



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«Συγκριτική Αξιολόγηση Μεθόδων Κατάταξης Φέρουσας
Ικανότητας Οδοστρωμάτων Αεροδρομίων»*



ΘΕΟΔΩΡΙΤΣΗ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ

Επιβλέπων: Ανδρέας Λοΐζος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2022

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Μετά την ολοκλήρωση της Διπλωματικής Εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Ανδρέα Λοΐζο, Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. για την ανάθεση της Διπλωματικής Εργασίας, καθώς και για την καθοδήγηση και τη συνολική επίβλεψη καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα κυρία Αγγελική Αρμένη για τις υποδείξεις της και για τις χρήσιμες συμβουλές της στην ολοκλήρωση της Διπλωματικής Εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς και τα αδέρφια μου, για την στήριξη και την συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

ΣΥΝΟΨΗ

Η δομική κατάταξη των οδοστρωμάτων αεροδρομίων και κατά συνέπεια ο προσδιορισμός των τύπων αεροσκαφών, που μπορεί να εξυπηρετήσει ένα οδόστρωμα αεροδρομίου αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την σωστή διαχείρισή του. Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η συγκριτική αξιολόγηση της υφιστάμενης μεθόδου δομικής κατάταξης οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACN-PCN με την αναθεωρημένη μέθοδο ACR-PCR. Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου, πραγματοποιείται σύγκριση των δεικτών ACN-ACR, καθώς και των δεικτών PCN-PCR. Σημειώνεται πως η σύγκριση των δεικτών αφορά στα εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων.

Προκειμένου να εξαχθούν τα συμπεράσματα της Διπλωματικής Εργασίας, επιλέχθηκαν δέκα (10) διαφορετικά σενάρια κυκλοφορίας αεροσκαφών, τα οποία ανταποκρίνονται σε πραγματική κυκλοφορία αεροσκαφών σε δέκα (10) περιφερειακά αεροδρόμια της Ελλάδας. Για κάθε σενάριο κυκλοφορίας αεροσκαφών και για τρεις διαφορετικές κατηγορίες εδαφικής αντοχής (CBR=7%, CBR=9% και CBR=10%), σχεδιάστηκαν οι κατάλληλες διατομές εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων, σύμφωνα με τις οδηγίες της Ομοσπονδιακής Διοίκησης Αεροπορίας (*Federal Aviation Administration – FAA*). Για το σύνολο των σεναρίων κυκλοφορίας και των διατομών οδοστρωμάτων, υπολογίστηκαν οι απαιτούμενοι δείκτες ACN-ACR και PCN-PCR, βάσει των διαθέσιμων λογισμικών υπολογισμού και σχεδιάστηκαν τα κατάλληλα διαγράμματα, ώστε αυτοί να συσχετιστούν. Τα σχετικά αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της συγκριτικής αξιολόγησης των δεικτών παρουσιάζονται στο τεύχος της Διπλωματικής Εργασίας.

ABSTRACT

Reporting airfield pavement bearing capacity and determining the aircraft types, that are allowed to use an airfield pavement are, useful tools in terms of pavement.

The objective of this Diploma Thesis is the comparative investigation of the current standardized method of reporting airfield pavement strength ACN-PCN and the new method ACR-PCR. To achieve this goal, both ACN-ACR and PCN-PCR were compared. It is noted that the above comparison takes into consideration flexible airfield pavements.

To come to a conclusion for this Diploma Thesis, ten (10) different realistic aircraft traffic scenarios were selected, from ten (10) regional airports in Greece. Flexible airport pavements structures were designed for every single aircraft traffic scenario and for three (3) different subgrade categories (CBR=7%, CBR=10% and CBR=10%), according to relevant design method developed by Federal Aviation Administration's (FAA). ACN-ACR and PCN-PCR were then calculated using suitable softwares, for the total number of the aircraft traffic scenarios and the pavement structures, and scatter plots were designed, so as to correlate the comparable amounts. Both relevant results and conclusions of benchmarking are included in the issue of this Diploma Thesis.

Πίνακας Περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1. Γενική Ανασκόπηση.....	1
1.2. Στόχος Διπλωματικής Εργασίας	2
1.3. Στάδια Διπλωματικής Εργασίας.....	2
1.4. Δομή Διπλωματικής Εργασίας.....	3
2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ ACN-PCN.....	5
2.1. Εισαγωγή.....	5
2.2. Βασικές Έννοιες και Ορισμοί	5
2.2.1. Δείκτης ACN	5
2.2.2. Πάχος Αναφοράς	5
2.2.3. Κάλυψη-διέλευση C (Coverage)	6
2.2.4. Κατηγορίες Εδαφικής Αντοχής	6
2.2.5. Δείκτης PCN.....	7
2.3. Βασική Αρχή της Μεθόδου ACN-PCN	7
2.4. Καθορισμός του δείκτη ACN.....	8
2.4.1 Μέθοδος CBR.....	10
2.5. Λογισμικό Υπολογισμών COMFAA 3.0	11
2.6. Καθορισμός του δείκτη PCN	15
2.6.1. Εμπειρική Μέθοδος Υπολογισμού ή Εμπειρία Μακράς Χρήσης του Αεροδρομίου (Using Aircraft Method).....	17
2.6.2. Υπολογιστική Μέθοδος Αξιολόγησης (Technical Evaluation Method)	18
2.6.3. Έννοια της Ισοδύναμης Κυκλοφορίας	25
2.7. Υπερφόρτωση Οδοστρωμάτων	34
3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ ACR-PCR	35
3.1. Εισαγωγή.....	35
3.2. Βασικές Έννοιες και Ορισμοί	35
3.2.1. Δείκτης ACR	35
3.2.2. Πάχος Αναφοράς	36
3.2.3. Κατηγορίες Εδαφικής Αντοχής	36
3.2.4. Δείκτης PCR.....	37
3.3. Βασική Αρχή της Μεθόδου ACR-PCR.....	37

