



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ ΚΑΤΑ FAA

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΑ ΤΣΙΛΙΓΙΑΝΝΗ



Επιβλέπων: Ανδρέας Λοΐζος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2018

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική μου εργασία, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ανδρέα Λοΐζο, καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ και επιβλέποντα της εργασίας, για τη δυνατότητα που μου έδωσε και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε ώστε να εκπονήσω ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα για τη διπλωματική μου εργασία.

Επιπλέον με ιδιαίτερη θερμή πρέπει να ευχαριστήσω την επιστημονική συνεργάτιδα του εργαστηρίου Οδοποιίας, κα Αγγελική Αρμένη για την καθοδήγηση και την υπομονή της κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	2
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	6
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	7
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	10
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
2 ΕΞΕΛΙΞΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ ΤΗΣ FAA	14
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
2.2 ΕΜΠΕΙΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ FAA	15
2.2.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	15
2.2.2 ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ	16
2.2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΧΩΝ	19
2.2.4 ΤΥΠΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΕΜΠΕΙΡΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ FAA	20
2.3 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ FAA	23
2.3.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	23
2.3.1.1 ΛΟΓΟΣ P/C (PASS-TO-COVERAGE)	27
2.3.1.2 ΝΟΜΟΙ ΚΟΠΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	28
2.3.1.3 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ	29
2.3.1.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΥΚΑΜΠΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ FAA	33
2.4 ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΗΣ FAA	35
2.4.1 ΝΕΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ	45
2.4.1.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΗ ΝΕΑ ΕΚΔΟΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΗΣ FAA	48

2.4.2	ΝΕΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΤΡΩΣΗΣ ΕΔΡΑΣΗΣ	51
2.5	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΥΠΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΦΑΑ ΣΤΑ ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ.....	55
3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΑΡΧΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΗΣ ΦΑΑ.....	58
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	58
3.2	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ.....	59
3.3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	62
3.4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ	69
3.5	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΣΟΧΙΑΣ ΦΑΑ ΒΑΣΕΙ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	74
4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	83
5	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	86

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την εξέλιξη του κριτηρίου αστοχίας που χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων, μέσω της μεθόδου της FAA. Εν προκειμένω, παρουσιάζεται η μετάβαση από την εμπειρική μέθοδο σχεδιασμού στην εξέλιξη της αναλυτικής μεθόδου, που χρησιμοποιείται σήμερα. Διενεργήθηκε προκαταρκτική διερεύνηση των βασικών αρχών των μοντέλων αστοχίας, όπως αυτά εξελίχθηκαν, που χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό, ενώ πραγματοποιήθηκε ενδεικτικό παράδειγμα σχεδιασμού εύκαμπτης διατομής οδοστρώματος. Για περαιτέρω εμβάθυνση στις αρχές των μοντέλων αστοχίας, υλοποιήθηκε προκαταρκτική ανάλυση ευαισθησίας των μοντέλων αστοχίας για την ασφαλική στρώση καθώς και σύγκριση των μοντέλων αστοχίας για μεταβολή ορισμένων παραμέτρων αυτών. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και ορισμένα ενδεικτικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη.

Λέξεις κλειδιά: Εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων, FAA, εξέλιξη σχεδιασμού, αξιολόγηση κριτήριο αστοχίας, σύγκριση μοντέλων αστοχίας, σχεδιασμός εύκαμπτου οδοστρώματος, ανάλυση ευαισθησίας

ABSTRACT

The present diploma thesis demonstrates the evolution of the existing failure criteria on which the design of flexible airport pavements is based, according to FAA design method. In particular, the transition from the empirical based FAA method to a new pavement design methodology is presented. The basic principles of existing fatigue failure models are compared to the ones of the energy based models through a preliminary investigation, while an indicative flexible pavement example is conducted using both fatigue models. For further consideration, a preliminary sensitivity analysis is implemented regarding hot mix asphalt fatigue model as well as a comparison of fatigue models based on the variation of particular model parameters. In conclusion, results and suggestions are provided through this study.

Key words: Flexible airport pavements, FAA, design evolution, failure criteria evaluation, fatigue failure model comparison, flexible pavement design, sensitivity analysis

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Γενικό νομογράφημα μεθόδου CBR (FAA, 1995)	16
Σχήμα 2.2: Κατανομή βάρους αεροσκάφους στα φορεία	16
Σχήμα 2.3: Διάγραμμα υπολογισμού πάχους για τυπικό φορείο μονού τροχού (FAA, 1995).....	19
Σχήμα 2.4: Τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος	20
Σχήμα 2.5: Αντικατάσταση αεροσκάφους σχεδιασμού με σύνολο.....	23
κυκλοφορίας.....	23
Σχήμα 2.6: Κρίσιμες θέσεις αστοχίας εύκαμπτου οδοστρώματος	24
Σχήμα 2.7: Αρχή Miner για υπολογισμό αθροιστικής φθοράς αεροσκάφους (FAA, 2009).....	25
Σχήμα 2.8: Υπολογισμός αθροιστικής φθοράς στρώσης έδρασης στην αναλυτική μέθοδο της FAA.....	26
Σχήμα 2.9: Ενεργά πλάτη δύο τροχών για υπολογισμό του λόγου P/C (Kawa, 2012)	27
Σχήμα 2.10 : Βάση δεδομένων αεροσκαφών FAA.....	32
Σχήμα 2.11: Κρίσιμες θέσεις αστοχίας εύκαμπτου οδοστρώματος	36
Σχήμα 2.12: Εξέλιξη επιμερισμού των στρώσεων από αδρανή (Kawa, 2017)	37
Σχήμα 2.13: Υπολογισμός απαιτήσεων συμπίκνωσης στρώσης έδρασης στην εξελιγμένη έκδοση αναλυτικής μεθόδου της FAA (FAA, 2016).....	39
Σχήμα 2.14: Εγκατάσταση δοκιμών NAPTF της FAA (FAA, 2018)	40
Σχήμα 2.15: Διαστάσεις οχήματος που χρησιμοποιείται στον κατασκευαστικό κύκλο CC1 της NAPTF (Redles, 2015)	42
Σχήμα 2.16: Διαστάσεις οχήματος που χρησιμοποιείται στον κατασκευαστικό κύκλο CC3 της NAPTF (Redles, 2015)	42
Σχήμα 2.17: Διάταξη κύριου φορείου οχήματος που χρησιμοποιείται στον CC5 (Kawa, 2017).....	43
Σχήμα 2.18: Διάταξη κύριου φορείου οχήματος που χρησιμοποιείται στον CC5 (Kawa, 2017).....	43

Σχήμα 2.19: Διατομές οδοστρώματος στις οποίες πραγματοποιούνται οι κατασκευαστικοί κύκλοι της NAPTF (Gopalakrishnan & Thompson, 2004).....	44
Σχήμα 2.20: Οδόστρωμα στο οποίο πραγματοποιούνται οι δοκιμές της NAPTF (Gopalakrishnan & Thompson, 2004).....	44
Σχήμα 2.21: Ενεργειακό μοντέλο RDEC (Pais, 2009).....	46
Σχήμα 2.22 : α) Συσκευή εργαστηριακής δοκιμής standard four-point bending beam fatigue test, β) σχηματική απεικόνιση σημείων φόρτισης.....	49
Σχήμα 2.23: Επιτρεπόμενο εύρος ορίων τυπικού υλικού P-401.....	51
Σχήμα 2.24: Διάγραμμα εύρεσης κατώτερου ορίου για τις καμπύλες αστοχίας στρώσης έδρασης (Kawa, 2017).....	52
Σχήμα 2.25: Διάγραμμα σύγκρισης μοντέλων Bleasdale και παλαιότερης αναλυτικής μεθόδου FAA (Kawa, 2017).....	53
Σχήμα 2.26: Σύγκλιση των μοντέλων Bleasdale και παλαιότερης αναλυτικής μεθόδου FAA (Kawa, 2017).....	54
Σχήμα 2.27: Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος αδρανών υλικών για ασφαλικό σκυρόδεμα κλειστού τύπου (ΕΤΕΠ, 2009).....	55
Σχήμα 2.28: Σύγκριση κοκκομετρίας ελληνικών προδιαγραφών και P-401.....	56
Σχήμα 3.1: Χρονικά διαστήματα «rest periods» για το οδόστρωμα (Carpenter & Shen, 2006)	61
Σχήμα 3.2: Αεροσκάφος σχεδιασμού.....	63
Σχήμα 3.3: Διάταξη τροχών αεροσκάφους σε σχέση με τον κεντρικό άξονα του διαδρόμου απογείωσης.....	63
Σχήμα 3.4: Διατομή οδοστρώματος από σχεδιασμό βάσει της εξελιγμένης αναλυτικής μεθόδου της FAA	64
Σχήμα 3.5: Περιβάλλον εφαρμογής εξελιγμένης αναλυτικής μεθόδου της FAA.....	65
Σχήμα 3.6: Φθορά του αεροσκάφους σχεδιασμού.....	65
Σχήμα 3.7: Διατομή βάσει της εξέλιξης της αναλυτικής μεθόδου FAA και αντίστοιχοι δείκτες φθοράς	66
Σχήμα 3.8: Διατομή οδοστρώματος κατά την αρχική αναλυτική μέθοδο σχεδιασμού FAA και αντίστοιχοι δείκτες φθοράς.....	67

Σχήμα 3.9: Περιβάλλον εφαρμογής αρχικής αναλυτικής μεθόδου σχεδιασμού κατά FAA.....	67
Σχήμα 3.10: Αναλογία παχών ασφαλικής στρώσης για τις δύο εκδόσεις της μεθόδου	68
Σχήμα 3.11: Αναλογία παχών στρώσης βάσης για τις δύο εκδόσεις της μεθόδου ..	68
Σχήμα 3.12: Διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος βάσει της εξελεγμένης αναλυτικής μεθόδου της FAA	70
Σχήμα 3.13: Καμπυλές καλύψεων-διελεύσεων και παραμορφώσεων για μέτρο ελαστικότητας 1380 Mpa	71
Σχήμα 3.14: Σχέση καλύψεων-διελεύσεων για τα δύο μοντέλα.....	72
Σχήμα 3.15: Καμπυλές καλύψεων-διελεύσεων και παραμορφώσεων για μέτρο ελαστικότητας 4138 Mpa	73
Σχήμα 3.16: Διατομή βάσει νέων μοντέλων αστοχίας	74
Σχήμα 3.17: Διάγραμμα θερμοκρασίας και μέτρου ελαστικότητας	75
Σχήμα 3.18: Διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας και HMA CDF	78
Σχήμα 3.19: Διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας και καλύψεων-διελεύσεων για την ασφαλτική στρώση	79
Σχήμα 3.20: Διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας και Sub CDF	81

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Συντελεστές ισοδυναμίας συστημάτων κύριου φορείου (FAA, 1995)...	17
Πίνακας 2.2: Τιμές λόγων διελεύσεων προς τις καλύψεις C.....	18
Πίνακας 2.3: Υλικά εμπειρικής μεθόδου FAA (FAA, 1995).....	21
Πίνακας 2.4: Συντελεστές ισοδυναμίας για μετατροπή τυπικών υλικών σε σταθεροποιημένα υλικά (FAA, 1995).....	22
Πίνακας 2.5: Τυπικά συστήματα προσγείωσης αεροσκαφών (FAA, 2009)	30
Πίνακας 2.6: Τυπικά συστήματα προσγείωσης αεροσκαφών (συνέχεια) (FAA, 2009)	31
Πίνακας 2.7: Προτεινόμενες ελάχιστες τιμές πάχους στρώσης βάσης από	34
ασύνδετο υλικό (FAA, 2009).....	34
Πίνακας 2.8: Ελάχιστες τιμές πάχους στρώσεων για τα εύκαμπτα οδοστρώματα (FAA, 2016).....	38
Πίνακας 2.9: Απαιτήσεις συμπίκνωσης στρώσης έδρασης για εύκαμπτα οδοστρώματα κατά την αρχική μορφή αναλυτικής μεθόδου της FAA (FAA, 2009)...	40
Πίνακας 2.10: Χαρακτηριστικά ασφαλικού σκυροδέματος ΕΤΕΠ (ΕΤΕΠ, 2009)	57
Πίνακας 2.11: Χαρακτηριστικά τυπικού υλικού P-401 (FAA, 2014)	57
Πίνακας 3.1: Τιμές μέτρου ελαστικότητας για διάφορες τιμές θερμοκρασίας	75
Πίνακας 3.2 : Δεδομένα μοντέλου Carpenter&Shen	76
Πίνακας 3.3: Δεδομένα για υπολογισμό φθοράς.....	77
Πίνακας 3.4: Υπολογισμός φθοράς βάσει του μοντέλου Carpenter&Shen	77
Πίνακας 3.5: Υπολογισμός φθοράς βάσει του μοντέλου του Heukelom&Klomp.....	77
Πίνακας 3.6: Υπολογισμός φθοράς βάσει του μοντέλου του Bleasdale για αστοχία της στρώσης έδρασης	80
Πίνακας 3.7: Υπολογισμός φθοράς βάσει του μοντέλου της αρχικής αναλυτικής μεθόδου της FAA για αστοχία της στρώσης έδρασης	80

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα οδοστρώματα αποτελούν μία δομή που εντοπίζεται σε ποικίλα έργα συγκοινωνιακής υποδομής. Τέτοια έργα μπορούν να είναι το οδικό δίκτυο, οι χώροι στάθμευσης αυτοκινήτων, οι γέφυρες, τα διόδια. Ένα ακόμα πεδίο χρήσης των οδοστρωμάτων είναι τα αεροδρόμια. Τα οδοστρώματα των αεροδρομίων παρουσιάζουν αρκετά κοινά χαρακτηριστικά με τα οδοστρώματα των οδών, όπως τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή, η δομή τους, αλλά και ο τρόπος κατασκευής τους. Ωστόσο, γίνεται διάκριση αυτών από τα οδοστρώματα των οδών λόγω της διαφορετικής κυκλοφορίας, του μεγέθους των φορτίων αλλά και του τρόπου φόρτισης που δέχεται ένα οδόστρωμα αεροδρομίου.

Η κίνηση των αεροσκαφών πραγματοποιείται μέσω των δαπέδων των αεροδρομίων, τα οποία αποτελούνται από διαφορετικούς τύπους οδοστρωμάτων, εύκαμπτων ή δύσκαμπτων, ανάλογα με τις λειτουργικές απαιτήσεις τους. Πιο συγκεκριμένα, στα δάπεδα αναμονής, στάθμευσης και συντήρησης των αεροσκαφών επιλέγεται, συνήθως, η κατασκευή δύσκαμπτου οδοστρώματος, λόγω των μεγάλων στατικών φορτίων που δέχεται το οδόστρωμα. Αντίθετα, σε διαδρόμους, τροχόδρομους και συνδετήριους διαδρόμους, τείνει να χρησιμοποιείται εύκαμπτος τύπος οδοστρωμάτων. Επομένως, απαιτείται σωστός σχεδιασμός του οδοστρώματος του αεροδρομίου, προκειμένου να ανταποκρίνεται επαρκώς στις συνθήκες φόρτισης αλλά και στις ανάγκες του αεροδρομίου.

Μια διατομή ενός οδοστρώματος αποτελείται από ένα αριθμό στρώσεων διαφορετικών υλικών. Ο σχεδιασμός ενός οδοστρώματος αεροδρομίου περιλαμβάνει τη επιλογή των παχών της κάθε στρώσης της διατομής, αλλά και την τοποθέτηση των κατάλληλων υλικών με τις απαιτούμενες ιδιότητες, ώστε να μπορούν να φέρουν τα φορτία των αεροσκαφών, τα οποία αποτελούν τον κύριο παράγοντα καταπόνησης του οδοστρώματος.

Για την υλοποίηση του σχεδιασμού των οδοστρωμάτων των αεροδρομίων έχουν αναπτυχθεί παγκοσμίως διάφορες μέθοδοι διαστασιολόγησης εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων πολιτικών αεροδρομίων. Μερικά παραδείγματα τέτοιων μεθόδων είναι αυτή της Ομοσπονδιακής Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας FAA (Federal Aviation Administration), του Γαλλικού Υπουργείου Συγκοινωνιών (STBA: Service Technique des Bases Aériennes) (STBA, 2001), της Διεύθυνσης Υπηρεσιών Πολιτικού Μηχανικού της Μεγάλης Βρετανίας (Directorate of Civil Engineering Services) (Directorate of civil engineering services, 1989), του Κέντρου Ανάπτυξης και

Έρευνας των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (ERCD:Engineer Research and Development Center) (ERDC, 2001), της Ένωσης Σκυροδέματος (PCA: Portland Center Association) (PCA, 1966) που εφαρμόζεται μόνο σε δύσκαμπτα οδοστρώματα και άλλες. Η παρούσα διπλωματική επικεντρώνεται στη μέθοδο διαστασιολόγησης της FAA, για τα εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίου, που αποτελεί και την πλέον διαδεδομένη μέθοδο σχεδιασμού.

Η FAA εισήγαγε το 1995 (FAA, 1995) την εμπειρική μέθοδο σχεδιασμού εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, η οποία χρησιμοποιήθηκε εκτενώς έως ότου αντικαταστάθηκε το 2009 από την αρχική αναλυτική μέθοδο σχεδιασμού (FAA, 2009), η οποία εξακολουθεί να χρησιμοποιείται έως και στις μέρες μας. Σημειώνεται ότι η μέθοδος διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων της FAA εφαρμόζεται τόσο στην αξιολόγηση όσο και στην ενίσχυση υφιστάμενων εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.

Στην προσπάθεια εξέλιξης της μεθοδολογίας σχεδιασμού, η FAA παρουσίασε το 2016 μία εξελιγμένη έκδοση της αναλυτικής μεθόδου (FAA, 2016). Οι πρώτες βάσεις για μία νέα προσέγγιση στο σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων, παρουσιάστηκαν στο συνέδριο Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering από τον S.H. Carpenter, που πραγματοποιήθηκε στην Αθήνα το 2007. Ωστόσο, η ένταξη των εξελίξεων στη μεθοδολογία σχεδιασμού της FAA, παρουσιάστηκε μετά από μία δεκαετία στο συνέδριο Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, που πραγματοποιήθηκε το 2017 στην Αθήνα.

Η παρούσα διπλωματική επικεντρώνεται στην καταγραφή των εξελίξεων που εισήχθησαν στο σχεδιασμό αλλά και στη μελέτη της επίδραση αυτών στη διαστασιολόγηση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων μέσω της αναλυτικής μεθόδου της FAA, με αφορμή την πρόσφατη εισαγωγή των αρχών αυτών στη μέθοδο σχεδιασμού.

Για το σκοπό αυτό πραγματοποιείται παρουσίαση της μετάβασης από την εμπειρική μέθοδο σχεδιασμού της FAA στην αναλυτική μέθοδο και μετέπειτα στην νεότερη έκδοση αυτής. Ακόμα, πραγματοποιείται προκαταρκτική διερεύνηση ώστε να συγκριθούν οι βασικές αρχές και τα κριτήρια στα οποία στηρίζεται ο σχεδιασμός των οδοστρωμάτων κατά την εξέλιξη της μεθοδολογίας διαστασιολόγησης, ώστε να συνταχθούν κάποια ενδεικτικά συμπεράσματα. Παρότι η αναλυτική μέθοδος σχεδιασμού της FAA χρησιμοποιείται τόσο σε εύκαμπτα όσο και σε δύσκαμπτα οδοστρώματα, στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται ανάλυση και μελέτη για το σχεδιασμό εύκαμπτου τύπου οδοστρώματος.

Στη συνέχεια ακολουθούν τα εξής κεφάλαια:

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Πραγματοποιείται παρουσίαση των βασικών αρχών της εμπειρικής μεθόδου σχεδιασμού οδοστρωμάτων της FAA αλλά και η μετάβαση στις αρχές της αρχικής αναλυτικής μεθόδου. Επίσης, παρουσιάζεται η προσθήκη των εξελίξεων στην αναλυτική μέθοδο σχεδιασμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Γίνεται προκαταρκτική διερεύνηση με σκοπό τη σύγκριση των βασικών αρχών , όπως αυτές εξελίχθηκαν στην αναλυτική μέθοδο σχεδιασμού. Η σύγκριση γίνεται μέσω ενδεικτικών παραδειγμάτων διαστασιολόγησης και ανάλυση ευαισθησίας για τα μοντέλα αστοχίας τα οποία καθορίζουν το σχεδιασμό, όπως αυτά διαφοροποιήθηκαν κατά την εξέλιξη της αναλυτικής μεθόδου της FAA.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: Παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα από την προκαταρκτική μελέτη που πραγματοποιήθηκε και επισημαίνονται σημεία ενδιαφέροντος για περαιτέρω ανάλυση και διερεύνηση.

2 ΕΞΕΛΙΞΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ ΤΗΣ FAA

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα πλαίσια του σχεδιασμού οδοστρωμάτων αεροδρομίων, εισήχθησαν διάφορες μεθοδολογίες διαστασιολόγησης. Πιο συγκεκριμένα, το 1995 δημοσιεύτηκε από την FAA (Federal Aviation Administration) η εμπειρική μέθοδος σχεδιασμού οδοστρωμάτων αεροδρομίου, η οποία εξελίχθηκε και συμπληρώθηκε με διορθώσεις με την πάροδο των χρόνων. Η συγκεκριμένη μέθοδος συνοδεύεται από το εγχειρίδιο Advisory Circular AC 150/5320-6D (FAA, 1995) και εφαρμόζεται τόσο σε εύκαμπτα όσο και σε δύσκαμπτα οδοστρώματα. Η εν λόγω μέθοδος βασίζεται σε συγκεκριμένες παραδοχές που συνδυάζουν το εμπειρικό υπόβαθρο και τις εκτενείς έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί από την FAA. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται για διαστασιολόγηση νέων, αξιολόγηση αλλά και ενίσχυση υφιστάμενων εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίου.

Την εμπειρική μέθοδο διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων της FAA, έρχεται να διαδεχθεί το 2009 η αναλυτική μέθοδος σχεδιασμού, οι βασικές αρχές της οποίας αναφέρονται στο εγχειρίδιο Advisory Circular AC 150/5320-6E (FAA, 2009). Η FAA προκειμένου να διευκολύνει τη διαδικασία σχεδιασμού βάσει της αναλυτικής μεθόδου, ανέπτυξε το υπολογιστικό σχεδιαστικό πρόγραμμα FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layer Design (FAARFIELD). Το AC 150/5320-6E αντικαθιστά το προηγούμενο AC 150/5320-6D, που εκδόθηκε τον Ιούλιο του 1995.

Στην προσπάθεια εξέλιξης και βελτίωσης της αναλυτικής μεθόδου της FAA, εισήχθη μία νέα έκδοση της μεθόδου διαστασιολόγησης νέων αλλά και αξιολόγησης και ενίσχυσης υφιστάμενων εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Η νέα αυτή εξελιγμένη έκδοση περιγράφεται από το Advisory Circular AC 150/5320-6F (FAA, 2016). Η εξελιγμένη μορφή της αναλυτικής μεθόδου της FAA εφαρμόζει τις βασικές αρχές της στη διαδικασία σχεδιασμού μέσω της χρήσης του FAARFIELD 1.42, αντικαθιστώντας το FAARFIELD 1.305 που χρησιμοποιούσε η αρχική μορφή της αναλυτικής μεθόδου. Στη συνέχεια παρατίθενται οι βασικές αρχές της μεθόδου σχεδιασμού της FAA, με στόχο την παρουσίαση της εξέλιξής της με την πάροδο του

χρόνου. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην μετάβαση από την αρχική μορφή της αναλυτικής μεθόδου σχεδιασμού της FAA στην νεότερη έκδοσή της.

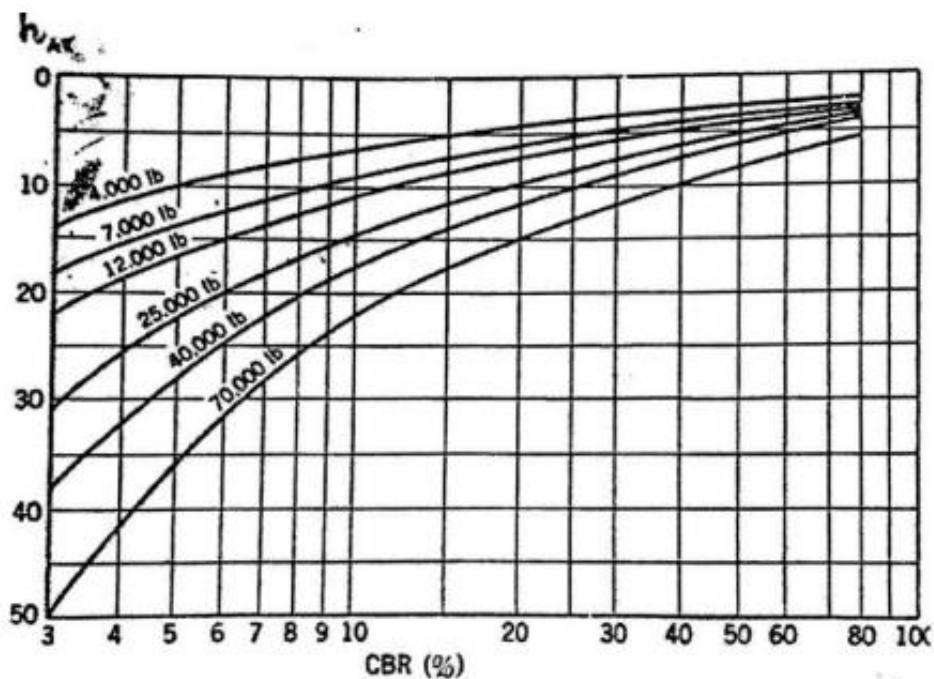
2.2 ΕΜΠΕΙΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ FAA

2.2.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Βασική παραδοχή στην οποία βασίζεται ο σχεδιασμός της εμπειρικής μεθόδου αποτελεί η μέθοδος CBR. Ο Καλιφορνιακός Δείκτης CBR (California Bearing Ratio) της στρώσης έδρασης, όπως αυτός αναπτύχθηκε από το σώμα μηχανικών των ΗΠΑ, προκύπτει από μία δοκιμή διεισδυτικότητας, κατά την οποία εκφράζεται η φέρουσα ικανότητα εδαφικών και ασύνδετων υλικών όταν συμπυκνωθούν στο εργαστήριο στη βέλτιστη υγρασία και σε διάφορους βαθμούς πυκνότητας. Ο δείκτης CBR ορίζεται ως ο λόγος επί τις εκατό της δύναμης που απαιτείται για τη διείσδυση του εμβόλου της συσκευής στο εκάστοτε υλικό σε ένα συγκεκριμένο βάθος, προς τη δύναμη που απαιτείται για το αντίστοιχο βάθος διείσδυσης ενός πρότυπου υλικού.

Ο σχεδιασμός βάσει της μεθόδου CBR είναι αποτέλεσμα εμπειρικής διαδικασίας και εφαρμόζεται για τον υπολογισμό του πάχους των στρώσεων του οδοστρώματος, όπως προκύπτουν για μία δεδομένη στρώση έδρασης (FAA, 1995).

Το σχήμα 2.1 παρουσιάζει το γενικό νομογράφημα της μεθόδου CBR, με βάση το οποίο υπολογίζεται το απαιτούμενο πάχος της στρώσης του οδοστρώματος σε σχέση με την φέρουσα ικανότητα της υποκείμενης στρώσης και τη φόρτιση που δέχεται το οδόστρωμα από το αεροσκάφος.



Σχήμα 2.1: Γενικό νομογράφημα μεθόδου CBR (FAA, 1995)

2.2.2 ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ

Σύμφωνα με την εμπειρική μέθοδο της FAA, τα πάχη των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος υπολογίζονται με βάση το αεροσκάφος σχεδιασμού. Ως αεροσκάφος σχεδιασμού, επιλέγεται από το σύνολο των αεροσκαφών που πρόκειται να χρησιμοποιήσουν το οδόστρωμα, αυτό για το οποίο απαιτείται το μέγιστο πάχος οδοστρώματος, όσον αφορά στα εύκαμπτα οδοστρώματα. Ο σχεδιασμός πραγματοποιείται έτσι ώστε το οδόστρωμα να παρουσιάζει διάρκεια ζωής είκοσι ετών. Γίνεται, ακόμα, η παραδοχή ότι το 95% του φορτίου ενός αεροσκάφους κατανέμεται στα πίσω φορεία, ενώ μόλις το 5 % κατανέμεται στο ρινιαίο φορείο τροχών, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Κατανομή βάρους αεροσκάφους στα φορεία

Επίσης, η διάταξη των τροχών του κύριου φορείου κάθε αεροσκάφους επιδρά διαφορετικά στο οδόστρωμα. Προκειμένου να γίνει αναγωγή όλων των αεροσκαφών σε γεωμετρία ανάλογη με αυτή του αεροσκάφους σχεδιασμού, ώστε να ληφθεί υπόψη η επίδρασή τους στο οδόστρωμα, οι ετήσιες αναχωρήσεις του κάθε αεροσκάφους πολλαπλασιάζονται με τον αντίστοιχο συντελεστή. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται αναλυτικά οι συντελεστές για την μετατροπή σε ισοδύναμο σύστημα τροχών κύριου φορείου.

