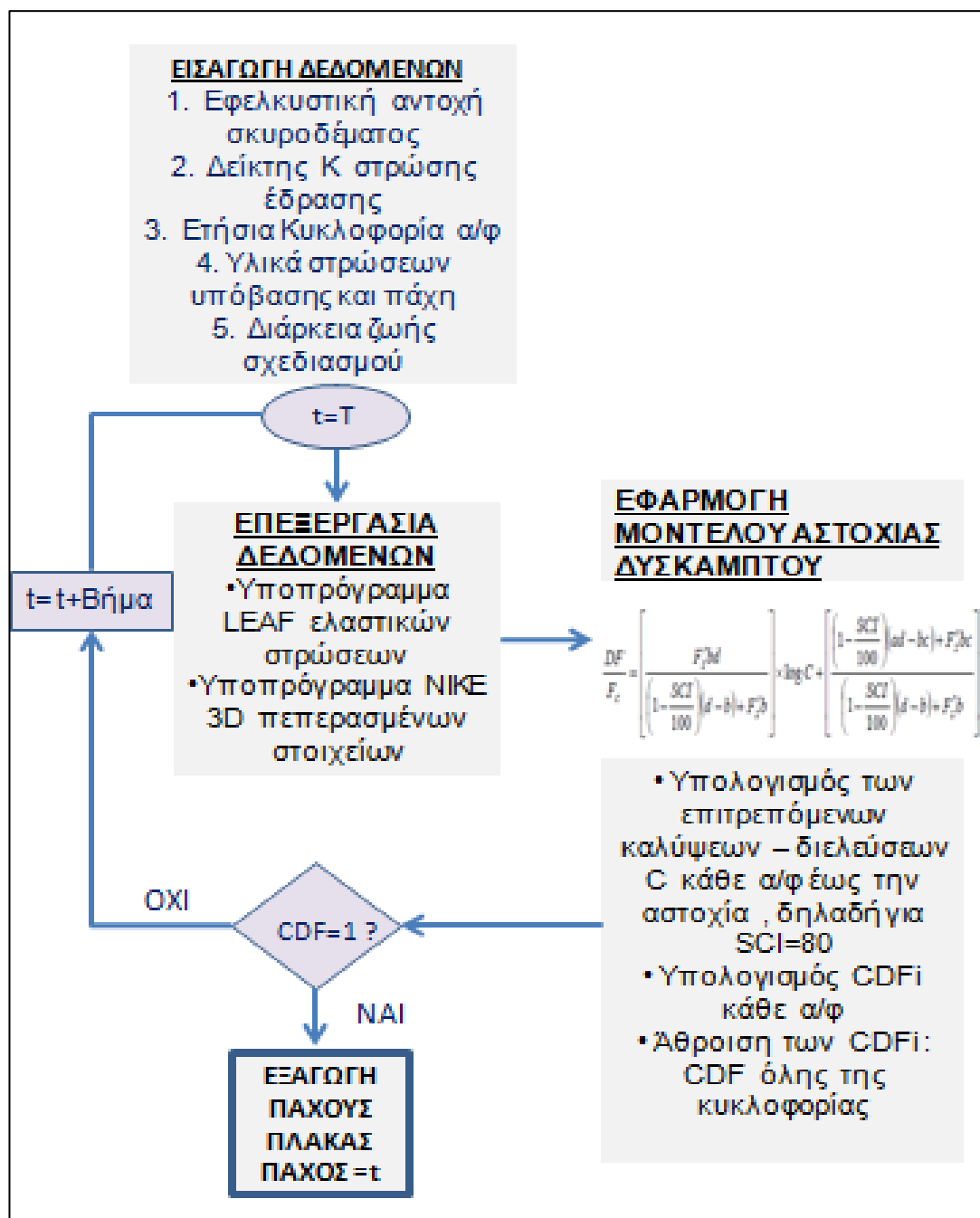
Η σειρά των υπολογισμών που εκτελούνται μετά την εισαγωγή των απαιτούμενων μεταβλητών σχεδιασμού προκειμένου να εξαχθεί το τελικό πάχος της πλάκας σκυροδέματος είναι η εξής:

- Αρχική προεκτίμηση των εσωτερικών τάσεων μέσω του υποπρογράμματος θεωρίας ελαστικών στρώσεων LEAF με σκοπό την εξοικονόμηση χρόνου στους υπολογισμούς .
- Ακριβής υπολογισμός μέγιστης οριζόντιας τάσης στη βάση της πλάκας σκυροδέματος (ακμή) από το υποπρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων NIKE - 3D για κάθε αεροσκάφος και απομείωσή της κατά 25 % (παραδοχή FAA). Το αποτέλεσμα συνήθως είναι κοντά σε αυτό που έχει προκύψει από το LEAF.
- Εφαρμογή μοντέλου αστοχίας δύσκαμπτου οδοστρώματος), όπως αυτό περιγράφεται στην ενότητα 3.2.2 και υπολογισμός καλύψεων – διελεύσεων C για κάθε αεροσκάφος.
- Υπολογισμός φθοράς CDFi κάθε αεροσκάφους που συμμετέχει στην κυκλοφορία.
- Υπολογισμός αθροιστικής φθοράς CDF όλης της κυκλοφορίας.

Όλα τα παραπάνω βήματα επαναλαμβάνονται μεταβάλλοντας κάθε φορά το πάχος της πλάκας σκυροδέματος, έως ότου ο δείκτης CDF λάβει την τιμή 1. Το τελικό πάχος του οδοστρώματος είναι αυτό για το οποίο προκύπτει δείκτης

CDF=1 και ικανοποιούνται συνεπώς όλες οι απαιτήσεις σχεδιασμού. Σημειώνεται πως ελάχιστο πάχος πλάκας σκυροδέματος είναι τα 15 cm (6 inches).

Οι υπολογισμοί που εκτελούνται από το λογισμικό και αναφέρθηκαν παραπάνω συνοψίζονται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 3.11.



Σχήμα 3.17 : Διάγραμμα Ροής αναλυτικής μεθόδου

4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΗΣ FAA

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται σύγκριση των βασικών αρχών και θεωρήσεων των δύο μεθόδων της FAA. Στο πλαίσιο της σύγκρισης, διενεργήθηκε διαστασιολόγηση δύσκαμπτου οδοστρώματος δαπέδου αναμονής αεροδρομίου με κοινή προβλεπόμενη κυκλοφορία, ίδια υλικά και ιδιότητες στρώσεων και διάρκεια ζωής σχεδιασμού ίση με 20 έτη.

4.2 Σύγκριση βασικών αρχών και παραδοχών

Μία από τις βασικότερες διαφοροποιήσεις των δύο μεθόδων είναι ως προς το θεωρητικό τους υπόβαθρο. Πιο συγκεκριμένα, η αναλυτική μέθοδος βασίζεται στη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων (3D FEM) δίνοντας μια ακριβή στατική επίλυση για την καταπόνηση της ακμής της πλάκας σκυροδέματος, προσομοιώνοντας το δύσκαμπτο με αρμούς οδόστρωμα. Αντίθετα, η εμπειρική μέθοδος βασίζεται στις εξισώσεις Westergaard για την εκτίμηση των τάσεων-υποχωρήσεων της πλάκας, εδραζόμενης σε ελατηριωτό έδαφος

Η αναλυτική μέθοδος εισάγει την έννοια του δείκτη αθροιστικής φθοράς CDF, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση όλης της κυκλοφορίας στη φθορά, στην κρίσιμη θέση αστοχίας του δύσκαμπτου οδοστρώματος, τη βάση της πλάκας σκυροδέματος. Απεναντίας, η εμπειρική μέθοδος βασίζεται στην έννοια του αεροσκάφους σχεδιασμού όπου οι συνολικές διελεύσεις μετατρέπονται σε ισοδύναμες διελεύσεις αεροσκάφους σχεδιασμού.

Ο σχεδιασμός με την αναλυτική μέθοδο πραγματοποιείται μέσω του λογισμικού FAARFIELD, ενώ ο σχεδιασμός με την εμπειρική μέθοδο επιτυγχάνεται μέσα από μια σειρά νομογραφημάτων. Επομένως, τα αποτελέσματα ενδεχομένως της αναλυτικής μεθόδου να είναι πιο ακριβή.

Η αναλυτική μέθοδος προσομοιώνει με ακρίβεια τα πολύπλοκα συστήματα διάταξης τροχών και προσγείωσης αεροσκαφών νέας γενιάς, ενώ τα νομογραφήματα της εμπειρικής μεθόδου είναι επαρκή για κυκλοφορίες αεροσκαφών έως διπλού δίδυμου τροχού και για συγκεκριμένους τύπους αεροσκαφών ευρείας ατράκτου.

Το μοντέλο αστοχίας της αναλυτικής μεθόδου είναι «δύο σταδίων» : από την αρηγμάτωση πλάκα έως την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής και από τη εκκίνηση της ρηγμάτωσης έως την αστοχία και βασίζεται σε δοκιμές πλήρους κλίμακας που διενεργήθηκαν στο NAPTF (National Airport Pavement Test Facility). Αντιθέτως, το μοντέλο αστοχίας της εμπειρικής μεθόδου είναι «ενός σταδίου» : η διάρκεια ζωής του οδοστρώματος θεωρείται ως μία ενιαία φάση και βασίζεται κυρίως σε θεωρητικές αναλύσεις μετάδοσης φορτίων και πειραματικά δεδομένα.

Ο λόγος P/C (pass-to-coverage) στην αναλυτική μέθοδο υπολογίζεται μέσω της έννοιας του ενεργού πλάτους ελαστικού , που ορίζεται στην επιφάνεια της πλάκας σκυροδέματος για το δύσκαμπτο οδόστρωμα. Στην εμπειρική μέθοδο, ο λόγος P/C έχει καθορισθεί εμπειρικά μέσω στατιστικών μεθόδων και εξαρτάται από τη διάταξη των τροχών του αεροσκάφους.

Στην αναλυτική μέθοδο, η φέρουσα ικανότητα της στρώσης υπόβασης εκφράζεται μέσω του μέτρου ελαστικότητας E και είναι ανεξάρτητη από τη φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης. Αντίθετα, στην εμπειρική μέθοδο η φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης εκφράζεται από το δείκτη αντίδρασης k. Το ισοδύναμο k κάτω από την πλάκα σκυροδέματος (επιφάνεια υπόβασης) υπολογίζεται από εμπειρικές σχέσεις προτού γίνει ο σχεδιασμός-διαστασιολόγηση της πλάκας.

4.3 Διαστασιολόγηση διατομής δύσκαμπτου οδοστρώματος

4.3.1 Δεδομένα σχεδιασμού

Έπειτα από τη σύγκριση των βασικών αρχών και παραδοχών της εμπειρικής και της αναλυτικής μεθόδου της FAA και την επισήμανση των διαφορών τους, πραγματοποιήθηκε διαστασιολόγηση δύσκαμπτου οδοστρώματος δαπέδου

αναμονής αεροδρομίου προκειμένου να διαπιστωθεί ο βαθμός επιρροής των διαφορετικών θεωρήσεων των δύο μεθόδων στο σχεδιασμό. Πιο συγκεκριμένα, στο πάχος πλάκας σκυροδέματος που αποτελεί το αποτέλεσμα του σχεδιασμού για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα με τις μεθόδους της FAA.

Ο σχεδιασμός έγινε για την προβλεπόμενη ετήσια κυκλοφορία του πίνακα 4.1 και με τις δύο μεθόδους.

Πίνακας 4.1: Προβλεπόμενη κυκλοφορία οδοστρώματος

ΤΥΠΟΣ Α/Φ	ΜΕΙΚΤΟ ΒΑΡΟΣ Α/Φ (lbs)	ΕΤΗΣΙΕΣ ΔΙΕΛΕΥΣΕΙΣ
AIRBUS A 319	150.796	1400
AIRBUS A 320	172.842	2100
B737-400	150.500	1200
B737-800	174.700	1800

Οι υπόλοιπες μεταβλητές που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος με τις μεθόδους της FAA τέθηκαν ως εξής για την ανάλυση του υπόψη δαπέδου αναμονής:

1. Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος: $R = 4,83 \text{ MPa}$ (700 psi) και τυπικό υλικό της FAA το P-501.
2. Κατηγορία στρώσης έδρασης: Η φέρουσα ικανότητα στρώσης έδρασης της περιοχής θεωρήθηκε μέτρια (κατηγορία B) , με δείκτη αντίδρασης $k = 81,4 \text{ MN /m}^3$ (300 lb/in³)
3. Στρώση υπόβασης: επιλέχθηκε υπόβαση από σταθεροποιημένο υλικό (αεροσκάφη με μεικτό βάρος άνω των 100.000 lbs) το P-306 Econocrete με πάχος 4 inches , δηλαδή το ελάχιστο πάχος στρώσης υπόβασης που επιτρέπει η FAA.
4. Διάρκεια ζωής οδοστρώματος : επιλέχθηκε η τυπική διάρκεια ζωής της FAA, δηλαδή τα 20 έτη. Επισημαίνεται πως τα νομογραφήματα της εμπειρικής μεθόδου έχουν συνταχθεί για διάρκεια ζωής 20 ετών, ενώ το λογισμικό της

αναλυτικής μεθόδου επιτρέπει την επιλογή από το χρήστη διαφορετικής διάρκειας ζωής από τα 20 έτη. Ωστόσο, επιλογή διάρκειας ζωής μεγαλύτερης από τα 20 έτη αντίκειται στις προδιαγραφές της FAA.

4.3.2 Διαστασιολόγηση οδοστρώματος με την εμπειρική μέθοδο

Η διαστασιολόγηση του οδοστρώματος πραγματοποιήθηκε με βάση την διαδικασία που περιγράφεται και με τα νομογραφήματα της μεθόδου που παρατίθενται στο κεφάλαιο 2.

Αρχικά, εκτιμήθηκε η φέρουσα ικανότητα της στρώσης υπόβασης με βάση τη φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης από το σχετικό διάγραμμα της μεθόδου και προέκυψε δείκτης αντίδρασης K στρώσης έδρασης ίσος με 95,2 MN/m³ (350 lb/in³).

Καθώς στην εμπειρική μέθοδο, η μεικτή κυκλοφορία ανάγεται σε κυκλοφορία αεροσκάφους σχεδιασμού, με το οποίο γίνονται όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί, χρειάστηκε να καθορισθεί και το αεροσκάφος σχεδιασμού της προβλεπόμενης κυκλοφορίας του αεροδρομίου. Υπενθυμίζεται πως αεροσκάφος σχεδιασμού για το σχεδιασμό δύσκαμπτων οδοστρωμάτων ορίζεται το αεροσκάφος της κυκλοφορίας που προκύπτει πως απαιτεί το μέγιστο πάχος πλάκας σκυροδέματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση αεροσκάφος σχεδιασμού προέκυψε το B737-800, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Απαιτούμενο πάχος πλάκας σκυροδέματος για κάθε αεροσκάφος

Τύπος αεροσκάφους	Απαιτούμενο πάχος πλάκας σκυροδέματος (ίντσες)
A320-200	13,2
A319-100	12,2
B737-400	12
B737-800	13,3

Όλα τα αεροσκάφη της προβλεπόμενης κυκλοφορίας έχουν σύστημα δύο τροχών σε κάθε φορείο, συνεπώς δεν χρειάστηκε η μετατροπή των διελεύσεων τους σε διελεύσεις του συστήματος τροχών του αεροσκάφους σχεδιασμού (R2) . Ωστόσο, χρειάστηκε η μετατροπή των διελεύσεων τους σε ισοδύναμες διελεύσεις αεροσκάφους σχεδιασμού (R1). Για το σκοπό αυτό, υπολογίστηκαν τα φορτία των τροχών για κάθε αεροσκάφος και εφαρμόστηκε η σχέση 2.1 του κεφαλαίου 2 για κάθε αεροσκάφος της κυκλοφορίας. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δίνονται στον πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3 : Ισοδύναμες ετήσιες διελεύσεις R1 για κάθε αεροσκάφος

Τύπος αεροσκάφους	Ισοδύναμες ετήσιες διελεύσεις R1
A320-200	2005
A319-100	844
B737-400	725
B737-800	1800

Οι συνολικές ισοδύναμες ετήσιες διελεύσεις προέκυψαν ίσες με 5374 . Έχοντας όλες τις απαραίτητες παραμέτρους εισόδου που απαιτούν τα νομογραφήματα και ακολουθώντας τη διαδικασία που αναλύεται στο κεφάλαιο 2, προέκυψε η παρακάτω διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος (σχήμα 4.1) με πάχος πλάκας σκυροδέματος ίση με 37 cm.



Σχήμα 4.1: Διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος – εμπειρική μέθοδος

4.3.3 Διαστασιολόγηση οδοστρώματος με την αναλυτική μέθοδο

Η διαστασιολόγηση του οδοστρώματος με την αναλυτική μέθοδο πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού FAARFIELD της FAA, οι δυνατότητες του οποίου αναλύονται εκτενώς στο κεφάλαιο 3.

Για το σχεδιασμό με το υπόψη λογισμικό, επιλέχθηκε αρχικά από τη βάση δεδομένων αεροσκαφών που διαθέτει, η προβλεπόμενη κυκλοφορία του οδοστρώματος αεροδρομίου που εξετάζεται στην παρούσα εργασία (Σχήμα 4.2)

The screenshot shows the FAARFIELD software interface. On the left, there is a 'Library Airplanes' list with various aircraft models. The main area displays a table of airplane data. Below the table are several control buttons for managing the list and generating reports.

Airplane Name (4)	Gross Taxi Weight (tns)	Annual Departures	% Annual Growth	De
A320-200 Twin opt	78,400	2.100	0.00	42
A319-100 opt	68,400	1.400	0.00	24
B737-400	68,266	1.200	0.00	24
B737-800	79,243	1.800	0.00	36

Buttons: Add, Remove, Save List, Clear List, Save to Float, Add Float, Back, Help, CDF Graph, View Gear, Float Airplanes.

Σχήμα 4.2: Προβλεπόμενη κυκλοφορία οδοστρώματος

Ακολουθως, εισήχθησαν η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, το σταθεροποιημένο υλικό της στρώσης υπόβασης καθώς και το πάχος της και η φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης στη σχετική επιφάνεια εργασίας του λογισμικού. Σημειώνεται πως το μέτρο ελαστικότητας E της στρώσης υπόβασης δεν μπορεί να μεταβληθεί, εφόσον πρόκειται για τυπικό υλικό σταθεροποιημένης υπόβασης της FAA (P-306 Econocrete) και το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης που χρησιμοποιείται από τους υπολογισμούς μετατρέπεται από τον δείκτη k μέσω της σχέσης 3.1.

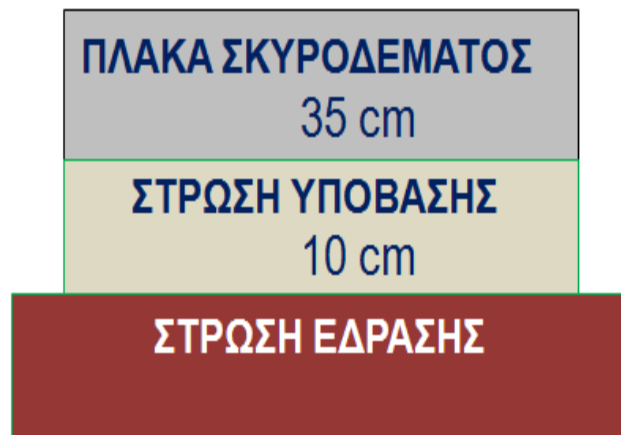
Layer Material	Thickness (mm)	Modulus or R (MPa)
PCC Surface	329.1	4.83
P-306 Econocrete	101.6	4.826,33
Subgrade	k = 81.6	272.43

Total thickness to the top of the subgrade, t = 430.7 mm

Σχήμα 4.3: Υλικά στρώσεων και ιδιότητες

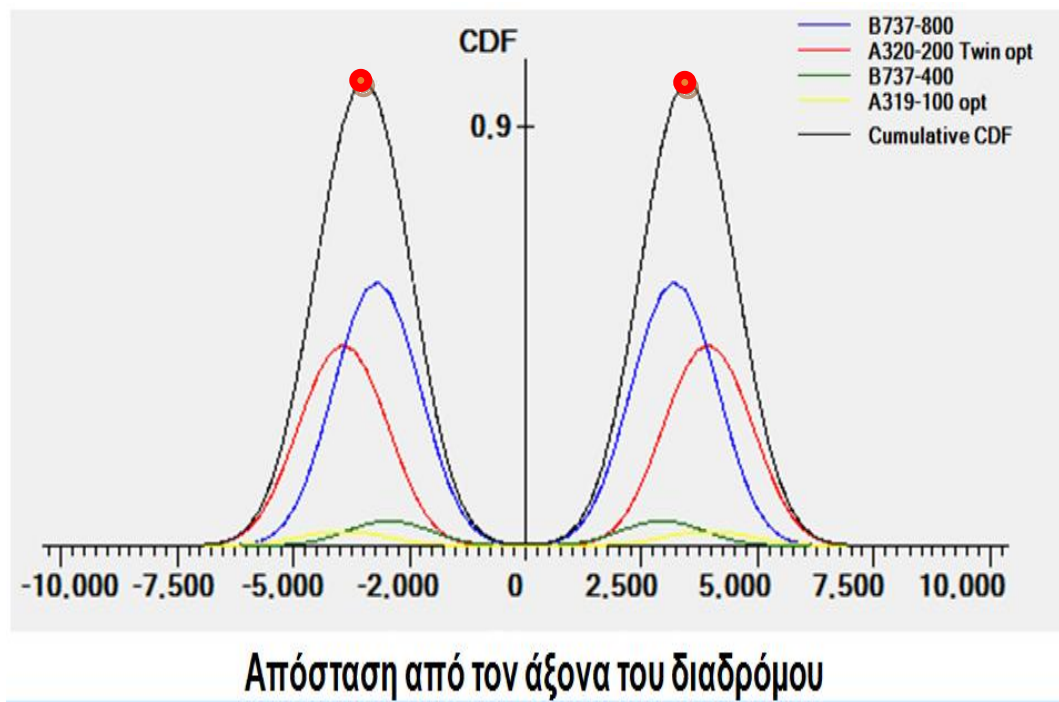
Μέσα από την επαναληπτική διαδικασία υπολογισμών με αλληπάλληλες μεταβολές του πάχους της πλάκας σκυροδέματος έως ότου ο δείκτης αθροιστικής φθοράς CDF φτάσει την τιμή 1, όπως περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3 αλλά και από το διάγραμμα ροής του σχήματος 3.11, εξάγεται το απαιτούμενο πάχος της πλάκας σκυροδέματος.