3.4. Καθορισμός του δείκτη ACR.....	37
3.4.1. Προσδιορισμός Πάχους Αναφοράς	38
3.4.2. Σημεία Υπολογισμού των Παραμορφώσεων	41
3.4.3. Διαδικασία Υπολογισμού του δείκτη ACR.....	43
3.4.4. Λογισμικό Υπολογισμού του δείκτη ACR: ICAO-ACR 1.3	44
3.5. Καθορισμός του δείκτη PCR	45
3.5.1. Εμπειρική Μέθοδος Υπολογισμού ή Εμπειρία Μακράς Χρήσης του Αεροδρομίου – Using Aircraft Method.....	46
3.5.2. Υπολογιστική Μέθοδος Αξιολόγησης – Technical Evaluation Method	48
3.5.3. Λογισμικό Υπολογισμού του δείκτη PCR: FAARFIELD 2.0	53
3.6. Υπερφόρτωση Οδοστρωμάτων	55
4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΑΡΧΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΔΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ.....	56
5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΔΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ..	66
5.1. Γενική Ιδέα.....	66
5.2. Σχεδιασμός Διατομών Οδοστρωμάτων σύμφωνα με την Αναλυτική Μέθοδο της FAA	66
5.2.1. Γενικές Αρχές Σχεδιασμού	66
5.2.2. Τυπικά Υλικά της FAA	68
5.2.3. Δομή Εύκαμπτου Οδοστρώματος Αεροδρομίου	70
5.2.4. Ελάχιστες απαιτήσεις παχών των επιμέρους στρώσεων	73
5.2.5. Διαστασιολόγηση διατομών με το λογισμικό FAARFIELD 2.0	74
5.3. Υπολογισμός των δεικτών ACN-ACR	76
5.4. Υπολογισμός των δεικτών PCN-PCR.....	76
5.5. Αποτελέσματα.....	77
5.5.1. Διατομές Οδοστρωμάτων	77
5.5.2. Δείκτες ACN-ACR.....	99
5.5.3. Δείκτες PCN-PCR	106
6.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	113
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	117

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2.1: Βασική Αρχή της Μεθόδου Δομικής Κατάταξης Οδοστρωμάτων Αεροδρομίων ACN-PCN (Fabre C., 2017)	8
Εικόνα 2.2: Υπολογισμός του δείκτη ACN αεροσκαφών με βάση το πάχος αναφοράς σε εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων	10
Εικόνα 2.3: Γενικό νομογράφημα της μεθόδου CBR.....	11
Εικόνα 2.4: Περιβάλλον εργασίας λογισμικού COMFAA για τον υπολογισμό του δείκτη ACN	13
Εικόνα 2.5: Σύνοψη αποτελεσμάτων λογισμικού COMFAA από τον υπολογισμό του δείκτη ACN	13
Εικόνα 2.6: Περιβάλλον εργασίας λογισμικού COMFAA για την εκτίμηση του δείκτη PCN.....	14
Εικόνα 2.7: Σύνοψη αποτελεσμάτων λογισμικού COMFAA για την εκτίμηση του δείκτη PCN	15
Εικόνα 2.8: Τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος για εκτίμηση πάχους αξιολόγησης	23
Εικόνα 2.9: Βοηθητικό υπολογιστικό φύλλο EXCEL του λογισμικού COMFAA για τον υπολογισμό οδοστρώματος αξιολόγησης (FAA, 2014).....	25
Εικόνα 2.10: Σχέδια κατανομής της φόρτισης από την κίνηση των αεροσκαφών (FAA, 2014)	27
Εικόνα 3.1: Καθορισμός πλέγματος για τα σημεία υπολογισμού των παραμορφώσεων για απλή διάταξη τροχών αεροσκάφους (FAA, 2020)	42
Εικόνα 3.2: Καθορισμός πλέγματος για τα σημεία υπολογισμού των παραμορφώσεων για σύνθετη διάταξη τροχών αεροσκάφους (FAA, 2020)	43
Εικόνα 3.3: Περιβάλλον λογισμικού ICAO-ACR για τον υπολογισμό του δείκτη ACR	45
Εικόνα 3.4: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας υπολογισμού του δείκτη PCR (FAA, 2020).....	52
Εικόνα 3.5: Περιβάλλον εργασίας λογισμικού FAARFIELD για την εκτίμηση του δείκτη PCR (FAA, 2020).....	54
Εικόνα 3.6: Σύνοψη αποτελεσμάτων λογισμικού FAARFIELD για την εκτίμηση του δείκτη PCR (FAA, 2020).....	54
Εικόνα 4.1: Αναπτυσσόμενες τάσεις κατά Boussinesq - Κυκλικό φορτίο (Λοΐζος και Πλατή, 2018)	57
Εικόνα 4.2: Σύγκριση Θεωρίας Πολλαπλών Ελαστικών Στρώσεων & Μεθόδου CBR.....	58
Εικόνα 4.3: Διαδικασία υπολογισμού του δείκτη ACN σε εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων ...	62
Εικόνα 4.4: Διαδικασία υπολογισμού του δείκτη ACR σε εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων....	63
Εικόνα 5.1: Κρίσιμες θέσεις αστοχίας εύκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου.....	67
Εικόνα 5.2: Κριτήριο αστοχίας στις κρίσιμες θέσεις μιας διατομής εύκαμπτου οδοστρώματος	68
Εικόνα 5.3: Τυπική Διατομή Εύκαμπτου Οδοστρώματος κατά FAA (FAA, 2021)	73
Εικόνα 5.4: Γενική επισκόπηση του λογισμικού FAARFIELD (FAA, 2020)	75
Εικόνα 5.5: Προτεινόμενες διατομές οδοστρωμάτων για το 1ο σενάριο κυκλοφορίας	89
Εικόνα 5.6: Προτεινόμενες διατομές οδοστρωμάτων για το 2 ^ο σενάριο κυκλοφορίας	90
Εικόνα 5.7: Προτεινόμενες διατομές οδοστρωμάτων για το 3 ^ο σενάριο κυκλοφορίας	91
Εικόνα 5.8: Προτεινόμενες διατομές οδοστρωμάτων για το 4 ^ο σενάριο κυκλοφορίας	92
Εικόνα 5.9: Προτεινόμενες διατομές οδοστρωμάτων για το 5 ^ο σενάριο κυκλοφορίας	93
Εικόνα 5.10: Προτεινόμενες διατομές οδοστρωμάτων για το 6 ^ο σενάριο κυκλοφορίας	94
Εικόνα 5.11: Προτεινόμενες διατομές οδοστρωμάτων για το 7 ^ο σενάριο κυκλοφορίας	95
Εικόνα 5.12: Προτεινόμενες διατομές οδοστρωμάτων για το 8 ^ο σενάριο κυκλοφορίας	96
Εικόνα 5.13: Προτεινόμενες διατομές οδοστρωμάτων για το 9 ^ο σενάριο κυκλοφορίας	97
Εικόνα 5.14: Προτεινόμενες διατομές οδοστρωμάτων για το 10 ^ο σενάριο κυκλοφορίας	98
Εικόνα 5.15: Διάγραμμα συσχέτισης δεικτών ACN-ACR για κατηγορία εδαφικής αντοχής A.....	102