Πίνακας 2.1: Συντελεστές ισοδυναμίας συστημάτων κύριου φορείου (FAA, 1995)

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
διπλού δίδυμου τροχού	μονού τροχού	2
διπλού δίδυμου τροχού	διπλού τροχού	1,7
διπλού τροχού	μονού τροχού	1,3
τετραπλού δίδυμου τροχού	διπλού τροχού	1,7

Αφού πραγματοποιηθεί η παραπάνω αναγωγή, οι ετήσιες διελεύσεις μετατρέπονται σε αντίστοιχες ισοδύναμες για το αεροσκάφος σχεδιασμού, σύμφωνα με τη σχέση (1). Προσδιορίζεται το φορτίο τροχού κάθε αεροσκάφους πολλαπλασιάζοντας το συνολικό βάρος με 0,95, αφού το 95 % μεταφέρεται στα κύρια φορεία τροχών και διαιρείται με τον αριθμό των τροχών του κύριου συστήματος.

$$\log(R_1) = \log(R_2) * \left(\frac{W_2}{W_1}\right)^{1/2} \quad (1)$$

Όπου,

- W_1 : φορτίο τροχού του αεροσκάφους σχεδιασμού
- W_2 : φορτίο τροχού αεροσκάφους που γίνονται οι μετατροπές

- R_1 : ισοδύναμες διελεύσεις αεροσκάφους σχεδιασμού
- R_2 : ισοδύναμες διελεύσεις του αεροσκάφους που μετατράπηκαν σε ισοδύναμες του ίδιου συστήματος τροχών με το αεροσκάφος σχεδιασμού.

Οι ετήσιες διελεύσεις που προκύπτουν αθροίζονται με τις ετήσιες διελεύσεις του αεροσκάφους σχεδιασμού για να χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό του πάχους των στρώσεων του οδοστρώματος αεροδρομίου.

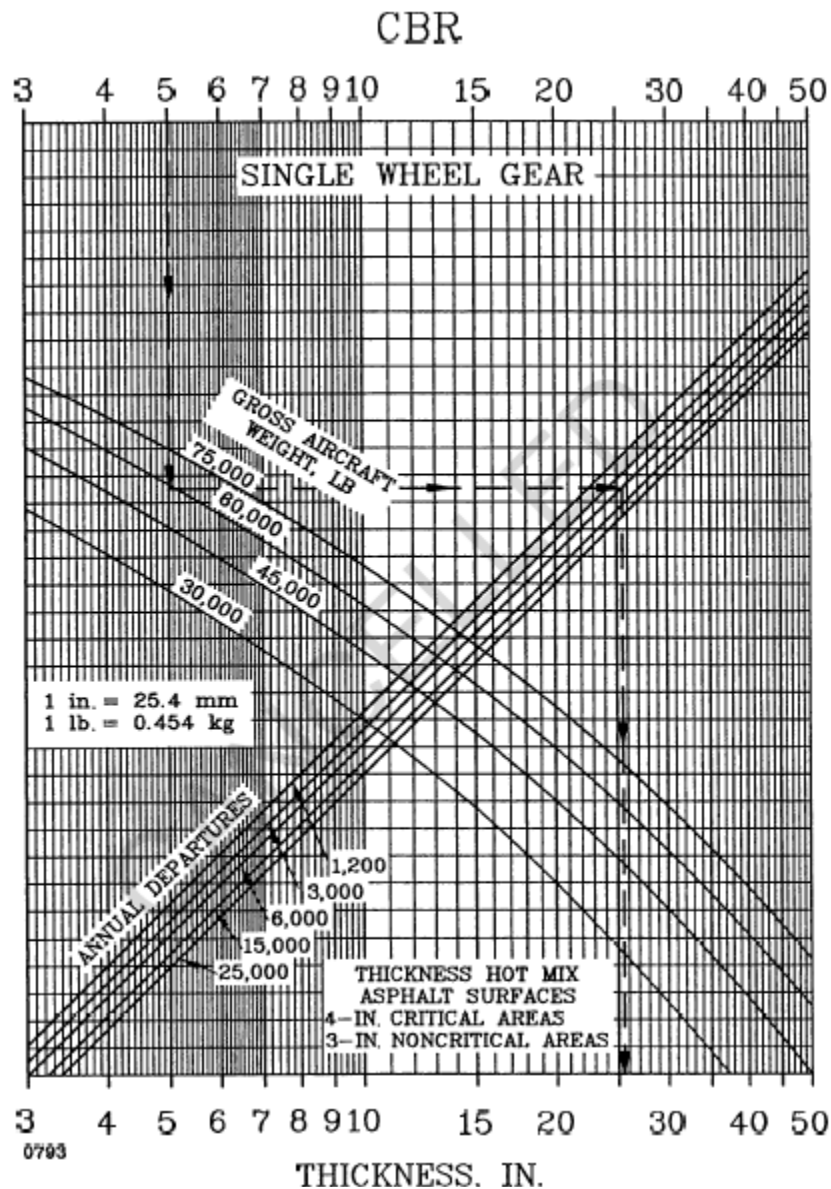
Μία ακόμα παραδοχή της μεθόδου που έχει συμπεριληφθεί στα διαγράμματα, είναι η έννοια των καλύψεων-διελεύσεων (coverages). Συγκεκριμένα, η μέθοδος θεωρεί ότι τα φορεία ενός αεροσκάφους σπανίως κινούνται στο ίδιο ίχνος και επομένως απαιτούνται περισσότερες από μία διελεύσεις προκειμένου σε ένα συγκεκριμένο σημείο του οδοστρώματος να προκύψει η μέγιστη επιβαλλόμενη φόρτιση και κατά επέκταση μία κάλυψη-διέλευση. Επομένως, προκειμένου να ληφθούν υπόψιν στο σχεδιασμό οι καλύψεις-διελεύσεις, εισάγεται η έννοια του λόγου των διελεύσεων προς τις καλύψεις-διελεύσεις (pass-to-coverage ratio). Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζονται συγκεκριμένα οι τιμές του λόγου των διελεύσεων προς τις καλύψεις-διελεύσεις, που έχουν συμπεριληφθεί στη διαδικασία σχεδιασμού της εμπειρικής μεθόδου της FAA (FAA, 1995).

Πίνακας 2.2: Τιμές λόγων διελεύσεων προς τις καλύψεις C

Διάγραμμα σχεδιασμού	Λόγος διελεύσεων προς καλύψεις-διελεύσεις C (pass-to-coverage ratio)	
	Εύκαμπτα οδοστρώματα	Δύσκαμπτα οδοστρώματα
Μονού τροχού	5,18	5,18
Διπλού τροχού	3,48	3,48
Διπλ. Τροχ-διπλ. Άξονα	1,84	3,68
A-300 Model B2	1,76	3,5
A-300 Model B4	1,73	3,45
B-747	1,85	3,7
B-757	1,94	3,88
B-767	1,95	3,9
C-130	2,07	4,15
DC10-10	1,82	3,64
DC10-30	1,69	3,38
L-1011	1,81	3,62

2.2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΧΩΝ

Η FAA, μέσω του εγχειρίδιου AC 150/5320-6D, παρέχει διαγράμματα υπολογισμού του πάχους για τυπικά κύρια φορεία μονού, διπλού και διπλού δίδυμου τροχού. Ενδεικτικά, στο σχήμα 2.3, παρουσιάζεται το διάγραμμα υπολογισμού πάχους για αεροσκάφος μονού τροχού.



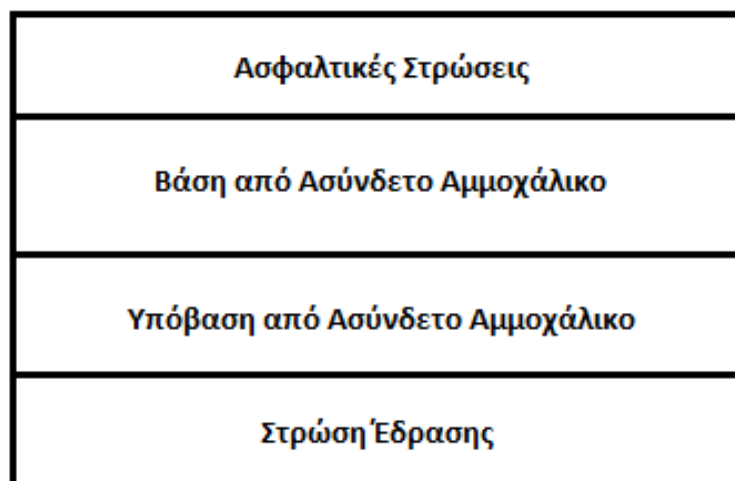
Σχήμα 2.3: Διάγραμμα υπολογισμού πάχους για τυπικό φορείο μονού τροχού (FAA, 1995)

Προκειμένου να υπολογιστεί το πάχος της κάθε στρώσης του εύκαμπτου οδοστρώματος, εισάγονται ως δεδομένα στο διάγραμμα η τιμή του δείκτη CBR της υποκείμενης στρώσης, οι ετήσιες αναχωρήσεις του αεροσκάφους σχεδιασμού καθώς

και το συνολικό του βάρος. Αρχικά, γίνεται η διαδικασία με το δείκτη CBR της στρώσης έδρασης, ώστε να υπολογιστεί το συνολικό πάχος του οδοστρώματος αεροδρομίου. Στη συνέχεια επαναλαμβάνονται τα ίδια βήματα για τον υπολογισμό του πάχους κάθε επιμέρους στρώσης, αλλά εισάγοντας το δείκτη CBR της υποκείμενης αυτής.

2.2.4 ΤΥΠΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΕΜΠΕΙΡΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ FAA

Η τυπική διατομή ενός εύκαμπτου οδοστρώματος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.4, αποτελείται από ασφαλτικές στρώσεις, στρώση βάσης από ασύνδετο υλικό και στρώση υπόβασης από ασύνδετο αμμοχάλικο, οι οποίες εδράζονται στη στρώση έδρασης.



Σχήμα 2.4: Τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος

Τα τυπικά υλικά της FAA που λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό ενός εύκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου, παρουσιάζονται στον πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3: Υλικά εμπειρικής μεθόδου FAA (FAA, 1995)

Υλικό		Χρήση στο οδόστρωμα ως
P-208 - Aggregate Base Course	Στρώση Βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο	Στρώση Βάσης
P-209 - Crushed Aggregate Base Course	Στρώση Βάσης από θραυστό αμμοχάλικο	Στρώση Βάσης
P-211 - Lime Rock Base Course	Στρώση Βάσης από ασβεστόλιθο	Στρώση Βάσης
P-304 - Cement Treated Base Course	Βάση από σταθεροποιημένο υλικό με τσιμέντο	Στρώση Βάσης
P-306 - Econocrete Subbase Course	Βάση από σταθεροποιημένο υλικό με τσιμέντο	Στρώση Βάσης
P-401 - Plant Mix Bituminous Pavements	Θερμό ασφαλτόμιγμα	Ασφαλτική Στρώση
P-154 - Subbase Course	Στρώση Υπόβασης	Στρώση Υπόβασης
P-210 - Caliche Base Course	Αμμοχάλικο	Στρώση Υπόβασης
P-212 - Shell Base Course	Μίγμα αδρανών και οστράκων	Στρώση Υπόβασης
P-213 - Sand Clay Base Course	Στρώση Βάσης από αργιλικό υλικό	Στρώση Υπόβασης
P-301 - Soil Cement Base Course	Εδαφικό υλικό κατεργασμένο με τσιμέντο	Στρώση Υπόβασης

Τα παραπάνω υλικά χρησιμοποιούνται σε αεροδρόμια με αεροσκάφη σχεδιασμού που έχουν βάρος μεγαλύτερα από 14000 kg. Πιο συγκεκριμένα, για το σχεδιασμό ενός εύκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου, σύμφωνα με την εμπειρική μέθοδο της FAA, χρησιμοποιείται για την ασφαλτική στρώση το υλικό που χαρακτηρίζεται ως «P-401», για τη στρώση βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο, χρησιμοποιείται το υλικό «P-209» και

τέλος, για την υπόβαση το υλικό «P-154» που πρόκειται επίσης για ασύνδετο αμμοχάλικο. Προδιαγραφές των παραπάνω υλικών παρατίθεται στο αντίστοιχο εγχειρίδιο της FAA, AC 150/5370-10G (FAA, 2014)

Ωστόσο, ορισμένες φορές ενθαρρύνεται η χρήση υλικών καλύτερης ποιότητας από αυτά που τυπικά ορίζει η FAA στη διαστασιολόγηση ή χρήση σταθεροποιημένων υλικών στις στρώσεις βάσης και υπόβασης. Συνήθως, η χρήση σταθεροποιημένου υλικού απαιτείται σε περιπτώσεις όπου το οδόστρωμα πρόκειται να χρησιμοποιηθεί από αεροσκάφη με βάρος μεγαλύτερο από 45.400 kg. Η θετική επίδραση από αυτή τη χρήση των υλικών ενσωματώνεται στη διαδικασία σχεδιασμού με συντελεστές ισοδυναμίας, που οδηγούν σε διαφορετική τιμή του πάχους στρώσης. Οι συντελεστές μετατροπής των υλικών φαίνονται στον πίνακα 2.4. (FAA, 1995).

Πίνακας 2.4: Συντελεστές ισοδυναμίας για μετατροπή τυπικών υλικών σε σταθεροποιημένα υλικά (FAA, 1995)

Υλικό	Συντελεστής Ισοδυναμίας
	Μετατροπή τυπικού υλικού Βάσης
P-208 - Aggregate Base Course	1.1
P-211 - Lime Rock Base Course	1.0
P-304 - Cement Treated Base Course	1.2-1.6
P-306 - Econocrete Subbase Course	1.2-1.7
P-401 - Plant Mix Bituminous Pavements	1.2-1.8
Υλικό	Μετατροπή τυπικού υλικού Υπόβασης
P-208 - Aggregate Base Course	1.0-1.5
P-209 - Crushed Aggregate Base Course	1.2-1.8
P-211 - Lime Rock Base Course	1.0-1.5
P-304 - Cement Treated Base Course	1.6-2.3
P-306 - Econocrete Subbase Course	1.6-2.4
P-301 - Soil Cement Base Course	1.0-1.5
P-401 - Plant Mix Bituminous Pavements	1.7-2.3

Αναλυτικότερα, το πάχος της στρώσης που προκύπτει από τη χρήση τυπικού υλικού, διαιρείται με τον κατάλληλο συντελεστή ισοδυναμίας και μετατρέπεται σε πάχος σταθεροποιημένης στρώσης (FAA, 1995).

2.3 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ FAA

2.3.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

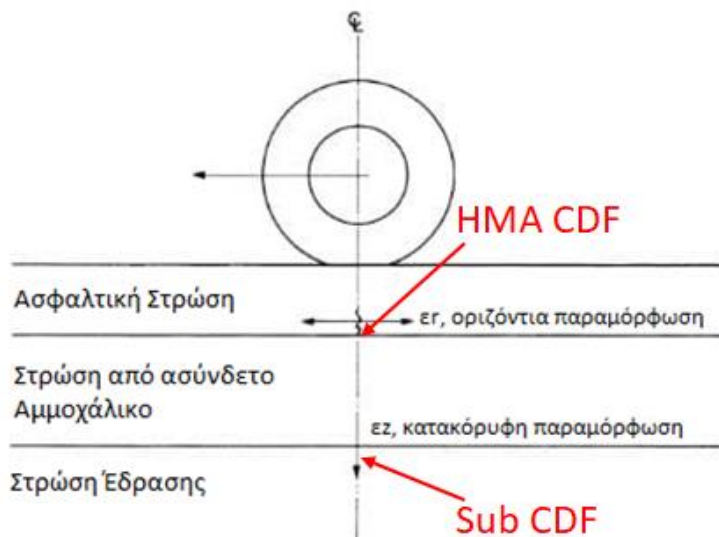
Στο πλαίσιο εξέλιξης των μεθοδολογιών σχεδιασμού και ανάλυσης οδοστρωμάτων αεροδρομίων, η FAA ανέπτυξε το 2009 μια αναλυτική μέθοδο διαστασιολόγησης, με στόχο να αντικαταστήσει την υφιστάμενη εμπειρική. Η αναλυτική μέθοδος της FAA χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό νέων οδοστρωμάτων αεροδρομίων καθώς και την αξιολόγηση εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Η εφαρμογή της μεθόδου πραγματοποιείται μέσω του σχεδιαστικού προγράμματος FAARFIELD 1.305, που εισήγαγε η FAA για διευκόλυνση στο σχεδιασμό.

Αρχικά, η μέθοδος βασίζεται στην θεωρία ελαστικών στρώσεων όσον αφορά στα εύκαμπτα οδοστρώματα και στην τρισδιάστατη θεωρία πεπερασμένων στοιχείων όσον αφορά στα δύσκαμπτα. Ο δείκτης CBR παύει να αποτελεί βασικό στοιχείο σχεδιασμού των οδοστρωμάτων και ως κριτήριο για τον υπολογισμό του πάχους κάθε στρώσης εισάγεται η έννοια της φθοράς. Σημειώνεται ότι, σε αντίθεση με την εμπειρική μέθοδο, η αναλυτική δεν περιλαμβάνει την έννοια του αεροσκάφους σχεδιασμού. Στο σχεδιασμό βάσει της αναλυτικής μεθόδου λαμβάνεται υπόψη το σύνολο των αεροσκαφών που αναμένεται να χρησιμοποιήσουν το οδόστρωμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5. Η επίδραση κάθε αεροσκάφους συμπεριλαμβάνεται στο σχεδιασμό μέσω της φθοράς που προκαλεί καθένα από αυτά.



Σχήμα 2.5: Αντικατάσταση αεροσκάφους σχεδιασμού με σύνολο κυκλοφορίας

Για τον υπολογισμό των παχών λαμβάνεται υπόψη η φθορά στις κρίσιμες θέσεις αστοχίας ενός εύκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου, δηλαδή στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων και στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης. Οι κρίσιμες θέσεις αστοχίας παρουσιάζονται στο σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Κρίσιμες θέσεις αστοχίας εύκαμπτου οδοστρώματος

Συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό της φθοράς στις κρίσιμες θέσεις αστοχίας, η αναλυτική μέθοδος της FAA χρησιμοποιεί τη μέγιστη κατακόρυφη παραμόρφωση στην κορυφή της στρώσης έδρασης και τη μέγιστη οριζόντια παραμόρφωση στον πυθμένα της επιφανειακής ασφαλικής στρώσης. Ως επιφανειακή ασφαλική στρώση το AC 150/5320-6E ορίζει τη στρώση ασφαλτομίγματος με σταθερό μέτρο ελαστικότητας 1380 Mpa και τιμή λόγου Poisson ίση με 0,35. Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας 1380 Mpa ορίζεται συντηρητικά από την FAA και αντιστοιχεί σε θερμοκρασία 32 ° C. (FAA, 2009) .

Ο υπολογισμός της φθοράς πραγματοποιείται μέσω του δείκτη φθοράς CDF (Cumulative Damage Factor) για κάθε αεροσκάφος της σύνθεσης κυκλοφορίας. Ο δείκτης CDF δίνεται από τη σχέση (2).

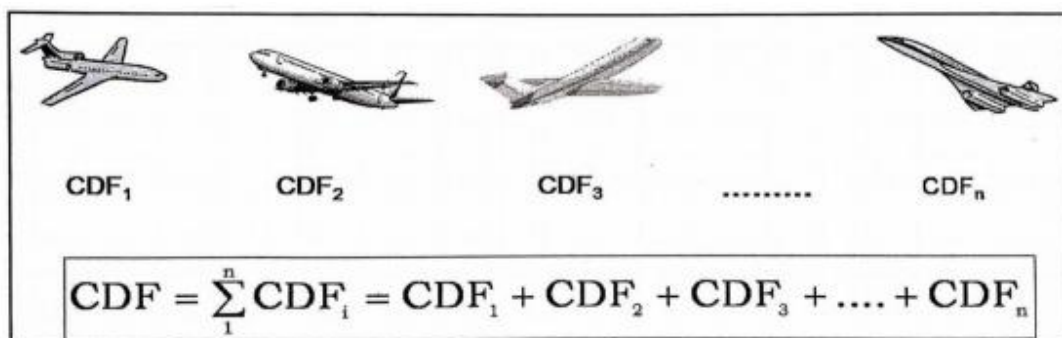
$$CDF = \frac{\text{προβλεπόμενες διελεύσεις}}{\text{επιτρεπόμενες διελεύσεις}} = \frac{(\text{ετήσιες αναχωρήσεις} * \text{περίοδος σχεδιασμού})}{(P/C * \text{καλύψεις- διελεύσεις για αστοχία})} \quad (2)$$

Όπου:

- Ετήσιες αναχωρήσεις : οι προβλεπόμενες διελεύσεις των αεροσκαφών στο αεροδρόμιο
- Περίοδος σχεδιασμού : 20 έτη
- P/C : ο λόγος των διελεύσεων προς τις καλύψεις-διελεύσεις C (Pass-to-coverage ratio)
- Καλύψεις-διελεύσεις για αστοχία: Επιτρεπόμενες καλύψεις διελεύσεις , οι οποίες προκύπτουν από αντίστοιχους νόμους κόπωσης και αστοχίας υλικών για κάθε κρίσιμη θέση.

Η αθροιστική φθορά που προκαλούν τα αεροσκάφη στο οδόστρωμα υπολογίζεται στις δύο κρίσιμες θέσεις, δηλαδή στον πυθμένα της επιφανειακής ασφαλικής στρώσης και στην κορυφή της στρώσης έδρασης.

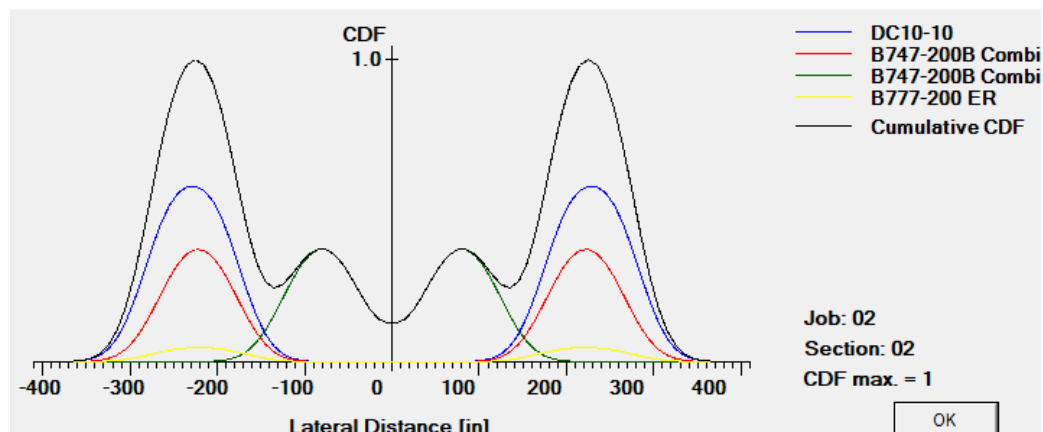
Προκειμένου να εξασφαλιστεί η επάρκεια του οδοστρώματος και για να μην αστοχήσει, θα πρέπει να ικανοποιείται η αρχή Miner, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.7. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει η αθροιστική φθορά της εκάστοτε κρίσιμης θέσης να είναι μικρότερη από τη μονάδα ($CDF < 1$). Πιο αναλυτικά, ο σχεδιασμός πραγματοποιείται ώστε ο δείκτης CDF να είναι ίσος με 1, δηλαδή σε αυτή την περίπτωση το οδόστρωμα έχει ολοκληρώσει τη διάρκεια ζωής του, δεν μπορεί να παραλάβει επιπλέον φορτία και επομένως για αυτή την τιμή το οδόστρωμα σχεδιάζεται οριακά. Για τιμή μικρότερη του 1, το οδόστρωμα έχει εναπομένονσα διάρκεια ζωής ενώ σε αντίθετη περίπτωση το οδόστρωμα που σχεδιάστηκε αστοχεί. Βασικό στοιχείο σχεδιασμού αποτελεί η τιμή του δείκτη CDF για τη στρώση έδρασης. Ωστόσο για το σχεδιασμό, υπολογίζεται και η φθορά της ασφαλικής στρώσης. (FAA, 2009).



Σχήμα 2.7: Αρχή Miner για υπολογισμό αθροιστικής φθοράς αεροσκάφους (FAA, 2009)

Ο δείκτης CDF έχει προκύψει από υπολογισμούς κατά μήκος του οδοστρώματος, για λωρίδες πάχους 10 ιντσών (254 mm), συνολικού πλάτους οδοστρώματος 820 ιντσών (20828 mm). Για κάθε λωρίδα υπολογίζεται ο λόγος διελεύσεων προς τις καλύψεις-διελεύσεις (Pass- to- coverage), με την παραδοχή ότι οι διελεύσεις ακολουθούν κανονική κατανομή. Με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν, ως δείκτης CDF ορίζεται ο μέγιστος εξ αυτών που έχουν υπολογιστεί και για τις 82 λωρίδες του οδοστρώματος (FAA, 2009).

Στο σχήμα 2.8 παρουσιάζεται ο υπολογισμός της αθροιστικής φθοράς για ενδεικτική σύνθεση κυκλοφορίας ενός αεροδρομίου, όπως προκύπτει από την αναλυτική μέθοδο της FAA. Παρατηρείται ότι στον υπολογισμό λαμβάνεται υπόψη η απόσταση των τροχών κάθε αεροσκάφους από τον κεντρικό άξονα του διαδρόμου.



Σχήμα 2.8: Υπολογισμός αθροιστικής φθοράς στρώσης έδρασης στην αναλυτική μέθοδο της FAA

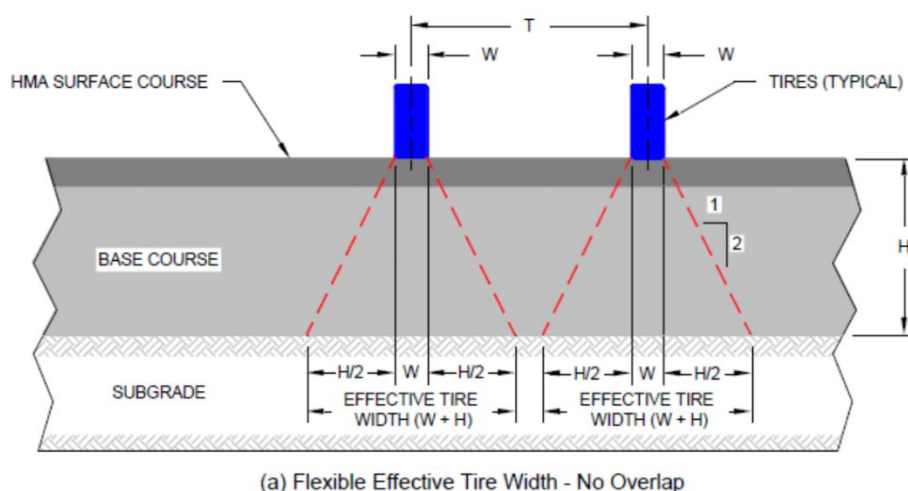
Τα οδοστρώματα σχεδιάζονται έτσι ώστε να μην υπερβαίνουν τα επιτρεπόμενα όρια φθοράς καθώς και για συγκεκριμένη περίοδο σχεδιασμού 20 ετών. Τα διαγράμματα υπολογισμού πάχους βάσει των κύριων φορέων των αεροσκαφών αντικαθίστανται από το υπολογιστικό πρόγραμμα FAARFIELD 1.305, το οποίο χρησιμοποιεί η αναλυτική μέθοδος της FAA ως εργαλείο σχεδιασμού. Τέλος, για τον υπολογισμό των φθορών στο οδόστρωμα, η νέα μέθοδος της FAA βασίζεται σε μοντέλα αστοχίας, τα οποία έχουν προκύψει από εκτεταμένες έρευνες από το 1940 έως σήμερα (FAA, 2009).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στην αναλυτική μέθοδο της FAA, ώστε να γίνει εκτίμηση της φθοράς του οδοστρώματος.