Η διατομή σχεδιασμού που προέκυψε από την αναλυτική μέθοδο φαίνεται στο σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος- αναλυτική μέθοδος

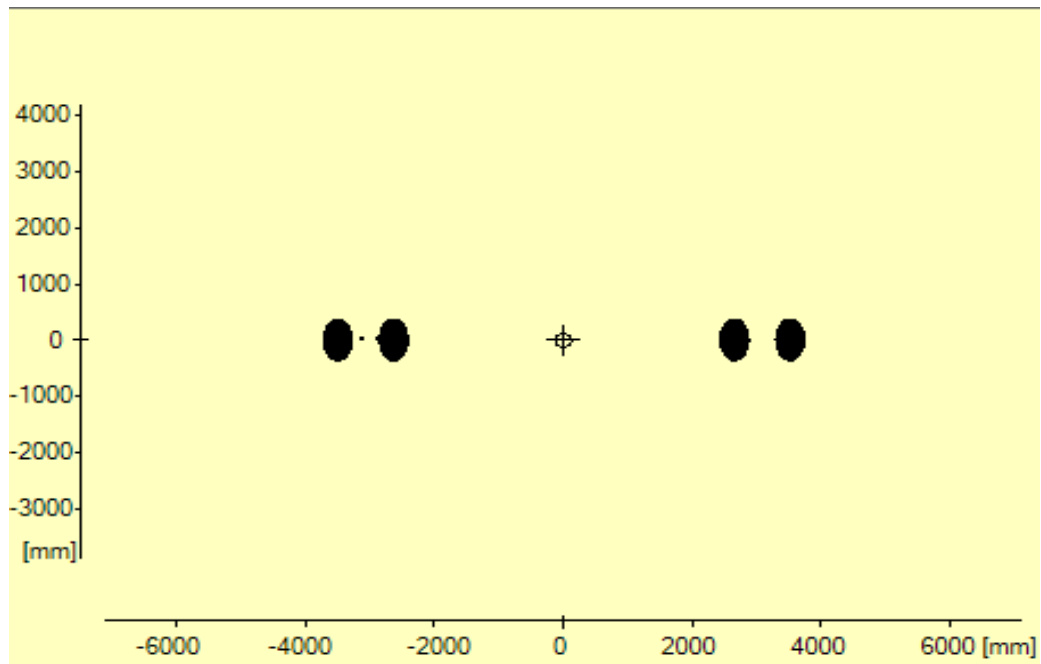
Το γράφημα του δείκτη φθοράς CDF για την κυκλοφορία του εξεταζόμενου οδοστρώματος φαίνεται στο σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5: Γράφημα αθροιστικής φθοράς κυκλοφορίας σε σχέση με τον άξονα του διαδρόμου

Από το γράφημα προκύπτει πως δυσμενέστερο για τη φθορά του οδοστρώματος είναι το αεροσκάφος B737-800 και κρίσιμα σημεία του διαδρόμου για την φθορά του οδοστρώματος τα προσημασμένα στο γράφημα.

Το σύστημα διάταξης των τροχών του δυσμενέστερου για τη φθορά του οδοστρώματος αεροσκάφους (B737-800) στο αναλυτικό σύστημα, παρατίθεται στο σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Διάταξη τροχών αεροσκάφους B737-800 στο αναλυτικό σύστημα

Η αναλυτική μέθοδος, μέσω του λογισμικού παρέχει και πληροφορίες σχετικά με κάθε αεροσκάφος που αφορούν την επίδραση του στη φθορά του οδοστρώματος. Τέτοιες πληροφορίες είναι η συνεισφορά κάθε αεροσκάφους στο συνολικό δείκτη CDF (CDF Contribution), ο μέγιστος δείκτης CDF (CDF Max for Airplane) κάθε αεροσκάφους καθώς και ο λόγος P/C (P/C ratio) για κάθε αεροσκάφος (σχήμα 4.7).

Airplane Name (4)	CDF Contribution	CDF Max for Airplane	P/C Ratio
A320-200 Twin opt	0,38	0,43	3,67
A319-100 opt	0,03	0,03	3,84
B737-400	0,05	0,05	3,51
B737-800	0,55	0,57	3,52

Σχήμα 4.7: Πληροφορίες αεροσκαφών σχετικές με τη φθορά του εξεταζόμενου δύσκαμπτου οδοστρώματος

4.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στο σχήμα 4.8 φαίνονται συγκριτικά οι διατομές που προέκυψαν από την διαδικασία που περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες.



Σχήμα 4.8: Συγκριτικά αποτελέσματα μεθόδων σχεδιασμού FAA

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων, διαπιστώνεται πως η απόκλιση στα πάχη είναι μικρή, παρά τα διαφορετικά θεωρητικά υπόβαθρα των δύο μεθόδων και τις διαφορές στη διαδικασία σχεδιασμού.

Ενδεχομένως αυτό θα μπορούσε να δικαιολογηθεί από το γεγονός πως επιδίωξη της FAA είναι η συμβατότητα των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων, κυρίως όταν πρόκειται να αξιολογηθεί ένα οδόστρωμα που έχει σχεδιασθεί με την εμπειρική μέθοδο. Αυτή είναι η σημασία του δείκτη F_c (Calibration Factor) στο μοντέλο αστοχίας που αναλύεται εκτενώς στο 3^ο κεφάλαιο και η τιμή του καθορίστηκε έπειτα από πολλές διερευνήσεις και δοκιμές πλήρους κλίμακας υπό την προσπάθεια βελτιστοποίησης της συμβατότητας των αποτελεσμάτων των 2 μεθόδων. Επιπλέον, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας στο λογισμικό της αναλυτικής μεθόδου που έχει μια καθορισμένη τιμή ανεξάρτητη της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος, έχει προκύψει στα 27,6 GPa έπειτα από διερευνήσεις και συγκριτικές αναλύσεις που είχαν και πάλι στόχο την επίτευξη συμβατότητας των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων.

Από τη συγκριτική ανάλυση των δύο μεθόδων, προέκυψε πως παρά τις μεγάλες διαφορές ως προς τις βασικές τους αρχές, τα αποτελέσματα τους δεν παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις. Για το λόγο αυτό, κρίθηκε σκόπιμη η διερεύνηση της επίδρασης των βασικών παραμέτρων στο σχεδιασμό με την αναλυτική μέθοδο, ώστε να διαφανεί η καθοριστικότητα τους και να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα για τον αναλυτή στο πλαίσιο της διαστασιολόγησης.

5. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΑΡΧΩΝ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ FAA

5.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια του παρόντος κεφαλαίου πραγματοποιείται εμβάθυνση στις παραμέτρους σχεδιασμού, ώστε να αναδειχθεί ποιες κρίνονται καθοριστικότερες για το σχεδιασμό. Για αυτό το σκοπό, διενεργήθηκαν διερευνήσεις σχετικά με την επιρροή των παραμέτρων σχεδιασμού στη διαστασιολόγηση του δύσκαμπτου οδοστρώματος και στο δείκτη αθροιστικής φθοράς CDF που αποτελεί το βασικό κριτήριο σχεδιασμού της αναλυτικής μεθόδου.

5.2 Διερεύνηση επιρροής παραμέτρων σχεδιασμού στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος

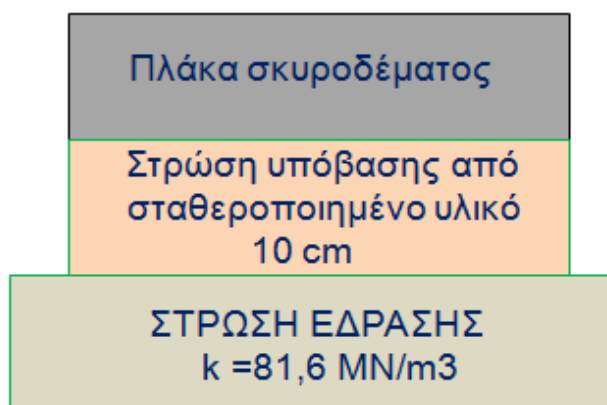
Προκειμένου να διαφανεί η επιρροή των παραμέτρων σχεδιασμού στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος, διενεργήθηκαν αναλύσεις ευαισθησίας του πάχους της πλάκας σκυροδέματος ως προς την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, το πάχος της υπόβασης, το μέτρο ελαστικότητας της υπόβασης και το δείκτη αντίδρασης k . Ανάλυση ευαισθησίας του πάχους της πλάκας ως προς το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος δεν πραγματοποιήθηκε, καθότι το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος έχει καθορισμένη τιμή στην αναλυτική μέθοδο ίση με 27,6 GPa και δεν μπορεί να μεταβληθεί. Για τη διερεύνηση θεωρήθηκε πως η πλάκα σκυροδέματος αποτελείται από το τυπικό υλικό της FAA P-501 και η εδαφική κατηγορία ορίστηκε ως μέση με δείκτη αντίδρασης εδάφους $k = 81,6 \text{ MN/m}^3$. Η προβλεπόμενη κυκλοφορία του οδοστρώματος θεωρήθηκε κοινή σε όλες τις αναλύσεις και παρουσιάζεται στον πίνακα 5.1. Η διάρκεια ζωής για το σχεδιασμό του οδοστρώματος ορίστηκε ίση με 20 έτη

Πίνακας 5.1: Προβλεπόμενη κυκλοφορία διερευνήσεων

ΤΥΠΟΣ Α/Φ	ΕΤΗΣΙΕΣ ΔΙΕΛΕΥΣΕΙΣ
AIRBUS A 319	1400
AIRBUS A 320	2100
B737-400	1200
B737-800	1800

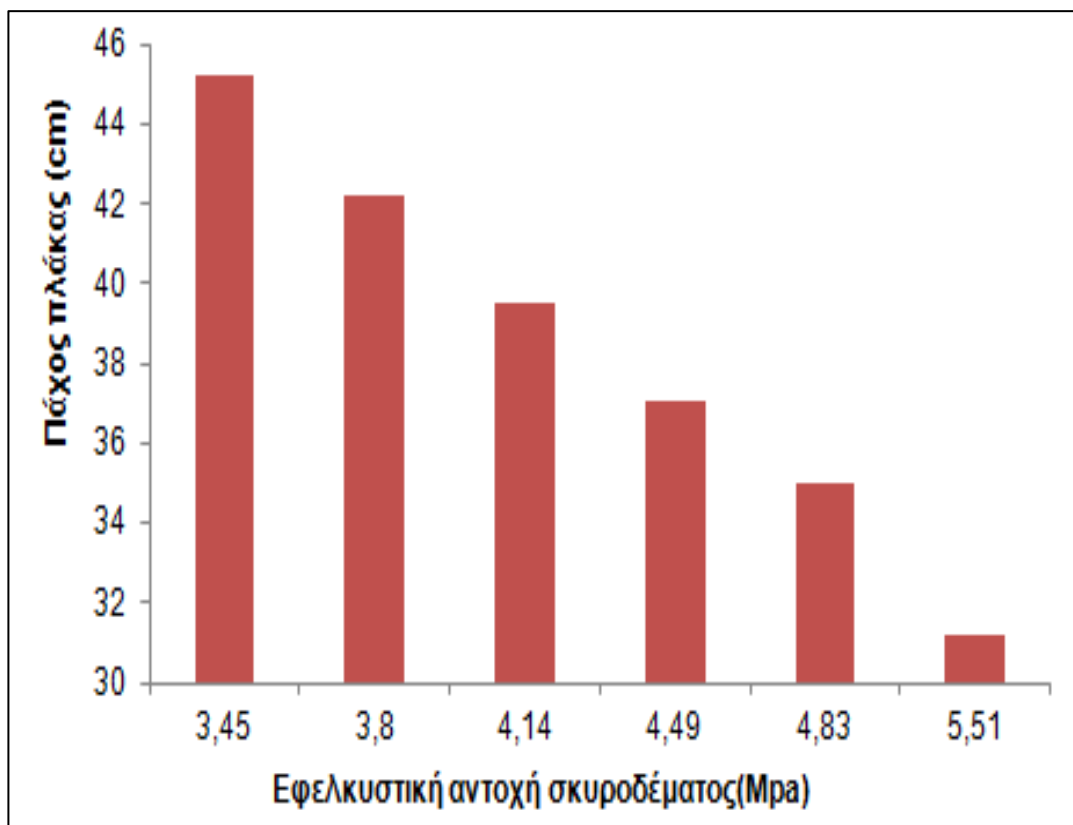
5.2.1 Ανάλυση ευαισθησίας πάχους πλάκας σκυροδέματος ως προς την εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος.

Αρχικά, επιλέχθηκε να διενεργηθεί μια ανάλυση ευαισθησίας του πάχους της πλάκας σκυροδέματος ως προς τη μεταβολή της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Η διατομή που εξετάστηκε αποτελείται από στρώσεις με τα τυπικά υλικά της FAA. Πιο συγκεκριμένα, για την πλάκα σκυροδέματος θεωρήθηκε τυπικό υλικό P-501 και P-306 Econocrete για τη στρώση σταθεροποιημένης υπόβασης πάχους 10 cm με καθορισμένο μέτρο ελαστικότητας $E = 4826,33 \text{ MPa}$.



Σχήμα 5.1: Διατομή διερεύνησης για την επίδραση της μεταβολής της εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος

Η τιμή της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος κυμάνθηκε από 3,45 έως 5,51 MPa και με αλληπάλληλες δοκιμές υπολογίστηκε το πάχος της πλάκας σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα της διερεύνησης παρουσιάζονται στο ραβδόγραμμα του σχήματος 5.2 .



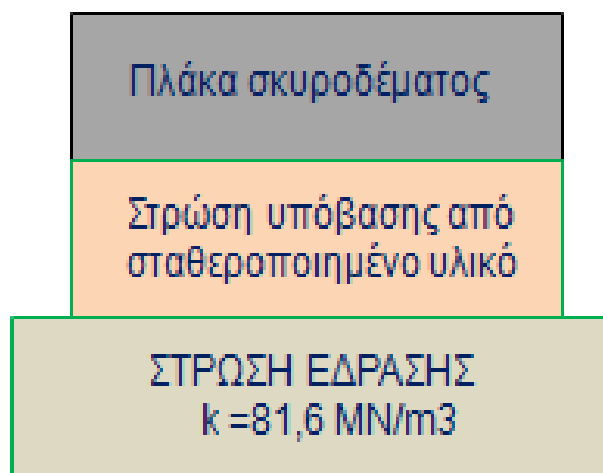
Σχήμα 5.2: Επίδραση της μεταβολής της εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος

Από το σχήμα 5.2 προκύπτει ότι αύξηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος επιφέρει σημαντική μείωση του τελικού πάχους πλάκας σκυροδέματος που προκύπτει από το σχεδιασμό. Συγκεκριμένα, για αύξηση της παραμέτρου από 3,45 σε 5,51 MPa (επιτρεπόμενα όρια), το απαιτούμενο πάχος της πλάκας μειώνεται περίπου κατά 14 cm (30,93 %).

5.2.2 Ανάλυση ευαισθησίας πάχους πλάκας σκυροδέματος ως προς το πάχος της σταθεροποιημένης στρώσης υπόβασης.

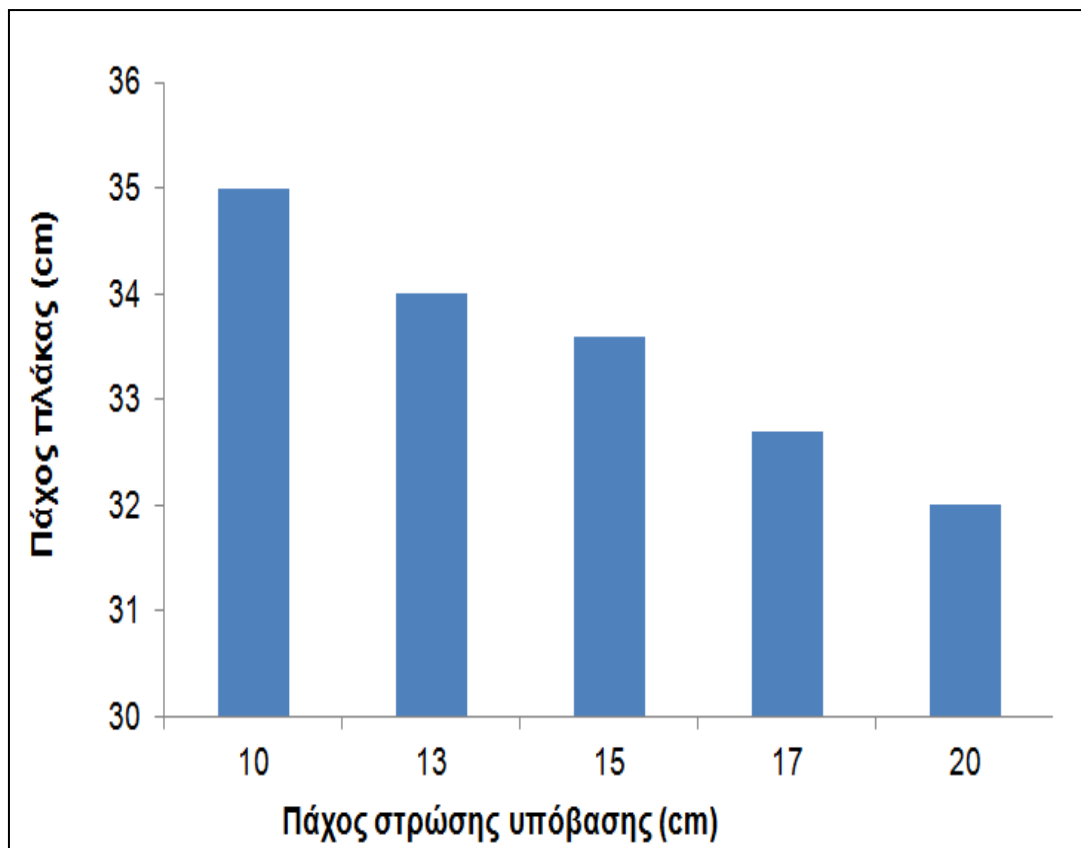
Ακολούθως, διενεργήθηκε ανάλυση ευαισθησίας ως προς το πάχος της

στρώσης υπόβασης. Η διατομή διερεύνησης αποτελείται από το τυπικό υλικό της FAA για σταθεροποιημένη υπόβαση P-306 Econocrete και φαίνεται στο σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3 : Διατομή διερεύνησης για την επίδραση της μεταβολής του πάχους σταθεροποιημένης υπόβασης στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος

Η τιμή του πάχους της σταθεροποιημένης υπόβασης κυμάνθηκε από 10 έως 20 cm, δεδομένου πως ελάχιστο απαιτούμενο πάχος στρώσης υπόβασης είναι τα 10 cm κατά το σχεδιασμό με την αναλυτική μέθοδο. Τα αποτελέσματα της διερεύνησης παρουσιάζονται στο ραβδόγραμμα του σχήματος 5.4.