Εικόνα 5.16: Διάγραμμα συσχέτισης δεικτών ACN-ACR για κατηγορία εδαφικής αντοχής B.....	102
Εικόνα 5.17: Διάγραμμα συσχέτισης δεικτών ACN-ACR για κατηγορία εδαφικής αντοχής C.....	103
Εικόνα 5.18: Διάγραμμα συσχέτισης δεικτών ACN-ACR για κατηγορία εδαφικής αντοχής D.....	103
Εικόνα 5.19: Διάγραμμα συσχέτισης δεικτών ACN-ACR για όλες τις κατηγορίες εδαφικής αντοχής	104
Εικόνα 5.20: Διάγραμμα συσχέτισης δεικτών ACN-ACR για όλες τις κατηγορίες εδαφικής αντοχής – Συντελεστής προσαρμογής	104
Εικόνα 5.21: Διάγραμμα διακύμανσης των τιμών του λόγου ACR/ACN.....	105
Εικόνα 5.22: Διάγραμμα συσχέτισης δεικτών PCN-PCR για κατηγορία εδαφικής αντοχής CBR=7% και για όλα τα σενάρια κυκλοφορίας.....	109
Εικόνα 5.23: Διάγραμμα συσχέτισης δεικτών PCN-PCR για κατηγορία εδαφικής αντοχής CBR=9% και για όλα τα σενάρια κυκλοφορίας.....	109
Εικόνα 5.24: Διάγραμμα συσχέτισης των δεικτών PCN-PCR για κατηγορία εδαφικής αντοχής CBR=10% και για όλα τα σενάρια κυκλοφορίας	110
Εικόνα 5.25: Διάγραμμα συσχέτισης δεικτών PCN-PCR με τους δείκτες HMA CDF-Sub CDF για στρώση έδρασης με τιμή CBR=7%	111
Εικόνα 5.26: Διάγραμμα συσχέτισης δεικτών PCN-PCR με τους δείκτες HMA CDF-Sub CDF για στρώση έδρασης με τιμή CBR=9%	111
Εικόνα 5.27: Διάγραμμα συσχέτισης δεικτών PCN-PCR με τους δείκτες HMA CDF-Sub CDF για στρώση έδρασης με τιμή CBR=10%	112