2.3.1.1 ΛΟΓΟΣ P/C (PASS-TO-COVERAGE)

Μία παράμετρος που εισάγεται στον υπολογισμό της φθοράς, είναι ο λόγος των διελεύσεων (passes) προς τις καλύψεις-διελεύσεις C (coverages). Οι διελεύσεις ενός φορείου ενός αεροσκάφους, συνήθως, δεν πραγματοποιούνται στο ίδιο ίχνος. Επομένως, μία κάλυψη-διέλευση θα προκύψει από περισσότερο αριθμό απλών διελεύσεων και θα προκαλέσει τη μέγιστη φόρτιση σε ένα σημείο του οδοστρώματος, το οποίο θεωρείται κρίσιμο και διαφέρει για κάθε τύπο αεροσκάφους. Για να συμπεριληφθούν τα παραπάνω στο σχεδιασμό εισάγεται ο λόγος P/C (pass-to-coverage), ο οποίος είναι διαφορετικός για κάθε τύπο αεροσκάφους. Ο λόγος P/C εξαρτάται από το φορτίο του αεροσκάφους, την κατανομή του βάρους, τον τύπο του φορείου και τις αποστάσεις μεταξύ των φορέων.

Σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο της FAA, για τον υπολογισμό του P/C λαμβάνεται υπόψη, το ενεργό πλάτος των ελαστικών ($W+H$), το οποίο υπολογίζεται στην κορυφή της στρώσης έδρασης, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.9, με κλίση 1:2. Επίσης, υπολογίζεται ο λόγος P/C στην ασφαλική στρώση σύμφωνα με την ίδια διαδικασία αλλά άλλο ενεργό πλάτος. Το ενεργό πλάτος για την ασφαλική στρώση είναι μικρότερο από αυτό που υπολογίζεται στην κορυφή της στρώσης έδρασης. Επομένως, γι' αυτό το λόγο η τιμή του P/C των ασφαλικών είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της στρώσης έδρασης. Ο υπολογισμός του λόγου των διελεύσεων προς τις καλύψεις-διελεύσεις προκύπτει από τη σχέση (3). (Kawa, 2012)



Σχήμα 2.9: Ενεργά πλάτη δύο τροχών για υπολογισμό του λόγου P/C (Kawa, 2012)

$$(C/P)_i = \sum_{k=1}^{N_e} P \left[\left(x_i - \frac{w_{eq}}{2} \right) \leq x_k \leq \left(x_i + \frac{w_{eq}}{2} \right) \right] \quad (3)$$

Όπου,

- $w_{eq} = W + H$ (στρ.έδρασης) + T , για τη στρώση έδρασης
- $w_{eq} = W + H$ (ασφ.στρώσης), για τις ασφαλικές στρώσεις
- x_i : η πλευρική απόσταση από τον κεντρικό άξονα του διαδρόμου έως το μέσο της λωρίδας i
- x_k : η πλευρική απόσταση από τον κεντρικό άξονα του διαδρόμου έως το μέσο του ελαστικού k

2.3.1.2 ΝΟΜΟΙ ΚΟΠΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Για τον υπολογισμό της φθοράς των ασφαλικών στρώσεων και της στρώσης έδρασης, χρειάζεται εκτίμηση των απαιτούμενων καλύψεων- διελεύσεων (coverages) έως την αστοχία. Οι απαιτούμενες καλύψεις-διελεύσεις εκτιμώνται μέσω των αντίστοιχων νόμων αστοχίας, για την κάθε κρίσιμη θέση του οδοστρώματος.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά στην αστοχία λόγω κόπωσης των ασφαλικών, χρησιμοποιείται ο νόμος των Heukelom και Klomp, που ορίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4) (Heukelom & Klomp, 1962).

$$\log_{10}(C) = 2,68 - 5 * \log_{10}(\varepsilon_h) - 2,665 * \log_{10}(E) \quad (4)$$

Όπου,

- C : επιτρεπόμενες καλύψεις- διελεύσεις για την αστοχία
- ε : η οριζόντια παραμόρφωση στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων
- E : το μέτρο ελαστικότητας της επιφανειακής ασφαλικής στρώσης, σε psi

Στην περίπτωση εκτίμηση της φθοράς στην κορυφή της στρώσης έδρασης, χρησιμοποιούνται οι σχέσεις (5) και (6), ώστε να προκύψουν οι καλύψεις- διελεύσεις για αστοχία (FAA, 2009).

$$C = \left(\frac{0,004}{\varepsilon}\right)^{8,1}, C \leq 12.100 \quad (5)$$

ή

$$C = \left(\frac{0,002428}{\varepsilon}\right)^{14,21}, C > 12.100 \quad (6)$$

Όπου,

- C: καλύψεις- διελεύσεις για αστοχία για διελεύσεις μεγαλύτερες ή όχι από 12.100 καλύψεις-διελεύσεις αεροσκαφών.

2.3.1.3 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ

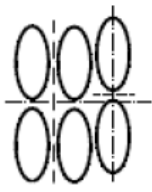
- Φορτίο:

Η αναλυτική μέθοδος σχεδιασμού της FAA βασίζεται στο μεικτό βάρος του αεροσκάφους κατά την απογείωση. Γίνεται η παραδοχή ότι το 95% του βάρους του αεροσκάφους αναλαμβάνεται από τα πίσω φορεία, ενώ το 5 % αναλαμβάνεται από το ρινιαίο φορείο του αεροσκάφους. Η μέθοδος λαμβάνει υπόψιν τις αναχωρήσεις των αεροσκαφών, διότι κατά την άφιξή τους έχουν μικρότερο βάρος.

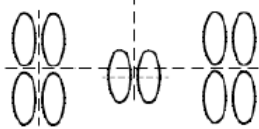
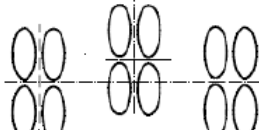
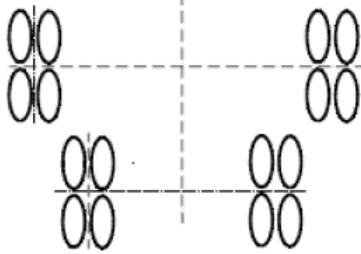
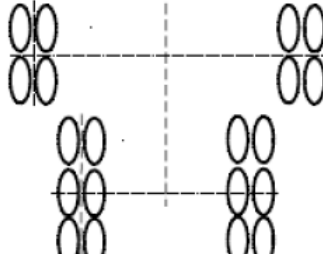
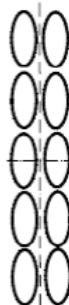
- Γεωμετρία και τύπος συστήματος προσγείωσης:

Η επίδραση του βάρους του αεροσκάφους στο οδόστρωμα εξαρτάται από τη γεωμετρία και τον τύπο του κύριου συστήματος προσγείωσης. Οι πίνακες 2.5 και 2.6, δείχνουν τις τυπικές διατάξεις των φορέων των αεροσκαφών σύμφωνα με την FAA.

Πίνακας 2.5: Τυπικά συστήματα προσγείωσης αεροσκαφών (FAA, 2009)

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 2.6: Τυπικά συστήματα προσγείωσης αεροσκαφών (συνέχεια) (FAA, 2009)

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

- Πίεση ελαστικών:

Βάσει της διάταξης των φορείων, του μεικτού βάρους του αεροσκάφους και το μέγεθος των ελαστικών, προκύπτει η πίεση των τροχών που ασκείται στο οδόστρωμα. Η πίεση των ελαστικών επιδρά σε μεγαλύτερο βαθμό στις παραμορφώσεις που δημιουργούνται στις ασφαλικές στρώσεις, σε σχέση με αυτές που δημιουργούνται στη στρώση έδρασης.

- Πρόβλεψη κυκλοφορίας:

Για το σχεδιασμό των οδοστρωμάτων μέσω της αναλυτικής μεθόδου της FAA απαιτείται η εκτίμηση των διελεύσεων των αεροσκαφών που αναμένεται ότι θα χρησιμοποιήσουν το οδόστρωμα του αεροδρομίου. Για την πρόβλεψη αυτή, χρησιμοποιούνται δεδομένα που προέχονται από στοιχεία των ίδιων των αεροδρομίων, την Terminal Area Forecast (TAF) επίσημη πρόβλεψη της αεροπορικής δραστηριότητας της FAA για τα αμερικάνικα αεροδρόμια, το Εθνικό Σχέδιο Ολοκληρωμένων Συστημάτων Αεροδρομίων (National Plan of Integrated Airport Systems), τα Στατιστικά της Δραστηριότητας των αεροδρομίων (Airport Activity Statistics) και τέλος, τις αναφορές από την Εναέρια Κυκλοφορία της FAA (FAA Air Traffic Activity Reports) (FAA, 2009).

Για να συμπεριληφθούν στο σχεδιασμό τα αεροσκάφη που συνθέτουν τη κυκλοφορία στο οδόστρωμα, η FAA διαθέτει μία εκτενή βάση δεδομένων από πλήθος αεροσκαφών. Η βάση δεδομένων της FAA αποτελείται από διάφορους τύπους αεροσκαφών και περιλαμβάνει στοιχεία αυτών, όπως το βάρος, γεωμετρία κύριων φορείων, πίεση ελαστικών και άλλα, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.10.

Airplane Name (4)	Gross Taxi Weight (tns)	Annual Departures	% Annual Growth	Dep
DC 10-10	207,745	2,263	0,00	45
B747-200B Combi Mixed	395,986	832	0,00	10
B747-200B Combi Mixed Belly	395,986	832	0,00	10
B777-200 ER	287,804	425	0,00	8

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

Σχήμα 2.10 : Βάση δεδομένων αεροσκαφών FAA

2.3.1.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΥΚΑΜΠΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ FAA

Μια τυπική διατομή ενός εύκαμπτου οδοστρώματος σύμφωνα με τη μέθοδο της FAA, αποτελείται από την ασφαλική στρώση, βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο και εφόσον απαιτείται λόγω της υποκείμενης στρώσης έδρασης, τοποθετείται στρώση υπόβασης. Σε περιπτώσεις όπου ο δείκτης φέρουσας ικανότητας CBR της στρώσης έδρασης ξεπερνά την τιμή 20 %, δεν απαιτείται στρώση υπόβασης.

Τα συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται από την FAA δεν παρουσιάζουν διαφορά σε σχέση με την εμπειρική μέθοδο. Συγκεκριμένα, για την ασφαλική στρώση χρησιμοποιείται το τυπικό υλικό της FAA P-401, το οποίο έχει ελάχιστη τιμή πάχους 102 mm (4 ίντσες). Επίσης, λαμβάνει σταθερή τιμή μέτρου ελαστικότητας ίση με 1380 Mpa (200000 Psi). Το μέτρο ελαστικότητας λαμβάνει συντηρητικά αυτή την τιμή και προκύπτει για θερμοκρασία ασφαλομίγματος ίση με 32° C (90 °F). Η τιμή του λόγου Poisson λαμβάνεται εξίσου σταθερή και ίση με 0,35.

Για τη στρώση βάσης, η FAA χρησιμοποιεί δύο τύπους υλικών, τα σταθεροποιημένα και μη σταθεροποιημένα υλικά. Τα σταθεροποιημένα υλικά βάσης που χρησιμοποιούνται είναι τα P-401 και P-403, τα οποία έχουν σταθερή τιμή μέτρου ελαστικότητας ίση με 2760 MPa (400000 Psi) και σταθερή τιμή λόγου Poisson ίση με 0,35. Ωστόσο, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μέτρου ελαστικότητας από το χρήστη του προγράμματος μέσω των στρώσεων «undefined», σε περίπτωση χρήσης σταθεροποιημένου υλικού βάσης διαφορετικού από τα τυπικά υλικά, με εύρος από 1035 έως 2760 MPa (150000 έως 400000 Psi).

Σχετικά με τα μη σταθεροποιημένα υλικά, η FAA χρησιμοποιεί θραυστό αμμοχάλικο P-209, του οποίου το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από εσωτερική διαδικασία του προγράμματος. Σε περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί τη χρήση υλικού διαφορετικής ποιότητας, για κάποια στρώση του οδοστρώματος, η αναλυτική μέθοδος της FAA δίνει τη δυνατότητα για μεταβολή του τυπικού υλικού που χρησιμοποιείται. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της στρώσης «undefined», όπως αναφέρεται στο AC 150/5320-6E, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει διαφορετικό υλικό για κάθε στρώση καθώς και να μεταβάλει την τιμή του μέτρου ελαστικότητας. Ωστόσο, στην περίπτωση που θα χρησιμοποιηθεί στη διατομή υλικό διαφορετικό από τα τυπικά υλικά, η χρήση του απαιτεί την έγκριση της FAA.

Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας θραυστού υλικού, γίνεται επιμερισμός των στρώσεων αδρανών, εφόσον έχουν μεγάλο πάχος. Ο επιμερισμός της στρώσης αδρανών στην αναλυτική μέθοδο σχεδιασμού της FAA γίνεται μέσω υπορουτίνας (WESModulus Subroutine), δηλαδή η στρώση από αδρανή χωρίζεται σε ίσες επιμέρους στρώσεις με μέγιστο πάχος 203 mm (8 ίντσες) η κάθε μία.

Τα ελάχιστα πάχη των στρώσεων βάσης υπολογίζονται με τη θεώρηση ότι η στρώση υπόβασης παρέχει ισοδύναμη φέρουσα ικανότητα αντίστοιχη με αυτή του CBR=20 %. Αρχικά, το πρόγραμμα υπολογίζει το πάχος της στρώσης βάσης έτσι ώστε να προστατεύει μια στρώση έδρασης με φέρουσα ικανότητα ίση με 20 % και σε δεύτερο επίπεδο συγκρίνει την τιμή του πάχους που προέκυψε με τις ελάχιστες τιμές που ενδείκνυνται για την εν λόγω στρώση. Η ελάχιστη τιμή πάχους για σταθεροποιημένα υλικά είναι 127 mm (5 ίντσες). Οι ελάχιστες τιμές για τα μη σταθεροποιημένα υλικά φαίνονται στον πίνακα 2.7.

Πίνακας 2.7: Προτεινόμενες ελάχιστες τιμές πάχους στρώσης βάσης από ασύνδετο υλικό (FAA, 2009)

Σύστημα Προσγείωσης α/φ	Μέγεθος Φορτίου		Ελάχιστο πάχος Βάσης (P-209)	
	kg	lbs	in	mm
S	30.000-50.000	13.600-22.700	4	100
	50.000-75.000	22.700-34.000	6	150
D	50.000-100.000	22.700-45.400	6	150
	100.000-200.000	45.400-90.700	8	200
2D	100.000-250.000	45.400-113.400	6	150
	250.000-400.000	113.400-181.00	8	200
2D(B757,B767)	200.000-400.000	90.700-181.000	6	150
2D ή 2D/D1 (DC10,L1011)	400.000-600.000	181.000-272.000	8	150
2D/2D2 (B747)	400.000-600.000	181.000-272.000	6	150
	600.000-850.000	272.000-385.600	8	200
2D/D1 ή 2D/2D1 (A340)	568.000-840.000	257.640-381.200	10	250
2S (C130)	75.000-125.000	34.000-56.700	4	100
	125.000-175.000	56.700-79.400	6	150
3D (B777)	537.000-777.000	243.500-352.440	10	250
3D (A380)	1.239.000-1.305.125	562.000-592.000	9	230

Για τη στρώση υπόβασης, εφόσον αυτή απαιτείται, χρησιμοποιούνται σταθεροποιημένα και μη υλικά. Το ελάχιστο πάχος της υπόβασης είναι για κατασκευαστικούς λόγους ίσο με 102 mm (4 ίντσες) και τα υλικά που χρησιμοποιούνται

παραμένουν ίδια με τα αντίστοιχα της εμπειρικής μεθόδου. Για αεροσκάφη με μεικτό βάρος μεγαλύτερο από 45.359 kg (100.000 pounds), προτείνεται η χρήση των υλικών P-208 και P-209.

Τέλος, για τη στρώση έδρασης γίνεται η παραδοχή ότι έχει άπειρο πάχος και χαρακτηρίζεται από το δείκτη CBR της φέρουσας ικανότητας (FAA, 2009).

Η αναλυτική μέθοδος της FAA χρησιμοποιεί τη σχέση (7) του Heukelom , ώστε να ορίζει το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης μέσω του δείκτη φέρουσας ικανότητας CBR. Από αυτή τη σχέση υπολογίζεται η τιμή του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης.

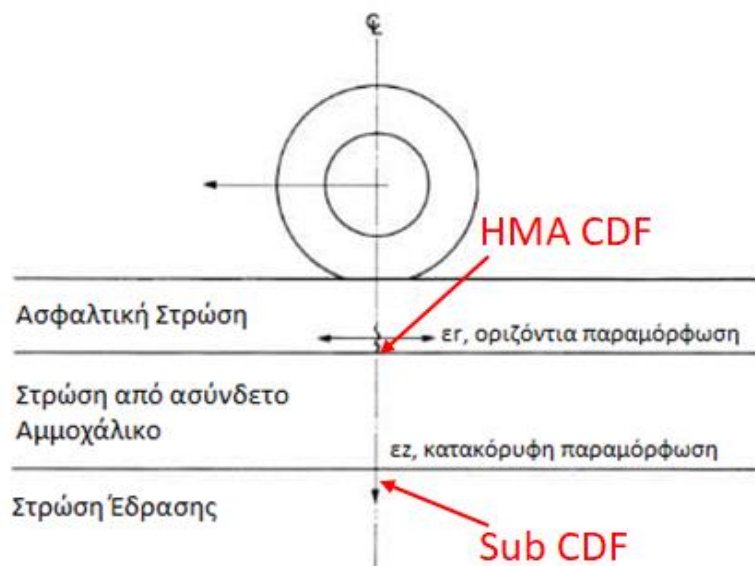
$$E = 1500 * CBR \quad (7)$$

Όπου,

- E: μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης, σε Psi.
- CBR: Καλιφορνιακός δείκτης φέρουσας ικανότητας στρώσης έδρασης, %

2.4 ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΗΣ FAA

Στην προσπάθεια βελτίωσης της διαδικασίας σχεδιασμού οδοστρωμάτων αεροδρομίων, η FAA παρουσίασε το 2016 τη νέα εξελιγμένη μορφή της αναλυτικής μεθόδου διαστασιολόγησης. Η εξέλιξη της αναλυτικής μεθόδου περιγράφεται από το AC 150/5320-6F (FAA, 2016). Αρχικά, η νεότερη έκδοση της μεθόδου εφαρμόζεται εξίσου για τη διαστασιολόγηση νέων, αλλά και την αξιολόγηση και ενίσχυση εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Επίσης, βασίζεται στη θεωρία ελαστικών στρώσεων, όσον αφορά στα εύκαμπτα οδοστρώματα, και στην τρισδιάστατη θεωρία πεπερασμένων στοιχείων όσον αφορά στα δύσκαμπτα. Οι βασικές αρχές για το σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων παραμένουν κοινές για τις δύο μεθόδους. Πιο συγκεκριμένα, βασικό στοιχείο σχεδιασμού είναι ο δείκτης CDF, που εκφράζει τη φθορά στις κρίσιμες θέσεις αστοχίας. Αξίζει να σημειωθεί, ότι παρά το γεγονός ότι οι κρίσιμες θέσεις αστοχίας παραμένουν κοινές κατά την εξέλιξη της μεθόδου, στην νέα έκδοση που εισήχθη από την FAA, ο υπολογισμός της φθοράς της ασφαλικής στρώσης γίνεται στον πυθμένα όλων των ασφαλικών στρώσεων, περιλαμβάνοντας την επιφανειακή ασφαλική στρώση και την ασφαλική βάση κι όχι στη βάση της επιφανειακής ασφαλικής στρώσης, όπως συνηθιζόταν. Η σταθεροποιημένη ασφαλική βάση ορίζεται από την FAA με μέτρο ελαστικότητας 2757 Mpa (400000 Psi) . Στο σχήμα 2.11 υπενθυμίζονται οι δύο κρίσιμες θέσεις αστοχίας.



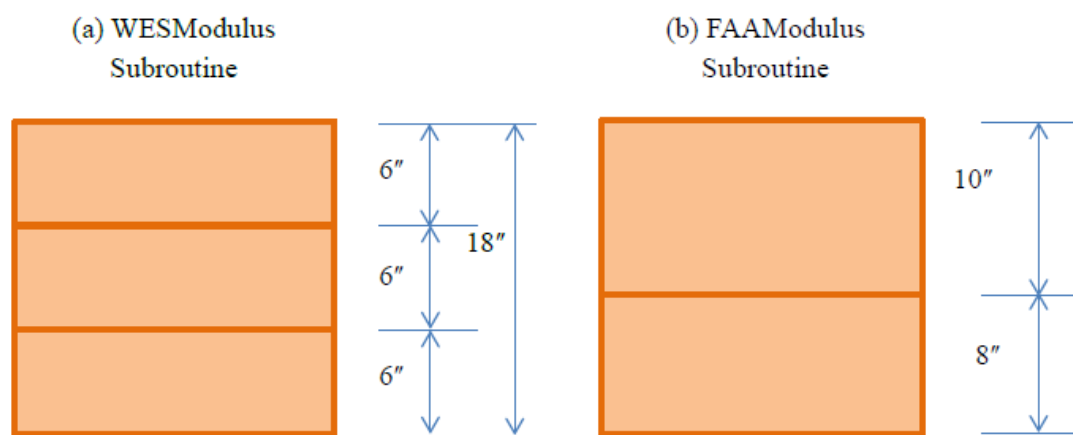
Σχήμα 2.11: Κρίσιμες θέσεις αστοχίας εύκαμπτου οδοστρώματος

Λαμβάνεται υπόψη το σύνολο των αεροσκαφών που πρόκειται να διέλθει από το οδόστρωμα καθώς και η αθροιστική επίδραση της κυκλοφορίας αυτής στο σχεδιασμό. Μια ακόμα ομοιότητα των δύο εκδόσεων της αναλυτικής μεθόδου είναι τα τυπικά υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται από την FAA, τα οποία δεν παρουσιάζουν κάποια διαφοροποίηση.

Παρόλα αυτά, η εξέλιξη της αναλυτικής μεθόδου σχεδιασμού της FAA παρουσιάζει και σημαντικές διαφορές σε σχέση με την αντίστοιχη παλαιότερη έκδοσή της. Η βασικότερη διαφορά τους έγκειται στη χρήση διαφορετικών μοντέλων αστοχίας, όσον αφορά στη στρώση έδρασης, και κόπωσης, όσον αφορά στις ασφαλτικές στρώσεις, για τον υπολογισμό της φθοράς του οδοστρώματος στις δύο θέσεις.

Στα πλαίσια της εξέλιξης της παλαιότερης αναλυτικής μεθόδου της FAA, υλοποιήθηκε μια βελτιωμένη διαδικασία επιμερισμού των στρώσεων των αδρανών. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται ώστε να υπολογιστεί το μέτρο ελαστικότητας των στρώσεων από αδρανή, αν αυτές έχουν μεγάλο πάχος, και επηρεάζονται άμεσα από το μέτρο ελαστικότητας της υποκείμενης στρώσης. Οι ανώτερες στρώσεις που έχουν προκύψει από τον επιμερισμό της στρώσης από αδρανή, εμφανίζουν μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με τις κατώτερες. Το τελικό μέτρο ελαστικότητας που ορίζεται για τη συνολική στρώση αδρανών, είναι ο μέσος όρος του μέτρου ελαστικότητας των επιμέρους στρώσεων (FAA, 2016). Η νέα έκδοση της μεθόδου της FAA πραγματοποιεί τη διαδικασία επιμερισμού βάσει μιας εξελιγμένης υπορουτίνας (FAAModulus Subroutine), ως αντικατάσταση της παλαιότερης διαδικασίας (WESModulus Subroutine). Στην

αρχική μορφή της αναλυτικής μεθόδου της FAA, η στρώση των αδρανών, αν έχει μεγάλο πάχος, χωρίζεται σε ίσες επιμέρους στρώσεις έως 8 ίντσες η καθεμία. Για παράδειγμα, αν η στρώση αδρανών έχει συνολικό πάχος 18 ίντσες, όπως δείχνει το σχήμα 2.12 (α), θα χωριστεί σε τρεις επιμέρους ίσες στρώσεις των 6 ιντσών. Αντίθετα, στη νέα υπορουτίνα όλες οι επιμέρους στρώσεις αδρανών, εκτός της ανώτερης εξ αυτών, έχουν σταθερά πάχος 8 ίντσες, ενώ το πάχος της ανώτερης κυμαίνεται από 4 έως 12 ίντσες. Επομένως, για το προηγούμενο παράδειγμα στρώσης από αδρανή πάχους 18 ιντσών, ο επιμερισμός γίνεται όπως φαίνεται στο σχήμα 2.12 (β) (Kawa, 2017).



Σχήμα 2.12: Εξέλιξη επιμερισμού των στρώσεων από αδρανή (Kawa, 2017)

Η μείωση των ελάχιστων ορίων πάχους που απαιτούνται για τη στρώση βάσης αποτελεί μία ακόμα διαφορά των δύο εκδόσεων της μεθόδου, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.8. Τα ελάχιστα όρια για το πάχος κάθε στρώσης του οδοστρώματος εξαρτώνται από το μέγιστο μεικτό βάρος του αεροσκάφους.

**Πίνακας 2.8: Ελάχιστες τιμές πάχους στρώσεων για τα εύκαμπτα
οδοστρώματα (FAA, 2016)**

Τύπος Στρώσης	Υλικό FAA	Μέγιστο Μεικτό Βάρος Αεροσκάφους, kg		
		<5.670	<45.360	≥45.360
Επιφανειακή Ασφαλτική στρώση	P-401	75 mm	100 mm	100 mm
Σταθεροποιημένη Βάση	P-401/P-403, P304, P-306	Δεν απαιτείται	Δεν απαιτείται	125 mm
Βάση από θραυστό αμμοχάλικο	P-209	75 mm	150 mm	150 mm
Βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο	P-208	75 mm	Δεν χρησιμοποιείται	Δεν χρησιμοποιείται
Υπόβαση	P-154	100 mm	100 mm (αν απαιτείται)	100 mm (αν απαιτείται)

Οι ελάχιστες τιμές πάχους της στρώσης βάσης εισάγονται αυτόματα στο σχεδιασμό, για όλους τους τύπους εύκαμπτου οδοστρώματος.

Το σχεδιαστικό πρόγραμμα FAARFIELD 1.305, που χρησιμοποιούσε η παλαιότερη μορφή αναλυτικής μεθόδου, αντικαθίσταται από τη νεότερη έκδοση FAARFIELD 1.42. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη εφαρμογή του προγράμματος αποθηκεύονται αυτόματα σε κατάλληλο αρχείο, κι όχι μέσα στο πρόγραμμα, όπως συνέβαινε.

Στην εξέλιξη της αναλυτικής μεθόδου σχεδιασμού, η βάση δεδομένων της FAA για τα αεροσκάφη περιλαμβάνει περισσότερους τύπους αεροσκαφών. Με αυτό τον τρόπο, δίνεται δυνατότητα μεγαλύτερου εύρους επιλογής αεροσκαφών, ώστε να γίνει σύνθεση της κυκλοφορίας για το σχεδιασμό το οδοστρώματος.

Τα κριτήρια συμπίκνωσης της στρώσης έδρασης εξελίχθηκαν επίσης, αφού δίνεται δυνατότητα υπολογισμού των απαιτήσεων συμπίκνωσης της στρώσης έδρασης για συνεκτικά και μη εδαφικά υλικά βάσει του σχεδιασμού. Με σκοπό να ελεγχθεί η επάρκεια της στρώσης έδρασης στις απαιτήσεις συμπίκνωσης, υπολογίζεται για διάφορα βάθη της εδαφικής στρώσης το απαιτούμενο ποσοστό της ξηρής πυκνότητας, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.13, και στη συνέχεια συγκρίνεται με το ήδη υπάρχον ποσοστό. Για κάθε επίπεδο ελέγχου, το κρίσιμο αεροσκάφος μπορεί να διαφέρει. Τα ελάχιστα όρια συμπίκνωσης που υπολογίζονται, αφορούν αποκλειστικά το οδόστρωμα που σχεδιάστηκε με συγκεκριμένα στοιχεία. Σε περίπτωση, δηλαδή, που

μεταβληθεί το υλικό εδάφους, η κυκλοφορία που χρησιμοποιεί το οδόστρωμα ή τα πάχη των στρώσεων, τότε προκύπτουν διαφορετικές απαιτήσεις για τη συμπίκνωση της στρώσης έδρασης (FAA, 2016).

The screenshot shows a software window titled 'Design Information for Section NewRigid'. On the left, under 'Section Names', 'NewFlexible' and 'NewRigid' are listed. The main area displays 'Subgrade Compaction Requirements' with two tables: one for 'NonCohesive Soil' and one for 'Cohesive Soil'. Each table has four columns: 'Percent Maximum Dry Density(%)', 'Depth of compaction from pavement surface (in)', 'Depth of compaction from top of subgrade (in)', and 'Critical Airplane for Compaction'. Below the tables are buttons for 'Help', 'Back', 'SaveXML', 'Save', 'Print', 'Design Info', 'Notes', and 'Copy'.