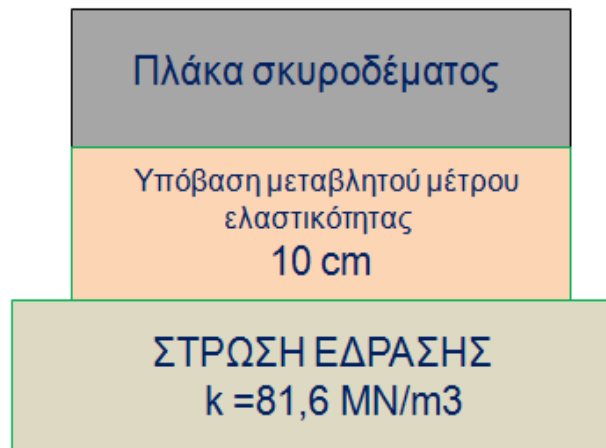


Σχήμα 5.4 : Επίδραση της μεταβολής του πάχους σταθεροποιημένης υπόβασης στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος

Από το σχήμα 5.4 προκύπτει ότι αύξηση του πάχους της στρώσης υπόβασης επιφέρει μείωση του τελικού πάχους πλάκας σκυροδέματος που προκύπτει από το σχεδιασμό. Συγκεκριμένα, για αύξηση της σταθεροποιημένης υπόβασης από 10 έως 20 cm , το απαιτούμενο πάχος της πλάκας μειώνεται κατά 3 cm και ποσοστιαία κατά 8,57 %.

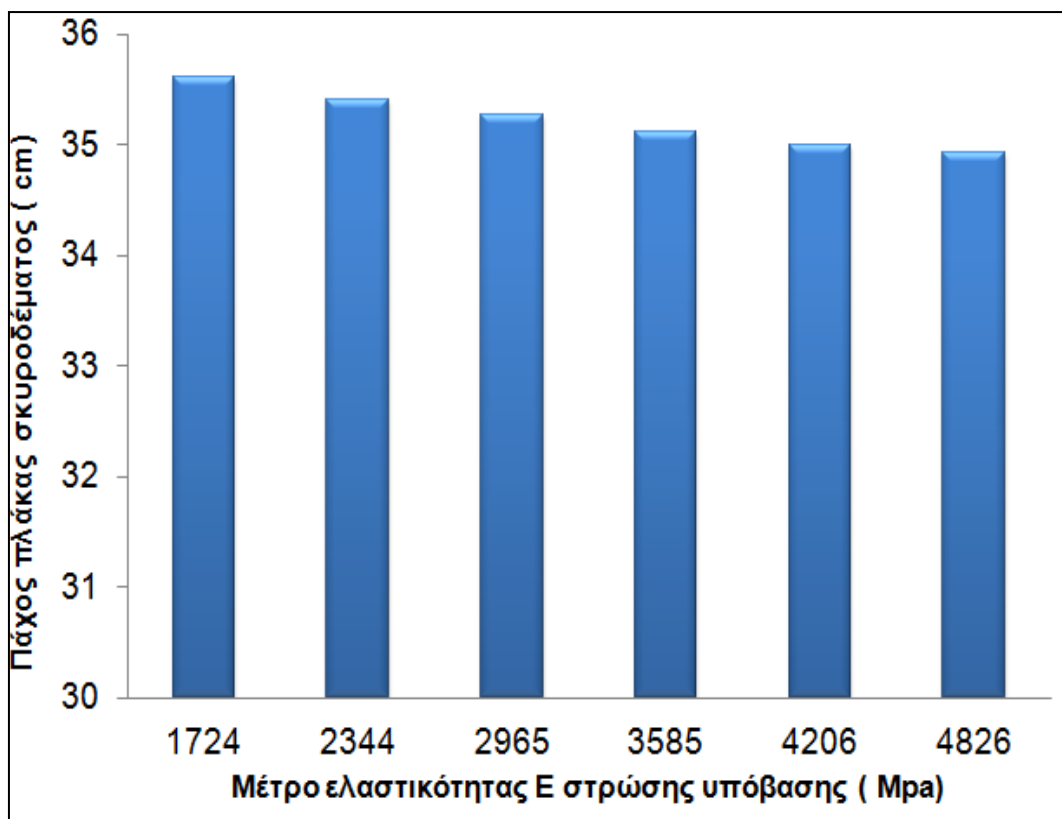
5.2.3 Ανάλυση ευαισθησίας πάχους πλάκας σκυροδέματος ως προς το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης σταθεροποιημένης υπόβασης.

Στη συγκεκριμένη ανάλυση ευαισθησίας, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης σταθεροποιημένης υπόβασης στο σχεδιασμό, εξετάσθηκε διατομή με σταθεροποιημένη στρώση υπόβασης μεταβλητού μέτρου ελαστικότητας πάχους 10 cm, η οποία αποτυπώνεται στο σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5: Διατομή διερεύνησης για την επίδραση της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας σταθεροποιημένης υπόβασης στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος

Το μέτρο ελαστικότητας της σταθεροποιημένης στρώσης υπόβασης μεταβλήθηκε μεταξύ των επιτρεπόμενων ορίων, δηλαδή μεταξύ 1723,69 – 4826,33 MPa. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στο ραβδόγραμμα του σχήματος 5.6.

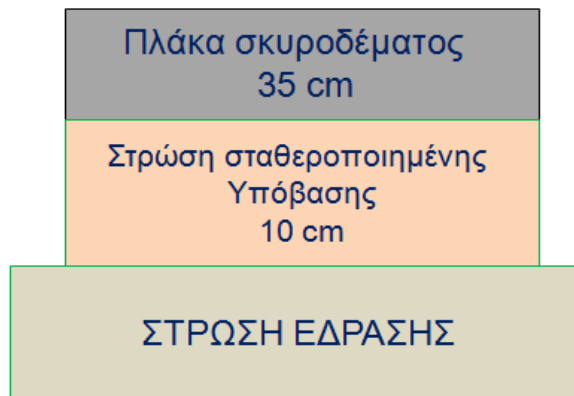


Σχήμα 5.6: Επίδραση της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας σταθεροποιημένης υπόβασης στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος

Από το σχήμα 5.6 προκύπτει ότι αύξηση του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης υπόβασης επιφέρει μείωση του πάχους πλάκας σκυροδέματος που σχεδιάζεται, ωστόσο αυτή η μείωση είναι μικρή. Ειδικότερα, για διακύμανση του μέτρου ελαστικότητας στο επιτρεπόμενο εύρος τιμών, σημειώνεται μείωση του πάχους της πλάκας της τάξης των 0,7 cm και ποσοστιαία 1,9%.

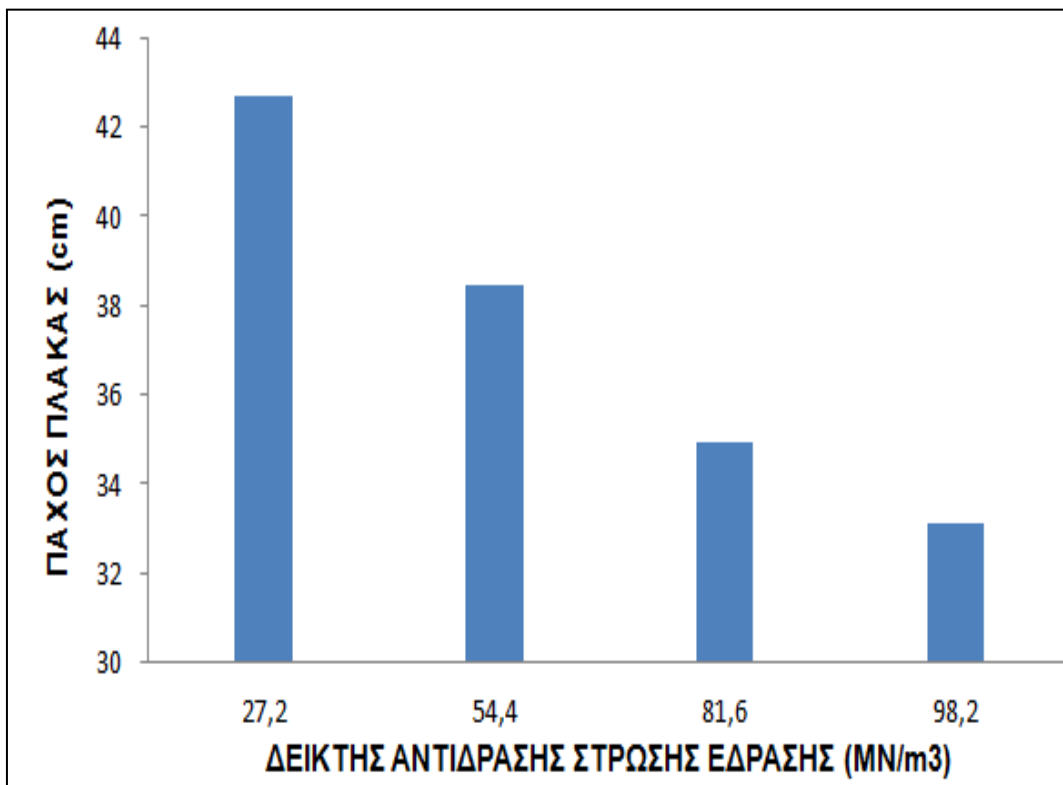
5.2.4 Ανάλυση ευαισθησίας πάχους πλάκας σκυροδέματος ως προς το δείκτη αντίδρασης στρώσης έδρασης

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται ο βαθμός ευαισθησίας του υπολογιζόμενου πάχους πλάκας στη φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης, η οποία εκφράζεται μέσω του δείκτη αντίδρασης εδάφους K. Η διατομή διερεύνησης παρουσιάζεται στο σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7: Διατομή διερεύνησης για την επίδραση της μεταβολής του δείκτη αντίδρασης K της στρώσης έδρασης στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος

Το εύρος μεταβολής του δείκτη αντίδρασης στρώσης έδρασης κυμάνθηκε από 27,2 έως 98,2 MN/m^3 (επιτρεπόμενες τιμές) και τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στο ραβδόγραμμα του σχήματος 5.8.

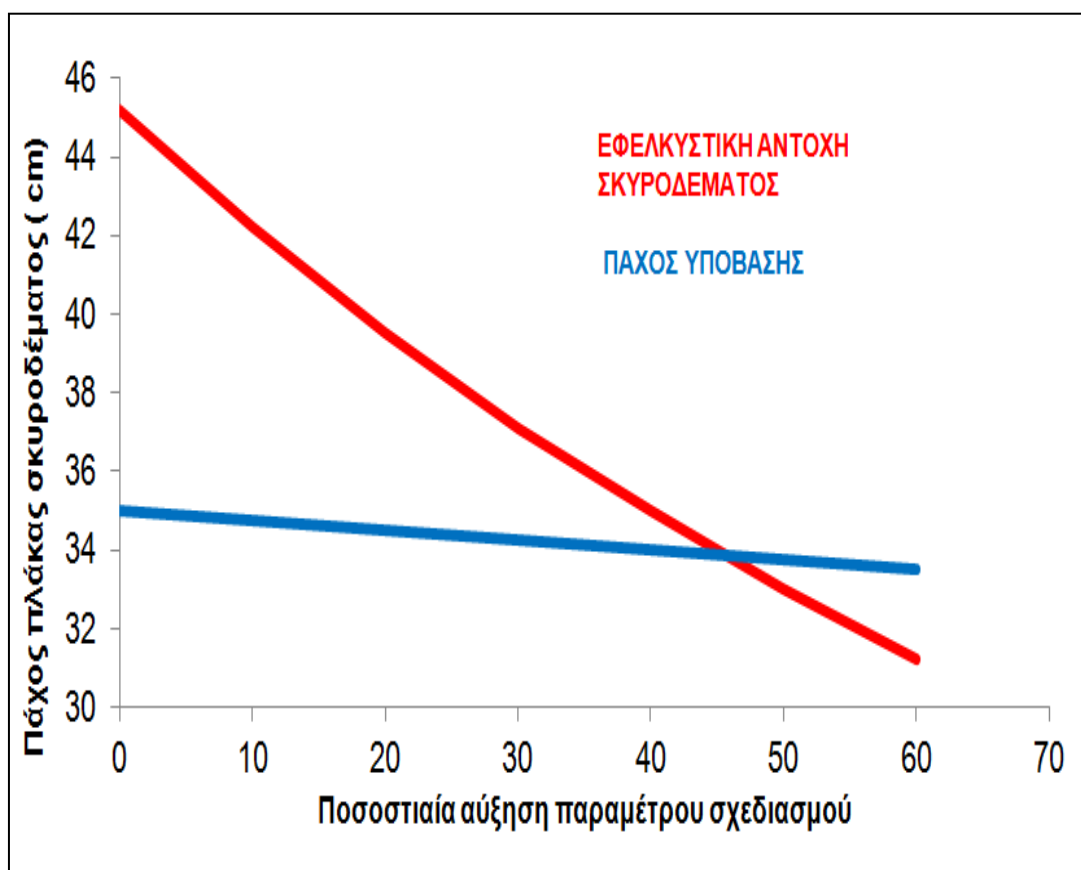


Σχήμα 5.8: Επίδραση της μεταβολής του δείκτη αντίδρασης εδάφους K στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος

Από το σχήμα 5.8 προκύπτει πως αύξηση της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης προκαλεί μείωση στο πάχος της πλάκας κατά περίπου 10 cm (23 %), γεγονός που υπογραμμίζει τη σημασία της αντοχής του εδαφικού υλικού στο σχεδιασμό.

Προκειμένου, να γίνει μια συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις αναλύσεις ευαισθησίας ως προς τις παραμέτρους σχεδιασμού, συντάχθηκε διάγραμμα μεταβολής του πάχους πλάκας σκυροδέματος σε σχέση με την ποσοστιαία αύξηση της εκάστοτε παραμέτρου σχεδιασμού. Οι παράμετροι σχεδιασμού που συγκρίθηκαν ως προς την επίδραση τους στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος είναι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος και το πάχος της σταθεροποιημένης υπόβασης, καθότι το μέγεθος του εύρους των επιτρεπόμενων τιμών τους επιτρέπει τη σύγκριση της ποσοστιαίας αύξησης τους από την αρχική τους τιμή.

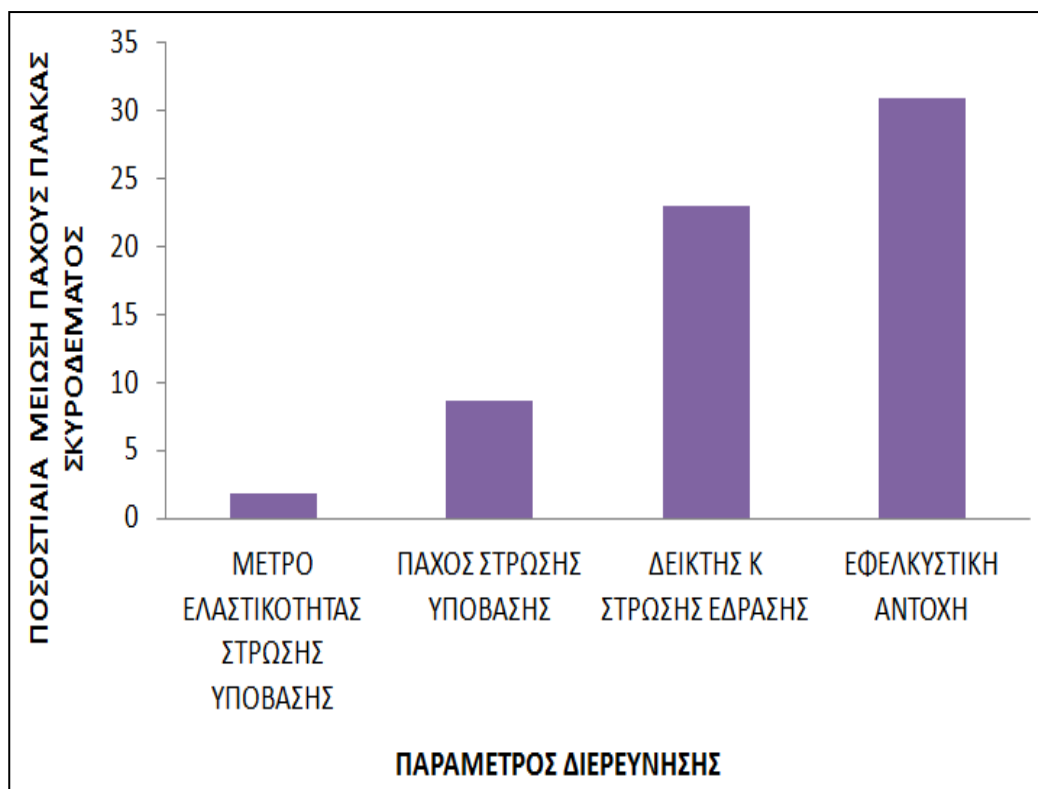
Για το διάγραμμα που συντάχθηκε, η αρχική τιμή της εφελκυστικής αντοχής είναι 3,45 Mpa και η αρχική τιμή της στρώσης υπόβασης 10 cm. Οι δύο αυτές παράμετροι αυξάνονταν κάθε φορά κατά 10 % και προέκυπτε το πάχος της πλάκας που απαιτείται. Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας παρουσιάζονται στο σχήμα 5.9.



Σχήμα 5.9: Σύγκριση βαθμού ευαισθησίας πάχους πλάκας σκυροδέματος ως προς την εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος και το πάχος σταθεροποιημένης υπόβασης

Από το συγκριτικό διάγραμμα του σχήματος 5.9 προκύπτει πως το απαιτούμενο πάχος της πλάκας σκυροδέματος που αποτελεί το αποτέλεσμα του σχεδιασμού για ένα δύσκαμπτο οδόστρωμα αεροδρομίου, εμφανίζει μεγαλύτερο βαθμό ευαισθησίας ως προς την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του οδοστρώματος.

Καταλήγοντας, για κάθε παράμετρο που διερευνήθηκε αυξάνοντας την τιμή της από την αρχική επιτρεπόμενη τιμή, παρατήρηθηκε μείωση του απαιτούμενου πάχους της πλάκας σκυροδέματος. Η ποσοστιαία μείωση του πάχους της πλάκας σκυροδέματος για κάθε παράμετρο που διερευνήθηκε, συνοψίζεται στο ραβδόγραμμα του σχήματος 5.10.



Σχήμα 5.10: Ποσοστιαία μείωση πάχους πλάκας σκυροδέματος για κάθε παράμετρο διερεύνησης

Από το σχήμα 5.10, προκύπτει μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση του απαιτούμενου πάχους πλάκας σκυροδέματος για αύξηση της παραμέτρου της εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος. Επομένως, καθοριστική παράμετρος για το σχεδιασμό αναδεικνύεται η επιλογή της εφελκυστικής αντοχής και της ποιότητας του σκυροδέματος που θα χρησιμοποιηθεί. Το γεγονός αυτό υπογραμμίζει την αναγκαιότητα χρήσης σκυροδέματος κατά την κατασκευή του οδοστρώματος, ίσης εφελκυστικής αντοχής με αυτήν που λήφθηκε υπόψη κατά το σχεδιασμό.

5.3 Διερεύνηση επίδρασης παραμέτρων σχεδιασμού στο δείκτη αθροιστικής φθοράς

Δεδομένου ότι ο δείκτης αθροιστικής φθοράς CDF αποτελεί το βασικό κριτήριο σχεδιασμού και συνδέεται με το μοντέλο αστοχίας της αναλυτικής μεθόδου που βασίζεται στο νόμο κοπώσεως του σκυροδέματος, κρίθηκε σκόπιμη η διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων σχεδιασμού στο δείκτη αθροιστικής φθοράς. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η επίδραση της μεταβολής της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος, του πάχους της πλάκας σκυροδέματος,

του πάχους σταθεροποιημένης υπόβασης και του δείκτη αντίδρασης εδάφους. Η προβλεπόμενη κυκλοφορία σε όλες τις διερευνήσεις είναι κοινή και περιλαμβάνεται στον πίνακα 5.1. Το υλικό της σταθεροποιημένης υπόβασης είναι το P-306 Econocrete και η διάρκεια ζωής σχεδιασμού ορίστηκε ίση με 20 έτη.