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Κατηγορίες Εδαφικής Αντοχής για τον υπολογισμό του δείκτη ACN (FAA, 2014)	7
Πίνακας 2.2: Μορφή έκφρασης του δείκτη PCN - Κωδικοποίηση	16
Πίνακας 2.3: Τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος αξιολόγησης ανάλογα με την διάταξη τροχών του αεροσκάφους (FAA, 2014).....	21
Πίνακας 2.4: Εύρος τιμών των συντελεστών ισοδυναμίας για τον υπολογισμό πάχους αξιολόγησης εύκαμπτου οδοστρώματος κατά FAA (FAA, 2014).....	24
Πίνακας 2.5: Σύνοψη τυπικών τιμών του λόγου P/TC (FAA, 2014)	29
Πίνακας 3.1: Κατηγορίες Εδαφικής Αντοχής για τον υπολογισμό του δείκτη ACR (FAA, 2020)	36
Πίνακας 3.2: Διατομή οδοστρώματος αναφοράς για τον υπολογισμό του δείκτη ACR σε εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων (Για αεροσκάφη με 2 ή λιγότερους τροχούς στα κύρια φορεία) (FAA, 2020)	38
Πίνακας 3.3: Διατομή οδοστρώματος αναφοράς για τον υπολογισμό του δείκτη ACR σε εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων (Για αεροσκάφη με περισσότερους από δύο τροχούς στα κύρια φορεία) (FAA, 2020).....	39
Πίνακας 3.4: Μορφή έκφρασης του δείκτη PCR - Κωδικοποίηση	45
Πίνακας 4.1: Σύνοψη μεθόδων υπολογισμού και ανάλυσης οδοστρωμάτων αεροδρομίων (Fabre C., 2017)	56
Πίνακας 4.2: Σύγκριση κατηγοριών εδαφικής αντοχής εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων των δύο μεθόδων δομικής κατάταξης ACN-PCN & ACR-PCR (White G., 2021).....	59
Πίνακας 4.3: Τυπικές διατομές οδοστρωμάτων αναφοράς για τον υπολογισμό των δεικτών ACN-ACR σε εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων	61
Πίνακας 4.4: Λογισμικά υπολογισμών των δύο μεθόδων δομικής κατάταξης οδοστρωμάτων αεροδρομίων	64
Πίνακας 4.5: Σύγκριση ποσοστών υπέρβασης των αντίστοιχων δεικτών αναλόγως του είδους του οδοστρώματος.....	65
Πίνακας 5.1: Τυπικά υλικά της FAA- Επιτρεπόμενα μέτρα ελαστικότητας E και λόγοι Poisson (FAA, 2021).....	69
Πίνακας 5.2: Ελάχιστα πάχη επιμέρους στρώσεων για εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων (FAA, 2021)	73
Πίνακας 5.3: Ετήσια στοιχεία κίνησης για το 1 ^ο σενάριο κυκλοφορίας	78
Πίνακας 5.4: Ετήσια στοιχεία κίνησης για το 2 ^ο σενάριο κυκλοφορίας	79
Πίνακας 5.5: Ετήσια στοιχεία κίνησης για το 3 ^ο σενάριο κυκλοφορίας	80
Πίνακας 5.6: Ετήσια στοιχεία κίνησης για το 4 ^ο σενάριο κυκλοφορίας	81
Πίνακας 5.7: Ετήσια στοιχεία κίνησης για το 5 ^ο σενάριο κυκλοφορίας	82
Πίνακας 5.8: Ετήσια στοιχεία κίνησης για το 6 ^ο σενάριο κυκλοφορίας	83
Πίνακας 5.9: Ετήσια στοιχεία κίνησης για το 7 ^ο σενάριο κυκλοφορίας	84
Πίνακας 5.10: Ετήσια στοιχεία κίνησης για το 8 ^ο σενάριο κυκλοφορίας	85
Πίνακας 5.11: Ετήσια στοιχεία κίνησης για το 9 ^ο σενάριο κυκλοφορίας	86
Πίνακας 5.12: Ετήσια στοιχεία κίνησης για το 10 ^ο σενάριο κυκλοφορίας.....	87
Πίνακας 5.13: Σύνοψη των δεικτών ACN-ACR για κάθε τύπο αεροσκάφους και για όλες τις κατηγορίες εδαφικής αντοχής.....	100
Πίνακας 5.14: Πάχη οδοστρωμάτων αξιολόγησης (inches) για την εκτίμηση των δεικτών PCN	106

Πίνακας 5.15: Σύνοψη δεικτών PCN-PCR για στρώση έδρασης με τιμή CBR=7%	107
Πίνακας 5.16: Σύνοψη δεικτών PCN-PCR για στρώση έδρασης με τιμή CBR=9%	107
Πίνακας 5.17: Σύνοψη δεικτών PCN-PCR για στρώση έδρασης με τιμή CBR=10%	108

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γενική Ανασκόπηση

Οι δυνατότητες εξυπηρέτησης του μεταφορικού έργου από ένα αεροδρόμιο εξαρτάται μεταξύ άλλων και από την επάρκεια ορισμένων βασικών υποδομών του: *χωρητικότητα (κτήρια επιβατών, δάπεδα στάθμευσης), μήκος διαδρόμου, φέρουσα ικανότητα οδοστρωμάτων.*

Μία από τις βασικές διαφορές μεταξύ των οδοστρωμάτων αεροδρομίων και οδών, βρίσκεται στα φορτία τα οποία εξυπηρετούν. Το οδόστρωμα ενός αεροδρομίου γενικά καλείται να δεχτεί μια μεγάλη «ποικιλία» φορτίων, τόσο ως προς το μέγεθος όσο και ως προς τον τρόπο εφαρμογής, από το αντίστοιχο μιας οδού. Επιπροσθέτως, η χρήση των οδοστρωμάτων αεροδρομίων επηρεάζεται από τις εξελίξεις και απαιτήσεις διαφόρων παραγόντων, όπως η αεροπορική βιομηχανία, η τουριστική βιομηχανία, οι αεροπορικές εταιρείες και οι αρχές διαχείρισης των αεροδρομίων, οι οποίες πρέπει να γνωρίζουν και να αντιλαμβάνονται τις δυνατότητες εξυπηρέτησης φορτίων από τα οδοστρώματα, ώστε να μπορούν να προγραμματίζουν τις δραστηριότητές τους.