Percent Maximum Dry Density(%)	Depth of compaction from pavement surface (in)	Depth of compaction from top of subgrade (in)	Critical Airplane for Compaction
100	0 - 18	--	B777-200 ER
95	18 - 70	0 - 43	B777-200 ER
90	70 - 183	43 - 156	B747-200B Combi Mixed

Percent Maximum Dry Density(%)	Depth of compaction from pavement surface (in)	Depth of compaction from top of subgrade (in)	Critical Airplane for Compaction
95	0 - 18	--	B777-200 ER
90	18 - 28	0 - 1	B777-200 ER
85	28 - 96	1 - 69	B747-200B Combi Mixed
80	96 - 176	69 - 151	B747-200B Combi Mixed

Σχήμα 2.13: Υπολογισμός απαιτήσεων συμπίκνωσης στρώσης έδρασης στην εξελιγμένη έκδοση αναλυτικής μεθόδου της FAA (FAA, 2016)

Αντίθετα, στην παλαιότερη έκδοση της αναλυτικής μεθόδου της FAA, οι απαιτήσεις αυτές για τα εύκαμπτα οδοστρώματα προκύπταν από πίνακα 2.9 ανάλογα με τον τύπο του αεροσκάφους, το βάρος του και τη συνεκτικότητα ή μη του εδαφικού υλικού. Το αεροσκάφος που απαιτεί το μεγαλύτερο βάθος συμπίκνωσης από τον πίνακα είναι αυτό που καθορίζει και τα ελάχιστα όρια, ανεξαρτήτως των αριθμών διελεύσεων του στο οδόστρωμα (FAA, 2009).

Πίνακας 2.9: Απαιτήσεις συμπύκνωσης στρώσης έδρασης για εύκαμπτα οδοστρώματα κατά την αρχική μορφή αναλυτικής μεθόδου της FAA (FAA, 2009)

GEAR TYPE	GROSS WEIGHT Lb.	NON-COHESIVE SOILS Depth of Compaction, inch				COHESIVE SOILS Depth of Compaction, inch			
		100%	95%	90%	85%	95%	90%	85%	80%
S	30,000	8	8-18	18-32	32-44	6	6-9	9-12	12-17
	50,000	10	10-24	24-36	36-48	6	6-9	9-16	16-20
	75,000	12	12-30	30-40	40-52	6	6-12	12-19	19-25
D (incls. 2S)	50,000	12	12-28	28-38	38-50	6	6-10	10-17	17-22
	100,000	17	17-30	30-42	42-55	6	6-12	12-19	19-25
	150,000	19	19-32	32-46	46-60	7	7-14	14-21	21-28
	200,000	21	21-37	37-53	53-69	9	9-16	16-24	24-32
2D (incls. B757, B767, A-300, DC-10-10, L1011)	100,000	14	14-26	26-38	38-49	5	6-10	10-17	17-22
	200,000	17	17-30	30-43	43-56	5	6-12	12-18	18-26
	300,000	20	20-34	34-48	48-63	7	7-14	14-22	22-29
	400,000 – 600,000	23	23-41	41-59	59-76	9	9-18	18-27	27-36
2D/D1, 2D/2D1 (incls. MD11, A340, DC10-30/40)	500,000 – 800,000	23	23-41	41-59	59-76	9	9-18	18-27	27-36
2D/2D2 (incls. B747 series)	800,000	23	23-41	41-59	59-76	9	9-18	18-27	27-36
	975,000	24	24-44	44-62	62-78	10	10-20	20-28	28-37
3D (incls. B777 series)	550,000	20	20-36	36-52	52-67	6	6-14	14-21	21-29
	650,000	22	22-39	39-56	56-70	7	7-16	16-22	22-30
	750,000	24	24-42	42-57	57-71	8	8-17	17-23	23-30
2D/3D2 (incls. A380 series)	1,250,000	24	24-42	42-61	61-78	9	9-18	18-27	27-36
	1,350,000	25	25-44	44-64	64-81	10	10-20	20-29	29-38

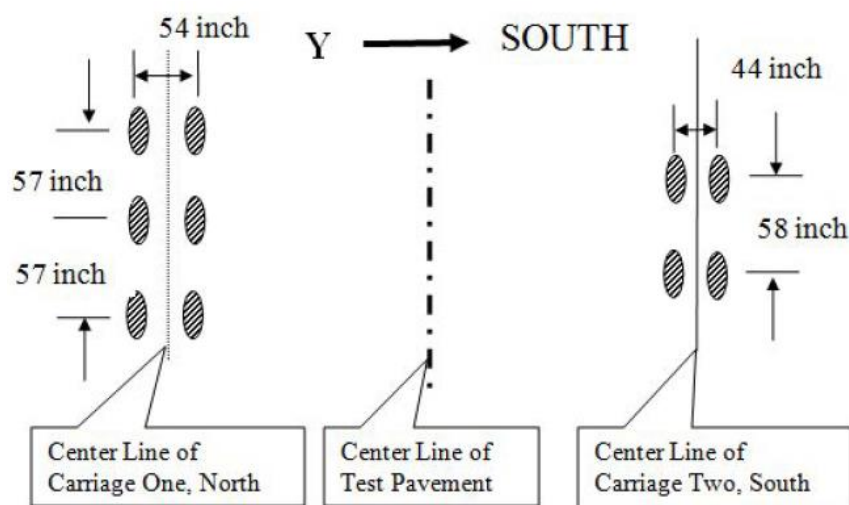
Σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι η νέα εξελιγμένη έκδοση της μεθόδου της FAA συμπεριλαμβάνει αποτελέσματα τα οποία έχουν επιβεβαιωθεί μέσα από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν από την εγκατάσταση της FAA, NAPTF, οι οποίες εξελίχθηκαν σε σχέση με την παλαιότερη μέθοδο.



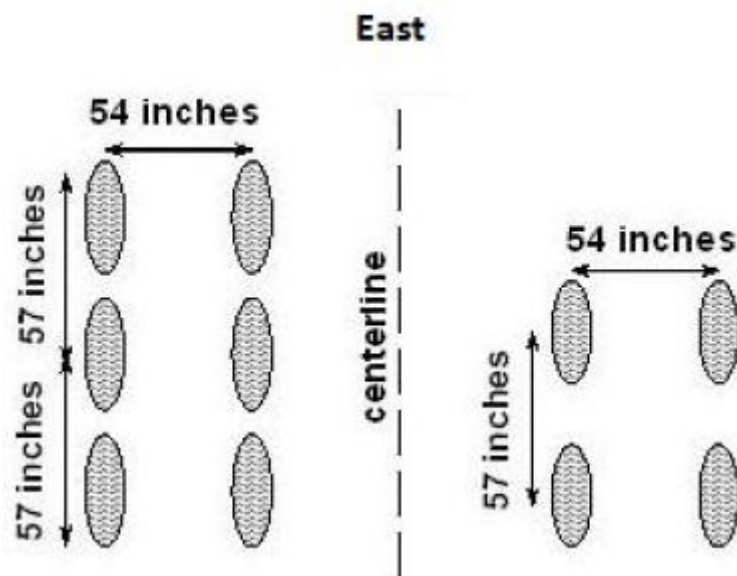
Σχήμα 2.14: Εγκατάσταση δοκιμών NAPTF της FAA (FAA, 2018)

Η εγκατάσταση της FAA, NAPTF (National Airport Pavement Test Facility), αποτελεί μια καινοτόμο εγκατάσταση που χρησιμοποιεί η FAA αποκλειστικά για την έρευνα των οδοστρωμάτων των αεροδρομίων. Η εγκατάσταση NAPTF απεικονίζεται στο σχήμα 2.14. Οι δοκιμές που πραγματοποιούνται χωρίζονται βάσει κατηγορίας της στρώσης έδρασης σε χαμηλής, μεσαίας και υψηλής αντοχής. Το οδόστρωμα που υπόκειται σε δοκιμή, θα υποστεί την κυκλοφορία έως ότου αστοχήσει και έπειτα θα κατασκευαστεί εκ νέου. Στην NAPTF μπορούν να ελεγχθούν διαφορετικοί τύποι οδοστρώματος, είτε εύκαμπτων είτε δύσκαμπτων. Ένας κύκλος κατασκευής περιλαμβάνει την δοκιμή του οδοστρώματος, την εγκατάσταση των μηχανημάτων, τις δοκιμές μέχρι την αστοχία, τον έλεγχο μετά τη δοκιμή και τέλος, την αφαίρεση του οδοστρώματος. Το όχημα που πραγματοποιούνται οι δοκιμές, το οποίο κινείται πάνω σε ράγες, φέρει 2 βαγόνια που μπορούν να προσομοιώσουν μέχρι και 10 τροχούς ανά φορείο με φορτία έως 333.75 kN (75,000 lbs) ανά τροχό. Το όχημα προγραμματίζεται για μια ελεγχόμενη προσομοίωση αεροσκάφους. Έχουν τοποθετηθεί αισθητήρες προκειμένου να συγκεντρώνονται οι απαραίτητες πληροφορίες. Οι αισθητήρες είναι είτε στατικοί για να καταμετρούν θερμοκρασία, υγρασία και αντίσταση σε ωριαίο επίπεδο, είτε δυναμικοί για μεγέθη όπως η παραμόρφωση και η απόκλιση του οδοστρώματος από την επιβολή του φορτίου. Από το 1999, η FAA έχει πραγματοποιήσει 7 κατασκευαστικούς κύκλους, κάμποι εκ των οποίων αναφέρονται σε δύσκαμπτα και άλλοι σε εύκαμπτα οδοστρώματα, εκτός από τον κατασκευαστικό κύκλο 1 οποίος στον οποίο εξετάζονται και οι δύο τύποι οδοστρωμάτων. Συγκεκριμένα οι κατασκευαστικοί κύκλοι CC1, CC3 και CC5 αναφέρονται σε εύκαμπτα οδοστρώματα. (FAA, 2018). Η διάταξη των οχημάτων που χρησιμοποιούνται στους κατασκευαστικούς κύκλους CC1, CC3, CC5 φαίνονται στα σχήματα 2.15, 2.16, 2.17 και 2.18 αντίστοιχα.

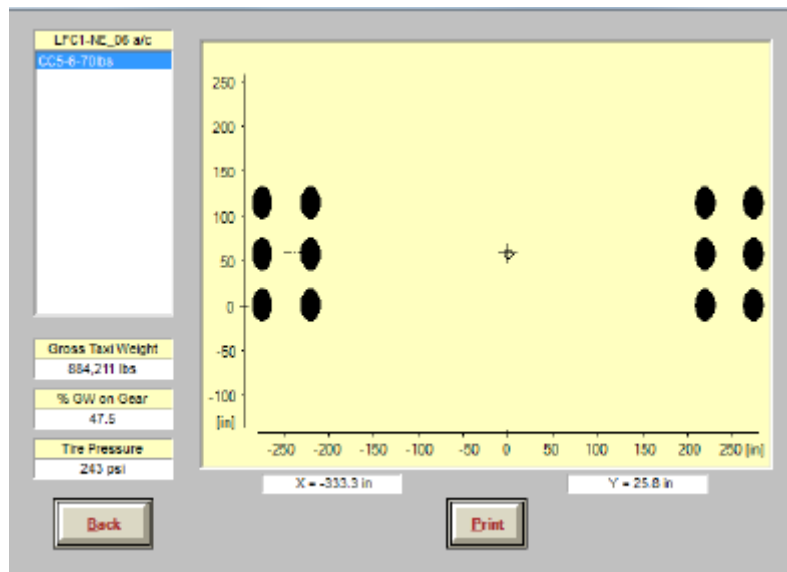
Οι κατασκευαστικοί κύκλοι της NAPTF διενεργούνται σε διατομές οδοστρώματος που αποτελούνται από την στρώση θερμού ασφαλτομίγματος, στρώση βάσης και υπόβασης και τη στρώση έδρασης. Οι διατομές παρουσιάζονται στο σχήμα 2.19. Ανάλογα με την φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης και το υλικό της στρώσης βάσης, οι διατομές αυτές κατηγοριοποιούνται αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας ένα κωδικό τριών γραμμάτων. Ο πρώτος χαρακτήρας υποδηλώνει τη φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης, δηλαδή το γράμμα L δηλώνει χαμηλή φέρουσα ικανότητα του εδάφους, το γράμμα M δηλώνει μέση αντοχή και το γράμμα H υψηλή. Ο δεύτερος χαρακτήρας του κωδικού δείχνει αν πρόκειται για εύκαμπτο (F) ή δύσκαμπτο (R) οδόστρωμα. Τέλος, το τρίτο και τελευταίο γράμμα αναφέρεται στο υλικό της στρώσης βάσης, δηλαδή αν πρόκειται για σταθεροποιημένη βάση (S) ή βάση από θραυστό αμμοχάλικο (C).



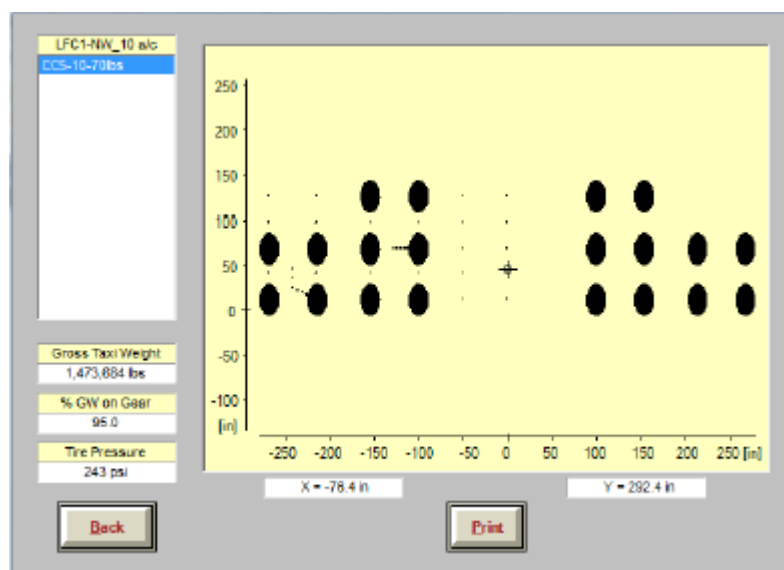
Σχήμα 2.15: Διαστάσεις οχήματος που χρησιμοποιείται στον κατασκευαστικό κύκλο CC1 της NAPTF (Redles, 2015)



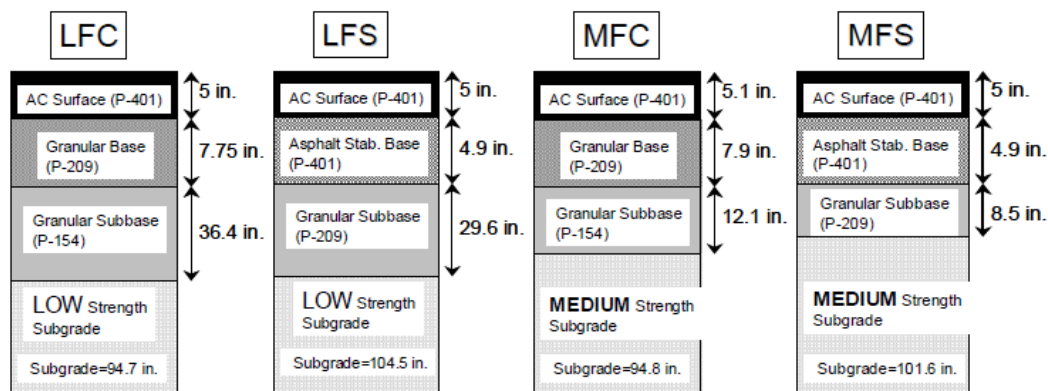
Σχήμα 2.16: Διαστάσεις οχήματος που χρησιμοποιείται στον κατασκευαστικό κύκλο CC3 της NAPTF (Redles, 2015)



Σχήμα 2.17: Διάταξη κύριου φορείου οχήματος που χρησιμοποιείται στον CC5 (Kawa, 2017)

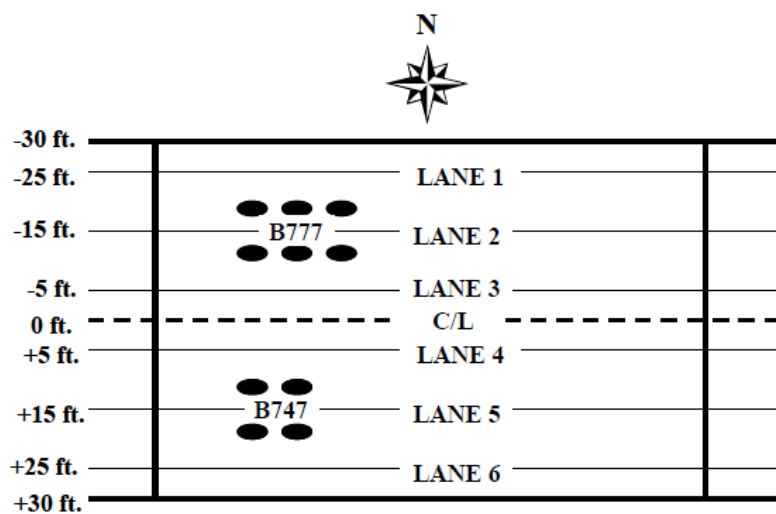


Σχήμα 2.18: Διάταξη κύριου φορείου οχήματος που χρησιμοποιείται στον CC5 (Kawa, 2017)



Σχήμα 2.19: Διατομές οδοστρώματος στις οποίες πραγματοποιούνται οι κατασκευαστικοί κύκλοι της NAPTF (Gopalakrishnan & Thompson, 2004)

Το οδόστρωμα πάνω στο οποίο πραγματοποιούνται οι δοκιμές της NAPTF χωρίζεται σε λωρίδες, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.20. Στις λωρίδες 1,2,3 ασκείται φορτίο ανάλογο με τύπο αεροσκάφους B777, ενώ στις υπόλοιπες ανάλογο του αεροσκάφους B747. Τέλος, σε όλες τις λωρίδες πραγματοποιείται η δοκιμή FWD, ενώ η δοκιμή HWD πραγματοποιείται στις λωρίδες 2,5 (Gopalakrishnan & Thompson, 2004).



FWD (LANE 1, 2, 3, 4, 5, and 6) and HWD (LANE 2, 5 and C/L) Test Lanes

Σχήμα 2.20: Οδόστρωμα στο οποίο πραγματοποιούνται οι δοκιμές της NAPTF (Gopalakrishnan & Thompson, 2004)

Η NAPTF, μέσω των αποτελεσμάτων των μη καταστρεπτικών δοκιμών FWD και HWD και αντίστοιχων λογισμικών, πραγματοποιεί ανάστροφη διαδικασία υπολογισμού «back calculation» για την πρόβλεψη των μέτρων ελαστικότητας της ασφαλτικής στρώσης και της στρώσης έδρασης. Η ανάστροφη διαδικασία υπολογισμού ονομάζεται έτσι, διότι ενώ συνήθως υπολογίζονται τα πάχη των στρώσεων του οδοστρώματος για δεδομένες φορτίσεις στο οδόστρωμα, μέσω του «back calculation» υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας για δεδομένα πάχη στρώσεων οδοστρώματος. Η FAA χρησιμοποιεί αυτή τη διαδικασία προκειμένου να υπολογίσει τις ιδιότητες των υλικών αλλά και την ανάπτυξη των μοντέλων αστοχίας (FAA, 2016). Τα αποτελέσματα των μοντέλων συγκρίνονται με τα αντίστοιχα που προκύπτουν από την NAPTF ώστε να ελεγχθεί η προσαρμογή των μοντέλων αστοχίας στην πράξη αλλά και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων που παρέχουν. Για την NAPTF, κριτήριο αστοχίας της στρώσης έδρασης αποτελεί η ύπαρξη παραμόρφωσης τουλάχιστον 1 ίντσας πλησίον της λωρίδας κυκλοφορίας (Gopalakrishnan & Thompson, 2004).

2.4.1 ΝΕΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ

Το νέο μοντέλο αστοχίας ασφαλτικών στρώσεων βασίστηκε σε μια ενεργειακή προσέγγιση για τον υπολογισμό της φθοράς της ασφαλτικής στρώσης. Η προσέγγιση αυτή ονομάζεται RDEC (ratio of dissipated energy change) και έδειξε ότι τα υλικά του θερμού ασφαλτομίγματος (HMA) συνδέονται σημαντικά με μία ενεργειακή παράμετρο που ονομάζεται plateau value (PV).

Η ενεργειακή προσέγγιση RDEC παρουσιάστηκε το 1997 από τους Carpenter και Jansen (Carpenter & Jansen, 1997) και θεωρεί ότι δεν είναι το σύνολο της εκλυόμενης ενέργειας αυτό που προκαλεί την κόπωση των ασφαλτικών, αλλά η μεταβολή αυτής ανά κύκλο φόρτισης. Ο δείκτης RDEC υπολογίζεται από τη σχέση (8) και δίνει μια πραγματική εκτίμηση της κόπωσης του ασφαλτομίγματος από τις επαναλαμβανόμενες φορτίσεις (Subhy, Lo Presti, & Airey, 2017).

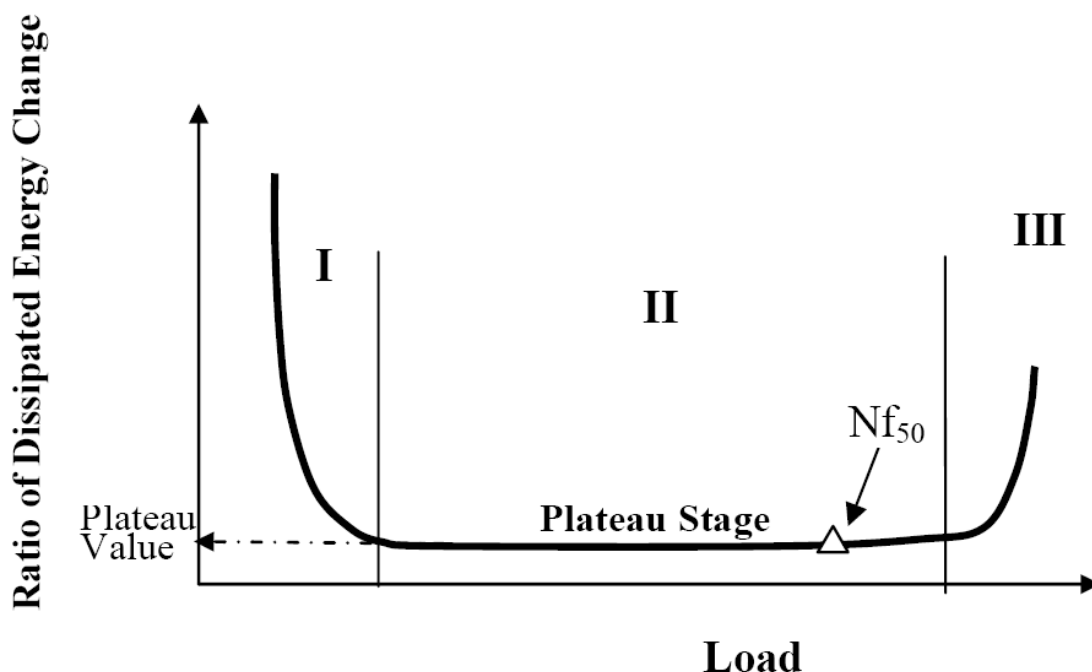
$$RDEC_i = \left(\frac{w_i - w_j}{w_i * (i - j)} \right) \quad (8)$$

Όπου,

- i : κύκλος φόρτισης i
- j : κύκλος φόρτισης j
- W_i : ενέργεια που εκλύεται στον κύκλο φόρτισης i
- W_j : ενέργεια που εκλύεται στον κύκλο φόρτισης j

Το διάγραμμα που συνδέει την τιμή του RDEC με τους κύκλους φορτίσεων, φαίνεται στο σχήμα 2.21. Παρατηρείται ότι το διάγραμμα μπορεί να διακριθεί σε τρεις περιοχές.

- Ο κλάδος I του διαγράμματος δείχνει την απότομη μείωση της τιμής RDEC, που δηλώνει ότι ένα μεγάλο ποσοστό ενέργειας εκλύεται αρχικά λόγω αλλαγής στην πυκνότητα του υλικού και συνεχίζει να μειώνεται έως ότου βρεθεί στη σταθερή περιοχή του δεύτερου κλάδου του διαγράμματος.
- Ο κλάδος II αναφέρεται στην εσωτερική φθορά που υφίστανται τα υλικά και παρουσιάζεται γραφικά με ένα ευθύγραμμο τμήμα σχεδόν παράλληλο στον άξονα των φορτίων. Ένα σταθερό ποσοστό ενέργειας μετατρέπεται σε φθορά, με αποτέλεσμα της έναρξη εμφάνισης κόπωσης του ασφαλτομίγματος.
- Ο κλάδος III παρουσιάζει απότομη αύξηση του RDEC και επομένως σηματοδοτεί την πραγματική αστοχία λόγω κόπωσης (Redles, 2015).



Σχήμα 2.21: Ενεργειακό μοντέλο RDEC (Pais, 2009)

Το ευθύγραμμο τμήμα του κλάδου II που είναι παράλληλο στον άξονα των φορτίσεων ονομάζεται plateau stage και προκύπτει από τιμή του RDEC που αντιστοιχεί σε δυσκαμψία μειωμένη κατά 50 %. Η τιμή αυτή του RDEC ονομάζεται PV (plateau value).

Το 2000 οι Ghuzlan και Carpenter έδειξαν ότι το plateau value συνδέεται άμεσα με την πραγματική αστοχία λόγω κόπωσης του ασφαλομίγματος (Ghuzlan & Carpenter, 2000), όπως φαίνεται στον κλάδο III. Μεταγενέστερα, οι Shen και Carpenter το 2005 (Carpenter & Shen, 2005) ανέπτυξαν μία ιδιαίτερη σχέση μεταξύ της τιμής PV και της τιμής Nf_{50} , που αποτελεί τους κύκλους φόρτισης για τιμή δυσκαμψίας μειωμένης κατά 50% και κατ' επέκταση των κύκλων φόρτισης που αντιστοιχούν στην αστοχία, όπως φαίνεται στη σχέση 9.

$$N_f = 0.4801PV^{-0.9007} \quad (9)$$

Όπου,

- N_f : ο αριθμός των καλύψεων-διελεύσεων για αστοχία
- PV: η τιμή του συντελεστή plateau value του ενεργειακού μοντέλου RDEC

Η προσέγγιση της μείωσης της δυσκαμψίας S στο μισό, αποτελεί κλασσική προσέγγιση προκειμένου να προσδιοριστεί η αστοχία λόγω κόπωσης σε ασφαλομίγματα (Pais, 2009). Επιπρόσθετα, η έννοια της τιμής N_f που εμφανίζεται για τιμή S μειωμένη κατά 50%, παρουσιάστηκε αρχικά από τους Tayebali et al (Tayebali et al., 1993).

Με σκοπό να προσδιοριστούν οι τιμές των παραμέτρων που θα αποτελούν τη σχέση υπολογισμού του PV, χρησιμοποιήθηκε στατιστική γραμμική παλινδρόμηση η οποία πραγματοποιήθηκε από το στατιστικό λογισμικό SAS (Version 8.02). Στο πρόγραμμα εισήχθησαν συνολικά τέσσερις ανεξάρτητες παράμετροι. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν η παραμόρφωση, η δυσκαμψία S, το ογκομετρικό ποσοστό κενών αέρος στην άσφαλο VP και τέλος, το ποσοστό διαβάθμισης αδρανών GP. Η δυσκαμψία S, προκύπτει από τη δοκιμή standard four-point bending beam fatigue test. Πρόκειται για εργαστηριακή δοκιμή η οποία δίνει τη μέγιστη δυσκαμψία του ασφαλομίγματος για διάφορες συχνότητες και θερμοκρασίες. Αναλυτική αναφορά στην εν λόγω δοκιμή πραγματοποιείται στη συνέχεια.

Συγκεκριμένα, έγινε προσπάθεια για ανάπτυξη μιας σχέσης για την τιμή PV. Αρχικά δημιουργήθηκε μια σχέση πρόβλεψης της τιμής PV. Για τη διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν δεκαεννέα μίγματα από το Τμήμα Μεταφορών του Ιλινόις (Illinois Department of Transportation), με δύο είδη αδρανών, για ποικίλα ποσοστά ασφάλτου στο μίγμα, ποσοστά κενών αέρος 4% και 7% και επίπεδα παραμορφώσεων από 300

έως 1000 microstrains, τα οποία ελέγχθηκαν το 2003 (IDOT03), συμπυκνώθηκαν με ένα κυλιόμενο κύλινδρο και ελέγχθηκαν από τη συσκευή κόπωσης Universal Testing Machine (UTM) του Πανεπιστημίου του Ιλινόις.