Υπενθυμίζεται το μοντέλο αστοχίας της αναλυτικής μεθόδου για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων και η σχέση υπολογισμού του δείκτη CDF, που αναλύονται εκτενέστερα στο κεφάλαιο 3.

$$\frac{DF}{F_c} = \left[\frac{F_s'bd}{\left(1 - \frac{SCI}{100}\right)(d-b) + F_s'b} \right] \times \log C + \left[\frac{\left(1 - \frac{SCI}{100}\right)(ad-bc) + F_s'bc}{\left(1 - \frac{SCI}{100}\right)(d-b) + F_s'b} \right]$$

Όπου

DF: ο συντελεστής σχεδιασμού που ισούται με το λόγο της εφελκυστικής αντοχής **R** προς την υπολογιζόμενη τάση **σ** από το υποπρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων

SCI: Δείκτης δομικής κατάστασης με τιμή 80 για διαστασιολόγηση με διάρκεια ζωής 20 έτη. (SCI=80 για αστοχία οδοστρώματος)

F_{cal} : συντελεστής βαθμονόμησης με τιμή 1,13

F's : συντελεστής σταθεροποιημένης βάσης (F's≤1)

Παράμετροι : a= 0.5878, b= 0.2523, c= 0.7409, d=0.2456

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

Για την εκτίμηση του δείκτη CDF με την αναλυτική μέθοδο πραγματοποιούνται με την εξής σειρά:

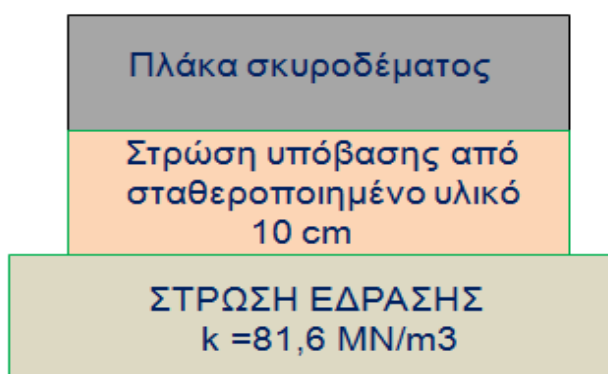
1. Υπολογισμός μέγιστης οριζόντιας τάσης σ από κάθε αεροσκάφος της κυκλοφορίας
2. Εφαρμογή του μοντέλου αστοχίας με την τάση σ που υπολογίστηκε και με τις τιμές όλων των υπόλοιπων συντελεστών και της

εφελκυστικής αντοχής που έχει επιλεγθεί ώστε να προκύψουν οι καλύψεις – διελεύσεις έως την αστοχία C

3. Υπολογισμός του δείκτη CDF για τις επιτρεπόμενες καλύψεις – διελεύσεις C που προέκυψαν.

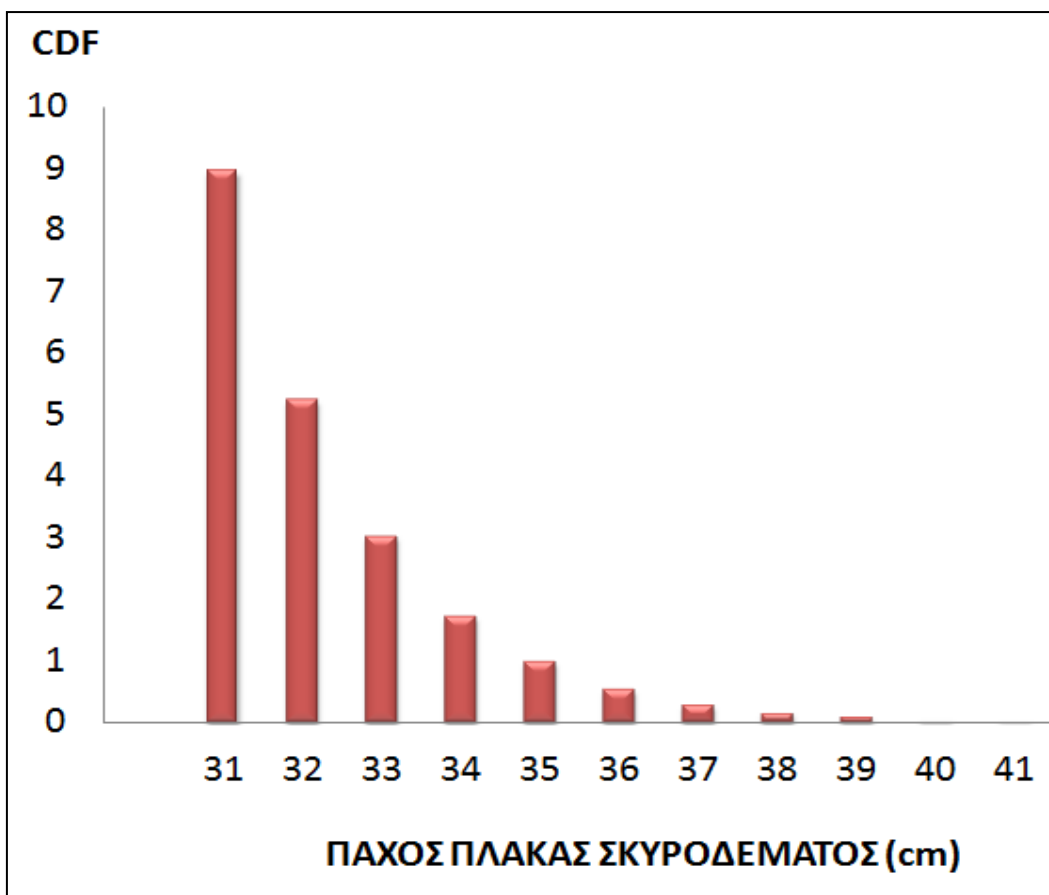
5.3.1 Επίδραση πάχους πλάκας σκυροδέματος στο δείκτη αθροιστικής φθοράς

Αρχικά, διερευνήθηκε η μεταβολή του δείκτη CDF έναντι της μεταβολής του πάχους της πλάκας σκυροδέματος. Η διατομή που διερευνήθηκε φαίνεται στο σχήμα 5.11.



Σχήμα 5.11: Διατομή διερεύνησης για την επίδραση της μεταβολής του πάχους της πλάκας σκυροδέματος στο δείκτη αθροιστικής φθοράς

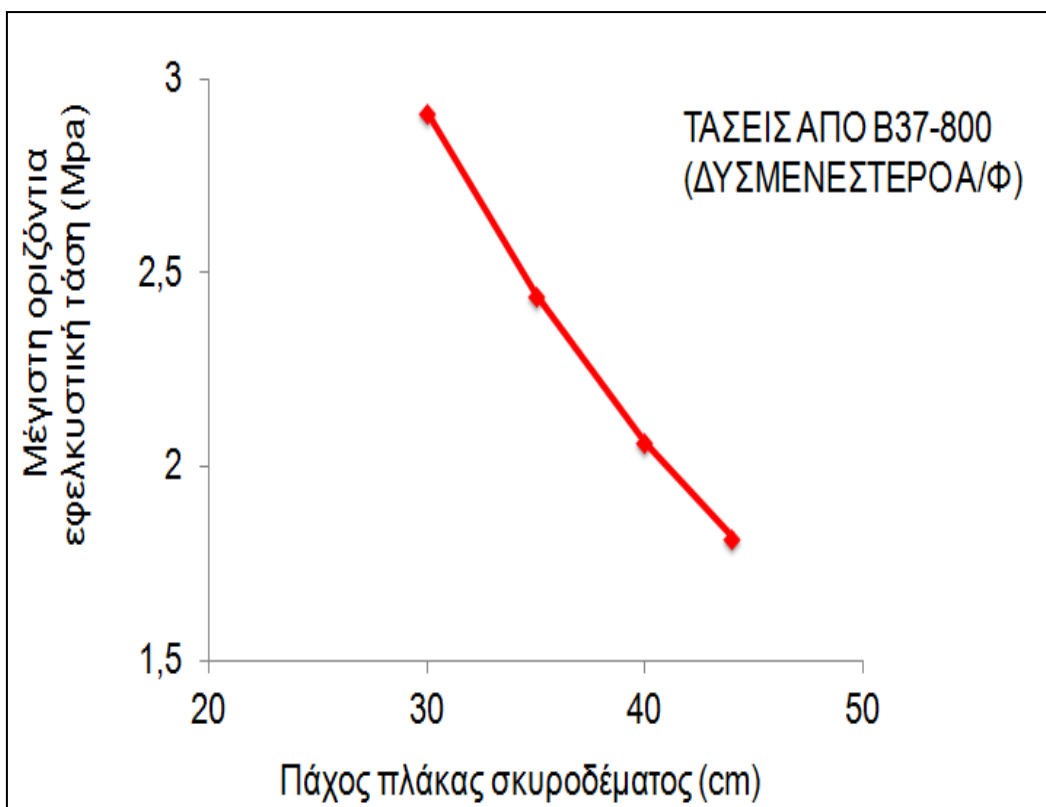
Το πάχος της πλάκας σκυροδέματος στη διερεύνηση κυμάνθηκε από 31 έως 41 cm και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο ραβδόγραμμα του σχήματος 5.12.



Σχήμα 5.12 : Επίδραση της μεταβολής του πάχους της πλάκας σκυροδέματος στο δείκτη αθροιστικής φθοράς

Από το ραβδόγραμμα του σχήματος 5.12 προκύπτει πως αύξηση του πάχους της πλάκας σκυροδέματος επιφέρει σημαντική μείωση του δείκτη αθροιστικής φθοράς CDF, γεγονός που επαληθεύει τις αρχές της διαδικασίας σχεδιασμού των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Όπως είναι γνωστό, ο βέλτιστος σχεδιασμός επιτυγχάνεται για δείκτη αθροιστικής φθοράς ίσο με 1 (Αρχή Φθοράς Miner), δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση για πάχος πλάκας ίσο με 35 cm. Παρατηρούμε πως αυξάνοντας το πάχος πλάκας από τα 35 cm ο δείκτης CDF αρχίζει να μειώνεται ώσπου εκμηδενίζεται για πάχος πλάκας άνω των 39 cm. Αντίθετα, μείωση του πάχους της πλάκας από τα 35 στα 31 cm αυξάνει σημαντικά την αθροιστική φθορά του οδοστρώματος.

Στο σχήμα 5.13 παρουσιάζεται και η μεταβολή των οριζόντιων εφελκυστικών τάσεων σε συνάρτηση με το πάχος της πλάκας σκυροδέματος για το δυσμενέστερο αεροσκάφος της κυκλοφορίας, το B737-800.

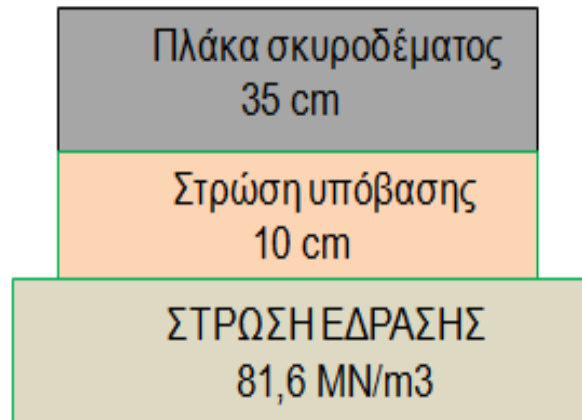


Σχήμα 5.13 : Μεταβολή οριζόντιων εφελκυστικών τάσεων σε σχέση με το πάχος της πλάκας σκυροδέματος

Από το διάγραμμα του σχήματος 5.13 προκύπτει ότι αύξηση του πάχους της πλάκας μειώνει τις οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται από τη φόρτιση που προκαλεί το αεροσκάφος. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα εξηγείται και από τους γενικότερους νόμους της μηχανικής παραμορφώσιμου στερεού σώματος.

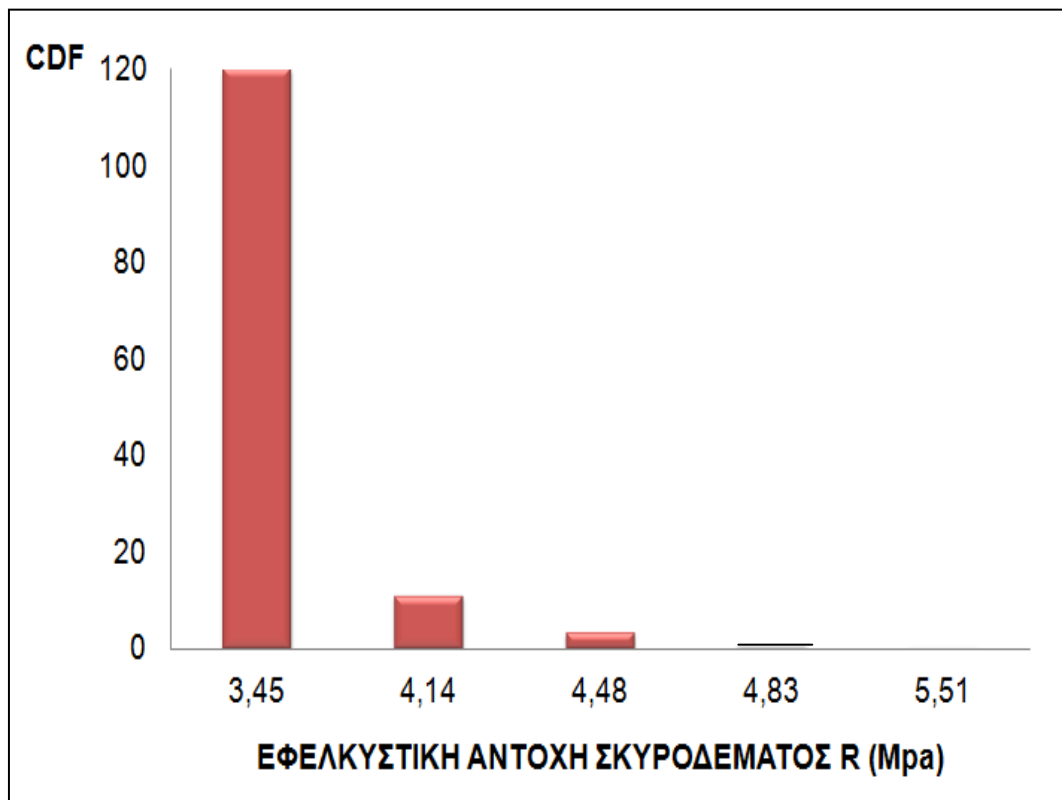
5.3.2 Επίδραση εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος στο δείκτη αθροιστικής φθοράς

Ακολούθως, διερευνήθηκε η μεταβολή του δείκτη CDF έναντι της μεταβολής της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος με σταθερό το πάχος της πλάκας στα 35 cm. Η διατομή που εξετάστηκε φαίνεται στο σχήμα 5.14.



Σχήμα 5.14 : Διατομή διερεύνησης για την επίδραση της μεταβολής της εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος στο δείκτη αθροιστικής φθοράς

Η τιμή της εφελκυστικής αντοχής κυμάνθηκε από 3.45 έως 5,52 MPa και τα αποτελέσματα της επισκόπησης της μεταβολής του δείκτη CDF συνοψίζονται στο ραβδόγραμμα του σχήματος 5.15.

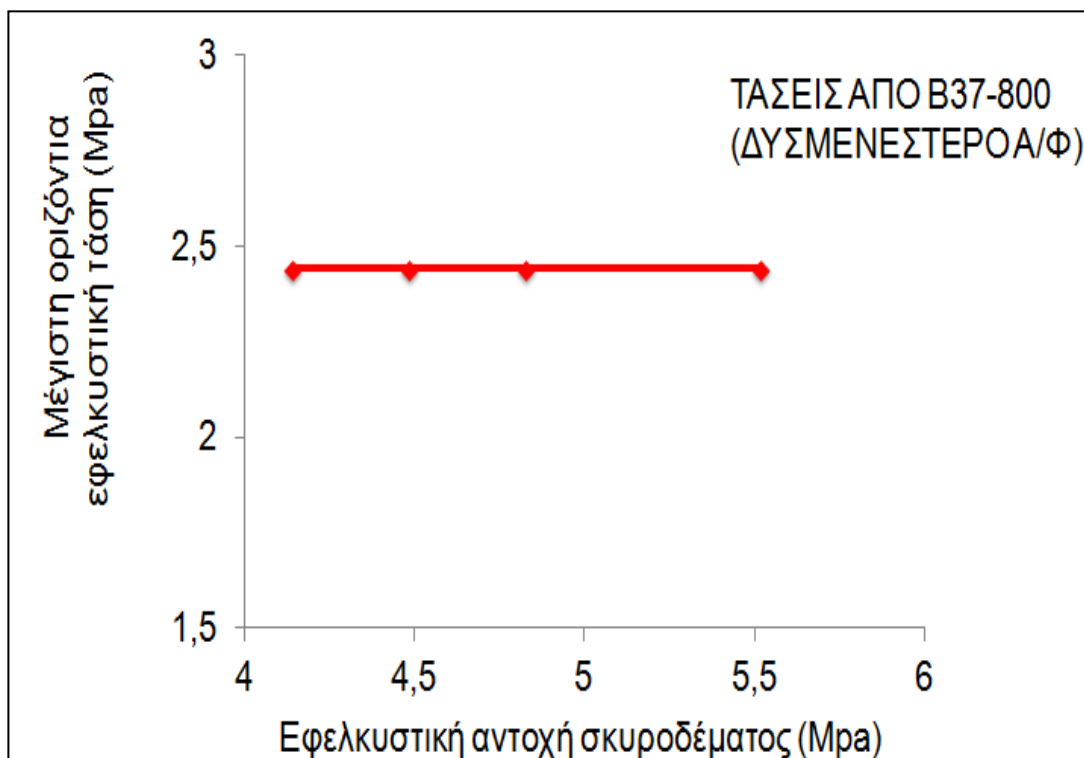


Σχήμα 5.15 : Επίδραση της μεταβολής της εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος στο δείκτη αθροιστικής φθοράς

Από το σχήμα 5.15 προκύπτει πως για αύξηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος επέρχεται μείωση της αθροιστικής φθοράς. Συγκεκριμένα, ο βέλτιστος σχεδιασμός στη συγκεκριμένη περίπτωση επιτυγχάνεται για εφελκυστική αντοχή ίση με 4,83. Παρατηρούμε πως μειώνοντας την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος ο δείκτης αθροιστικής φθοράς αυξάνεται ραγδαία, γεγονός που καταδεικνύει την επίδραση της αντοχής του σκυροδέματος στη φθορά του δύσκαμπτου οδοστρώματος.

Κατά την FAA, για τις περισσότερες περιπτώσεις σχεδιασμού οδοστρωμάτων αεροδρομίων, απαιτείται εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος μεταξύ 4,14 έως 4,83 MPa, ώστε να μειωθεί ο κίνδυνος της πρόωρης ρηγμάτωσης και να επιτευχθεί καλύτερη συμπεριφορά του σκυροδέματος έναντι των επαναλαμβανόμενων φορτίσεων.

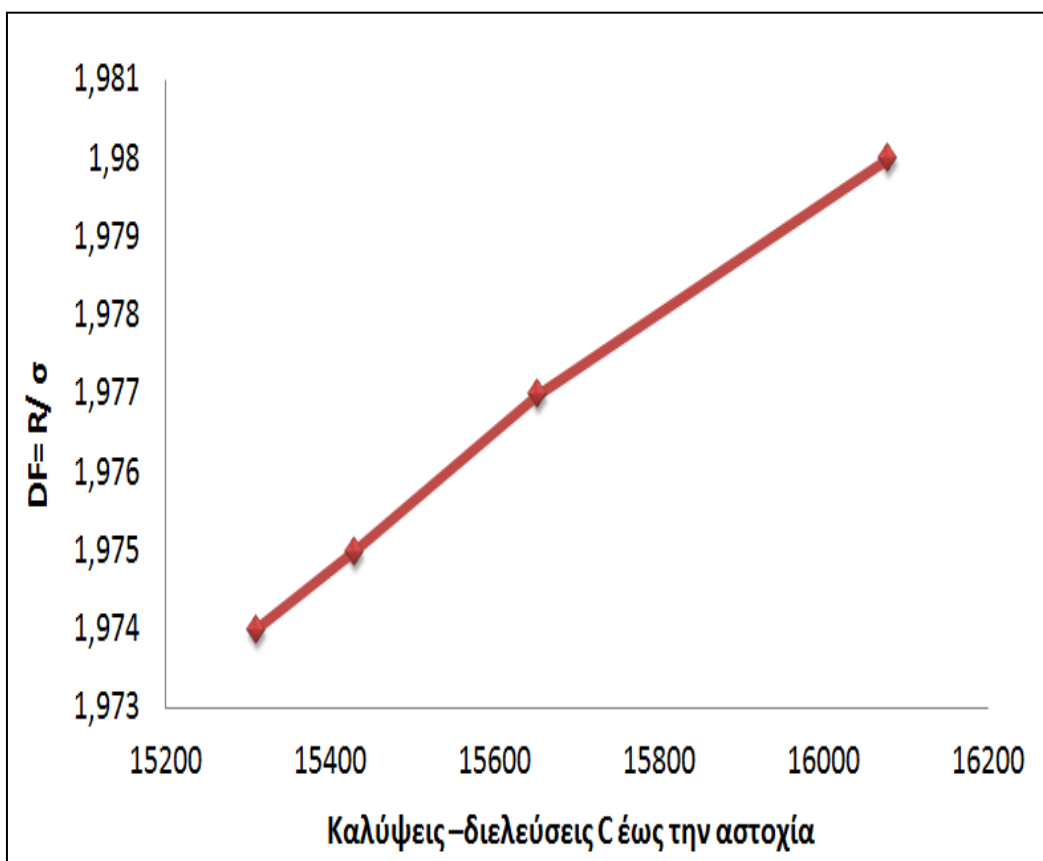
Στο σχήμα 5.16 παρουσιάζεται η σχέση των οριζόντιων εφελκυστικών τάσεων με τη μεταβολή της εφελκυστικής αντοχής κατά τη διερεύνηση.