Στο πλαίσιο αυτό η υιοθέτηση ενός συστήματος δομικής κατάταξης (reporting) της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος μπορεί να λειτουργήσει υποστηρικτικά στη συνεργασία μεταξύ των διαφόρων μερών αποτελώντας ένα κοινά αποδεκτό και αντιληπτό κώδικα αναφοράς θεμάτων, τα οποία σχετίζονται με τη φέρουσα ικανότητα των οδοστρωμάτων και την επίδραση του φορτίου των αεροσκαφών. Κατά συνέπεια, ο προσδιορισμός της φέρουσας ικανότητας, του μεγέθους δηλαδή το οποίο θα προσδιορίσει ποιους τύπους αεροσκαφών μπορεί να εξυπηρετήσει ένα δεδομένο οδόστρωμα αεροδρομίου, αποκτά ιδιαίτερη σημασία και χρησιμότητα δεδομένου ότι η γνώση της είναι απαραίτητο στοιχείο για τη σωστή διαχείρισή του. Αυτό συμβαίνει διότι συχνά, είτε λόγω της μεταβολής της μεταφορικής ζήτησης για την τοπική ανάπτυξη, είτε λόγω εξέλιξης της τεχνολογίας (νέοι τύποι αεροσκαφών), προκύπτει η ανάγκη να μεταβληθούν τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας ενός αεροδρομίου (όγκος, τύποι αεροσκαφών), οπότε οι αρχές του πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να κρίνουν εάν η φέρουσα ικανότητα των οδοστρωμάτων είναι επαρκής για να παραληφθούν με ασφάλεια τα (νέα) φορτία των αεροσκαφών. Σημειώνεται ότι οι παρεμβάσεις σε ένα αεροδρόμιο συνήθως αποτελούν μια διαδικασία σύνθετη και χρονοβόρα, η οποία απαιτεί ιδιαίτερα υψηλό κόστος (Λοΐζος και Πλατή, 2018).

Για τον λόγο αυτό εισήχθη το 1981 η μέθοδος ACN-PCN (*Aircraft Classification Number – Pavement Classification Number*) από τον Διεθνή Οργανισμό Πολιτικής Αεροπορίας ICAO

(*International Civil Aviation Organization*) με στόχο να γίνει παγκόσμια αποδεκτή ως ο κύριος τρόπος ελέγχου της δομικής επάρκειας των οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Ωστόσο, οι εξελίξεις στο πεδίο του σχεδιασμού των οδοστρωμάτων, καθώς και τα αποτελέσματα των διερευνήσεων όσον αφορά στην αξιοπιστία της Μεθόδου Κατάταξης Φέρουσας Ικανότητας ACN-PCN, ανέδειξαν την ανάγκη εκσυγχρονισμού της μεθόδου ACN-PCN.

Πράγματι, εδώ και δύο δεκαετίες τουλάχιστον, οι διεθνείς πρακτικές σχεδιασμού και ανάλυσης των οδοστρωμάτων βασίζονται στην Θεωρία Πολλαπλών Ελαστικών Στρώσεων (*ML²EA: Multi-Layer Linear Elastic Analysis*). Ωστόσο, οι βασικές αρχές της μεθόδου ACN-PCN στηρίζονται στην μέθοδο CBR, η οποία δεν χρησιμοποιείται πλέον. Κατά αυτόν τον τρόπο, διαφαίνεται πως υπάρχει ασυμβατότητα μεταξύ της υφιστάμενης μεθόδου κατάταξης ACN-PCN και των μεθόδων σχεδιασμού και ανάλυσης οδοστρωμάτων. Οι αδυναμίες και οι ελλείψεις της μεθόδου ACN-PCN οδήγησαν τον ICAO να εισαγάγει μια νέα Μέθοδο Κατάταξης Φέρουσας Ικανότητας, τη μέθοδο ACR-PCR (*Aircraft Classification Rating – Pavement Classification Rating*) τον Μάρτιο του 2018.

1.2. Στόχος Διπλωματικής Εργασίας

Η δεδομένη χρονική στιγμή, αποτελεί μια μεταβατική περίοδο εναρμονισμού της υφιστάμενης μεθόδου κατάταξης φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων, ACN-PCN, με την αναθεωρημένη μέθοδο ACR-PCR. Η νέα αυτή μέθοδος, ACR-PCR, πρόκειται να τεθεί σε ισχύ από τις 28 Νοεμβρίου 2024.

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθόδων κατάταξης φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Η επίτευξη του παραπάνω στόχου περιλαμβάνει δύο διαδικασίες συγκριτικής αξιολόγησης, την σύγκριση των δεικτών ACN-ACR, καθώς και την σύγκριση των δεικτών PCN-PCR. Πιο συγκεκριμένα, διερευνάται η ύπαρξη ή μη συσχέτισης μεταξύ των αντίστοιχων δεικτών. Επιπλέον, τονίζεται πως η συγκριτική αυτή αξιολόγηση αφορά στα εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων.