Μέσω γραμμικής παλινδρόμησης και χρησιμοποιώντας ως κριτήριο την τιμή R^2 , δηλαδή την καλή προσαρμογή στο μοντέλο, αναπτύχθηκε η σχέση για την πρόβλεψη της τιμής PV με διακύμανση R^2 ίση με 0.917 και τυπικό σφάλμα ίσο με 0.3437, οπότε προέκυψε η εξίσωση (10).

$$PV = 10.846 * \varepsilon^{5.396} * S^{4.292} * VP^{3.069} * GP^{-2.681} \quad (10)$$

Αφού προέκυψε το μοντέλο πρόβλεψης της τιμής PV, χρησιμοποιήθηκε σε πλήθος μιγμάτων, τα οποία προέρχονταν από διαφορετικές πηγές. Μεταξύ των δειγμάτων, υπήρχαν και δείγματα που προήλθαν από την NAPTF. Έπειτα, βάσει των τιμών που προέκυψαν από το μοντέλο πρόβλεψης, τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα που προέκυψαν μέσω των αντίστοιχων δοκιμών. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων προέκυψε το τελικό μοντέλο που δίνει την τιμή PV.

Συνδυάζοντας όλα τα αποτελέσματα από 101 διαφορετικά μείγματα θερμού ασφαλομίγματος και 427 δείγματα που ελέγχθηκαν σε κόπωση, προέκυψε η τελική μορφή της σχέσης (11), που δίνει την τιμή PV μέσω γραμμικής παλινδρόμησης, για R^2 ίσο με 0.86 και τυπικό σφάλμα ίσο με 0.42 (Carpenter & Shen, 2007).

$$PV = 44.422 * \varepsilon^{5.140} * S^{2.993} * VP^{1.850} * GP^{-0.4063} \quad (11)$$

2.4.1.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΗ ΝΕΑ ΕΚΔΟΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΗΣ FAA

Στην εξέλιξη της αναλυτικής μεθόδου διαστασιολόγησης της FAA, προκειμένου να υπολογιστεί η φθορά των ασφαλικών στρώσεων, οι καλύψεις-διελεύσεις (coverages) για αστοχία υπολογίζονται μέσω της σχέσης των Shen και Carpenter που ορίζεται από τη σχέση (12).

$$N_f = 0.4801 PV^{-0.9007} \quad (12)$$

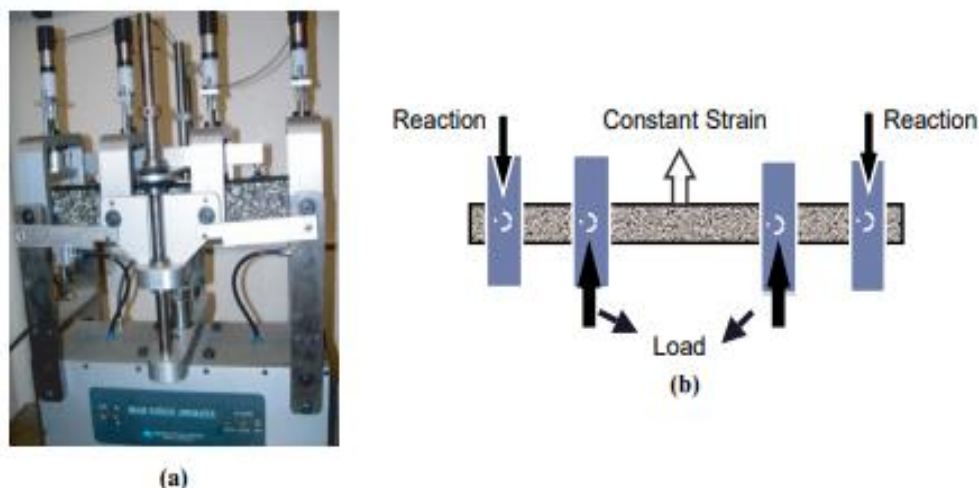
Όπου,

- N_f : ο αριθμός των καλύψεων-διελεύσεων για αστοχία
- PV: η τιμή του συντελεστή plateau value και υπολογίζεται από τη σχέση (13)

$$PV=44.422*\varepsilon^{5.140}*S^{2.993}*VP^{1.850}*GP^{-0.4063} \quad (13)$$

Όπου,

- ε , η οριζόντια παραμόρφωση που εμφανίζεται στον πυθμένα όλων των ασφαλικών στρώσεων
- S , αποτελεί τη δυσκαμψία που υπολογίστηκε μέσω της εργαστηριακής δοκιμής standard four-point bending beam fatigue test η οποία δίνει τη μέγιστη δυσκαμψία για το ασφαλτόμιγμα, υπό διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας και συχνοτήτων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η δοκιμή πραγματοποιήθηκε για συχνότητα 10 Hz και θερμοκρασία 20 ° C, από την οποία προέκυψε τιμή S ίση με 600000 psi (4137 MPa). Η τιμή 4137 Mpa, ορίζεται ως η τιμή του S , σύμφωνα με την εξέλιξη της αναλυτικής μεθόδου της FAA. Το σχήμα 2.22 απεικονίζει τη συσκευή της δοκιμής.



Σχήμα 2.22 : α) Συσκευή εργαστηριακής δοκιμής standard four-point bending beam fatigue test, β) σχηματική απεικόνιση σημείων φόρτισης

- Η παράμετρος VP αποτελεί το ογκομετρικό ποσοστό των κενών αέρος στο ασφαλτόμιγμα και ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών αέρος προς το άθροισμα του όγκου ασφάλτου και κενών αέρος και ορίζεται από τη σχέση (14).

$$VP = \frac{V_a}{V_b + V_a} \quad (14)$$

Όπου,

V_a = όγκος κενών αέρος %

V_b = όγκος της ασφάλτου %

- Η παράμετρος GP εκφράζει το ποσοστό διαβάθμισης αδρανών και ορίζεται από τη σχέση (15).

$$GP = \frac{P_{200}}{P_{NMS} - P_{PCS}} \quad (15)$$

Όπου,

P_{NMS} = ποσοστό αδρανών που διέρχεται από το κόσκινο με μέγιστο μέγεθος

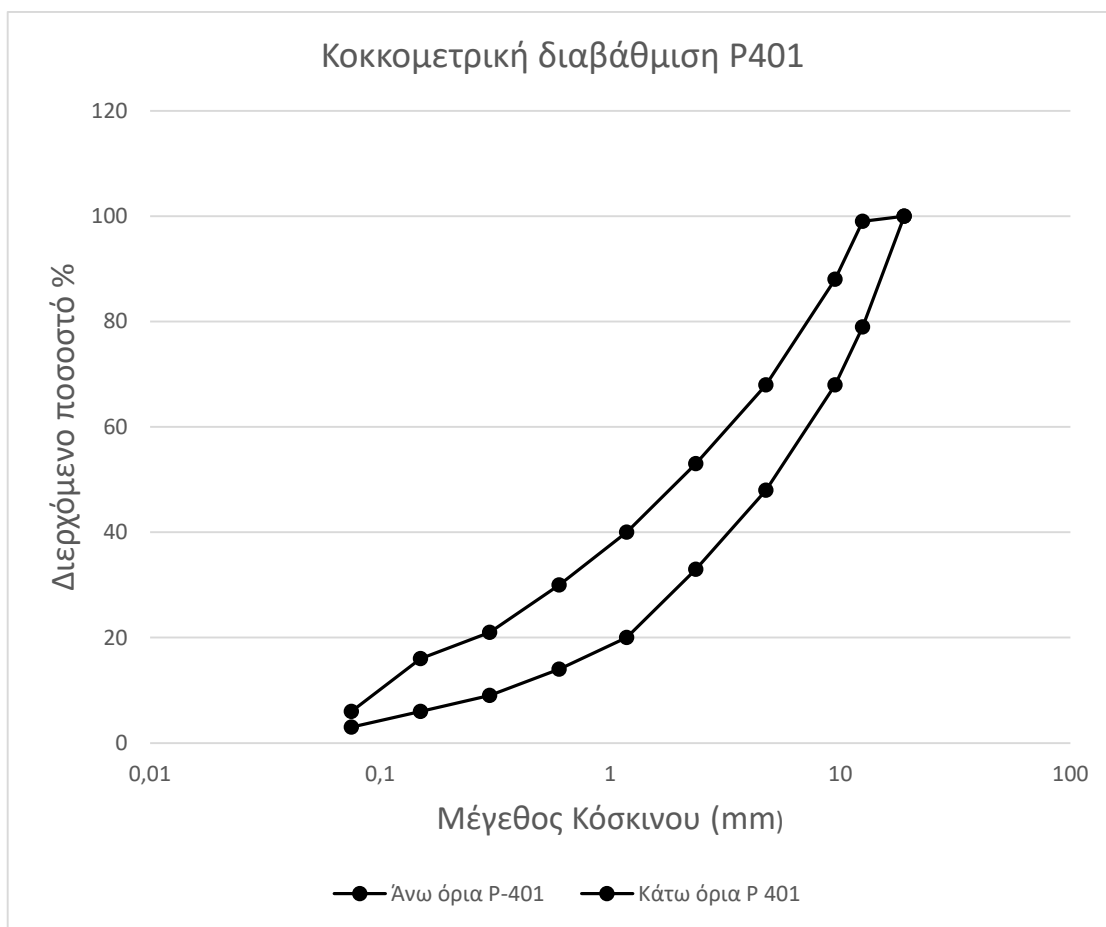
P_{PCS} = ποσοστό αδρανών που διέρχεται από το κύριο κόσκινο ελέγχου (0, 22 *NMPS)

P_{200} = ποσοστό αδρανών που διέρχεται από το κόσκινο #200 (0.075mm)

Σύμφωνα με τα τυπικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην αναλυτική μέθοδο της FAA, καθορίζονται και οι τιμές που λαμβάνουν οι παραπάνω παράμετροι στο σχεδιασμό ενός εύκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου (Carpenter & Shen, Development of an asphalt fatigue model based on energy models, 2007). Οι τιμές αυτές είναι:

- $V_a = 3.5\%$
- $V_b = 12.0\%$
- $P_{NMS} = 95\%$
- $P_{PCS} = 58\%$
- $P_{200} = 4.5\%$

Οι παραπάνω τιμές αποτελούν ένα μέσο όρο των τιμών της κοκκομετρικής διαβάθμισης του τυπικού υλικού P-401 της FAA. Οι κοκκομετρικές καμπύλες παρουσιάζονται στο σχήμα 2.23.



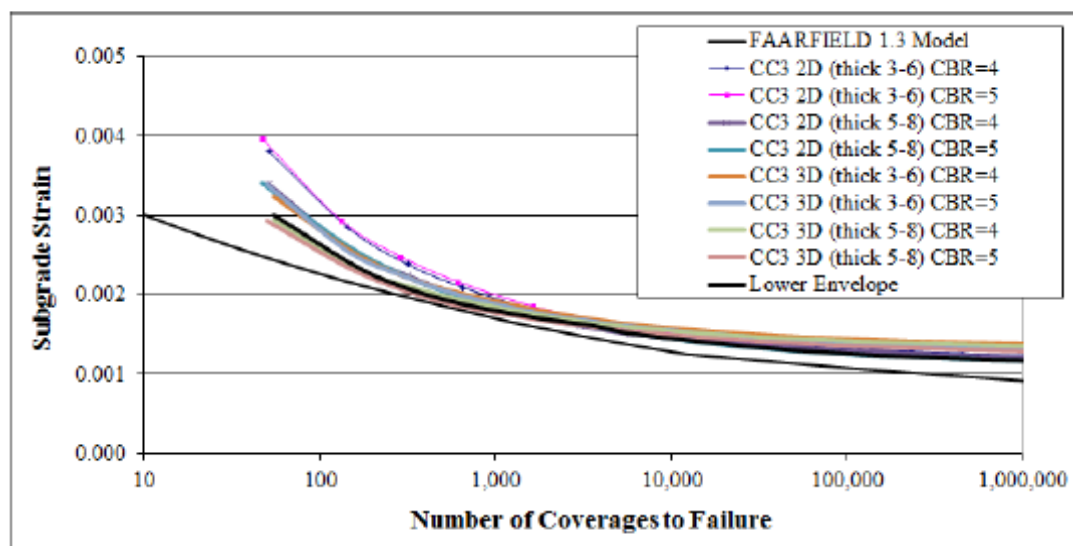
Σχήμα 2.23: Επιτρεπόμενο εύρος ορίων τυπικού υλικού P-401

Η συγκεκριμένη μέθοδος λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά των τυπικών υλικών που χρησιμοποιούνται. Επομένως σε περίπτωση εφαρμογή της σε χώρα που χρησιμοποιεί διαφορετικά υλικά στο σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων, θα πρέπει να γίνει κατάλληλη προσαρμογή των νόμων αστοχίας βάσει των υλικών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν.

2.4.2 ΝΕΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΤΡΩΣΗΣ ΕΔΡΑΣΗΣ

Κατά την εξέλιξη της αναλυτικής μεθόδου σχεδιασμού της FAA, παρατηρείται διαφορά μεταξύ των μοντέλων υπολογισμού καλύψεων-διελεύσεων για αστοχία, που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της φθοράς στην κορυφή της στρώσης έδρασης. Για την ανάπτυξη του νέου μοντέλου αστοχίας που χρησιμοποιείται στην εξελιγμένη μορφή της αναλυτικής μεθόδου, χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι διατομών εύκαμπτου

οδοστρώματος. Ο πρώτος τύπος αποτελούνταν από στρώση ασφαλτομίγματος πάχους 7.62 cm, στρώση βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο P-209 πάχους 15.24 cm και στρώση υπόβασης P-154. Ο δεύτερος τύπος αποτελείται από τα ίδια υλικά αλλά για πάχη 12.7 και 20.32 cm για στρώση ασφαλτικών και βάσης αντίστοιχα. Μέσω χρήσης του προγράμματος COMFAA της FAA για τους δύο τύπους διατομών, για αεροσκάφη διπλού και διπλού δίδυμου τροχού και δείκτη CBR 4% και 5%, υπολογίστηκε η κατακόρυφη παραμόρφωση στην κορυφή της στρώσης έδρασης συναρτήσει των καλύψεων-διελεύσεων για αστοχία. Τα αποτελέσματα τοποθετήθηκαν σε αντίστοιχο διάγραμμα και συνολικά προέκυψαν 8 καμπύλες. Αντίστοιχη διαδικασία πραγματοποιήθηκε για το μοντέλο αστοχίας της στρώσης έδρασης που χρησιμοποιούσε η προηγούμενη αναλυτική μέθοδος. Το συνολικό διάγραμμα με τα αποτελέσματα της διαδικασίας φαίνεται στο σχήμα 2.24.



Σχήμα 2.24: Διάγραμμα εύρεσης κατώτερου ορίου για τις καμπύλες αστοχίας στρώσης έδρασης (Kawa, 2017)

Στην προσπάθεια να αναπτυχθεί ένα μοντέλο που να συγκλίνει όσο το δυνατό καλύτερα στο κατώτερο όριο των 8 περιπτώσεων, αναπτύχθηκε η εξίσωση Bleasdale, μέσω στατιστικού προγράμματος (CurveExpert Basic 1.4), που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των καλύψεων για αστοχία στη νεότερη έκδοση αναλυτικής μεθόδου της FAA. Η μορφή της εξίσωσης υπολογισμού των καλύψεων-διελεύσεων για αστοχία παρουσιάζεται από την εξίσωση (16).

$$\text{Log10}(C) = \left(\frac{1}{-0,1638 + 185,19 \cdot \varepsilon} \right)^{0,60586}, \text{ αν } C > 1000 \quad (16)$$

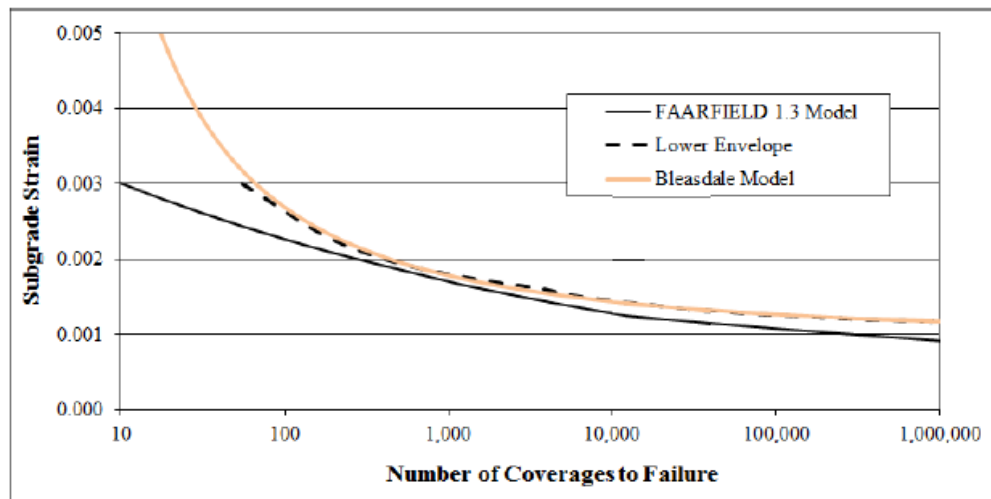
Όπου,

- C : οι καλύψεις-διελεύσεις για αστοχία στην κορυφή της στρώσης έδρασης
- ε : μέγιστη κατακόρυφη παραμόρφωση στην κορυφή της στρώσης έδρασης

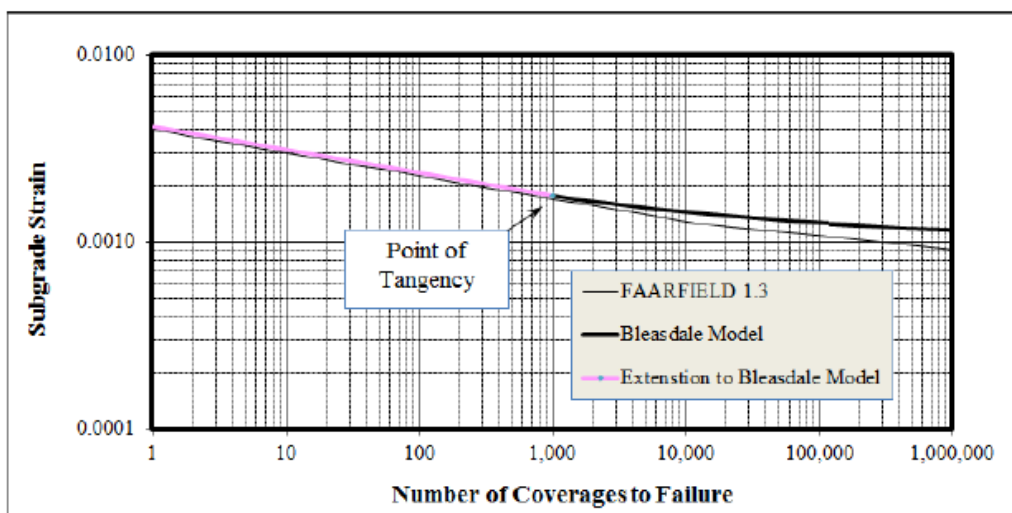
Σε περίπτωση όπου οι διελεύσεις δεν ξεπερνούν τις 1000, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση (17), όπως εφαρμόζοταν στην αναλυτική μέθοδο σχεδιασμού που εισήχθη το 2009.

$$C = \left(\frac{0,004}{\varepsilon} \right)^{8,1} \quad (17)$$

Στο σχήμα 2.25 παρουσιάζεται γραφικά η προσαρμογή του μοντέλου Bleasdale στην ευθεία του κατώτερου ορίου, συγκριτικά με το μοντέλο που χρησιμοποιούνταν στην αρχική αναλυτική μέθοδο σχεδιασμού κατά FAA. Σημειώνεται ότι το νέο μοντέλο αστοχίας της στρώσης έδρασης έχει καλύτερη προσαρμογή για μεγαλύτερα επίπεδα διελεύσεων.



Σχήμα 2.25: Διάγραμμα σύγκρισης μοντέλων Bleasdale και παλαιότερης αναλυτικής μεθόδου FAA (Kawa, 2017)



Σχήμα 2.26: Σύγκλιση των μοντέλων Bleasdale και παλαιότερης αναλυτικής μεθόδου FAA (Kawa, 2017)

Στο σχήμα 2.26, φαίνεται ένα σημείο σύγκλισης των ευθειών των μοντέλων Bleasdale και του αντίστοιχου μοντέλου που χρησιμοποιούνταν στην προηγούμενη έκδοση της αναλυτικής μεθόδου της FAA, το οποίο αντιστοιχεί σε αριθμό καλύψεων για αστοχία ίσο με 1000. Έτσι εξηγείται, επομένως, η δυνατότητα χρήσης του μοντέλου αστοχίας της στρώσης έδρασης της αναλυτικής μεθόδου στην εξελιγμένη αναλυτική μέθοδο της FAA, για διελεύσεις μικρότερες των 1000.

Μετά από την εύρεση, στατιστικά, του νέου μοντέλου αστοχίας της στρώσης έδρασης, διερευνήθηκε η σχέση του με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διενέργεια δοκιμών στην εγκατάσταση NAPTF, συγκεκριμένα από τον κύκλο κατασκευής CC3 και CC5 για εύκαμπτο οδόστρωμα. Ο κατασκευαστικός κύκλος CC3 αφορά στρώση έδρασης χαμηλής αντοχής και πραγματοποιείται για το δεύτερο τύπο διατομής οδοστρώματος, όπως και ο κατασκευαστικός κύκλος CC5. Το μέτρο ελαστικότητας του θερμού ασφαλτομίγματος εκτιμήθηκε βάσει της θερμοκρασίας, μέσω της εξίσωσης (18):

$$\text{Log}_{10}(E) = 1.53658 - 0.006447 T - 0.00007404 T^2 \quad (18)$$

Όπου,

- E : μέτρο ελαστικότητας ασφαλτικής στρώσης, σε Psi
- T : θερμοκρασία του ασφαλτομίγματος, σε Fahrenheit

Η κατακόρυφη παραμόρφωση στην κορυφή της στρώσης έδρασης από τη δοκιμή της NARTF, λαμβάνεται έτσι ώστε να δίνει δείκτη φθοράς CDF στρώσης έδρασης ίσο με 1. Αυτό συμβαίνει για θερμοκρασία 25 °C (77° Fahrenheit) και μέτρο ελαστικότητας E ίσο με 2758 MPa (400000 psi) και για 32,2 °C (90° Fahrenheit) και μέτρο ελαστικότητας 1379 MPa (200000 psi).

Εν κατακλείδι, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις της NARTF συγκρίθηκαν με αυτά από το στατιστικό μοντέλο μέσω της ανάστροφης διαδικασίας «back calculation» και προέκυψε το νέο μοντέλο αστοχίας της στρώσης έδρασης που χρησιμοποιείται στην εξελιγμένη μέθοδο διαστασιολόγησης της FAA.

Αξίζει να σημειωθεί ότι από τη σύγκριση του μοντέλου με τις αντίστοιχες μετρήσεις της NARTF, προέκυψε ότι τα μοντέλα δίνουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής για το οδόστρωμα, ειδικά για υψηλά επίπεδα καλύψεων (Kawa, 2017)

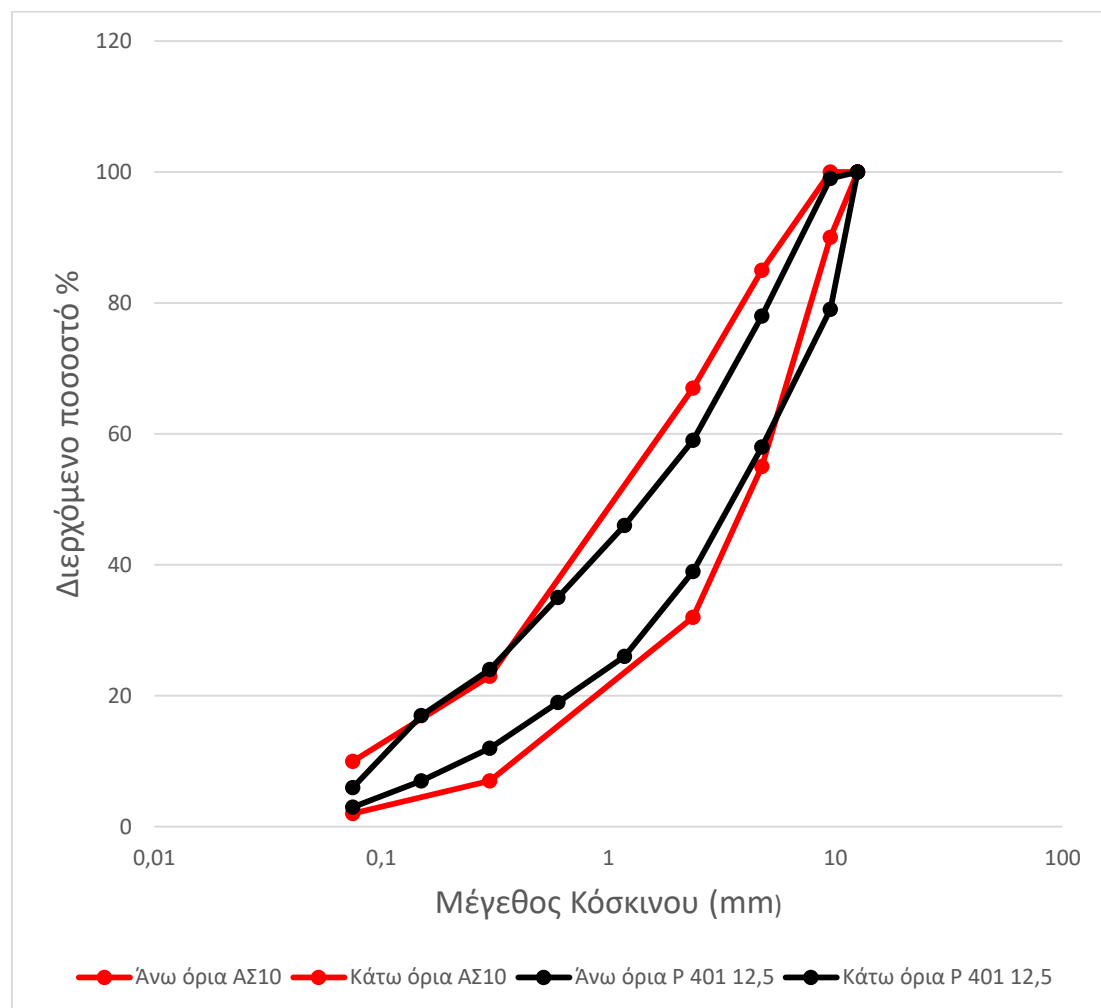
2.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΥΠΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ FAA ΣΤΑ ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ

Σύμφωνα με τις ελληνικές προδιαγραφές για τα οδοστρώματα αεροδρομίων της ΕΤΕΠ (Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές) (ΕΤΕΠ, 2009), έγινε μια ενδεικτική διερεύνηση για τη δυνατότητα εφαρμογής των τυπικών υλικών που χρησιμοποιεί η FAA, στα ελληνικά αεροδρόμια. Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα 2.27 παρουσιάζονται οι ελληνικές προδιαγραφές για την κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος αδρανών υλικών για ασφαλικό σκυρόδεμα κλειστού τύπου.

Ονομαστικό άνοιγμα οπής κόσκινου κατά το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 933-2 (mm)	Τύπος ασφαλτομίγματος				
	ΑΣ 40	ΑΣ 31,5	ΑΣ 20	Σ 12,5	ΑΣ 10
83 (50) ⁽¹⁾	100				
40 (37,5)	90-100	100			
31,5 (25,0)	-	90-100	100		
20 (19)	58-81 (56-80)	-	90-100	100	
12,5 (12,5)	-	56-80	-	90-100	100
10 (9,5)			58-81 (56-80)	-	90-100
4 (4,75)	20-50 (23-53)	26-56 (29-59)	31-61 (35-65)	39-70 (44-74)	49-80 (56-85)
2 (2,36)	14-39 (15-41)	18-43 (19-45)	21-46 (23-49)	25-55 (28-58)	29-63 (32-67)
0,25 (0,30)	3-15 (4-16)	4-16 (5-17)	4-18 (5-19)	4-19 (5-21)	6-21 (7-23)
0,063 (0,075)	0-5 (0-6)	1-6 (1-7)	1-7 (2-8)	1-9 (2-10)	1-9 (2-10)

Σχήμα 2.27: Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος αδρανών υλικών για ασφαλικό σκυρόδεμα κλειστού τύπου (ΕΤΕΠ, 2009)

Βάσει των ιδιοτήτων του πρότυπου υλικού της FAA P-401, συγκρίθηκαν τα όρια των ελληνικών απαιτήσεων για την κοκκομετρία των αδρανών του ασφαλτομίγματος, προκειμένου να μελετηθεί η δυνατότητα εφαρμογής του P-401 στα ελληνικά αεροδρόμια. Από την ενδεικτική μελέτη που διενεργήθηκε, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.28, η κοκκομετρική διαβάθμιση του P-401 ακολουθεί περίπου την αντίστοιχη διαβάθμιση του τύπου ασφαλτικού σκυροδέματος ΑΣ10 των ελληνικών προδιαγραφών. Το ΑΣ10 δηλώνει ασφαλτικό σκυρόδεμα με αδρανή συγκρατούμενα έως και 10% κατά βάρος από το κόσκίνο βρογχίδας 10 mm.