Σχήμα 5.16 : Μεταβολή οριζόντιων εφελκυστικών τάσεων σε σχέση με την εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος

Από το διάγραμμα του σχήματος 5.16 προκύπτει ότι οι οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις δεν μεταβάλλονται σε σχέση με την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος σε μία διατομή με καθορισμένο πάχος πλάκας. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται από την παραδοχή της FAA για σταθερό μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος ορισμένο στα 27,6 GPa, ανεξάρτητα από την ποιότητα του σκυροδέματος, δηλαδή την εφελκυστική του αντοχή. Συνεπώς, το υποπρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που είναι ενσωματωμένο στο FAARFIELD, για σταθερό πάχος πλάκας, σταθερό πάχος στρώσης υπόβασης και σταθερά μέτρα ελαστικότητας υπολογίζει τις ίδιες οριζόντιες τάσεις για κάθε μεταβολή της εφελκυστικής αντοχής στη διερεύνηση.

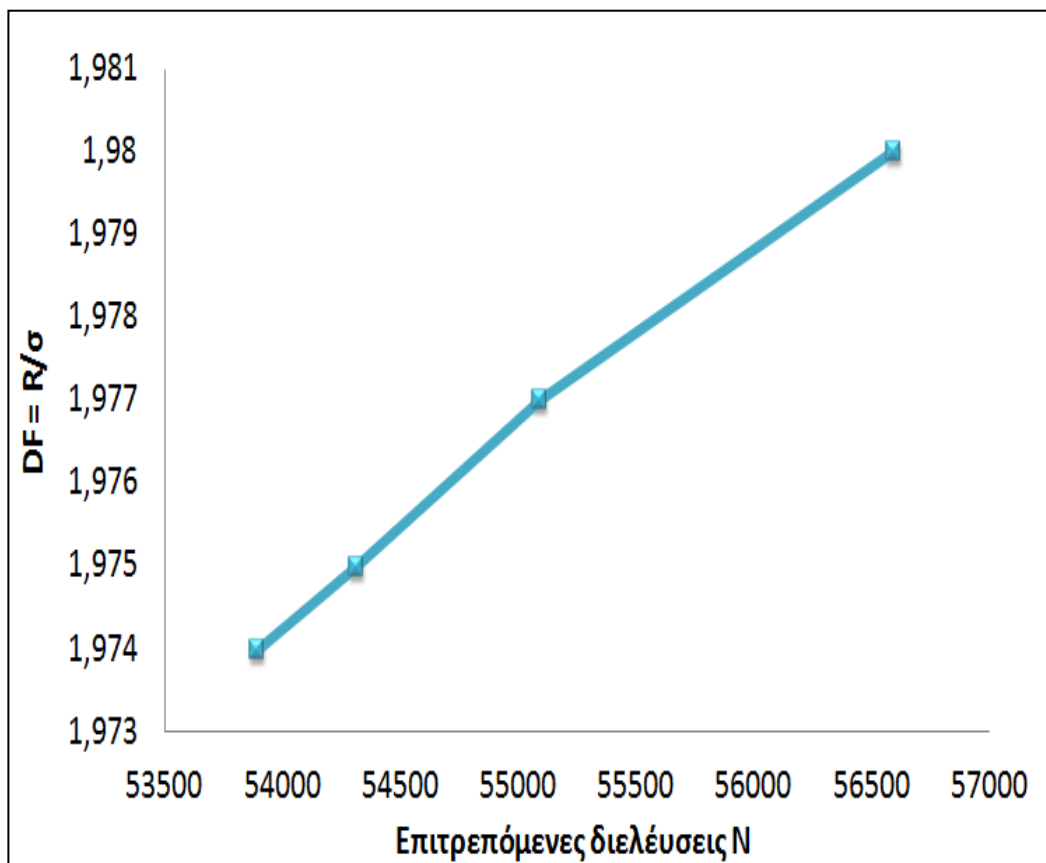
Δεδομένου ότι στο μοντέλο αστοχίας της αναλυτικής μεθόδου υπεισέρχονται πολλοί συσχετιζόμενοι συντελεστές, κρίθηκε σκόπιμο να διερευνηθεί και η σχέση μεταξύ του συντελεστή σχεδιασμού DF και των καλύψεων – διελεύσεων έως την αστοχία C καθώς μεταβάλλεται η εφελκυστική αντοχή. Ο συντελεστής DF ισούται με το λόγο της εφελκυστικής αντοχής προς την οριζόντια υπολογιζόμενη τάση και καθώς οι τάσεις προκύπτει πως παραμένουν σταθερές (σχήμα 5.16), στη συγκεκριμένη περίπτωση η τιμή του συντελεστή σχεδιασμού επηρεάζεται μόνο από τη μεταβολή της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Οι απαραίτητοι υπολογισμοί για αυτήν τη διαδικασία έγιναν χειροκίνητα, καθώς, η μέθοδος δεν εμφανίζει τις καλύψεις- διελεύσεις C έως την αστοχία με τις οποίες υπολογίζεται ο δείκτης CDF. Η μεταβολή της εφελκυστικής αντοχής κυμάνθηκε και πάλι στο επιτρεπόμενο εύρος τιμών (3,45- 5,51 MPa) και η διατομή εξέτασης παραμένει αυτή του σχήματος 5.14. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών για το αεροσκάφος B737-800 παρουσιάζονται στο διάγραμμα του σχήματος 5.17.



Σχήμα 5.17: Σχέση μεταξύ συντελεστή σχεδιασμού DF και καλύψεων – διελεύσεων C έως την αστοχία υπό τη μεταβολή της εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος

Από το σχήμα 5.17 γίνεται εμφανές πως με αύξηση της εφελκυστικής αντοχής σε μία διατομή που συνεπάγεται και αύξηση του συντελεστή σχεδιασμού, μεγαλώνει και ο αριθμός των επιτρεπόμενων καλύψεων–διελεύσεων C έως την αστοχία για κάθε αεροσκάφος.

Επιπλέον, πολλαπλασιάζοντας τις καλύψεις – διελεύσεις C έως την αστοχία με το λόγο P/C κάθε αεροσκάφους προκύπτει και ο αριθμός των επιτρεπόμενων διελεύσεων N. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών για το δυσμενέστερο αεροσκάφος της κυκλοφορίας των διερευνήσεων B 737-800 εμφανίζονται στο διάγραμμα του σχήματος 5.18.



Σχήμα 5.18: Σχέση μεταξύ συντελεστή σχεδιασμού DF και επιτρεπόμενων διελεύσεων υπό τη μεταβολή της εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος

Από το σχήμα 5.18 προκύπτει πως με αύξηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος αυξάνονται και οι επιτρεπόμενες διελεύσεις, συνεπώς μειώνεται ο δείκτης αθροιστικής φθοράς CDF καθώς ισχύει

$$CDF = \frac{N_{\text{προβλεπόμενες}}}{N_{\text{επιτρεπόμενες}}}$$

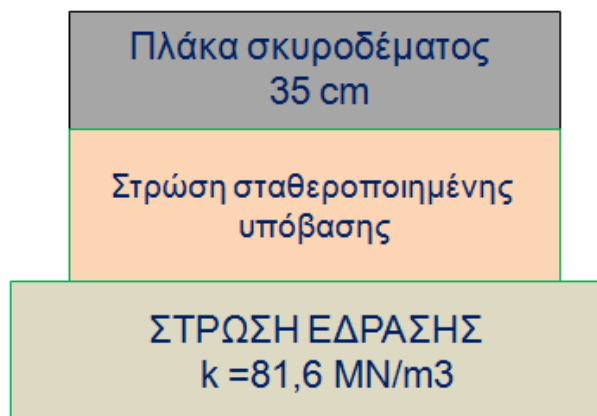
Το γεγονός αυτό επαληθεύει τα αποτελέσματα του σχήματος 5.15, που παρουσιάζουν την άμεση επίδραση της εφελκυστικής αντοχής στο δείκτη CDF.

Έπειτα από την εξέταση όλων των παραμέτρων που υπεισέρχονται στο μοντέλο αστοχίας, παρατηρείται πως τα αποτελέσματα είναι αναμενόμενα από τη συμπεριφορά του νόμου κοπώσεως του σκυροδέματος αλλά και από τις διαδικασίες και παραδοχές που στηρίζεται ο σχεδιασμός με την αναλυτική

μέθοδο. Αύξηση της εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος προκαλεί μείωση του δείκτη αθροιστικής φθοράς του οδοστρώματος σε μεγάλο βαθμό και επιτείνει τον αριθμό των επιτρεπόμενων διελεύσεων του κάθε αεροσκάφους, συνεπώς και το συνολικό αριθμό επιτρεπόμενων διελεύσεων.

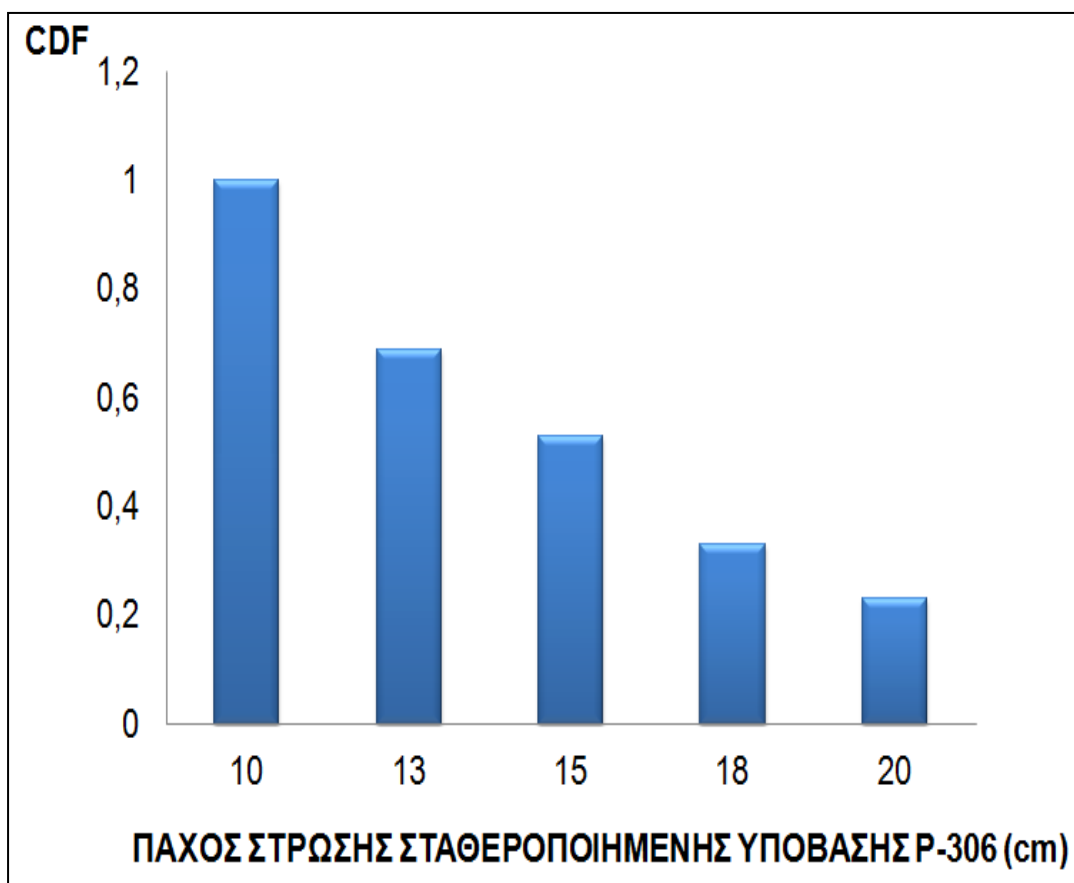
5.3.3 Επίδραση του πάχους σταθεροποιημένης υπόβασης στο δείκτη αθροιστικής φθοράς

Στο σημείο αυτό, διερευνάται η μεταβολή του δείκτη CDF έναντι της μεταβολής του πάχους της σταθεροποιημένης υπόβασης με σταθερό το πάχος πλάκας στα 35 cm και εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος ίση με 4,83 Μpa . Η διατομή που εξετάστηκε φαίνεται στο σχήμα 5.19.



Σχήμα 5.19: Διατομή διερεύνησης για την επίδραση της μεταβολής του πάχους της σταθεροποιημένης υπόβασης στο δείκτη αθροιστικής φθοράς

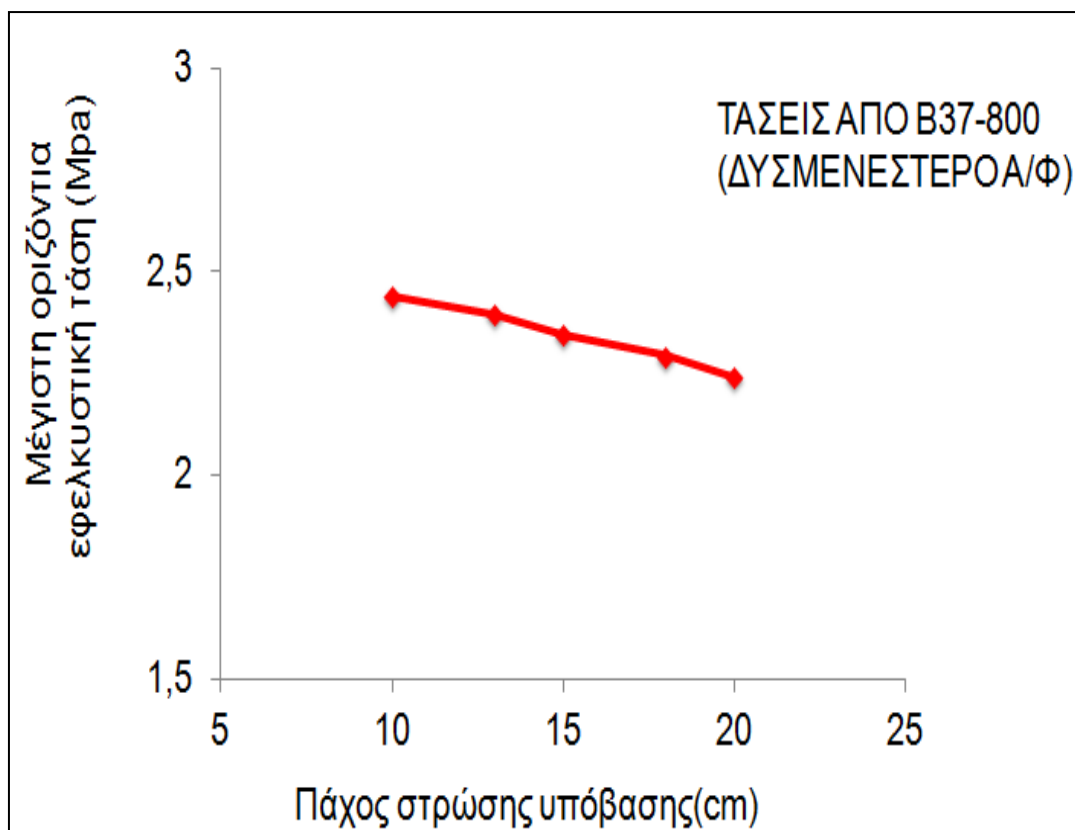
Το πάχος της στρώσης σταθεροποιημένης υπόβασης μεταβλήθηκε από τα 10 cm έως τα 20 cm και τα αποτελέσματα της επιρροής στο δείκτη CDF συνοψίζονται στο διάγραμμα του σχήματος 5.20.



Σχήμα 5.20: Επίδραση της μεταβολής του πάχους στρώσης σταθεροποιημένης υπόβασης στο δείκτη αθροιστικής φθοράς

Από το σχήμα 5.20, προκύπτει πως αύξηση της υπόβασης κατά 10 cm μειώνει το δείκτη αθροιστικής φθοράς κατά 0,8 μονάδες , συνεπώς η επιρροή της μεταβολής του πάχους της στρώσης υπόβασης δεν είναι τόσο σημαντική στο δείκτη αθροιστικής φθοράς CDF όσο στο πάχος της πλάκας (5.22).

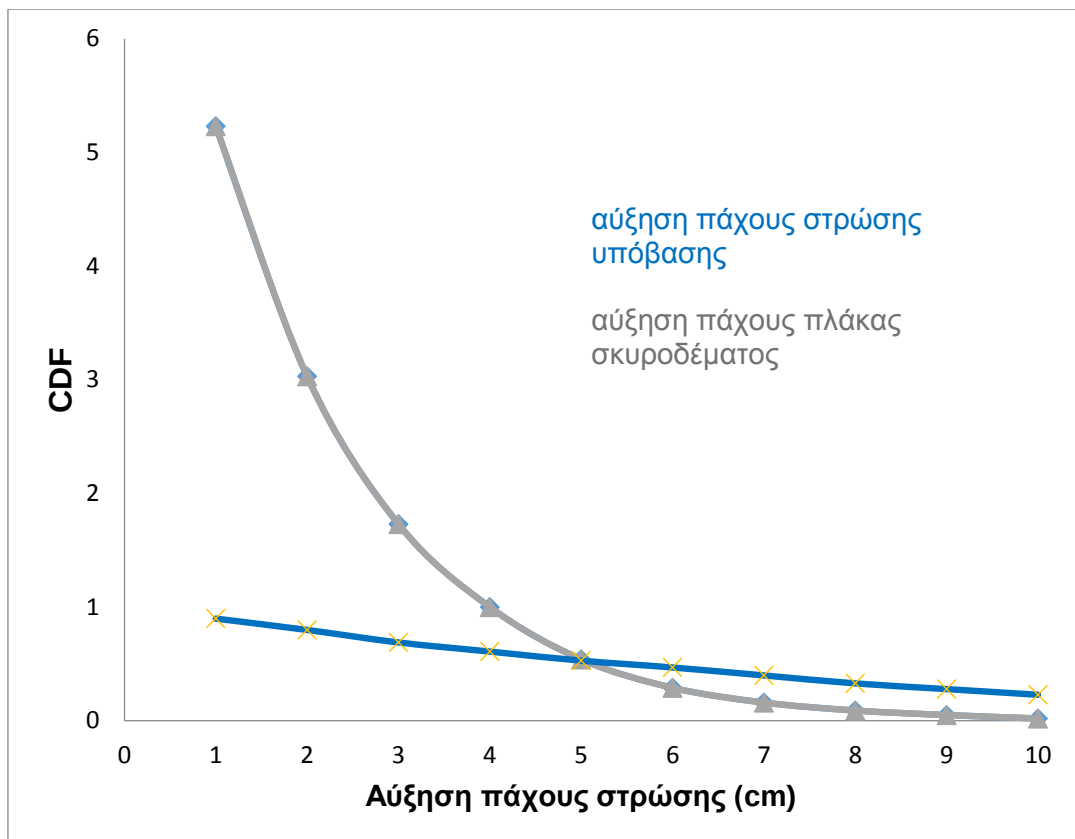
Οι οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις από το δυσμενέστερο αεροσκάφος μεταβάλλονται σε σχέση με το πάχος υπόβασης, όπως φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 5.21.



Σχήμα 5.21 : Μεταβολή οριζόντιων εφελκυστικών τάσεων σε σχέση με το πάχος της στρώσης σταθεροποιημένης υπόβασης

Από το σχήμα 5.21 , παρατηρείται μείωση των τάσεων καθώς αυξάνεται το πάχος της στρώσης υπόβασης , μικρότερη των 0,3 MPa.

Προκειμένου να γίνει μια συγκριτική ανάλυση μεταξύ της επίδρασης της στρώσης σταθεροποιημένης υπόβασης και της πλάκας σκυροδέματος στον δείκτη αθροιστικής φθοράς συντάχθηκε το διάγραμμα του σχήματος 5.22. Στον οριζόντιο άξονα μεταβάλλεται κατά 1 cm το πάχος της στρώσης που εξετάζεται και στον κατακόρυφο άξονα παρίσταται η τιμή του δείκτη CDF. Οι δοκιμές ξεκίνησαν με αρχικό πάχος για την πλάκα σκυροδέματος (στρώση κυκλοφορίας δύσκαμπτου οδοστρώματος) ίσο με 31 cm και 10 cm για την στρώση σταθεροποιημένης υπόβασης. Το εύρος της μεταβολής και για τις δύο παραμέτρους ήταν τα 10 cm.