1.3. Στάδια Διπλωματικής Εργασίας

Η εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας πραγματοποιήθηκε μέσω μιας σειράς σταδίων, για την καλύτερη προσέγγιση του στόχου. Τα στάδια αυτά περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

Μετά τον προσδιορισμό του επιδιωκόμενου στόχου, έγινε βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με το αντικείμενο της εργασίας, ώστε να πραγματοποιηθεί η απαιτούμενη σύγκριση των βασικών εννοιών των δύο μεθόδων δομικής κατάταξης φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Στη συνέχεια, για την επίτευξη του στόχου, προσδιορίστηκε η μεθοδολογία η οποία θα ακολουθηθεί και περιγράφεται παρακάτω. Έπειτα από συλλογή των απαραίτητων στοιχείων, σχεδιάστηκαν για δέκα (10) διαφορετικά σενάρια κυκλοφορίας αεροσκαφών, τα οποία αντιπροσωπεύουν μια μέση κατάσταση στην Ελλάδα, κατάλληλα διαμορφωμένες διατομές εύκαμπτων οδοστρωμάτων.

Μάλιστα, για λόγους σύγκρισης, για κάθε σενάριο κυκλοφορίας αεροσκαφών επιλέχθηκαν τρεις (3) χαρακτηριστικές τιμές του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης. Με τη βοήθεια των απαραίτητων υπολογιστικών προγραμμάτων κάθε μεθόδου αξιολόγησης, υπολογίστηκαν οι απαιτούμενοι δείκτες ACN-ACR, καθώς και PCN-PCR και δημιουργήθηκαν όλα τα απαιτούμενα διαγράμματα. Βάσει των διαγραμμάτων αυτών, προέκυψαν οι πρώτες παρατηρήσεις, οι οποίες οδήγησαν και στα σχετικά συμπεράσματα.

Η ερμηνεία και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων οδήγησαν στο συμπέρασμα πως υπάρχει αρκετά καλή συσχέτιση μεταξύ των δεικτών ACN-ACR, ενώ οι δείκτες PCN-PCR δεν παρουσιάζουν κάποια συσχέτιση μεταξύ τους. Έτσι, προέκυψαν σημαντικές πληροφορίες για το υπό εξέταση θέμα, καθώς και διατυπώθηκαν κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

1.4. Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται σε έξι κεφάλαια, όπως περιγράφονται παρακάτω.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια γενική εικόνα του αντικείμενου της Διπλωματικής Εργασίας. Αρχικά, περιγράφεται το ζήτημα το οποίο ώθησε στην παρούσα έρευνα και στη συνέχεια ο στόχος της έρευνας. Έπειτα, πραγματοποιείται μία μικρή αναφορά στα επιμέρους κεφάλαια της Διπλωματικής Εργασίας, για τα οποία υπάρχει μία σύντομη περιγραφή ως προς το περιεχόμενό τους.

Το δεύτερο κεφάλαιο αποτελεί μια παρουσίαση της υφιστάμενης μεθόδου κατάταξης φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACN-PCN. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι βασικές έννοιες της μεθόδου, η θεμελιώδης αρχή της και η διαδικασία υπολογισμού των δεικτών ACN και PCN.

Το τρίτο κεφάλαιο, κατ' αναλογία με το δεύτερο, αποτελεί μια παρουσίαση της νέας μεθόδου κατάταξης φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACR-PCR και των χαρακτηριστικών αυτής.

Το τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την θεωρητική σύγκριση των βασικών αρχών των δύο μεθόδων κατάταξης φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACN-PCN & ACR-PCR, εστιάζοντας στις διαφορές τους, όπως αυτές προκύπτουν από την βιβλιογραφία.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία, η οποία ακολουθήθηκε για την πρακτική εφαρμογή των δύο μεθόδων κατάταξης φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACN-PCN & ACR-PCR.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα της συγκριτικής αξιολόγησης των δύο μεθόδων κατάταξης φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACN-PCN & ACR-PCR, καθώς και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ ACN-PCN

2.1. Εισαγωγή

Η μέθοδος ACN-PCN (*Aircraft Classification Number – Pavement Classification Number*) εισήχθη το 1981 από τον Διεθνή Οργανισμό Πολιτικής Αεροπορίας ICAO (*International Civil Aviation Organization*) με στόχο να γίνει παγκόσμια αποδεκτή ως ο κύριος τρόπος ελέγχου της δομικής επάρκειας των οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

Οι αρχές διαχείρισης ενός αεροδρομίου οφείλουν να γνωστοποιούν στην Υπηρεσία Αεροναυτικών Πληροφοριών (*AIS: Aeronautical Information Service*) τα αποτελέσματα της αξιολόγησης της δομικής επάρκειας των οδοστρωμάτων, έτσι όπως αυτά υπολογίστηκαν με την μέθοδο δομικής κατάταξης οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACN-PCN, με σκοπό να δημοσιευτούν στα Έντυπα Αεροναυτικών Πληροφοριών (*AIP: Aeronautical Information Publication*).

Σημειώνεται ότι η μέθοδος δομικής κατάταξης οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACN-PCN εφαρμόζεται σε οδοστρώματα αεροδρομίων που μπορούν να εξυπηρετήσουν αεροσκάφη με βάρος 12.500 pounds (5.700 kg) ή μεγαλύτερο.