Σχήμα 2.28: Σύγκριση κοκκομετρίας ελληνικών προδιαγραφών και P-401

Συγκρίθηκαν ακόμα οι απαιτήσεις της ΕΤΕΠ για τα χαρακτηριστικά του ασφαλτικού σκυροδέματος κλειστού τύπου για όλες τις ασφαλτικές στρώσεις, με αυτά του τυπικού υλικού P-401. Οι ελληνικές απαιτήσεις φαίνονται στον πίνακα 2.10, ενώ οι ιδιότητες του P-401 παρουσιάζονται στον πίνακα 2.11.

Πίνακας 2.10: Χαρακτηριστικά ασφαλτικού σκυροδέματος ΕΤΕΠ (ΕΤΕΠ, 2009)

Χαρακτηριστικά κριτήρια	Για όλες τις κατηγορίες οδών
Βαθμός συμπίκνωσης, κτύποι	2x75
Ευστάθεια, kN	> 8,0
Παραμόρφωση, mm	2,0 - 3,5 (¹)
Κενά αέρος, (%)	3,0 - 5,0
Κενά που γέμισαν με άσφαλτο, %	65 - 74

Πίνακας 2.11: Χαρακτηριστικά τυπικού υλικού P-401 (FAA, 2014)

Test Property	Pavements Designed for Aircraft Gross Weights of 60,000 Lbs. Or More or Tire Pressures of 100 Psi or More	
Number of Blows	75	
	Specification Tolerance	
	L	U
Stability, minimum, pounds	1800	--
Flow, 0.01-inch	8	16
Air Voids Total Mix, percent	2.0	5.0
Mat Density, percent	96.3	--
Joint density, percent	93.3	--

Από τη σύγκριση των χαρακτηριστικών του P-401 και τις ελάχιστες απαιτήσεις της ΕΤΕΠ παρατηρείται ότι, το κριτήριο για την ευστάθεια ικανοποιείται ($1800 \text{ pounds} = 8,0068 \text{ kN} > 8$), όπως επίσης και το κριτήριο για το ποσοστό των κενών αέρος στο ασφαλτόμιγμα. Η ελληνική προδιαγραφή απαιτεί συμπίκνωση των δοκιμών κατά Marshall με 2x75 κτύπους, ενώ το P-401 συμπυκνώνεται με 75 κτύπους, σύμφωνα με τη δοκιμή Marshall. Ωστόσο απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση των ιδιοτήτων των τυπικών υλικών της FAA προκειμένου να μελετηθεί λεπτομερώς η δυνατότητα εφαρμογής τους στο σχεδιασμό των ελληνικών αεροδρομίων.

3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΑΡΧΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΗΣ FAA

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το μοντέλο των Heukelom & Klomp αποτέλεσε βασικό μοντέλο για το σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων για πλήθος χρόνων, έως τις μέρες μας. Ωστόσο, βάσει των εξελίξεων που έχουν πραγματοποιηθεί στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων των αεροδρομίων η προσέγγιση για την αστοχία των Heukelom&Klomp θεωρείται παλαιωμένη και οδηγεί στην ανάγκη υιοθέτησης νέων μοντέλων στο σχεδιασμό. Με αφορμή την πρόσφατη παρουσίαση από την FAA των νέων αρχών στο σχεδιασμό, γίνεται σύγκριση μεταξύ των προσεγγίσεων που ακολουθούνται. Συγκεκριμένα, η ενεργειακή προσέγγιση RDEC για αστοχία που εφαρμόζεται στην αναλυτική μέθοδο της FAA, παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον S.H Carpenter, ως διακεκριμένος ομιλητής, το 2007 στο διεθνές συνέδριο με τίτλο Advanced characterisation of pavement and soil engineering materials (ACPSEM) που πραγματοποιήθηκε στην Αθήνα (ACPSEM, 2007). Έκτοτε, απαιτήθηκαν 10 χρόνια για την ένταξη της ενεργειακής προσέγγισης στο σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων και συγκεκριμένα στη μεθοδολογία της FAA. Οι εξελίξεις αυτές παρουσιάστηκαν στο διεθνές συνέδριο BCRRA (Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields) (BCRRA, 2017) που διεξήχθη το 2017.

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των μοντέλων αστοχίας των δύο εκδόσεων της αναλυτικής μεθόδου σχεδιασμού της FAA, με στόχο τη σύγκρισή τους. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε παράδειγμα διαστασιολόγησης εύκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου σύμφωνα με τις δύο εκδόσεις της αναλυτικής μεθόδου της FAA, ώστε να εντοπιστούν διαφορές στη διαδικασία σχεδιασμού, λόγω των διαφορετικών μοντέλων αστοχίας που χρησιμοποιούνται σε κάθε έκδοση. Στη συνέχεια, για περαιτέρω εμβάθυνση στις βασικές αρχές των μοντέλων αυτών, υλοποιήθηκε μια προκαταρκτική ανάλυση ευαισθησίας για τις δύο μορφές αναλυτικής μεθόδου. Μελετήθηκε, ακόμα, η επίδραση της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας στη φθορά της διατομής του οδοστρώματος που σχεδιάστηκε βάση της εξέλιξης της αναλυτικής μεθόδου, για

ενδεικτικές τιμές μέτρου ελαστικότητας ασφαλικής στρώσης στις δύο κρίσιμες θέσεις αστοχίας. Οι αναλύσεις παρουσιάζονται εκτενώς στη συνέχεια.

3.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ

Κατά την εξέλιξη της αναλυτικής μεθόδου σχεδιασμού της FAA, παρατηρήθηκε διαφοροποίηση του μοντέλου που εφαρμόζεται προκειμένου να γίνει εκτίμηση της φθοράς των ασφαλικών στρώσεων. Το νέο μοντέλο αστοχίας λόγω κόπωσης των ασφαλικών στρώσεων βασίζεται σε διαφορετική προσέγγιση, συγκριτικά το αντίστοιχο της αρχικής μορφής της αναλυτικής μεθόδου σχεδιασμού.

Τα υπάρχοντα μοντέλα που χρησιμοποιούνταν για την πρόβλεψη της κόπωσης των ασφαλικών στρώσεων είναι κυρίως εμπειρικά και έχουν αναπτυχθεί για τον υπολογισμό των φορτίσεων για αστοχία και βασίζονται στην οριζόντια παραμόρφωση των ασφαλικών στρώσεων και το μέτρο ελαστικότητας του θερμού ασφαλτομίγματος. Τα απλούστερα μοντέλα κόπωσης ασφαλικών στρώσεων ορίζονται από τη σχέση (19).

$$N_f = k_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{k_2} \quad (19)$$

Όπου,

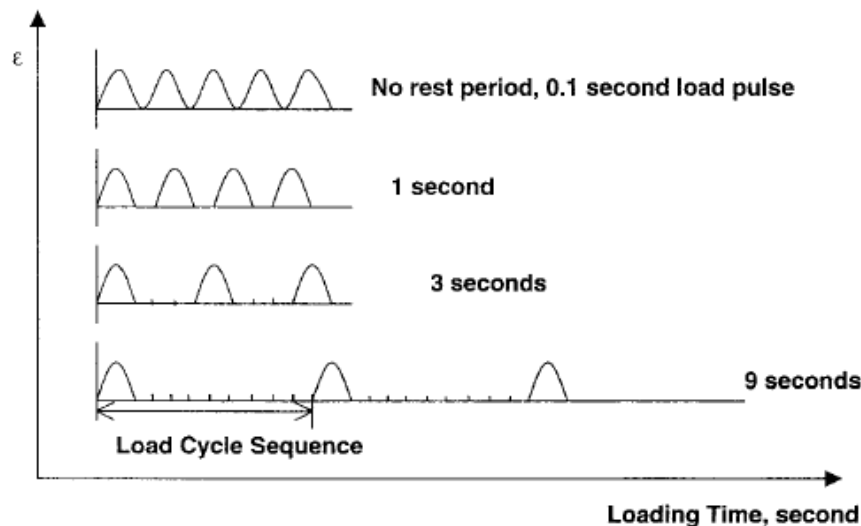
- N_f : ο αριθμός των καλύψεων-διελεύσεων για αστοχία
- ε_t : η οριζόντια παραμόρφωση στον πυθμένα της ασφαλικής στρώσης
- k_1, k_2 : σταθερές που προκύπτουν από εργαστηριακές δοκιμές

Ο βασικός ρόλος των παλαιότερων μοντέλων είναι η σύνδεση των ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιούνται, η παραμόρφωση που προκαλείται στο οδόστρωμα και οι επαναλαμβανόμενες φορτίσεις για αστοχία (Carpenter & Shen, 2007). Συγκεκριμένα το μοντέλο κόπωσης των ασφαλικών των Heukelom και Klopp (1962), το οποίο ανήκει στην κατηγορία των εμπειρικών μοντέλων που προαναφέρθηκαν με την εκθετική μορφή που παρουσιάστηκε, στηρίζεται στο μέτρο ελαστικότητας των ασφαλικών. Αυτό συμβαίνει υπό την έννοια ότι τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο οδόστρωμα χαρακτηρίζονται κυρίως από την αντίσταση που παρουσιάζουν υπό την παραμόρφωση που δημιουργείται από τη συνεχόμενη άσκηση του φορτίου. Η

αντίσταση αυτή μπορεί να εκφραστεί και ως δύναμη ή δυσκαμψία. Το κύριο μέγεθος που εκφράζει δυσκαμψία είναι το μέτρο ελαστικότητας (Behiry, 2014).

Ωστόσο, τα μοντέλα αυτά περιλαμβάνουν μετρήσεις που έχουν προκύψει από εργαστηριακές δοκιμές και ως εκ τούτου απαιτούν προσαρμογή στο εργοτάξιο προκειμένου να παράσχουν ορθές εκτιμήσεις σχετικά με τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος. Ακόμα, οι παράμετροί τους προσδιορίζονται από συνεχόμενη φόρτιση του οδοστρώματος, είναι άμεσα εξαρτώμενοι από τα υλικά ενώ τα φορτία που ασκούνται είναι εντός ενός περιορισμένου εύρους, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τις πραγματικές συνθήκες στις οποίες βρίσκεται το οδόστρωμα.

Εκτός από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, πραγματική συνθήκη του οδοστρώματος αποτελεί και το κενό χρονικό διάστημα μεταξύ των διαδοχικών φορτίσεων (Carpenter & Shen, 2007). Τα χρονικά διαστήματα αυτά, τα οποία στη βιβλιογραφία αναφέρονται ως *rest periods*, ανάλογα με τη διάρκειά τους μετά από συγκεκριμένο αριθμό κύκλων φορτίσεων παρουσιάζουν μια θεραπευτική επίδραση στο οδόστρωμα. Το σχήμα 3.1 απεικονίζει τη θεραπευτική αυτή επίδραση μέσα από τρεις περιπτώσεις τέτοιων χρονικών διαστημάτων, σταθερών από 0 έως 9 δευτερόλεπτα, τα οποία εισήλθαν στο μηχάνημα δοκιμών, μετά από διαδοχικές φορτίσεις. Η ενεργειακή προσέγγιση RDEC χρησιμοποιείται στη μελέτη της θεραπευτικής επίδρασης των *rest periods* στο οδόστρωμα. Από διάφορες δοκιμές μέσω της ενεργειακής ανάλυσης RDEC, βρέθηκαν διάφορες τιμές PV. Για αυτές τις τιμές, με την αύξηση της χρονικής διάρκειας των *rest periods* από 0 έως 9 δευτερόλεπτα, παρατηρήθηκε μείωση της παραμέτρου PV, γεγονός που υποδηλώνει αύξηση της διάρκειας ζωής του οδοστρώματος (Carpenter & Shen, 2006).



Σχήμα 3.1: Χρονικά διαστήματα «rest periods» για το οδόστρωμα (Carpenter & Shen, 2006)

Επίσης, τα παλαιότερα μοντέλα αστοχίας δεν συμπεριλαμβάνουν την έννοια του ορίου αντοχής σε κόπωση FEL (fatigue endurance limit), δηλαδή ένα όριο παραμόρφωσης κάτω από το οποίο θα εμφανίζεται ελάχιστη έως μηδαμινή φθορά λόγω κόπωσης του ασφατομίγματος (Carpenter, Shen, & Ghuzlan, 2003). Το όριο FEL συνδέεται άμεσα με τη θεραπευτική επίδραση των rest periods στο οδόστρωμα. Έρευνες έχουν δείξει ότι σε χαμηλά επίπεδα παραμορφώσεων, μειώνονται τα επίπεδα φθοράς στο οδόστρωμα, οπότε αρχίζει να εμφανίζεται θεραπεία στο οδόστρωμα. Ειδικά, όταν η παραμόρφωση φτάσει την τιμή FEL, όση φθορά δημιουργείται αποκαθίσταται άμεσα χωρίς να συσσωρεύεται. Με αυτόν τον τρόπο, η θεραπευτική ιδιότητα του οδοστρώματος σε σχέση με την φθορά που υφίστανται.

Η δυνατότητα του οδοστρώματος για να αποκαταστήσει τη φθορά που υφίσταται αποτελεί μία εξίσωση μεταξύ της επιφανειακής ενέργειας του οδοστρώματος και της εκλυόμενης ενέργειας που προκαλεί τη φθορά. Σύμφωνα με την ενεργειακή προσέγγιση του RDEC, η επιφανειακή ενέργεια είναι σταθερή για ένα δεδομένο υλικό, ενώ αυτό που μεταβάλλεται στην εξίσωση είναι το ποσοστό της εκλυόμενης ενέργειας ανά κύκλο φόρτισης. Η φθορά που δημιουργείται από το ποσοστό της ενέργειας που εκλύεται ανά κύκλο φόρτισης, αντισταθμίζεται από τις θεραπευτικές ιδιότητες που έχει το οδόστρωμα. Όταν οι θεραπευτικές ιδιότητες επιδρούν περισσότερο στο οδόστρωμα σε σχέση με τη φθορά στην οποία υπόκειται, τότε η διάρκεια ζωής του οδοστρώματος επιμηκύνεται. Το γεγονός αυτό παρατηρήθηκε και εργαστηριακά, για επίπεδα παραμορφώσεων κοντά στο FEL. (Carpenter & Shen, 2006). Μέσω εργαστηριακών

δοκιμών, οι Shen & Carpenter όρισαν ότι η τιμή του FEL κυμαίνεται μεταξύ των 70 και 350 microstains. (Carpenter & Shen, 2007)

Τέλος, από τη στιγμή που έχει παρουσιαστεί μια ενεργειακή προσέγγιση σχετικά με το όριο της παραμόρφωσης που μπορεί να προκληθεί σε ένα οδόστρωμα χωρίς αυτό να αστοχεί, ο σχεδιασμός ενός εύκαμπτου οδοστρώματος στοχεύοντας στην ελαχιστοποίηση των οριζόντιων παραμορφώσεων κάτω από αυτό το όριο, είναι εξίσου μη απαραίτητος και αντισοοονομικός (Carpenter & Shen, 2007).

Όλοι οι παραπάνω λόγοι υποδηλώνουν την ανάγκη για βελτίωση και εξέλιξη των εμπειρικών μοντέλων κόπωσης, τα οποία βασίστηκαν στην ενεργειακή προσέγγιση του RDEC , όπως προαναφέρθηκε.

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω ως βασικές αρχές, αναπτύχθηκε το νέο μοντέλο αστοχίας λόγω κόπωσης των ασφαλικών, το οποίο χρησιμοποιείται από την εξελιγμένη μορφή της αναλυτικής μεθόδου σχεδιασμού της FAA, προκειμένου να υπολογιστεί η φθορά των ασφαλικών στρώσεων.

3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Στα πλαίσια μιας προκαταρκτικής διερεύνησης του ενεργειακού μοντέλου αστοχίας λόγω κόπωσης των ασφαλικών στρώσεων σε σχέση με το αντίστοιχο μοντέλο των Heukelom και Klomp, πραγματοποιήθηκε ένα ενδεικτικό παράδειγμα διαστασιολόγησης εύκαμπτου οδοστρώματος μέσω της νέας έκδοσης της αναλυτικής μεθόδου της FAA. Σκοπός της διερεύνησης αυτής είναι η μελέτη της επίδρασης του ενεργειακού μοντέλου στο σχεδιασμό του διαδρόμου προσγείωσης αεροσκαφών σε σχέση με αυτό που χρησιμοποιούταν στην προηγούμενη έκδοση της μεθόδου. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος που προέκυψε από το σχεδιασμό βάσει των δύο εκδόσεων της μεθόδου κατά FAA, καθώς και μία ενδεικτική σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Για το σχεδιασμό χρησιμοποιήθηκε ως δεδομένο, αεροσκάφος μονού τροχού, όσον αφορά στη διάταξη του κύριου φορείου, με βάρος 22680 kg και 20000 ετήσιες αναχωρήσεις. Τα χαρακτηριστικά του αεροσκάφους φαίνονται και στο σχήμα 3.2.

Airplane Group	Airplane Name (1)	Gross Taxi Weight (lbs)	Annual Departures	% Annual Growth	De
Generic	S-40 HTP	50.000	20.000	0.00	40

Library Airplanes
SWL-50
S-30
S-45
S-50
S-60
S-75
D-50
D-75
D-100
D-150
D-200
2D-100
2D-150
2D-200
2D-300
2D-400

Add

Remove

Save List

Clear List

Save to Float

Add Float

Float Airplanes

Back

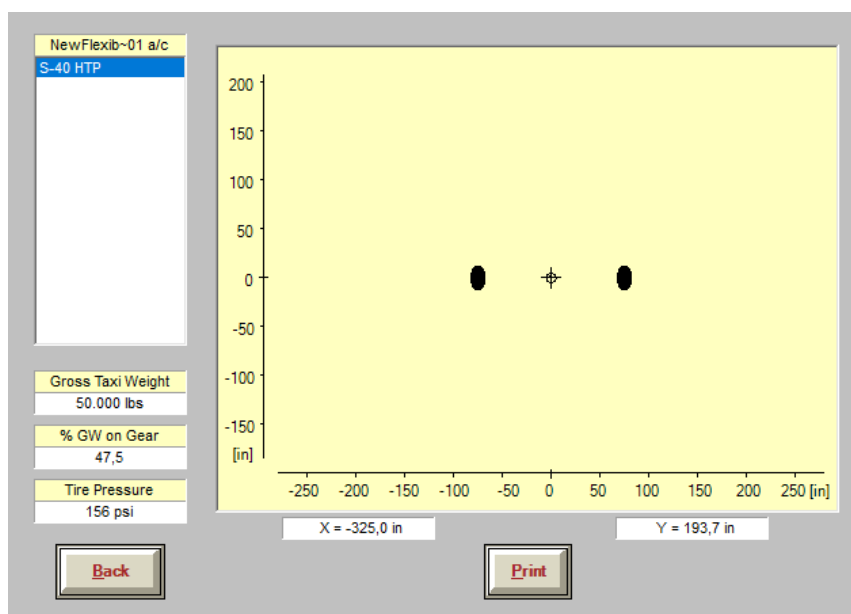
Help

CDF Graph

View Gear

Σχήμα 3.2: Αεροσκάφος σχεδιασμού

Η διάταξη των πίσω τροχών του αεροσκάφους που επιλέχθηκε, όπως και η απόσταση των τροχών από τον κεντρικό άξονα του διαδρόμου απογείωσης του αεροδρομίου, παρουσιάζεται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Διάταξη τροχών αεροσκάφους σε σχέση με τον κεντρικό άξονα του διαδρόμου απογείωσης

Ο σχεδιασμός πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα τυπικά υλικά της FAA. Συγκεκριμένα, για τη διαστασιολόγηση της διατομής του οδοστρώματος επιλέχθηκε επιφανειακή στρώση ασφατικών από τυπικό υλικό P-401 θερμού ασφαλτομίγματος, με μέτρο ελαστικότητας 1380 Mpa. Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας που ορίζεται συντηρητικά από την αναλυτική μέθοδο της FAA για την επιφανειακή ασφατική στρώση και αντιστοιχεί σε θερμοκρασία οδοστρώματος 32 ° C. Επίσης, ορίστηκε στρώση βάσης από P-209 ασύνδετο αμμοχάλικο και υπόβαση από P-154 ασύνδετο αμμοχάλικο. Τέλος, ο δείκτης CBR της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης επιλέχθηκε ίσος με 7 %.

Από το σχεδιασμό προέκυψε διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος με πάχος ασφατικών στρώσεων 11 cm , πάχος στρώσης βάσης 20 cm και πάχος στρώσης υπόβασης 23 cm. Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η διατομή που προέκυψε από το σχεδιασμό, με τα αντίστοιχα υλικά και μέτρα ελαστικότητας κάθε στρώσης.

P-401: Επιφανειακή Ασφατική Στρώση	11 cm
E= 1380 Mpa	
P-209 : Στρώση Βάσης από Ασύνδετο Αμμοχάλικο	20 cm
E=326 Mpa	
P-154 : Στρώση Υπόβασης από Ασύνδετο Αμμοχάλικο	23 cm
E=114 Mpa	
Στρώση Έδρασης	
CBR=7 %	

Σχήμα 3.4: Διατομή οδοστρώματος από σχεδιασμό βάσει της εξελεγμένης αναλυτικής μεθόδου της FAA

Section Names
NewFlexib~01

01 NewFlexib~01 Des. Life = 20

Layer Material	Thickness (mm)	Modulus or R (MPa)
P-401/P-403 HMA Surface	101,6	1.378,95
P-209 Cr Ag	198,8	326,09
P-154 UnCr Ag	224,0	113,94
Subgrade	CBR = 7,0	72,39

Total thickness to the top of the subgrade, t = 524,4 mm

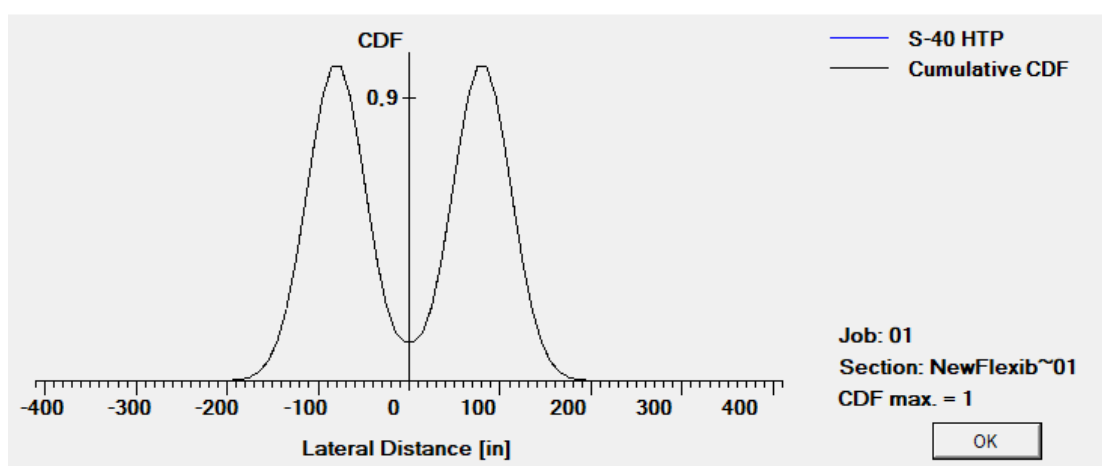
Status

Airplane

Back Help Life Modify Structure Design Structure Save Structure

Σχήμα 3.5: Περιβάλλον εφαρμογής εξελιγμένης αναλυτικής μεθόδου της FAA

Η αναλυτική μέθοδος σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων χρησιμοποιεί ως βασικό κριτήριο για τη διαστασιολόγηση μιας διατομής την αστοχία της στρώσης έδρασης. Αυτό συμβαίνει οριακά για τιμή φθοράς στην κορυφή της στρώσης έδρασης ίση με 1. Η φθορά που προκαλεί το αεροσκάφος σχεδιασμού στο οδόστρωμα του διαδρόμου απογείωσης φαίνεται στο σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6: Φθορά του αεροσκάφους σχεδιασμού

Στο σχήμα 3.7 φαίνονται αναλυτικά οι τιμές της φθοράς που προέκυψαν στις δύο κρίσιμες θέσεις αστοχίας της διατομής που σχεδιάστηκε. Συγκεκριμένα η φθορά της ασφαλικής στρώσης προέκυψε ίση με 0,89.

P-401: Επιφανειακή Ασφαλική Στρώση E= 1380 Mpa	11 cm	HMA CDF=0,89
P-209 : Στρώση Βάσης από Ασύνδετο Αμμοχάλικο E=326 Mpa	20 cm	
P-154 : Στρώση Υπόβασης από Ασύνδετο Αμμοχάλικο E=114 Mpa	23 cm	Sub CDF=1,00
Στρώση Έδρασης CBR=7 %		

Σχήμα 3.7: Διατομή βάσει της εξέλιξης της αναλυτικής μεθόδου FAA και αντίστοιχοι δείκτες φθοράς

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε έλεγχος επάρκειας μέσω της αρχικής έκδοσης της αναλυτικής μεθόδου της FAA, για τη διατομή που σχεδιάστηκε. Σκοπός του ελέγχου αυτού είναι η διερεύνηση της επίδρασης του διαφορετικού μοντέλου αστοχίας στο σχεδιασμό και πως αυτό επηρεάζει τη φθορά μιας διατομής εύκαμπτου οδοστρώματος, συγκριτικά με την εξέλιξη της αναλυτικής μεθόδου διαστασιολόγησης της FAA. Για τη διαδικασία αυτή διατηρήθηκαν τα ίδια δεδομένα και τα ίδια πάχη ώστε να διερευνηθεί η σχέση μεταξύ των φθορών για τις δύο κρίσιμες θέσεις του οδοστρώματος. Οι φθορές για την ασφαλική στρώση και τη στρώση έδρασης, προέκυψαν 1,14 και 11,25 αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8 και 3.9. Προέκυψαν, δηλαδή, τιμές μεγαλύτερες του 1. Παρατηρείται ότι, η ίδια διατομή που σχεδιάστηκε με τη νέα έκδοση της αναλυτικής μεθόδου της FAA, δεν επαρκεί σύμφωνα με τους νόμους αστοχίας που χρησιμοποιεί η προηγούμενη έκδοση της μεθόδου και κατ' επέκταση οδηγείται στην αστοχία.

P-401: Επιφανειακή Ασφαλτική Στρώση E= 1380 Mpa	11 cm	HMA CDF=1,14
P-209 : Στρώση Βάσης από Ασύνδετο Αμμοχάλικο E=326 Mpa	20 cm	
P-154 : Στρώση Υπόβασης από Ασύνδετο Αμμοχάλικο E=114 Mpa	23 cm	Sub CDF=11,25
Στρώση Έδρασης CBR=7 %		

Σχήμα 3.8: Διατομή οδοστρώματος κατά την αρχική αναλυτική μέθοδο σχεδιασμού FAA και αντίστοιχοι δείκτες φθοράς

Section Names
ACAggrega~01

01 ACAggrega~01 Des. Life = 20

Layer Material	Thickness (in)	Modulus or R (psi)
P-401/P-403 HMA Surface	4.00	200.000
Undefined	7.83	47.293
Undefined	8.82	16.526
Non-Standard Structure		
Subgrade	CBR = 7.0	10.500

HMA CDF = 1.14; Sub CDF = 11.25; Str Life (SG) = 1.8 yrs; t = 20.65 in

Life Stopped 0.29; 0.20

Buttons: Back, Help, Life, Modify Structure, Design Structure, Save Structure

Σχήμα 3.9: Περιβάλλον εφαρμογής αρχικής αναλυτικής μεθόδου σχεδιασμού κατά FAA

Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε σχεδιασμός διατομής εύκαμπτου οδοστρώματος μέσω της αρχικής μορφή της αναλυτικής μεθόδου της FAA, ενώ εισήχθησαν τα ίδια δεδομένα για το σχεδιασμό. Χρησιμοποιήθηκε αεροσκάφος μονού τροχού, όσον αφορά στη διάταξη του κύριου φορείου, με βάρος 22680 kg και 20000 ετήσιες αναχωρήσεις. Σχετικά με υλικά της διατομής, χρησιμοποιήθηκε επιφανειακή στρώση ασφαλτικών από τυπικό υλικό P-401 θερμού ασφαλτομίγματος, με μέτρο ελαστικότητας 1380 Mpa, ορίσθηκε στρώση βάσης από P-209 ασύνδετο αμμοχάλικο

και υπόβαση από P-154 ασύνδετο αμμοχάλικο. Τέλος, ο δείκτης CBR της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης επιλέχθηκε ίσος με 7 %.