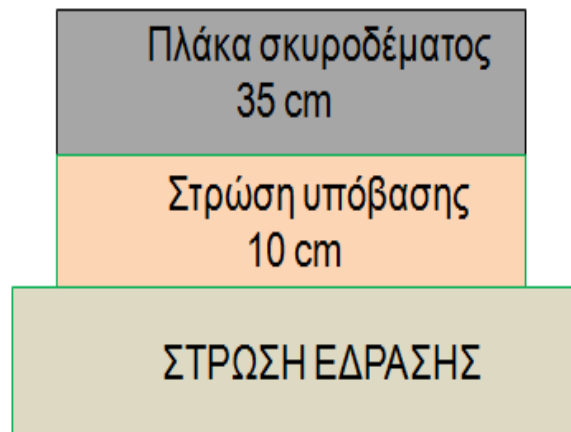


Σχήμα 5.22: Σύγκριση βαθμού ευαισθησίας δείκτη αθροιστικής φθοράς ως προς το πάχος πλάκας σκυροδέματος και το πάχος σταθεροποιημένης υπόβασης

Από το σχήμα 5.22, προκύπτει πως ο δείκτης αθροιστικής φθοράς CDF μειώνεται περισσότερο για μεταβολή κατά 1 cm του πάχους της πλάκας σκυροδέματος, εμφανίζοντας μεγαλύτερο βαθμό ευαισθησίας σε αυτήν την παράμετρο.

5.3.4 Επίδραση του δείκτη αντίδρασης στρώσης έδρασης στο δείκτη αθροιστικής φθοράς

Προκειμένου να εξεταστούν όλοι οι μεταβλητές σχεδιασμού της αναλυτικής μεθόδου σε σχέση με την αθροιστική φθορά, διερευνήθηκε και η επιρροή της μεταβολής της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης στο δείκτη CDF. Η φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος με την αναλυτική μέθοδο, εκφράζεται μέσω του δείκτη αντίδρασης εδάφους K . Η διατομή που διερευνήθηκε φαίνεται στο σχήμα 5.23 .



Σχήμα 5.23: Διατομή διερεύνησης για την επίδραση της μεταβολής του δείκτη αντίδρασης Κ στρώσης έδρασης στο δείκτη αθροιστικής φθοράς

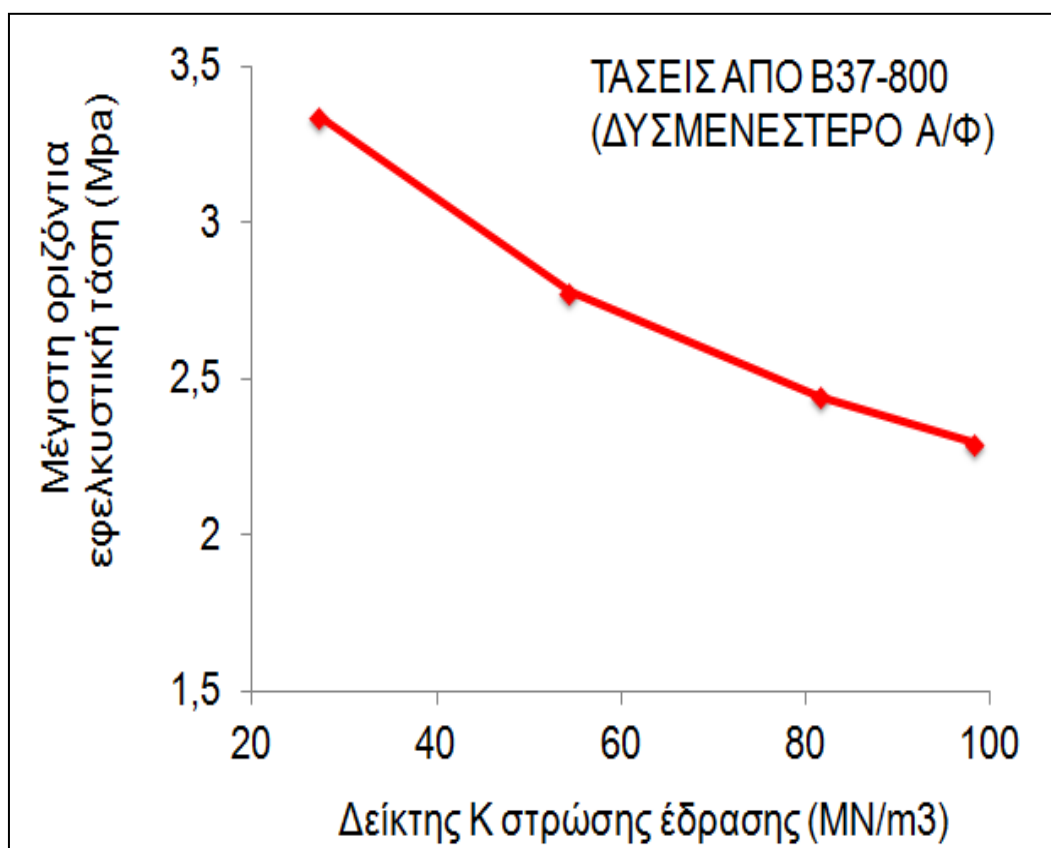
Το εύρος του δείκτη αντίδρασης στρώσης έδρασης κυμάνθηκε από 27,2 - 98,2 MN/m^3 (επιτρεπόμενες τιμές) και τα αποτελέσματα της επισκόπησης συνοψίζονται στο ραβδόγραμμα του σχήματος 5.24.



Σχήμα 5.24: Επίδραση της μεταβολής του δείκτη αντίδρασης Κ στρώσης έδρασης στο δείκτη αθροιστικής φθοράς

Από το ραβδόγραμμα του σχήματος 5.24 προκύπτει πως μείωση της εδαφικής αντοχής, δηλαδή μείωση του δείκτη αντίδρασης K, επιφέρει σημαντική αύξηση στο δείκτη αθροιστικής φθοράς.

Αντίστοιχα, οι μέγιστες οριζόντιες τάσεις παρουσιάζουν ανάλογη συμπεριφορά έναντι της μεταβολής του δείκτη αντίδρασης K της στρώσης έδρασης, όπως φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 5.25.



Σχήμα 5.25: Μεταβολή οριζόντιων εφελκυστικών τάσεων σε σχέση με το δείκτη K στρώσης έδρασης

Από την υπόψη διερεύνηση προκύπτει πως η εδαφική αντοχή επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την αθροιστική φθορά του δύσκαμπτου οδοστρώματος. Παρά το γεγονός πως στα δύσκαμπτα οδοστρώματα το μεγαλύτερο μέρος της καταπόνησης παραλαμβάνεται από την πλάκα σκυροδέματος και οι τάσεις φθάνουν στο έδαφος σημαντικά απομειωμένες, η στρώση έδρασης θα πρέπει να προσφέρει επαρκή στήριξη στο δύσκαμπτο οδόστρωμα, συνεπώς να έχει υψηλό δείκτη αντίδρασης K. Σε περίπτωση όπου η κατασκευή ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου απαιτεί την έδραση του σε εδαφικό υλικό χαμηλής

κατηγορίας φέρουσας ικανότητας θα πρέπει αυτό να συμπυκνωθεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές συμπύκνωσης της FAA ώστε να αυξηθεί ο δείκτης αντίδρασης K. Κατά αυτόν τον τρόπο, μειώνεται η αθροιστική φθορά του οδοστρώματος και συνεπώς επιτυγχάνεται σχεδιασμός με μικρότερο πάχος πλάκας. Ωστόσο, σημειώνεται πως οι απαιτήσεις συμπύκνωσης της στρώσης έδρασης των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων δεν είναι τόσο αυστηρές όσο στα εύκαμπτα οδοστρώματα λόγω των σχετικά απομειωμένων τάσεων.

6. ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο σχεδιασμός οδοστρωμάτων αεροδρομίων διανύει ένα μεταβατικό στάδιο από την εμπειρική στην ολοένα και εξελισσόμενη αναλυτική μέθοδο. Υπό την κατεύθυνση αυτή, η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στη διερεύνηση της αναλυτικής μεθόδου διαστασιολόγησης δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων της FAA. Στο πλαίσιο αυτό, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των βασικών αρχών και θεωρήσεων της αναλυτικής μεθόδου με εκείνες της προγενέστερης εμπειρικής. Από τη συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθόδων προέκυψε ότι παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές ως προς το θεωρητικό τους υπόβαθρο, τις παραδοχές αλλά και ως προς τη διαδικασία σχεδιασμού.

Προκειμένου να διαφανεί ο βαθμός επιρροής των διαφοροποιήσεων των δύο μεθόδων στον τελικό σχεδιασμό, διενεργήθηκε διαστασιολόγηση δαπέδου αναμονής δύσκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου με ενδεικτική προβλεπόμενη κυκλοφορία και με τα τυπικά υλικά της FAA. Από την εν λόγω διαδικασία, προέκυψαν διατομές με μικρή απόκλιση στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος, γεγονός που καταδεικνύει πως οι διαφορές των δύο μεθόδων δεν αντικατοπτρίζονται στα αποτελέσματα του σχεδιασμού. Αντίθετα, από αντίστοιχες διερευνήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί για τα εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων έχουν προκύψει σημαντικές διαφορές στα υπολογιζόμενα πάχη οδοστρώματος μεταξύ των δύο μεθόδων.

Η μικρή απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων σχεδιασμού για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα θα μπορούσε να δικαιολογηθεί από το γεγονός πως επιδίωξη της FAA είναι η συμβατότητα των αποτελεσμάτων της αναλυτικής μεθόδου με της προγενέστερης εμπειρικής. Συγκεκριμένα, αυτή είναι η σημασία του συντελεστή βαθμονόμησης F_c (Calibration Factor) στο μοντέλο αστοχίας της αναλυτικής μεθόδου. Για τον καθορισμό της τιμής του, πραγματοποιήθηκαν πολλές συγκριτικές αναλύσεις των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων. Η ενσωμάτωση του στο κριτήριο αστοχίας των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων έχει ως σκοπό τη στάθμιση των αποκλίσεων των εξαγόμενων παχών της πλάκας σκυροδέματος από τις δύο μεθόδους. Η παραπάνω επιδίωξη της FAA επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα της παρούσας διερεύνησης.

Αξίζει να σημειωθεί, πως το 1980 κυκλοφόρησε από την FAA το λογισμικό LEDNEW αλλά δεν υιοθετήθηκε ως αντικατάσταση των νομογραφημάτων εξαιτίας της ασυμβατότητας των αποτελεσμάτων. Τα ανανεωμένα μηχανιστικά μοντέλα και οι δοκιμές πλήρους κλίμακας που διεξήχθησαν στην εγκατάσταση πειραματικών δοκιμών NARTF της FAA, είχαν ως στόχο την ανάπτυξη νέων μεθόδων, συμβατών με αυτές που αντικαθιστούν.

Από τη διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων σχεδιασμού στο αποτέλεσμα της διαστασιολόγησης μέσω σχετικών αναλύσεων ευαισθησίας, προέκυψε πως το πάχος της πλάκας σκυροδέματος παρουσιάζει μεγαλύτερο βαθμό ευαισθησίας ως προς την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος και τον δείκτη K της στρώσης έδρασης και μικρότερο βαθμό ευαισθησίας στο πάχος και στο υλικό της στρώσης υπόβασης. Αντίστοιχα, από τη διερεύνηση της επιρροής των παραμέτρων σχεδιασμού στο δείκτη αθροιστικής φθοράς που εξαρτάται από το μοντέλο αστοχίας της αναλυτικής μεθόδου και αποτελεί βασικό κριτήριο σχεδιασμού, προέκυψε πως η αθροιστική φθορά του οδοστρώματος επηρεάζεται περισσότερο από τη μεταβολή της εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος και από το πάχος της πλάκας σκυροδέματος.

Το γεγονός αυτό εφιστά την προσοχή στον αναλυτή, σχετικά με την επιλογή ποιότητας σκυροδέματος με κατάλληλη εφελκυστική αντοχή. Επιπροσθέτως, ο αναλυτής προκειμένου να διασφαλίσει πως θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή σκυρόδεμα ίδιας εφελκυστικής αντοχής με αυτήν που έγινε ο σχεδιασμός, θα πρέπει να λάβει υπόψη του και ορισμένους παράγοντες όπως: τη δυνατότητα της περιοχής που πρόκειται να κατασκευασθεί το οδόστρωμα να παράγει σκυρόδεμα συγκεκριμένης εφελκυστικής αντοχής, την ανάγκη αποφυγής υψηλού ποσοστού τσιμέντου που μπορεί να επηρεάσει την αντοχή του σκυροδέματος και την περίπτωση όπου οι απαιτήσεις για νωρίτερη παράδοση του οδοστρώματος στην κυκλοφορία δεν επιτρέψουν την απόκτηση της απαιτούμενης εφελκυστικής αντοχής των 28 ημερών. Η ανάδειξη της σημασίας της ποιότητας του σκυροδέματος έρχεται σε συμφωνία και με τη μηχανική συμπεριφορά των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων όπου η πλάκα σκυροδέματος (στρώση κυκλοφορίας) αναλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος των καταπονήσεων.

Από τα παραπάνω, εξάγεται το συμπέρασμα πως τα αποτελέσματα όλων των διερευνήσεων που διενεργήθηκαν είναι αναμενόμενα από τη συμπεριφορά του μοντέλου αστοχίας του σκυροδέματος αλλά και από τις διαδικασίες αλλά και

παραδοχές που στηρίζεται ο σχεδιασμός με την αναλυτική μέθοδο. Αξίζει να επισημανθεί, πως το μοντέλο αστοχίας εμπεριέχει πολλούς αλληλένδετους δείκτες και παραμέτρους που προέκυψαν από τις δοκιμές πλήρους κλίμακας και δε συνίσταται στην άμεση συσχέτιση του συντελεστή σχεδιασμού (λόγος αντοχής σκυροδέματος προς υπολογιζόμενη τάση) με τις επιτρεπόμενες διελεύσεις, όπως συνήθως στα δύσκαμπτα οδοστρώματα των οδών. Καθοριστικό παράγοντα για το σχεδιασμό με την αναλυτική μέθοδο αποτελεί ο Δείκτης Δομικής Κατάστασης SCI που υπεισέρχεται στο μοντέλο αστοχίας και σχετίζεται με τα επιφανειακά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος.

Στο πλαίσιο της υπόψη διερεύνησης εντοπίστηκαν και ορισμένα κρίσιμα σημεία που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό με την αναλυτική μέθοδο. Πιο συγκεκριμένα, κρίσιμο σημείο αποτελεί η παραδοχή σταθερού μέτρου ελαστικότητας σκυροδέματος στην αναλυτική μέθοδο, με καθορισμένη τιμή $E=27,6 \text{ GPa}$, ανεξαρτήτως ποιότητας σκυροδέματος και εφελκυστικής αντοχής. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε ώστε να προκύπτουν αποτελέσματα που να συμπίπτουν με τα απαιτούμενα πάχη που εξάγονται από τα νομογραφήματα της εμπειρικής μεθόδου. Ωστόσο, στην πραγματικότητα, αύξηση της εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος ισοδυναμεί με υψηλότερη κατηγορία σκυροδέματος, επομένως και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας E . Όσο μεγαλώνει το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος, τόσο μικρότερη είναι και η παραμόρφωση του υπό σταθερή τάση. Μέτρο ελαστικότητας ίσο με $27,6 \text{ GPa}$ αντιστοιχεί σε κατηγορία σκυροδέματος C12/16 με μέση αντοχή σε εφελκυσμό ίση με $1,6 \text{ MPa}$. Για το σχεδιασμό, όμως, με την αναλυτική μέθοδο της FAA συνίσταται η επιλογή εφελκυστικής αντοχής μεταξύ $4,14$ έως $4,83 \text{ MPa}$ που αντιστοιχεί σε κατηγορία σκυροδέματος από C50/55 και πάνω, όπου το αντίστοιχο μέτρο ελαστικότητας ξεπερνάει την τιμή των 37 GPa .

Με βάση τα παραπάνω, εκτιμάται πως η θεώρηση της FAA για σταθερό μέτρο ελαστικότητας που αντιστοιχεί σε χαμηλή κατηγορία σκυροδέματος, αποτελεί μία, ενδεχομένως, συντηρητική παραδοχή που επηρεάζει την ακρίβεια στον υπολογισμό των τάσεων και παραμορφώσεων από τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Αξίζει να αναφερθεί, πως στην Ελλάδα συνιστάται για την κατασκευή δαπέδων αεροδρομίων από σκυρόδεμα, η χρήση κατηγορίας σκυροδέματος υψηλότερης από C25/30, για λόγους ανθεκτικότητας. Η κατηγορία C25/30 αντιστοιχεί σε μέση εφελκυστική αντοχή ίση με $2,6 \text{ MPa}$, οπότε σύμφωνα με τις ελληνικές προδιαγραφές δεν θα πρέπει να επιλέγεται

μικρότερη τιμή από αυτή για το σχεδιασμό δύσκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου. Ωστόσο, σημειώνεται πως σχετικές διερευνήσεις (Garg et al, 2004) υπέδειξαν πως η υπολογιζόμενη οριζόντια εφελκυστική τάση που αποτελεί το κρίσιμο εντατικό μέγεθος για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα, εμφανίζει μικρό βαθμό ευαισθησίας ως προς το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος. Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας είναι σημαντική για την ακρίβεια στον υπολογισμό των οριζόντιων παραμορφώσεων οι οποίες όμως δεν υπεισέρχονται στο μοντέλο αστοχίας των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.

Εν κατακλείδι, τα αποτελέσματα της παρούσας διερεύνησης καταδεικνύουν την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα προκειμένου να εξετασθούν όλες οι δυνατότητες της αναλυτικής μεθόδου. Αναλυτικότερα, θα ήταν σκόπιμη η διερεύνηση της διαδικασίας αξιολόγησης των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων και της ενίσχυσης τους με κατάλληλη επίστρωση, η οποία περιλαμβάνεται στα πλαίσια της μεθόδου της FAA. Υπό το πρίσμα αυτό, θα μπορούσε να διερευνηθεί περαιτέρω και ο Δείκτης Δομικής Κατάστασης SCI του μοντέλου αστοχίας της αναλυτικής μεθόδου, που αποτελεί παράμετρο η οποία θεωρείται σταθερή κατά τη διαδικασία σχεδιασμού αλλά μεταβάλλεται κατά τη διαδικασία αξιολόγησης μιας υφιστάμενης διατομής δύσκαμπτου οδοστρώματος.

Ολοκληρώνοντας, αξίζει να αναφερθεί η πρόσφατη έκδοση της εξελιγμένης αναλυτικής μεθόδου (FAA,2016) που περιέχει αρκετές βελτιώσεις και τροποποιήσεις οι οποίες θα μπορούσαν να διερευνηθούν μελλοντικά. Η υπόψη έκδοση της αναλυτικής μεθόδου παρουσιάστηκε στα πλαίσια του Διεθνούς Συνεδρίου για τη Φέρουσα Ικανότητα Οδοστρωμάτων Οδών, Αεροδρομίων και Σιδηροδρομικής Υποδομής BCRRRA 2017 (Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields) που έλαβε χώρα στην Αθήνα και διοργανώθηκε υπό την αιγίδα του Εργαστηρίου Οδοποιίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

AASHTO T222, “Standard Method of Test for Nonrepetitive Static Plate Load Test of Soils and Flexible Pavement Components for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements”, 1981

ASTM D5340-98, “Standard Test Method for Airport Pavement Condition Surveys” Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.03, ASTM International, Pennsylvania, 1998

ASTM C78 / C78M-16, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016

ASTM D5340-12, Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012

Brill, D., Calibration of FAARFIELD Rigid Pavement Design Procedure, Washington, DC, January 2010

Brill, D., Kawa I., Ricalde L., “Comparative Study of Rigid Pavement Thickness Designs using FAARFIELD”, 2008

Brill, D., “Review of 10 Years of Concrete Airport Pavement Studies at the NAPTF”, Brasil, 2011

Brill, D., “Introducing FAARFIELD 1.41: *Latest Updates to FAA Airport Pavement Design Procedures*”, BCRRRA 2017 Conference, Athens, 2017

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, Mississippi USA, 2001

Federal Aviation Administration, Office of Airport Safety and Standards, AC 150.5320-6D, “Airport Pavement Design and Evaluation,” 1995.