2.2. Βασικές Έννοιες και Ορισμοί

2.2.1. Δείκτης ACN

Ο δείκτης ACN (*Aircraft Classification Number*) είναι ένας αριθμός ο οποίος εκφράζει τη σχετική επίδραση ενός αεροσκάφους σε ένα οδόστρωμα για μια προκαθορισμένη αντοχή του εδάφους. Αριθμητικά προσδιορίζεται ως το διπλάσιο φορτίο (σε χιλιάδες Kgr) του μονού τροχού (*DSWL: Derived Single Wheel Load*), ο οποίος έχει πίεση 1,25 MPa και προκαλεί την ίδια ένταση με το πραγματικό σύστημα τροχών του αεροσκάφους σε ένα οδόστρωμα πάχους ίσο με το πάχος αναφοράς.

2.2.2. Πάχος Αναφοράς

Το πάχος αναφοράς για εύκαμπτα οδοστρώματα είναι ίσο με το συμβατικό πάχος του οδοστρώματος, το οποίο επιτρέπει 10.000 καλύψεις-διελεύσεις C του πραγματικού συστήματος τροχών του αεροσκάφους για μια συγκεκριμένη κατηγορία εδαφικής αντοχής. Η επιλογή του συμβατικού αριθμού των 10.000 καλύψεων-διελεύσεων C έγινε από τον ICAO ώστε να εξασφαλιστεί μια ρεαλιστική εκτίμηση της βαριάς φόρτισης από τα διαφορετικά αεροσκάφη, τα

οποία πρέπει να εξυπηρετεί το οδόστρωμα ενός αεροδρομίου. Η ουσιαστική προσφορά του πάχους αναφοράς είναι η απεξάρτηση του δείκτη ACN από το πάχος του εκάστοτε οδοστρώματος μελέτης.

2.2.3. Κάλυψη-διέλευση C (Coverage)

Οι διελεύσεις των αεροσκαφών λαμβάνονται υπόψη με τον αριθμό των καλύψεων-διελεύσεων C. Δεδομένου ότι τα φορεία ενός αεροσκάφους σπανίως κινούνται κατά μήκος του ίδιου ίχνους ενδέχεται να χρειαστούν περισσότερες από μία διελεύσεις του φορείου του αεροσκάφους, ώστε ένα συγκεκριμένο σημείο του οδοστρώματος να δεχτεί τη μέγιστη επιβαλλόμενη φόρτιση. Κατά συνέπεια, σύμφωνα με την FAA μία κάλυψη-διέλευση C (Coverage) προκύπτει από έναν ορισμένο αριθμό διελεύσεων αεροσκαφών (*passes*) και αντιστοιχεί σε μία μέγιστη φόρτιση του οδοστρώματος. Υπό το πρίσμα αυτό, οι καλύψεις-διελεύσεις C ενέχουν την έννοια των «διελεύσεων μέγιστης επιπόνησης».

2.2.4. Κατηγορίες Εδαφικής Αντοχής

Η κατηγορία εδαφικής αντοχής καθορίζεται με βάση την τιμή του δείκτη CBR (*California Bearing Ratio*) της στρώσης έδρασης για εύκαμπτα οδοστρώματα προσδιορίζοντας, έτσι τις παρακάτω τέσσερις κατηγορίες:

Υψηλή αντοχή (A): αντιπροσωπεύει όλες τις τιμές CBR πάνω από 13%,
με χαρακτηριστική τιμή το 15%.

Μέτρια αντοχή (B): αντιπροσωπεύει τις τιμές CBR από 8% έως 13%,
με χαρακτηριστική τιμή το 10%.

Χαμηλή αντοχή (C): αντιπροσωπεύει τις τιμές CBR από 4% έως 8%,
με χαρακτηριστική τιμή το 6%.

Πολύ χαμηλή αντοχή (D): αντιπροσωπεύει όλες τις τιμές CBR κάτω από 4%,
με χαρακτηριστική τιμή το 3%.

Οι κατηγορίες της εδαφικής αντοχής για τον υπολογισμό του δείκτη ACN συνοψίζονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Κατηγορίες Εδαφικής Αντοχής για τον υπολογισμό του δείκτη ACN (FAA, 2014)

Κατηγορία Εδαφικής Αντοχής	Χαρακτηριστική τιμή CBR (%)	Αντιπροσωπεύει τιμές CBR	Κωδικοποίηση
Υψηλή	15%	$CBR \geq 13\%$	A
Μέτρια	10%	$8\% < CBR < 13\%$	B
Χαμηλή	6%	$4\% < CBR \leq 8\%$	C
Πολύ χαμηλή	3%	$CBR \leq 4\%$	D

2.2.5. Δείκτης PCN

Ο δείκτης PCN (*Pavement Classification Number*) αποτελεί μια έκφραση της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος, η οποία εκτιμάται σε σχέση με το φορτίο, το οποίο μπορεί με ασφάλεια να φέρει για απεριόριστο αριθμό διελεύσεων. Βάσει αυτού, ο αριθμός PCN, που εκφράζει τη φέρουσα ικανότητα ενός οδοστρώματος, ορίζεται ως το ACN του αεροσκάφους που προκαλεί τη μέγιστη ένταση την οποία μπορεί να δεχτεί το οδόστρωμα χωρίς περιορισμό του αριθμού των διελεύσεων του αεροσκάφους.