Παρατηρείται ότι ο σχεδιασμός με την αρχική μορφή της αναλυτικής μεθόδου της FAA επηρεάζει την αναλογία των παχών της επιφανειακής ασφαλικής στρώσης από P-401, συγκριτικά με την εξέλιξη της ίδιας μεθόδου. Συγκεκριμένα, το πάχος της ασφαλικής στρώσης αυξήθηκε σε 18 cm, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.10.

P-401: Επιφανειακή Ασφαλική Στρώση E= 1380 Mpa 11 cm	P-401: Επιφανειακή Ασφαλική Στρώση E= 1380 Mpa 18 cm
P-209 : Στρώση Βάσης από Ασύνδετο Αμμοχάλικο E=326 Mpa 20 cm	P-209 : Στρώση Βάσης από Ασύνδετο Αμμοχάλικο E=326 Mpa 20 cm
P-154 : Στρώση Υπόβασης από Ασύνδετο Αμμοχάλικο E=114 Mpa 23 cm	P-154 : Στρώση Υπόβασης από Ασύνδετο Αμμοχάλικο E=114 Mpa 23 cm
Στρώση Έδρασης CBR=7 %	Στρώση Έδρασης CBR=7 %

Σχήμα 3.10: Αναλογία παχών ασφαλικής στρώσης για τις δύο εκδόσεις της μεθόδου

Μια ακόμα προσέγγιση για το σχεδιασμό εύκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου με την αρχική μορφή της αναλυτικής μεθόδου, για τα ίδια δεδομένα, είναι αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.11. Όπως φαίνεται στο σχήμα, προέκυψε διατομή με πάχος ασφαλική στρώσης 11 cm, πάχος στρώσης έδρασης 26 cm και στρώση υπόβασης με πάχος 23 cm. Παρατηρείται αύξηση πάχους από 20 cm σε 26 cm, σε σχέση με την εξελιγμένη μέθοδο σχεδιασμού της FAA.

P-401: Επιφανειακή Ασφαλική Στρώση E= 1380 Mpa 11 cm	P-401: Επιφανειακή Ασφαλική Στρώση E= 1380 Mpa 11 cm
P-209 : Στρώση Βάσης από Ασύνδετο Αμμοχάλικο E=326 Mpa 20 cm	P-209 : Στρώση Βάσης από Ασύνδετο Αμμοχάλικο E=326 Mpa 26 cm
P-154 : Στρώση Υπόβασης από Ασύνδετο Αμμοχάλικο E=114 Mpa 23 cm	P-154 : Στρώση Υπόβασης από Ασύνδετο Αμμοχάλικο E=114 Mpa 23 cm
Στρώση Έδρασης CBR=7 %	Στρώση Έδρασης CBR=7 %

Σχήμα 3.11: Αναλογία παχών στρώσης βάσης για τις δύο εκδόσεις της μεθόδου

Έχοντας πραγματοποιήσει τα παραπάνω παραδείγματα σχεδιασμού, παρατηρούμε ότι η αρχική μορφή αναλυτικής μεθόδου σχεδιασμού της FAA διαφοροποιείται από την αντίστοιχη εξελιγμένη, σε ότι αφορά τη διαστασιολόγηση αλλά και την αστοχία μιας διατομής εύκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου. Πιο συγκεκριμένα, στην αρχική έκδοση σχεδιασμού της FAA απαιτούνται μεγαλύτερα πάχη στρώσεων, είτε ασφαλικών είτε στρώσης βάσης.

Επομένως, υπάρχουν ενδείξεις ότι ο σχεδιασμός οδοστρώματος αεροδρομίου που γίνεται βάσει των νέων μοντέλων αστοχίας αποτελεί λιγότερο συντηρητική προσέγγιση, σε σχέση τα αντίστοιχα παλιότερα μοντέλα.

3.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ

Τα δύο μοντέλα κόπωσης των ασφαλικών στρώσεων στηρίζονται σε διαφορετικές προσεγγίσεις και παραδοχές. Αυτό έχει συνέπεια και στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων, όπως παρατηρήθηκε από το ενδεικτικό παράδειγμα διαστασιολόγησης που πραγματοποιήθηκε και για τις δύο μορφές της μεθόδου σχεδιασμού της FAA. Στην προσπάθεια για διερεύνηση των διαφοροποιήσεων, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis) για τα δύο μοντέλα. Η ανάλυση αυτή μπορεί να προκύψει μέσω διαγραμμάτων καλύψεων-διελεύσεων και των αντίστοιχων παραμορφώσεων που αναπτύσσονται.

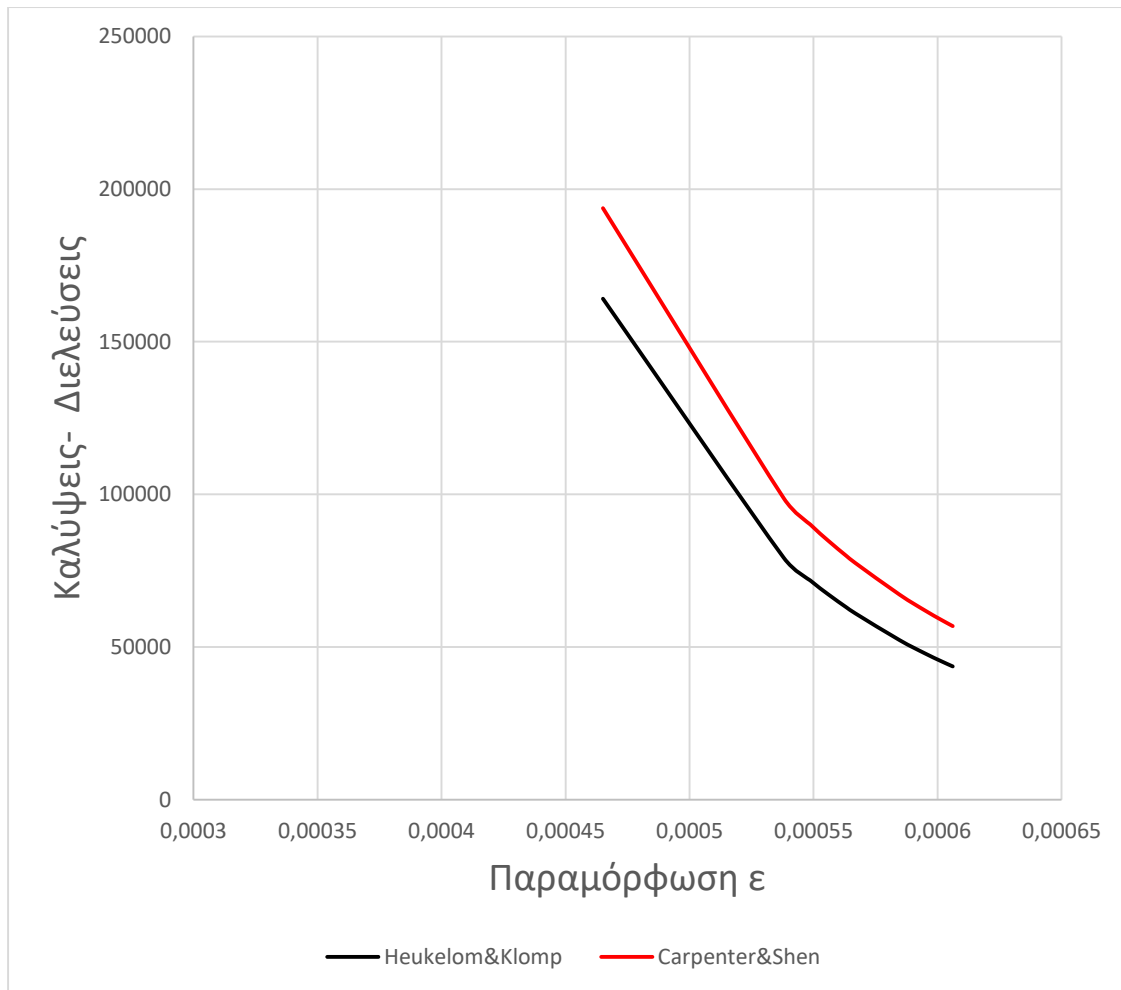
Για τη συγκεκριμένη ανάλυση, χρησιμοποιήθηκε διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος. Η διατομή αποτελείται από επιφανειακή στρώση θερμού ασφατομίγματος P-401, στρώση βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο P-209 και στρώση υπόβασης από υλικό P-154. Η στρώση έδρασης έχει δείκτη φέρουσας ικανότητας CBR ίσο με 7 %. Η διατομή προέκυψε από σχεδιασμό βάσει της εξελιγμένης μορφής της αναλυτικής μεθόδου της FAA για αεροσκάφος μονού τροχού, βάρους 22680 kg και 20000 ετήσιες αναχωρήσεις. Οι δείκτες φθοράς για τον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων και την κορυφή της στρώσης έδρασης είναι 0,89 και 1, αντίστοιχα. Τα αναλυτικά στοιχεία της κάθε στρώσης της διατομής φαίνονται στο σχήμα 3.12.

P-401: Επιφανειακή Ασφαλτική Στρώση	11 cm
E= 1380 Mpa	
P-209 : Στρώση Βάσης από Ασύνδετο	20 cm
Αμμοχάλικο E=326 Mpa	
P-154 : Στρώση Υπόβασης από Ασύνδετο	23 cm
Αμμοχάλικο E=114 Mpa	
Στρώση Έδρασης	
CBR=7 %	

Σχήμα 3.12: Διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος βάσει της εξελιγμένης αναλυτικής μεθόδου της FAA

Στην εν λόγω διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος, πραγματοποιήθηκε προκαταρκτική διερεύνηση της συμπεριφοράς των δύο μοντέλων κόπωσης των ασφαλτικών για συγκεκριμένες τιμές μέτρου ελαστικότητας επιφανειακής στρώσης. Κατά τη διερεύνηση αυτή, για σταθερό μέτρο ελαστικότητας κάθε φορά, αυξήθηκε σταδιακά το πάχος της στρώσης από P-401. Η τιμή του πάχους, ξεκινώντας από 11 cm, αυξήθηκε έως ότου η διατομή επαρκούσε οριακά έναντι αστοχίας, δηλαδή η τιμή της φθοράς της στρώσης έδρασης έλαβε την ελάχιστη επιτρεπτή τιμή της.

Επιλέχθηκαν δύο ενδεικτικές τιμές μέτρου ελαστικότητας προκειμένου να γίνει μια προκαταρκτική ανάλυση ευαισθησίας των δύο μοντέλων. Αρχικά, έγινε διερεύνηση για τιμή μέτρου ελαστικότητας ίση με 1380 Mpa (200000 Psi), την τυπική τιμή που ορίζει συντηρητικά η FAA ως μέτρο ελαστικότητας της επιφανειακής ασφαλτικής στρώσης. Τα αποτελέσματα της πρώτης ανάλυσης συνοψίζονται γραφικά στο σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13: Καμπυλές καλύψεων-διελεύσεων και παραμορφώσεων για μέτρο ελαστικότητας 1380 Mpa

Παρατηρείται ότι για μέτρο ελαστικότητας 1380 Mpa, την τυπική τιμή που ορίζει συντηρητικά η FAA ως μέτρο ελαστικότητας της επιφανειακής ασφατικής στρώσης, τα δύο μοντέλα παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά, με καμπύλες που έχουν κοινή κλίση.

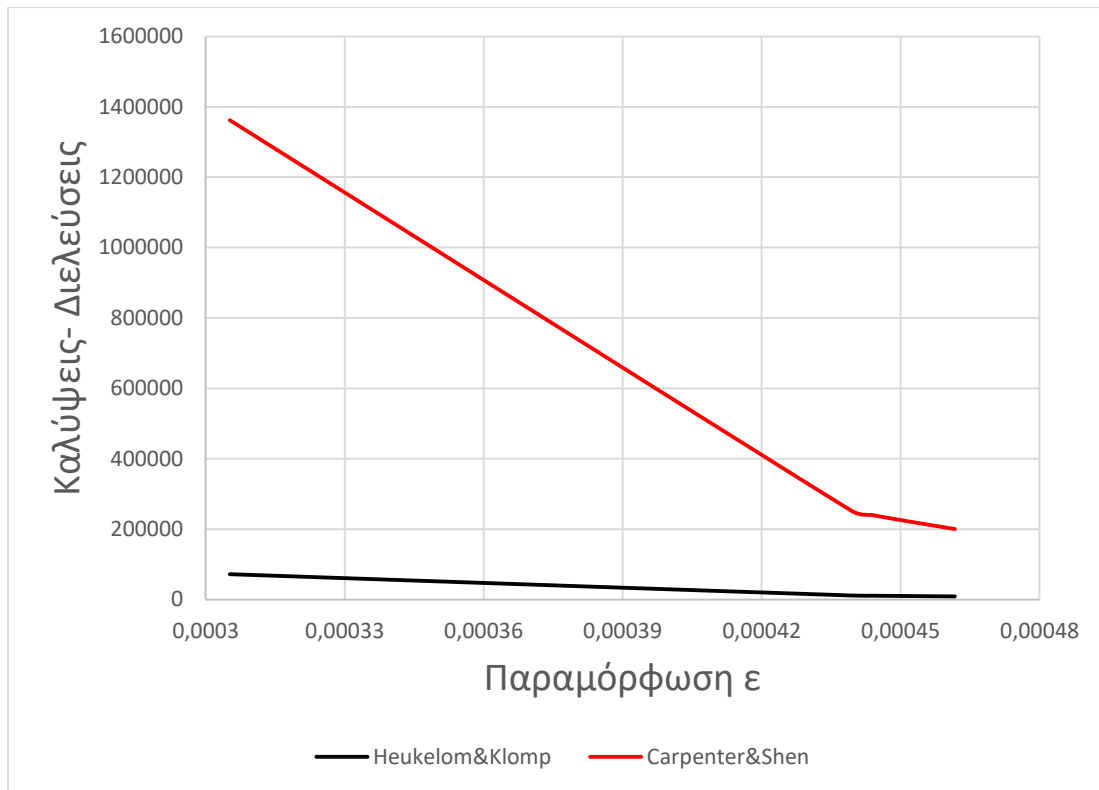
Επίσης, πραγματοποιήθηκε μια ενδεικτική διερεύνηση της σχέσης μεταξύ των καλύψεων-διελεύσεων για αστοχία που προκύπτουν από τα δύο μοντέλα αστοχίας. Από το σχήμα 3.14 παρατηρείται μία γραμμική σχέση μεταξύ των καλύψεων-διελεύσεων που προκύπτουν από τα μοντέλα των και των Heukelom&Klomp. Ωστόσο, για σταθερή τιμή μέτρου ελαστικότητας 1380 Mpa, το μοντέλο των Heukelom&Klomp παρουσιάζει μειωμένο αριθμό καλύψεων-διελεύσεων συγκριτικά με το αντίστοιχο των Carpenter&Shen.



Σχήμα 3.14: Σχέση καλύψεων-διελεύσεων γαι τα δύο μοντέλα

Ωστόσο, προκειμένου να διερευνηθεί αν τα δύο μοντέλα συνεχίζουν να συμπεριφέρονται ομοίως και για άλλες τιμές του μέτρου ελαστικότητας, έγινε η ίδια διαδικασία αλλά αυτή τη φορά με μέτρο ελαστικότητας ίσο με 4138 Mpa (600000 Psi).

Αντίθετα, από το σχήμα 3.15, φαίνεται ότι αυξανόμενου του μέτρου ελαστικότητας σε 4138 Mpa, οι δύο καμπύλες που αντιπροσωπεύουν τα δύο μοντέλα απομακρύνονται αρκετά, έχοντας διαφορετική κλίση και μεγάλη απόκλιση τιμών καλύψεων–διελεύσεων. Αυτό σημαίνει ότι η κοινή συμπεριφορά που εμφάνισαν για μέτρο ελαστικότητας 1380 Mpa, παύει να ισχύει για τιμή μέτρου ελαστικότητας 4138 Mpa.



Σχήμα 3.15: Καμπυλές καλύψεων-διελεύσεων και παραμορφώσεων για μέτρο ελαστικότητας 4138 Mpa

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται η διαφορετική συμπεριφορά των δύο μοντέλων, καθώς διαφοροποιούνται οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας. Πιο συγκεκριμένα, εντοπίζεται μια σύγκλιση των μοντέλων όταν ισχύουν οι τυπικές τιμές που προτείνει η FAA για το σχεδιασμό των οδοστρωμάτων. Επίσης, μπορούμε να διακρίνουμε ότι το νέο μοντέλο κόπωσης ασφαλικών των Carpenter&Shen για τον υπολογισμό των καλύψεων-διελεύσεων για αστοχία, φαίνεται να είναι λιγότερο συντηρητικό σε σχέση με το αντίστοιχο των Heukelom&Klomp. Αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι το νέο μοντέλο αστοχίας επιτρέπει περισσότερες καλύψεις – διελεύσεις για ίδια διατομή οδοστρώματος με κοινά μέτρα ελαστικότητας ασφαλικής στρώσης και όμοια μεταβολή πάχους, αλλά και από τη γραμμική σχέση μεταξύ των δύο μοντέλων του σχήματος 3.14. Άρα, αφού το νέο ενεργειακό μοντέλο επιτρέπει περισσότερες καλύψεις-διελεύσεις στο οδόστρωμα, η κόπωση των ασφαλικών στρώσεων θα επέλθει για περισσότερες καλύψεις – διελεύσεις, όταν ο σχεδιασμός γίνεται με χρήση της πιο πρόσφατης έκδοσης αναλυτικής μεθόδου της FAA. Θα μπορούσε να σημειωθεί ακόμα ότι το μοντέλο αστοχίας των Carpenter&Shen εμφανίζεται ως καταλληλότερο για μεγαλύτερα επίπεδα διελεύσεων στο οδόστρωμα.

Τέλος, ενδιαφέρουσα παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας υποδηλώνει και τη διαφορετική θερμοκρασία στο ασφαλτόμιγμα. Επομένως, η προκαταρκτική ανάλυση ευαισθησίας που διενεργήθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της δυνατότητας εφαρμογής και προσαρμογής των μοντέλων σχεδιασμού σε διαφορετικές θερμοκρασίες ανάλογα με τη θέση του αεροδρομίου.

3.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΑΣΟΧΙΑΣ FAA ΒΑΣΕΙ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Στα πλαίσια παλαιότερων μελετών σχετικά με την αναλυτική μέθοδο της FAA, είχε διαπιστωθεί μια μη αναμενόμενη συμπεριφορά του νόμου αστοχίας του Heukelom & Klotz, όταν εφαρμόζεται για διάφορες τιμές μέτρου ελαστικότητας. Έπειτα από την ανάλυση ευαισθησίας για τα δύο μοντέλα αστοχίας, η περαιτέρω διερεύνηση της συμπεριφοράς τους επικεντρώθηκε στην επίδραση του μέτρου ελαστικότητας στην αστοχία του οδοστρώματος αεροδρομίου. Το παράδειγμα που πραγματοποιήθηκε προκειμένου να συγκριθούν τα δύο μοντέλα, βασίστηκε στη μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας, διατηρώντας, όμως, όλα τα πάχη των στρώσεων σταθερά. Πιο συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η επίδραση της μεταβολής αυτής στις τιμές φθοράς για τις δύο κρίσιμες θέσεις αστοχίας ενός εύκαμπτου οδοστρώματος, για την αρχική έκδοση της μεθόδου διαστασιολόγησης της FAA, αλλά και για την εξέλιξή της. Ως διατομή, διατηρήθηκε εκείνη που προέκυψε από τον σχεδιασμό βάσει των νέων μοντέλων αστοχίας που εφαρμόζει η αναλυτική μέθοδος (σχήμα 3.16), ενώ μεταβλήθηκε μόνο το μέτρο ελαστικότητας της ασφατικής στρώσης.

P-401: Επιφανειακή Ασφατική Στρώση	11 cm
E= 1380 Mpa	
P-209 : Στρώση Βάσης από Ασύνδετο Αμμοχάλικο	20 cm
E=326 Mpa	
P-154 : Στρώση Υπόβασης από Ασύνδετο Αμμοχάλικο	23 cm
E=114 Mpa	
Στρώση Έδρασης	
CBR=7 %	

Σχήμα 3.16: Διατομή βάσει νέων μοντέλων αστοχίας

Μέσω της σχέσης (20) που συνδέει το μέτρο ελαστικότητας με τη θερμοκρασία του ασφαλτομίγματος, προέκυψε το διάγραμμα του σχήματος 3.17, για εύρος θερμοκρασίας ασφαλτομίγματος από 15 έως 32 ° C (FAA, 2016)

$$\text{Log}_{10} (E) = 1.53658 - 0.006447 T - 0.00007404 T^2 \quad (20)$$

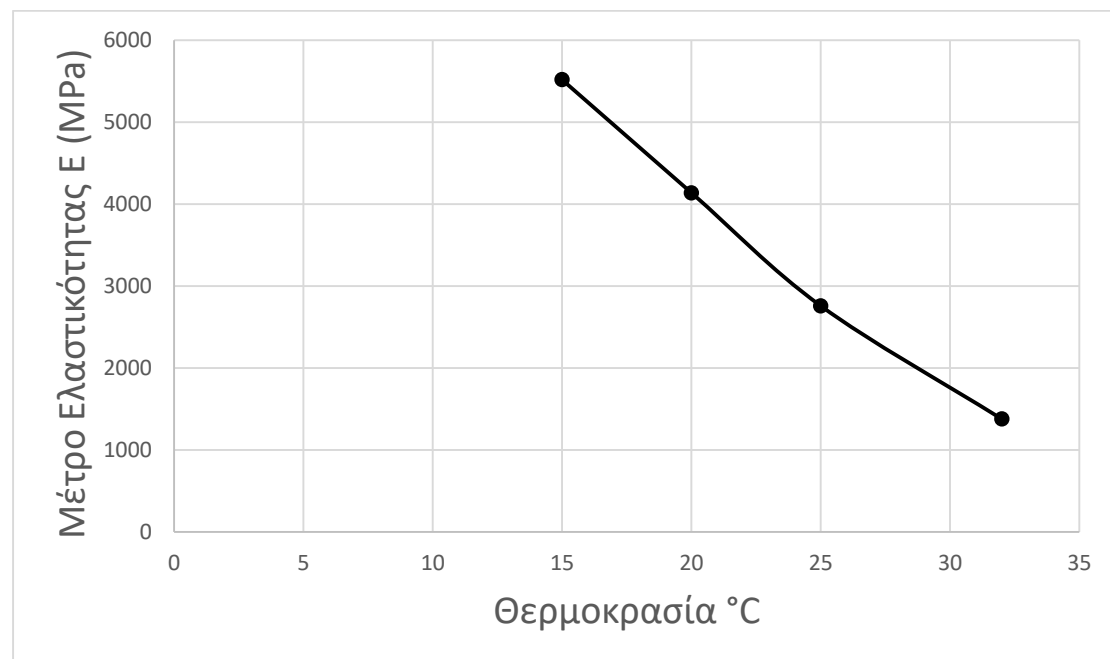
Όπου,

- E: μέτρο ελαστικότητας ασφαλτικής στρώσης
- T: Θερμοκρασία ασφαλτομίγματος

Τα στοιχεία από τα οποία προέκυψε το διάγραμμα του σχήματος φαίνονται στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Τιμές μέτρου ελαστικότητας για διάφορες τιμές θερμοκρασίας

E(Mpa)	Θερμοκρασία °C
5516	15
4137	20
2758	25
1378	32



Σχήμα 3.17: Διάγραμμα θερμοκρασίας και μέτρου ελαστικότητας

Για μέτρο ελαστικότητας με τιμές από 1379 έως 5516 Mpa , κοινή παραμόρφωση και σταθερό πάχος των στρώσεων, υπολογίστηκε η φθορά, για τα δύο μοντέλα.

Όσον αφορά στην αστοχία λόγω κόπωσης των ασφαλικών, υπολογίστηκε ο δείκτης HMA CDF στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων για διάφορες τιμές μέτρου ελαστικότητας και για τα δύο μοντέλα. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε για τέσσερις ενδεικτικές τιμές μέτρου ελαστικότητας της ασφαλικής στρώσης. Οι τιμές αυτές είναι τα 1380 Mpa (200000 Psi), την τυπική τιμή που ορίζει η FAA για την επιφανειακή ασφαλική στρώση από P-401, 2758 Mpa (400000 Psi), 4137 Mpa (600000 Psi) και 5516 Mpa (800000 Psi).

Για τους υπολογισμούς της φθοράς στον πυθμένα της ασφαλικής στρώσης, εισήχθησαν ως δεδομένα οι οριζόντιες παραμορφώσεις που προέκυψαν από τη μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας, η σταθερή τιμή S ίση με 4137 Mpa (600000 Psi), οι παράμετροι που βασίζονται στην κοκκομετρία του P-401 $V_a = 3.5\%$, $V_b = 12.0\%$, $P_{NMS} = 95\%$, $P_{PCS} = 58\%$ και $P_{200} = 4.5\%$, όπως φαίνεται στο σχήμα. Η φθορά υπολογίστηκε για περίοδο σχεδιασμού 20 ετών, 20000 ετήσιες αναχωρήσεις και τιμή λόγου P/C ίση με 5,21, όπως φαίνεται στους πίνακες 3.2, 3.3. Προέκυψαν οι τιμές για το συντελεστή PV και τις καλύψεις έως την αστοχία N_f , με σκοπό τον υπολογισμό της φθοράς στη βάση της ασφαλικής στρώσης.

Οι υπολογισμοί που διενεργήθηκαν στα πλαίσια της μελέτης της επίδρασης του ενεργειακού μοντέλου αστοχίας στο σχεδιασμό, βάσει της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας της ασφαλικής στρώσης, φαίνονται στον πίνακα 3.4.

Πίνακας 3.2 : Δεδομένα μοντέλου Carpenter&Shen

S Psi	Va %	Vb %	VP
600000	3,5	12	0,225806
4136,854			
PNMS %	PPCS %	P200 %	GP
95	58	4,5	8,222222

Πίνακας 3.3: Δεδομένα για υπολογισμό φθοράς

P/C	Περίοδος σχεδιασμού	Ετήσιες αναχωρήσεις
5,21	20	20000

Πίνακας 3.4: Υπολογισμός φθοράς βάσει του μοντέλου Carpenter&Shen

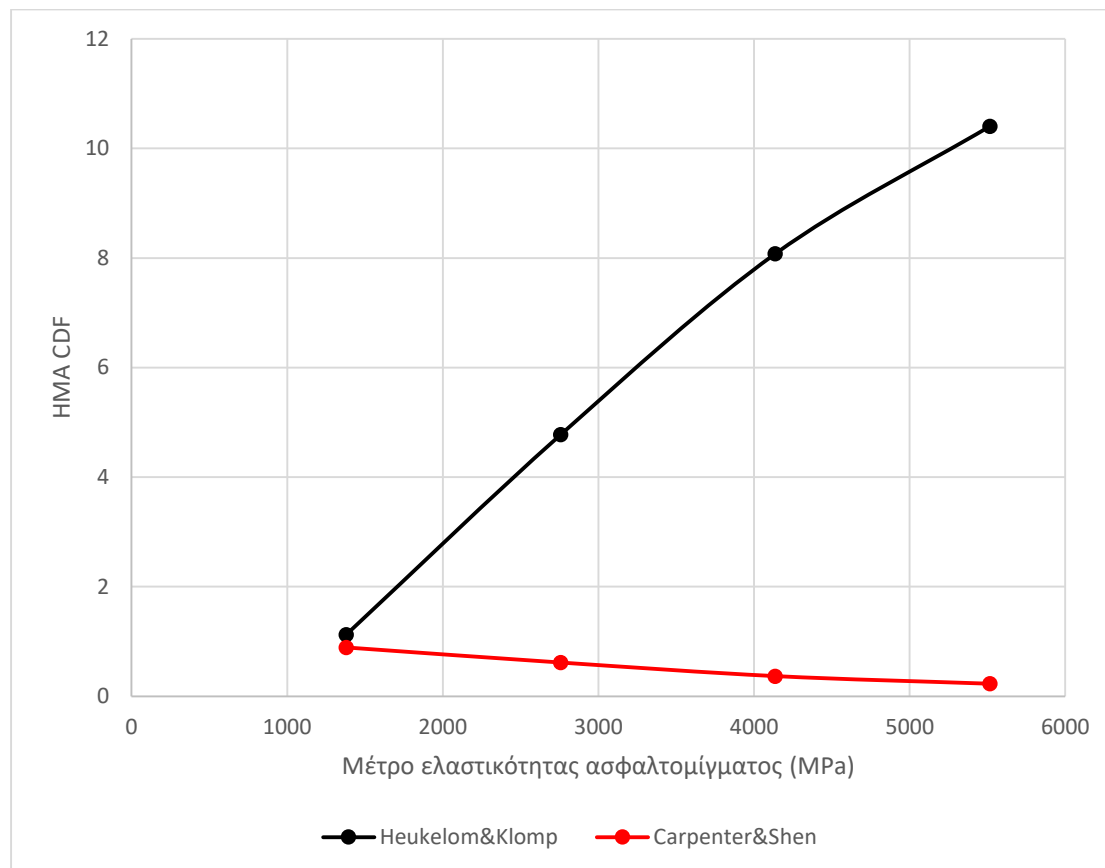
Μοντέλο Carpenter&Shen				
E (Mpa)	εh in./in.	PV	Nf	CDF
1380	0,000554119	1,46914E-06	86110	0,89
E (Mpa)	εh in./in.	PV	Nf	CDF
2758	0,000511515	9,73815E-07	124712	0,62
E (Mpa)	εh in./in.	PV	Nf	CDF
4137	0,000457778	5,50441E-07	208484	0,37
E (Mpa)	εh in./in.	PV	Nf	CDF
5516	0,000413095	3,24669E-07	335410	0,23

Η ίδια διαδικασία έγινε και για το μοντέλο αστοχίας του Heukelom&Klomp, ορίζοντας ως δεδομένο τις ίδιες οριζόντιες παραμορφώσεις που εισήχθησαν στο ενεργειακό μοντέλο και το μέτρο ελαστικότητας της ασφαλικής στρώσης, όπως φαίνεται στον πίνακα 3.5. Εισήχθησαν, επίσης, τα δεδομένα του πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.5: Υπολογισμός φθοράς βάσει του μοντέλου του Heukelom&Klomp

Μοντέλο Heukelom&Klomp				
E (Mpa)	εh in./in.	log (C)	C	CDF
1380	0,000554119	4,83	68350	1,12
E (Mpa)	εh in./in.	log (C)	C	CDF
2758	0,000511515	4,2	16077	4,77
E (Mpa)	εh in./in.	log (C)	C	CDF
4137	0,000457778	3,97	9505	8,07
E (Mpa)	εh in./in.	log (C)	C	CDF
5516	0,000413095	3,86	7379	10,4

Στο διάγραμμα του σχήματος 3.18 παρουσιάζονται οι τιμές που προέκυψαν από τους παραπάνω υπολογισμούς για τη μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας, προκειμένου να γίνει η σύγκριση των δύο νόμων.