Federal Aviation Administration, Office of Airport Safety and Standards, AC 150.5320-6E, "Airport Pavement Design and Evaluation",2009.

Federal Aviation Administration, Office of Airport Safety and Standards, AC 150.5320-6F, "Airport Pavement Design and Evaluation",2016.

Federal Aviation Administration, Office of Airport Safety and Standards, AC150/5370-10G, "Standards for Specifying Construction of Airports",2014

Federal Aviation Administration (FAA), National Airport Pavement Test Facility (NAPTF) webpage <http://www.airporttech.tc.faa.gov/naptf/index.asp> , FAA Airport Technology, Research and Technology Branch, AAR-410, William J. Hughes Technical Center, Atlantic City International Airport, New Jersey

Garg, Guo, McQueen " Operational Life of Airport Pavements ", Washington ,DC, 2004

Garg, Navneet, Guo, Edward, and McQueen, Roy D., "Operational Life of Airport Pavements," FAA report DOT/FAA/AR-04/46, December 2004.

Kawa, Izydor, Brill, David R., and Hayhoe, Gordon F., "FAARFIELD—New FAA Airport Pavement Thickness Design Software," in *Proceedings of the 2007 FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference*, Atlantic City, New Jersey, 2007.

Portland Cement Association (PCA),"Thickness Design for Concrete Pavements", Illinois, 1966

Rollings, Raymond S., "Design of Overlays for Rigid Airport Pavements," FAA report DOT/FAA/PM-87/19, April 1988.

Smith, K.D., Roesler, J.R., and Houghton, J.E., "Review of Fatigue Models for Concrete Airfield Pavement Design," American Concrete Pavement Association, Skokie, Illinois, September 2002.

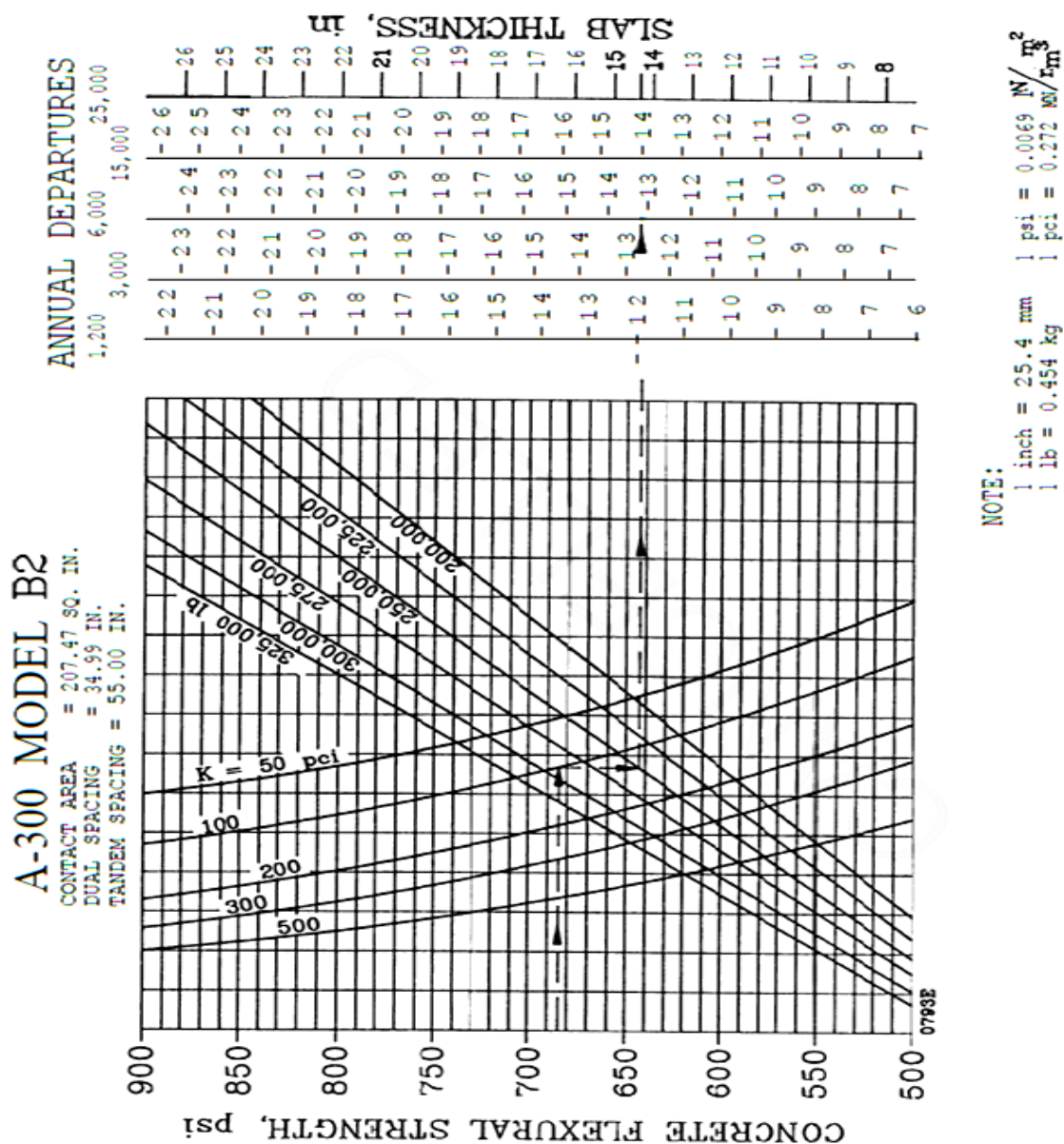
Westergaard, J.M., "Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis," *Public Roads*, Vol. 7, 1926.

Yoder, E.J. and Witczak, M.W., *Principles of Pavement Design*, 2nd Ed., New York, Wiley, 1975.

Λοΐζος, Α., Πλατή Χ., “Σημειώσεις για το μάθημα Οδοστρώματα Οδών και Αεροδρομίων”, Αθήνα, Οκτώβριος 2015

Λοΐζος, Α., Πλατή Χ., “Σημειώσεις για το μάθημα Οδοστρώματα”, Αθήνα, Φεβρουάριος 2015

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

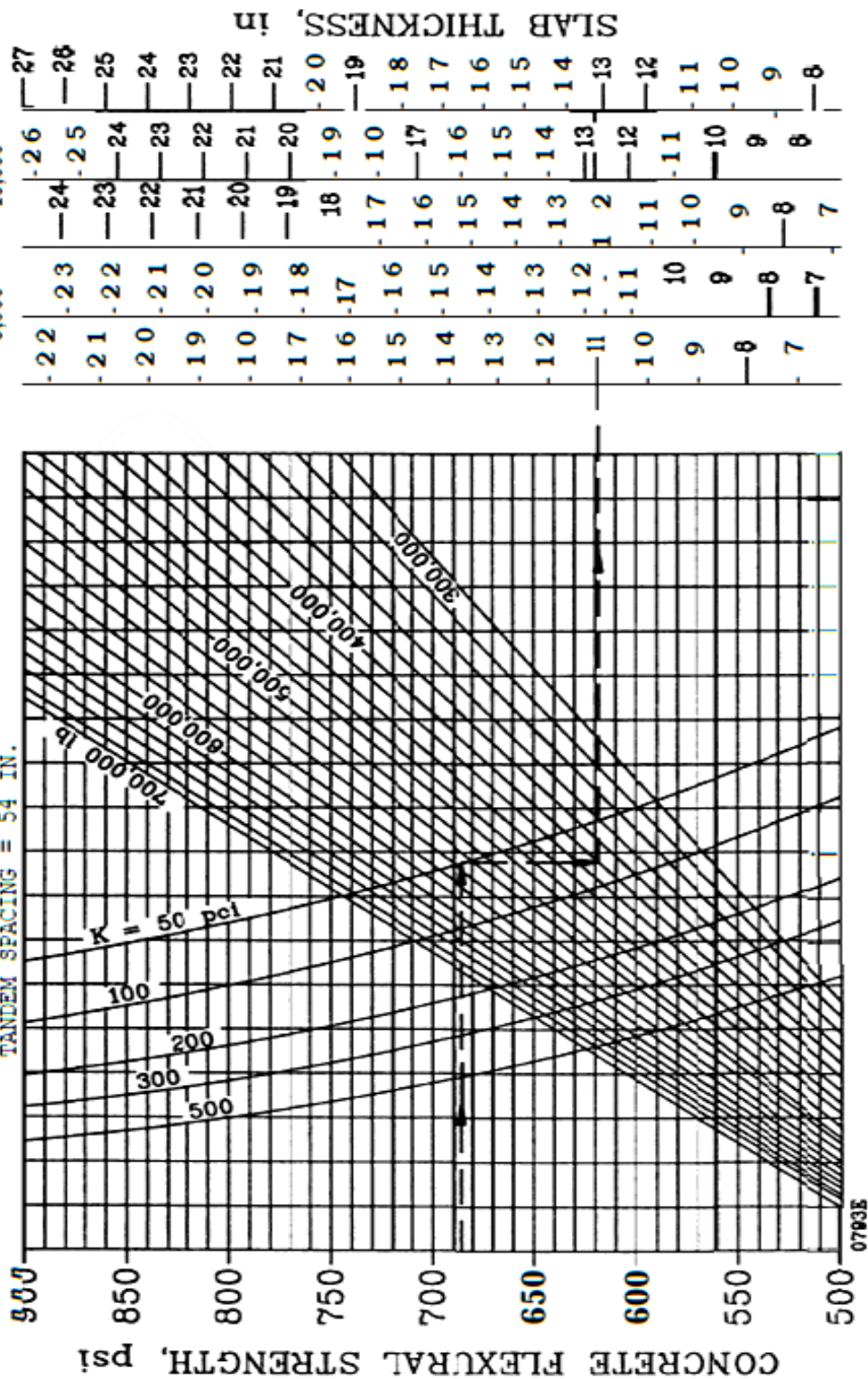


Σχήμα Π1: Διάγραμμα υπολογισμού εμπειρικής μεθόδου για το α/φ

A300 MODEL B2

B-747 SP

CONTACT AREA = 210 SQ. IN.
DUAL SPACING = 43.25 IN.
TANDEM SPACING = 54 IN.



NOTE:

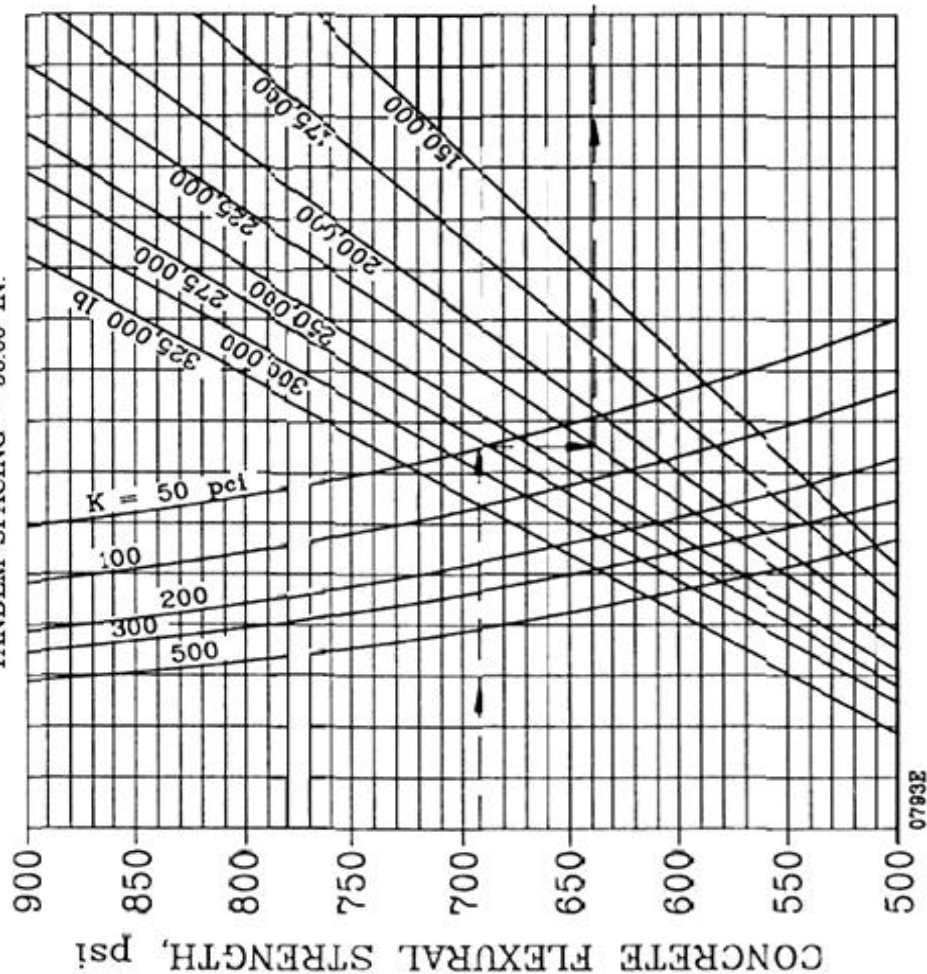
1 inch = 25.4 mm
1 lb = 0.454 kg
1 psi = 0.0069 MN/m²
1 pci = 0.272 MN/m³

Σχήμα Π4: Διάγραμμα υπολογισμού εμπειρικής μεθόδου για το α/φ

B747 SP

B-767

CONTACT AREA = 202.46 SQ. IN.
DUAL SPACING = 45.00 IN.
TANDEM SPACING = 56.00 IN.



ANNUAL DEPARTURES

1,200 3,000 6,000 15,000 25,000

ANNUAL DEPARTURES	1,200	3,000	6,000	15,000	25,000	SLAB THICKNESS, in
26	2	2	3	4	4	26
25	2	2	2	3	3	25
24	2	2	2	2	2	24
23	2	2	2	2	2	23
22	1	2	2	2	2	22
21	1	2	2	2	2	21
20	1	1	2	2	2	20
19	1	1	1	2	2	19
18	1	1	1	1	2	18
17	1	1	1	1	1	17
16	1	1	1	1	1	16
15	1	1	1	1	1	15
14	1	1	1	1	1	14
13	1	1	1	1	1	13
12	1	1	1	1	1	12
11	1	1	1	1	1	11
10	1	1	1	1	1	10
9	1	1	1	1	1	9
8	1	1	1	1	1	8
7	1	1	1	1	1	7

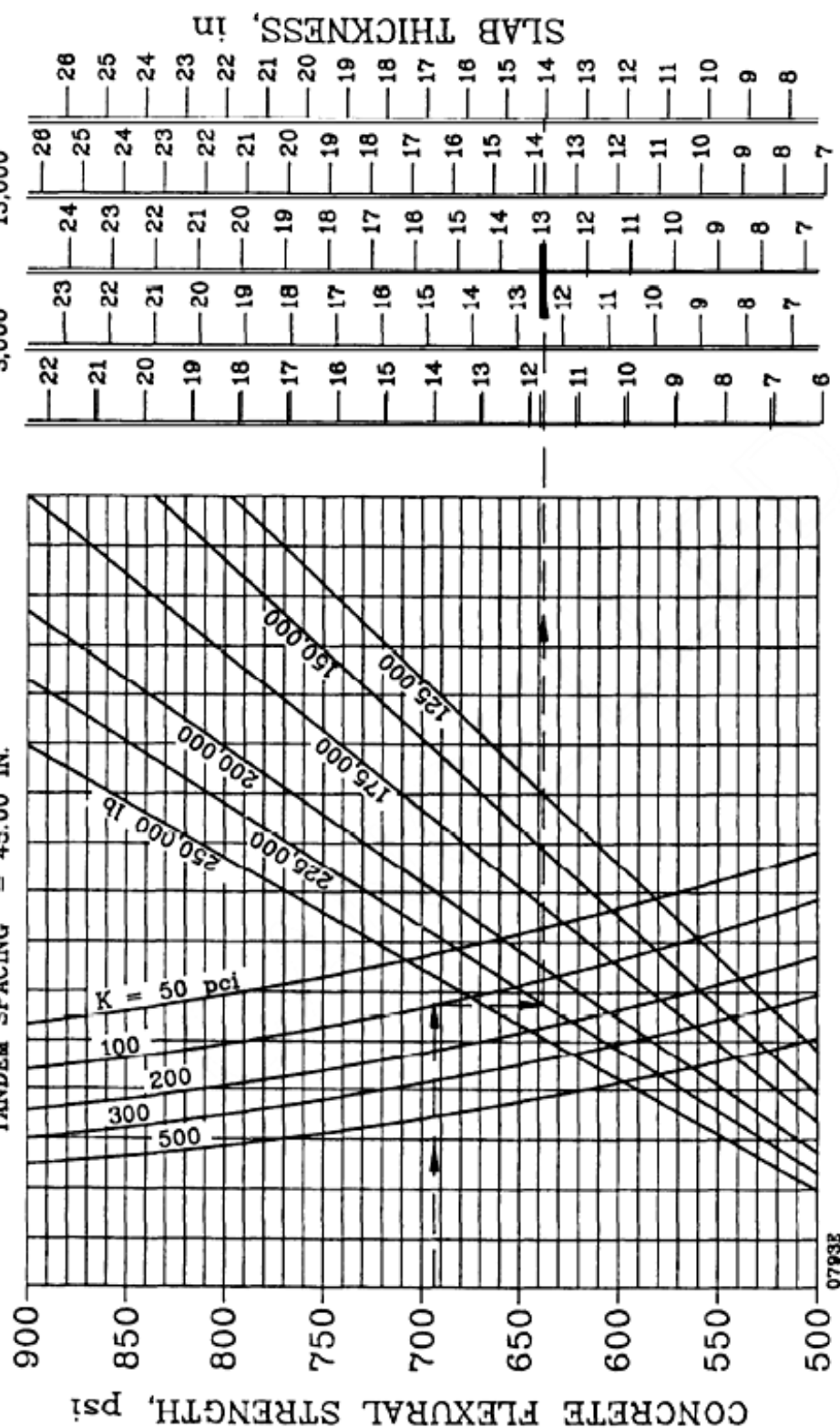
NOTE:

1 inch = 25.4 mm
1 lb = 0.454 kg
1 psi = 0.0069 MN/m²
1 pci = 0.272 MN/m

Σχήμα Π5: Διάγραμμα υπολογισμού εμπειρικής μεθόδου για το αεροσκάφος B-767

B-757

CONTACT AREA = 168.35 SQ. IN.
DUAL SPACING = 34.00 IN.
TANDEM SPACING = 45.00 IN.



NOTE:

1 inch = 25.4 mm
1 psi = 0.0069 MN/m²
1 lb = 0.454 kg
1 pci = 0.272 MN/m³

Σχήμα Π6: Διάγραμμα υπολογισμού εμπειρικής μεθόδου για το α/φ

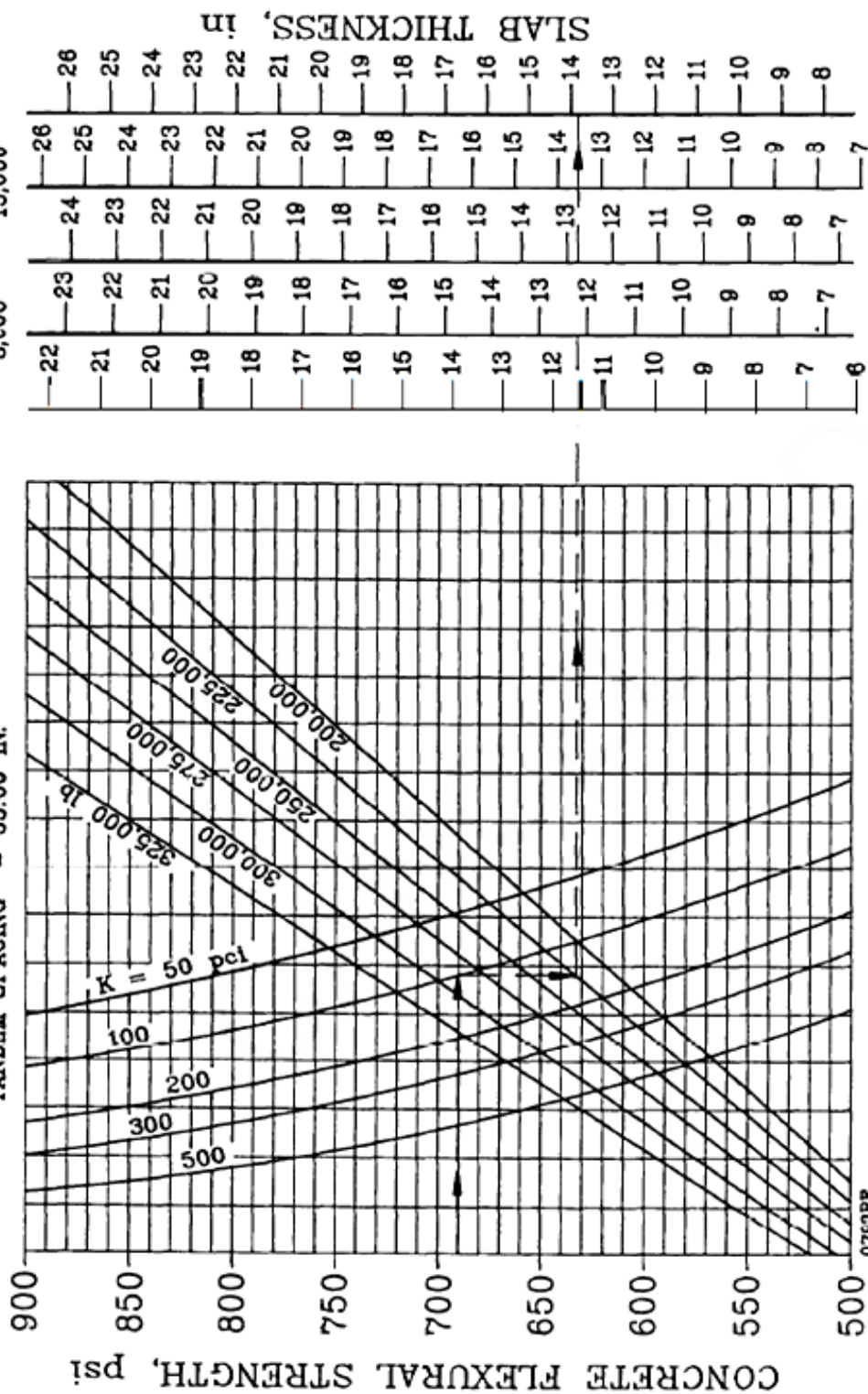
B-757

A-300 MODEL B2

CONTACT AREA = 207.47 SQ. IN.
DUAL SPACING = 34.98 IN.
TANDEM SPACING = 55.00 IN.

ANNUAL DEPARTURES

1,200 3,000 6,000 15,000 25,000

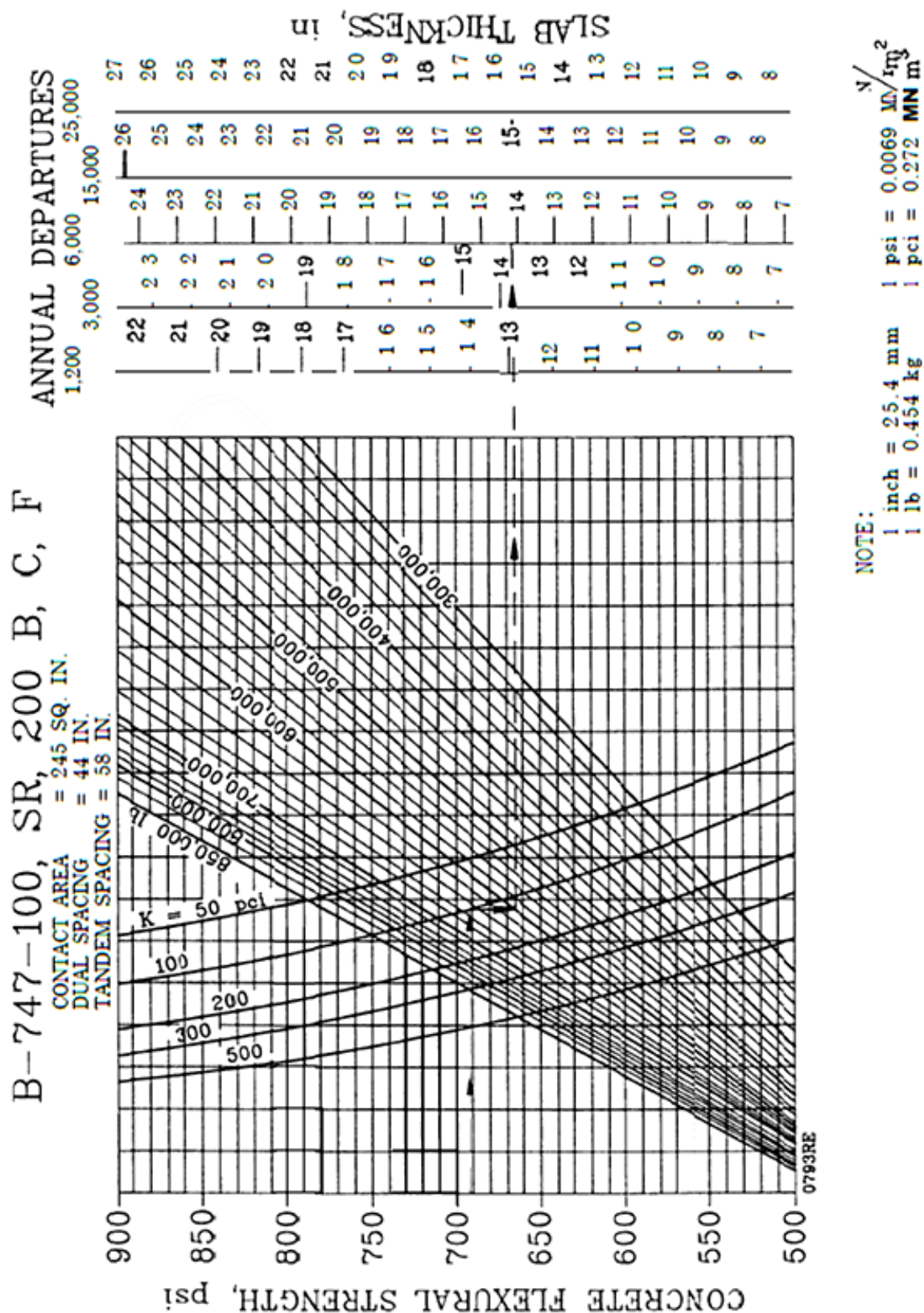


NOTE:

1 inch = 25.4 mm 1 psi = 0.0069 MN/m²
1 lb = 0.454 kg 1 pci = 0.272 MN/m³

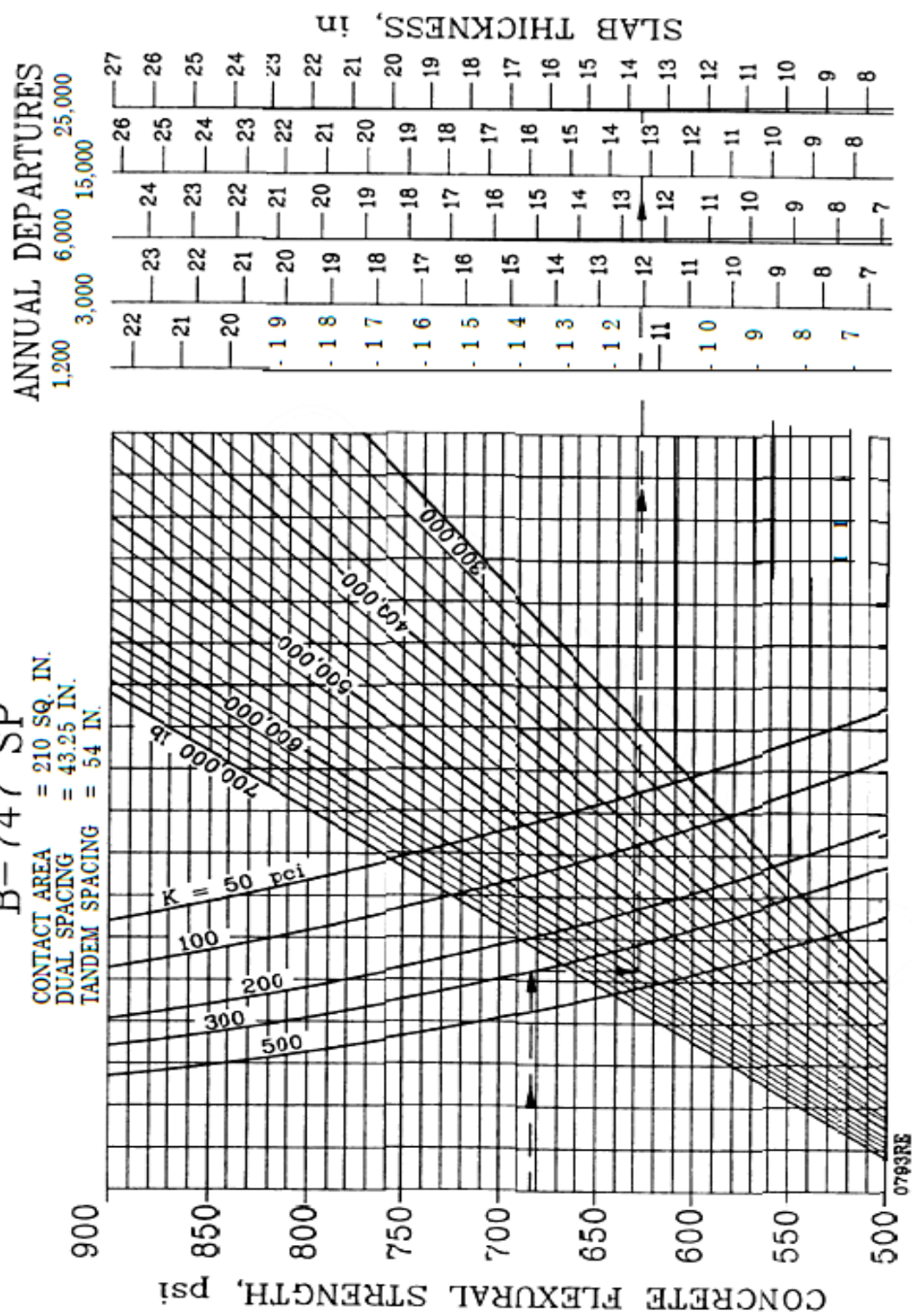
Σχήμα Π7: Διάγραμμα υπολογισμού εμπειρικής μεθόδου για το αεροσκάφος

A-300 MODEL B2 σειρά 2



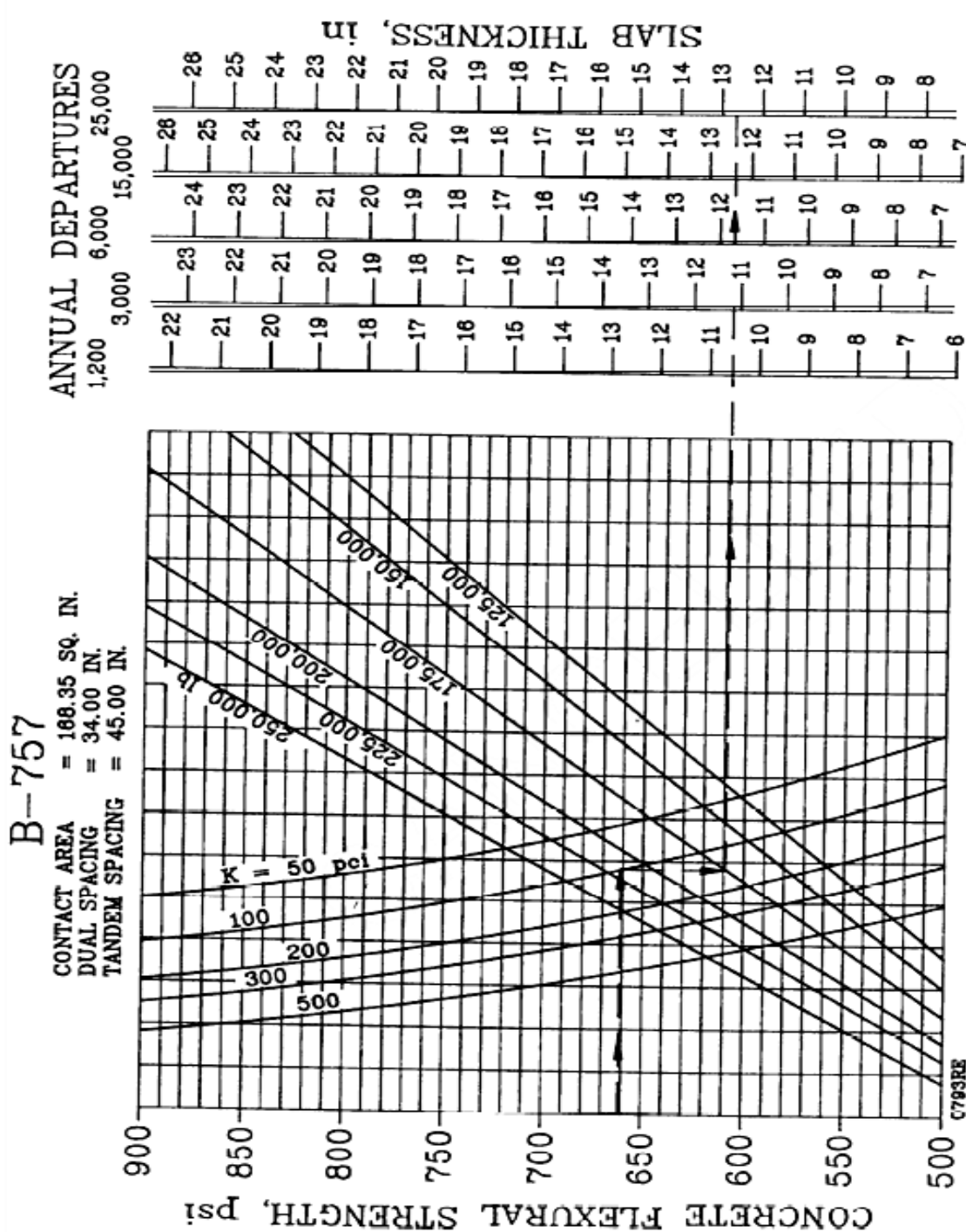
Σχήμα Π7: Διάγραμμα υπολογισμού εμπειρικής μεθόδου για το α/φ B-747-100,SR,200 B, C,F σειρά 2

B-747 SP
 CONTACT AREA = 210 SQ. IN.
 DUAL SPACING = 43.25 IN.
 TANDEM SPACING = 54 IN.



NOTE:
 1 inch = 25.4 mm 1 psi = 0.0069 $\frac{N}{mm^2}$
 1 lb = 0.454 kg 1 pci = 0.272 $\frac{MN}{m^3}$

Σχήμα Π8: Διάγραμμα υπολογισμού εμπειρικής μεθόδου για το α/φ
 B747 SP



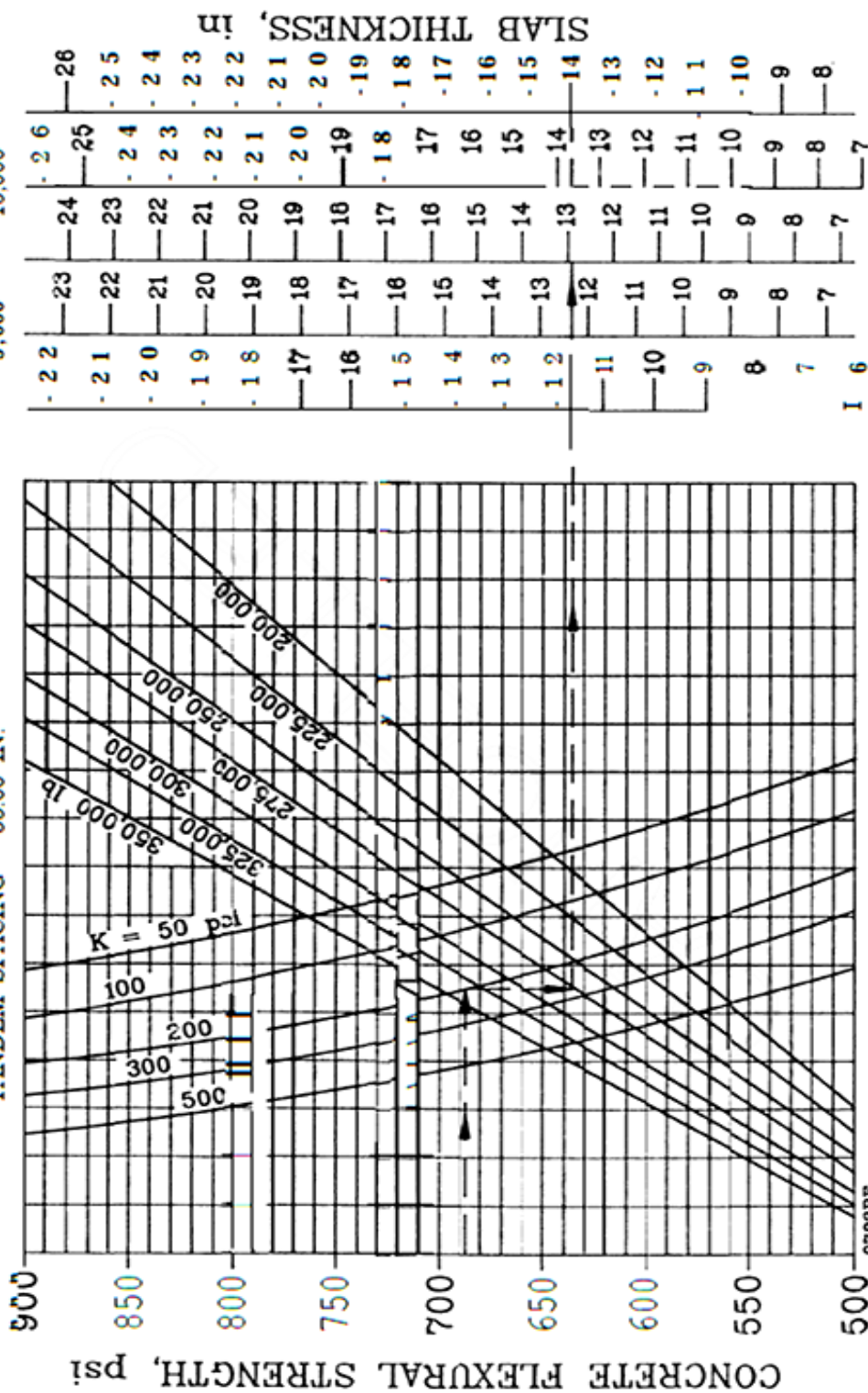
Σχήμα Π9: Διάγραμμα υπολογισμού εμπειρικής μεθόδου α/φ B-757

A-300 MODEL B4

CONTACT AREA = 217.08 SQ. IN.
DUAL SPACING = 36.17 IN.
TANDEM SPACING = 55.00 IN.

ANNUAL DEPARTURES

1,200 3,000 6,000 15,000 25,000



Σχήμα Π10: Διάγραμμα υπολογισμού εμπειρικής μεθόδου για το α/φ
A-300 MODEL B2

NOTE:

1 inch = 25.4 mm 1 psi = 0.0069 N/mm²

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Συνολικά αποτελέσματα υπολογισμών διερευνήσεων επίδρασης παραμέτρων σχεδιασμού στο δείκτη αθροιστικής φθοράς

- Οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις (MPa) για κάθε αεροσκάφος σε σχέση με το δείκτη αντίδρασης στρώσης έδρασης K (MN/m³)

Πίνακας Π1

ΔΕΙΚΤΗΣ Κ ΣΤΡΩΣΗΣ ΕΔΡΑΣΗΣ (MN/m³)	A320	A319	B737-400	B737-800
27,2	3,27	2,88	2,97	3,34
54,4	2,7	2,39	2,48	2,77
81,6	2,38	2,11	2,18	2,44
98,2	2,24	1,98	2,05	2,3

- Οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις (MPa) για κάθε αεροσκάφος σε σχέση με το πάχος της πλάκας σκυροδέματος (cm)

Πίνακας Π2

ΠΑΧΟΣ ΠΛΑΚΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ(cm)	A320	A319	B737-400	B737-800
30	2,85	2,53	2,6	2,92
35	2,38	2,11	2,18	2,44
40	2,02	1,78	1,84	2,06
44	1,77	1,56	1,62	1,81

- Οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις (Mpa) για κάθε αεροσκάφος σε σχέση με το πάχος της στρώσης σταθεροποιημένης υπόβασης (cm)

Πίνακας Π3

ΠΑΧΟΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΥΠΟΒΑΣΗΣ (cm)	A320	A319	B737-400	B737-800
10	2,38	2,11	2,18	2,44
13	2,34	2,07	2,39	2,39
15	2,30	2,03	2,09	2,35
18	2,24	1,98	2,05	2,29
20	2,19	1,94	2,01	2,24

- Οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις (MPa) για κάθε αεροσκάφος σε σχέση με την εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος (MPa)

Πίνακας Π4

ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (MPa)	A320	A319	B737-400	B737-800
3,45	2,39	2,1	2,18	2,44
4,14	2,39	2,1	2,18	2,44
4,83	2,39	2,1	2,18	2,44
5,52	2,39	2,1	2,18	2,44