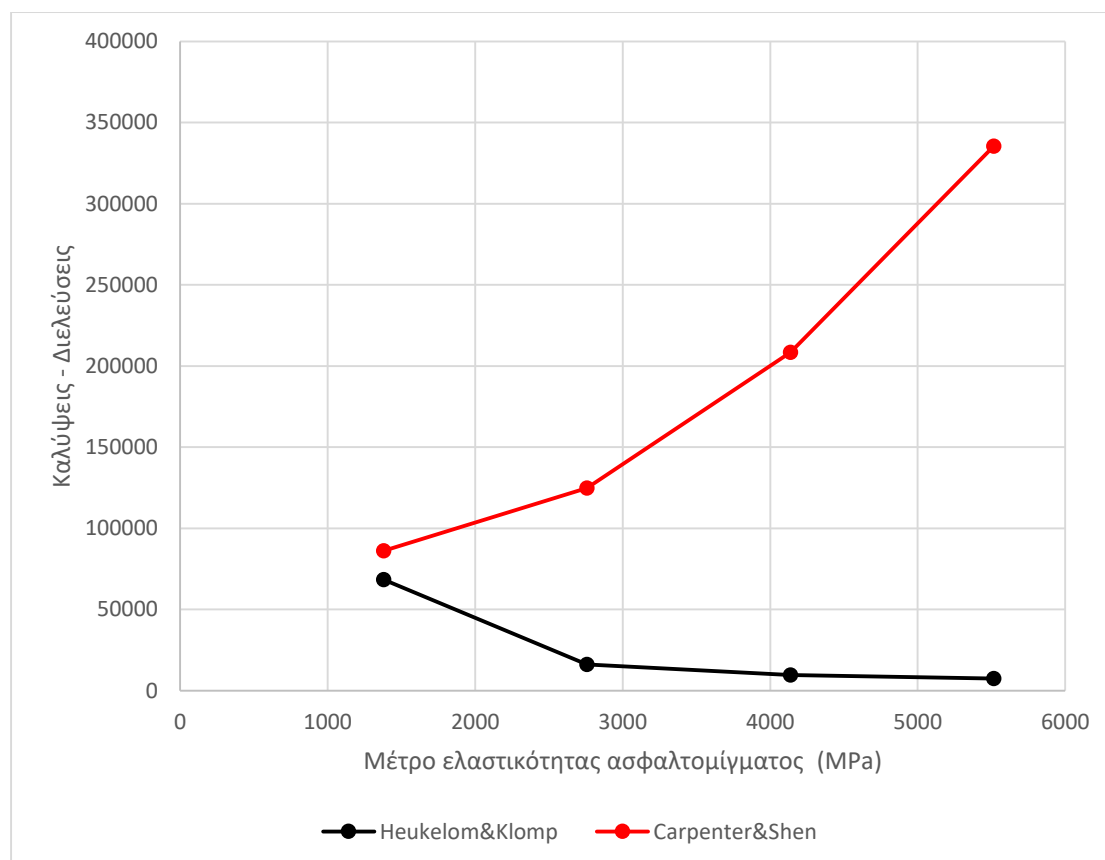


Σχήμα 3.18: Διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας και HMA CDF

Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι στην περίπτωση της εξέλιξης της αναλυτικής μεθόδου διαστασιολόγησης της FAA, η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας προκαλεί μείωση στην τιμή του δείκτη φθοράς της ασφαλικής στρώσης. Αντίθετα, η καμπύλη που αντιπροσωπεύει την αρχική αναλυτική μέθοδο της FAA, παρουσιάζει μη αναμενόμενη συμπεριφορά. Αυτό συμβαίνει διότι η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας στη συγκεκριμένη περίπτωση προκαλεί αύξηση της τιμής HMA CDF, οδηγώντας το οδόστρωμα σε αστοχία. Ωστόσο, παρατηρείται μία σύγκλιση των τιμών της φθοράς για μικρές τιμές του μέτρου ελαστικότητας. Παρόμοια παρατήρηση παρουσιάστηκε και στην ανάλυση ευαισθησίας, όπου για τιμή μέτρου ελαστικότητας 1378 MPa, τα δύο μοντέλα παρουσίαζαν κοινή συμπεριφορά, ενώ καθώς αυξανόταν το μέτρο ελαστικότητας, οι δύο καμπύλες απομακρύνονταν.

Απόρροια του προηγούμενου διαγράμματος, αποτελεί και η αύξηση των καλύψεων-διελεύσεων κατά τη νεότερη αναλυτική μέθοδο της FAA, αυξανόμενου του μέτρου ελαστικότητας, για τον πυθμένα των ασφαλτικών. Επίσης, η αντίθετη συμπεριφορά της τάσης των καλύψεων-διελεύσεων παρατηρείται, όσον αφορά την αρχική αναλυτική μέθοδο σχεδιασμού.

Η επίδραση της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας στον αριθμό των καλύψεων-διελεύσεων για αστοχία, φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 3.19, για τα δύο μοντέλα κόπωσης ασφαλτικών στρώσεων.



Σχήμα 3.19: Διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας και καλύψεων-διελεύσεων για την ασφαλτική στρώση

Η μελέτη της επίδρασης από τη μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας στους νόμους αστοχίας, πραγματοποιήθηκε και για τη δεύτερη κρίσιμη θέση του οδοστρώματος, την κορυφή της στρώσης έδρασης. Βάσει των νόμων για αστοχία, του Bleasdale και του αντίστοιχου νόμου που χρησιμοποιούσε η αρχική αναλυτική μέθοδος σχεδιασμού της FAA, διερευνήθηκε η σχέση μεταξύ της φθοράς και του μέτρου ελαστικότητας. Διενεργήθηκαν και εδώ υπολογισμοί για την εύρεση της φθοράς στην κορυφή της στρώσης έδρασης, όπως φαίνεται στους πίνακες 3.6, 3.7.

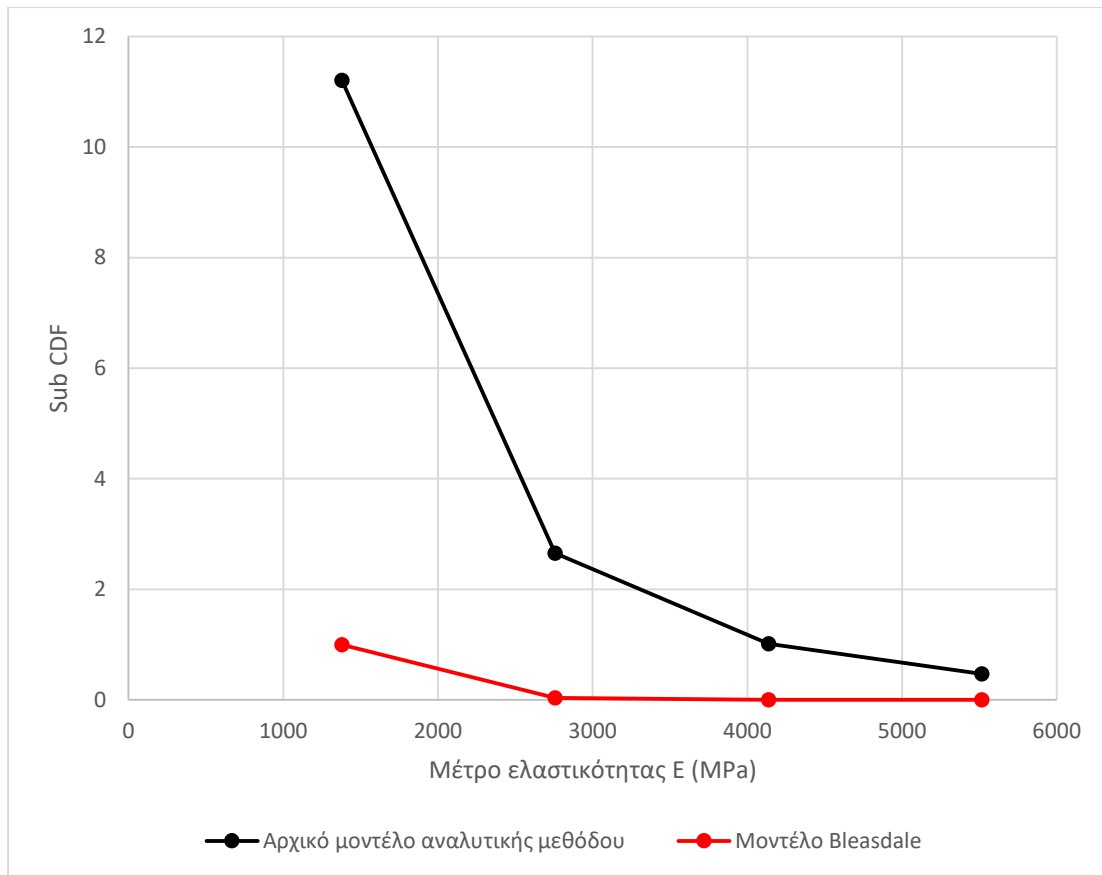
Πίνακας 3.6: Υπολογισμός φθοράς βάσει του μοντέλου του Bleasdale για αστοχία της στρώσης έδρασης

ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ BLEASDALE							
ε in./in	log10 (C)	(C)	E mpa	CDF	P/C	Περίοδος σχεδιασμού	Ετήσιες αναχωρήσεις
0,00124015	5,19	157327,3	1378	0,997047	2,55	20	20000
0,00112064	6,66	4573330	2758	0,034299	2,55	20	20000
0,00104713	8,34	2,23E+08	4137	0,000703	2,55	20	20000
0,00099204	10,72	5,32E+10	5516	2,95E-06	2,55	20	20000

Πίνακας 3.7: Υπολογισμός φθοράς βάσει του μοντέλου της αρχικής αναλυτικής μεθόδου της FAA για αστοχία της στρώσης έδρασης

ΑΡΧΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ FAA						
ε in./in	C	E mpa	CDF	P/C	Περίοδος σχεδιασμού	Ετήσιες αναχωρήσεις
0,00124015	13999	1378	11,2	2,55	20	20000
0,00112064	59084	2758	2,65	2,55	20	20000
0,00104713	154944	4137	1,01	2,55	20	20000
0,000992043	333953	5516	0,46	2,55	20	20000

Η σύγκριση των δύο νόμων αστοχίας στρώσης έδρασης πραγματοποιείται μέσω του διαγράμματος που φαίνεται στο σχήμα 3.20, συνοψίζοντας τα αποτελέσματα των υπολογισμών.



Σχήμα 3.20: Διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας και Sub CDF

Στη συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρούμε μια κοινή συμπεριφορά των δύο νόμων αστοχίας της στρώσης έδρασης που χρησιμοποιούνται στις δύο μεθόδους. Αναλυτικότερα, η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των ασφαλικών στρώσεων οδηγεί σε μείωση της φθοράς στην κορυφή της στρώσης έδρασης και στα δύο μοντέλα. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι, στην περίπτωση της αρχικής μορφής της αναλυτικής μεθόδου της FAA, ο δείκτης Sub CDF μειώνεται πιο απότομα, με την αντίστοιχη καμπύλη να παρουσιάζει μεγαλύτερη κλίση σε σχέση με την καμπύλη μοντέλου αστοχίας Bleasdale. Αυτό δείχνει ότι, το μοντέλο αστοχίας του Bleasdale που εφαρμόζεται στην εξέλιξη της αρχικής αναλυτική μεθόδου διαστασιολόγησης της FAA, προσαρμόζεται καλύτερα στο σχεδιασμό μιας διατομής εύκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου. Επίσης, για την τυπική τιμή μέτρου ελαστικότητας 1380 Mpa, που ορίζει η FAA για το σχεδιασμό, η αρχική αναλυτική μέθοδος της FAA δίνει πολύ μεγαλύτερη φθορά στην κορυφή της στρώσης έδρασης, συγκριτικά με την εξέλιξη της μεθόδου. Άρα, το νέο μοντέλο αστοχίας στρώσης έδρασης οδηγεί σε λιγότερο συντηρητικό σχεδιασμό εύκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου σε σχέση με το αντίστοιχο μοντέλο της αρχικής μορφής της αναλυτικής μεθόδου της FAA

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα από την διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε για τα δύο μοντέλα, βάσει του μέτρου ελαστικότητας, διακρίνεται ότι η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας οδηγεί το οδόστρωμα σε αστοχία, όταν ο σχεδιασμός γίνεται με τα παλαιότερα μοντέλα αστοχίας. Αυτό γιατί, ο νόμος του Heukelom&Klomp που υπολογίζει τις απαιτούμενες καλύψεις-διελεύσεις για αστοχία, στον πυθμένα των ασφαλικών, συνδέεται άμεσα με το μέτρο ελαστικότητας της επιφανειακής ασφαλικής στρώσης. Αντίθετα, η αύξηση αυτή ευνοεί τη μη αστοχία του οδοστρώματος, όταν ο σχεδιασμός γίνεται μέσω της εξελιγμένης έκδοσης της αναλυτικής μεθόδου της FAA. Ακόμα ένα συμπέρασμα το οποίο προκύπτει είναι ότι στο νέο μοντέλο αστοχίας που χρησιμοποιείται στη μέθοδο της FAA, η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας της επιφανειακής ασφαλικής στρώσης επιτρέπει περισσότερες καλύψεις-διελεύσεις στο οδόστρωμα και συνεπώς περισσότερες διελεύσεις αεροσκάφους, χωρίς αυτό να αστοχεί. Ολοκληρώνοντας την σύγκριση των δύο μοντέλων βάσει της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας της ασφαλικής στρώσης, φαίνεται ότι ο σχεδιασμός βάσει των νέων μοντέλων αστοχίας κατά την FAA, είναι λιγότερο συντηρητικός συγκρινόμενος με τον αντίστοιχο σχεδιασμό που προκύπτει από τη χρήση των προηγούμενων μοντέλων αστοχίας.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η ανάλυση που παρουσιάστηκε στα παραπάνω κεφάλαια, πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια μιας προκαταρκτικής μελέτης της εξέλιξης του κριτηρίου αστοχίας που χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό ενός εύκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου, σύμφωνα με την FAA. Παρουσιάστηκε η μετάβαση από τις βασικές αρχές της εμπειρικής μεθόδου διαστασιολόγησης στη σημερινή μορφή της αναλυτικής μεθόδου. Η νεότερη έκδοση της αναλυτικής μεθόδου σχεδιασμού της FAA παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με την αρχική έκδοση της. Η εξελιγμένη έκδοση της αναλυτικής μεθόδου εξακολουθεί να εφαρμόζεται τόσο σε εύκαμπτα όσο και σε δύσκαμπτα οδοστρώματα. Βασικό κριτήριο για το σχεδιασμό παραμένει η φθορά της στρώσης έδρασης όπως και οι κρίσιμες θέσεις αστοχίας στις οποίες υπολογίζεται. Εφαρμόζεται το σύνολο της κυκλοφορίας των αεροσκαφών στο οδόστρωμα καθώς και η αθροιστική φθορά που προκαλεί. Τα τυπικά υλικά της FAA δεν παρουσιάζουν, επίσης, κάποια διαφορά κατά την εξέλιξη της αναλυτικής μεθόδου σχεδιασμού.

Όμως, κατά τη μετάβαση από την αρχική αναλυτική μέθοδο σχεδιασμού στην νεότερη και πιο εξελιγμένη έκδοσή της, πραγματοποιήθηκαν βελτιώσεις αλλά και προσθήκες στη μεθοδολογία σχεδιασμού, με βασικότερες εξ αυτών την προσθήκη νέων μοντέλων αστοχίας στο σχεδιασμό. Πιο συγκεκριμένα, το παλιότερο μοντέλο των Heukelom&Klomp αντικαθίσταται από το ενεργειακό μοντέλο των Carpenter&Shen, για την αστοχία των ασφαλικών στρώσεων, ενώ για την αστοχία της στρώσης έδρασης εισάγεται το νέο μοντέλο του Bleasdale.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, κυριότερη αναφορά έγινε στην εξέλιξη από το παραδοσιακό μοντέλο του Heukelom&Klomp, που υπολογίζει τις καλύψεις-διελεύσεις για αστοχία βάσει του μέτρου ελαστικότητας της επιφανειακής ασφαλικής στρώσης, στην ενεργειακή προσέγγιση RDEC των Carpenter&Shen, λόγω της πρόσφατης ένταξής του στη μεθοδολογία σχεδιασμού της FAA. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε σχεδιασμός εύκαμπτης διατομής οδοστρώματος αεροδρομίου, χρησιμοποιώντας τις δύο εκδόσεις αναλυτικής μεθόδου. Από το σχεδιασμό αυτό παρατηρήθηκε ότι η αρχική αναλυτική μέθοδος σχεδιασμού απαιτεί μεγαλύτερα πάχη ασφαλικής στρώσης και στρώσης βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο. Προκειμένου να γίνει περαιτέρω εμβάθυνση στη σύγκριση των δύο μοντέλων αστοχίας της ασφαλικής στρώσης, πραγματοποιήθηκε ενδεικτική ανάλυση ευαισθησίας. Η ανάλυση ευαισθησίας βασίστηκε στη σχέση μεταξύ των καλύψεων-διελεύσεων και της παραμόρφωσης που προκαλείται από σταθερή τιμή μέτρου ελαστικότητας και μεταβολή του πάχους, για τη

διατομή που σχεδιάστηκε μέσω της εξελιγμένης έκδοσης της αναλυτικής μεθόδου της FAA. Από αυτή την ανάλυση προέκυψε ότι για τιμή μέτρου ελαστικότητας ίση με 1380 Mpa, τα δύο μοντέλα αστοχίας συμπεριφέρονται ανάλογα, αλλά όσο αυξάνεται το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης από θερμό ασφαλτόμιγμα, τα δύο μοντέλα παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά. Επομένως, η παρόμοια συμπεριφορά των μοντέλων Heukelom&Klomp και Carpenter&Shen παρατηρείται στις τυπικές τιμές που ορίζει η FAA για το σχεδιασμό. Από τη σύγκριση των καλύψεων-διελεύσεων για τα δύο μοντέλα, φαίνεται ότι το ενεργειακό μοντέλο αστοχίας επιτρέπει περισσότερες καλύψεις για κοινά στοιχεία κυκλοφορίας και ίδια περίοδο σχεδιασμού καθιστώντας το λιγότερο συντηρητική προσέγγιση.

Σε συνέχεια της σύγκρισης των δύο μοντέλων που εφαρμόζονται στη διαστασιολόγηση κατά την FAA, μεταβλήθηκε η τιμή του μέτρου ελαστικότητας της ασφαλικής στρώσης προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά των μοντέλων αστοχίας για κάθε κρίσιμη θέση. Μέσω της σύγκρισης αυτής, προέκυψε ότι το μοντέλο του Heukelom παρουσιάζει μη αναμενόμενη συμπεριφορά, όσον αφορά τη φθορά των ασφαλικών, αλλά και των αριθμό των καλύψεων-διελεύσεων για αστοχία. Αντίθετα, σχετικά με τη φθορά στην κορυφή της στρώσης έδρασης, τα δύο μοντέλα συμπεριφέρονται ανάλογα, με το ενεργειακό μοντέλο να δίνει πολύ μικρότερες τιμές για τη φθορά στην κορυφή της στρώσης έδρασης.

Συνοψίζοντας τα όσα προαναφέρθηκαν, καταλήγουμε στο γενικότερο συμπέρασμα ότι το νέο μοντέλο υπολογισμού των καλύψεων-διελεύσεων για αστοχία των Carpenter&Shen, που βασίζεται στην ενεργειακή προσέγγιση, είναι λιγότερο συντηρητικό από το αντίστοιχο του Heukelom&Klomp. Αυτό συμβαίνει γιατί, όπως παρατηρήθηκε μέσω των ενδεικτικών αναλύσεων, από το νέο μοντέλο που χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων της FAA προκύπτουν διατομές με μικρότερα πάχη σε σχέση με τα αντίστοιχα που προκύπτουν από την εφαρμογή του μοντέλου του Heukelom&Klomp στη μέθοδο σχεδιασμού για την ίδια περίοδο σχεδιασμού 20 ετών και την ίδια κυκλοφορία στο οδόστρωμα. Επίσης, το ενεργειακό μοντέλο των Carpenter&Shen επιτρέπει περισσότερες καλύψεις-διελεύσεις και κατ' επέκταση περισσότερες διελεύσεις αεροσκαφών.

Παρατηρήθηκε, ακόμα η δυνατότητα χρήσης των μοντέλων αστοχίας και σε διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες. Η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας της ασφαλικής στρώσης εξηγείται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας στο ασφαλτόμιγμα, η οποία επηρεάζεται από τη θέση του αεροδρομίου.

Από την προκαταρκτική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε, η εφαρμογή των νέων μοντέλων αστοχίας, ασφαλικών και στρώσης έδρασης, φαίνεται να επηρεάζουν το σχεδιασμό ενός εύκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου μέσω της αναλυτικής μεθόδου σχεδιασμού της FAA. Παρόλα αυτά, αξίζει να πραγματοποιηθεί περαιτέρω διερεύνηση ώστε να μελετηθεί αναλυτικά η συμβολή του νέου μοντέλου αστοχίας στρώσης έδρασης στο σχεδιασμό εύκαμπτου οδοστρώματος, μέσω της FAA.

Λόγω της πρόσφατης εισαγωγής του ενεργειακού μοντέλου στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων αεροδρομίων, τα ήδη υπάρχοντα αεροδρόμια έχουν σχεδιασθεί σύμφωνα με την προηγούμενη έκδοση της μεθόδου διαστασιολόγησης που χρησιμοποιούσε το μοντέλο αστοχίας του Heukelom&Klomp. Επομένως, βάσει των εξελίξεων στο σχεδιασμό, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η μελέτη της συμπεριφοράς των ήδη διαστασιολογημένων εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων, σύμφωνα με τις νέες αρχές που εισήχθησαν στον σχεδιασμό.

5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ACPSEM. (2007). *Development of mechanics in the analysis of HMA pavements*. Athens: International conference on advanced characterisation of pavement and soil engineering materials.
- BCRRA. (2017). *Introducing FAARFIELD 1.41: latest updates to FAA pavement design procedures*. Athens: Bearing capacity of roads, railways and airfields.
- Behiry, A. E.-M. (2014). *Characterization of the layered pavement by modelling and calibration of resilient modulus*. American Journal of Civil Engineering.
- Carpenter, S. H., & Shen, S. (2007). *Development of an asphalt fatigue model based on energy models*. Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions.
- Carpenter, S. H., & Shen, S. (2007). *Dissipated Energy Concepts for HMA Performance: Fatigue and Healing*.
- Carpenter, S., & Jansen, M. (1997). *Fatigue behaviour under new aircraft loading conditions , Proceedings of aircraft pavement technology in the midst of change*.
- Carpenter, S., & Shen, S. (2005). *Application of dissipated energy concept in fatigue endurance limit testing*.
- Carpenter, S., & Shen, S. (2006). *A dissipated energy approach to study HMA healing in fatigue*. Transportation Research Record.
- Carpenter, S., Shen, S., & Ghuzlan, K. (2003). *Fatigue Endurance Limit for Highway and Airport Pavements*. Transportation Research Record.
- Directorate of civil engineering services. (1989). *A guide to airfield pavement design and evaluation*. United Kingdom: Property services agency, Department of environment.
- ERDC. (2001). *Pavement design for airfields*. Waterways experiment station. Mississippi USA: US Army corps of engineers.
- FAA. (1995). *Advisory Circular No 150/5320-6D "Airport Pavement Design and Evaluation"*. Washington DC: Federal Aviation Administration.
- FAA. (2009). *Advisory Circular No 150/5320-6E "Airport Pavement Design and Evaluation"*. Washington DC: Federal Aviation Administration.

- FAA. (2014). *Advisory Circular No 150/5370-10G "Standards for Specifying Construction of Airports"*. Washington DC: Federal Aviation Administration.
- FAA. (2016). *Advisory Circular No 150/5320-6F "Airport pavement Design and Evaluation"*. Washington DC: Federal Aviation Administration.
- FAA. (2018). *Federal Aviation Administration*.
<http://www.airporttech.tc.faa.gov/Airport-Pavement/National-Airport-Pavement-Test-Facility-NAPTF/NAPTF-Program/Introduction>
- Ghuzlan, K., & Carpenter, S. (2000). *Energy derived,damage-based failure criterion for faigue testing*. Transportation research record: Journal of transportation rsearch board.
- Gopalakrishnan, K., & Thompson, M. (2004). *Comparative effect of B777 and B747 trafficking on elastic layer moduli of NAPTF flexible pavements*. New Jersey: 2004 FAA worldwide airport technology transfer conference.
- Heukelom, W., & Klomp, A. (1962). *Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction*. Michigan: International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements.
- Kawa, I. (2012). *Pass-to-Coverage computation of arbitrary gear configurations in the FAARFIELD program*. Virginia: Federal Aviation Administration.
- Kawa, I. (2017). *Development of New Subgrade Failure Model for Flexible Pavements in FAARFIELD*. New Jersey: Federal Aviation Administration.
- Pais, J. (2009). *Four Point Bending, Proceedings of the Second Workshop*. Guimarães, Portugal: University of Minho.
- PCA. (1966). *Thickness design for concrete pavements*. Illinois: Portland Cement Association.
- Redles, T. (2015). *Verification of the dissipated energy based fatigue model using field data*. New Jersey: Rowan University.
- STBA. (2001). *Instruction technique sur les aerodromes civils* . Paris: The Airports and Airforce Base Engineering, Service Technique des Bases Aeriennes.
- Subhy, A., Lo Presti, D., & Airey, G. (2017). *New simplified approach for obtaining a reliable plateau value in fatigue analysis of bituminous materials*. Engineering Failure Analysis.

Tayebali et al. (1993). *Modeling Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixtures, Proceedings of Associations of Asphalt Paving Technologists, Vol.62.*

ΕΤΕΠ. (2009). *Ασφαλτικές στρώσεις κλειστού τύπου ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-05-03-11-04:2009.* Αθήνα: Εφημερίς της Κυβερνήσεως.

Λοΐζος Α., Πλατή Χ. (2015). *Σημειώσεις για το μάθημα Οδοστρώματα Οδών και Αεροδρομίων, Τεύχος Α.* Αθήνα: ΕΜΠ.