2.3. Βασική Αρχή της Μεθόδου ACN-PCN

Η θεμελιώδης αρχή της μεθόδου ACN-PCN είναι η ακόλουθη. Επί της αρχής, κάθε αεροσκάφος χαρακτηρίζεται από μία τιμή του δείκτη ACN, για την οποία ακολουθείται μία διαδικασία υπολογισμού. Έτσι, λοιπόν καθίσταται δυνατή η εξυπηρέτηση του αεροσκάφους, χωρίς περιορισμό του αριθμού των διελεύσεων του, από οποιοδήποτε οδόστρωμα, το οποίο χαρακτηρίζεται από ίση (ή μεγαλύτερη) τιμή του δείκτη PCN σε σχέση με την τιμή του δείκτη ACN του αεροσκάφους, δηλαδή όταν ισχύει ότι $PCN_{\text{οδ/τος}} \geq ACN_{\text{α/φους}}$ (Εικόνα 2.1). Σε διαφορετική περίπτωση, δηλαδή όταν $PCN_{\text{οδ/τος}} < ACN_{\text{α/φους}}$, θα πρέπει να επιβληθούν περιορισμοί στο αεροσκάφος (ελάττωση

επιτρεπόμενου φορτίου ή/και μείωση του αριθμού των διελεύσεων).



Εικόνα 2.1: Βασική Αρχή της Μεθόδου Δομικής Κατάταξης Οδοστρωμάτων Αεροδρομίων ACN-PCN (Fabre C., 2017)

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να τονιστεί πως ο όρος «απεριόριστος» αριθμός διελεύσεων του αεροσκάφους δεν σημαίνει ότι το οδόστρωμα έχει τέτοια δομική επάρκεια, ώστε να είναι σε θέση να εξυπηρετήσει άπειρες διελεύσεις του αεροσκάφους. Εν αντιθέσει, σημαίνει πως δεν απαιτείται κάποια ιδιαίτερη έγκριση πριν από κάθε διέλευση του αεροσκάφους. Όταν όμως η τιμή του δείκτη ACN ενός αεροσκάφους υπερβαίνει την τιμή του δείκτη PCN του οδοστρώματος, ο χειριστής του αεροσκάφους πρέπει να λάβει την έγκριση του διαχειριστή του αεροδρομίου, προτού επιχειρήσει σε αυτό.

2.4. Καθορισμός του δείκτη ACN

Κάθε αεροσκάφος χαρακτηρίζεται από μια τιμή του δείκτη ACN, η οποία εξαρτάται από το *φορτίο του αεροσκάφους, την πίεση των ελαστικών και την κατηγορία εδαφικής αντοχής του οδοστρώματος*, στο οποίο επιχειρεί.

Η συμπερίληψη της κατηγορίας της εδαφικής αντοχής στην τιμή του δείκτη ACN φαντάζει ιδιαίτερη, καθώς το οδόστρωμα είναι ανεξάρτητο του αεροσκάφους. Ωστόσο, η κατηγορία εδαφικής αντοχής χρησιμοποιείται απλώς ως ένδειξη του βαθμού της αλληλεπίδρασης των συστημάτων τροχών των αεροσκαφών με το οδόστρωμα. Εν προκειμένω, το πάχος ενός οδοστρώματος πάνω σε μια υψηλής αντοχής εδαφική στρώση θα είναι μικρό, υποδηλώνοντας πως ο βαθμός επίδρασης του

τροχού του αεροσκάφους σε αυτό θα είναι μικρός. Σε αντίθεση, μια χαμηλής αντοχής εδαφική στρώση απαιτεί μεγάλο πάχος οδοστρώματος, γεγονός που σημαίνει ότι οι τροχοί επιδρούν σημαντικά στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος. Έτσι, το πάχος αναφοράς, όπως αυτό καθορίζεται από την κατηγορία της εδαφικής αντοχής, είναι σημαντικό για την σύγκριση των σχετικών επιδράσεων διαφορετικών συστημάτων τροχών των αεροσκαφών.

Για κάθε μια κατηγορία εδαφικής αντοχής το πάχος αναφοράς είναι προφανώς διαφορετικό, που σημαίνει ότι και η τιμή του δείκτη ACN ενός αεροσκάφους μεταβάλλεται αντίστοιχα. Επιπλέον, η τιμή μεταβάλλεται ανάλογα και με το φορτίο το οποίο φέρει το αεροσκάφος, οπότε για κάθε κατηγορία φέρουσας ικανότητας του εδάφους συνήθως υπολογίζονται δύο τιμές. Η μια αντιστοιχεί στο μέγιστο βάρος του αεροσκάφους, ενώ η δεύτερη αναφέρεται στην περίπτωση που το αεροσκάφος είναι κενό.

Οι τιμές ACN όλων των σύγχρονων αεροσκαφών, για όλες τις κατηγορίες εδαφικής αντοχής τόσο για την περίπτωση που το αεροσκάφος έχει το μέγιστο φορτίο του, όσο και για εκείνη που είναι κενό, έχουν υπολογιστεί και πινακοποιηθεί με βάση προγράμματα H/Y, τα οποία παρέχει ο ICAO στο εγχειρίδιο της μεθόδου. Από αυτούς τους πίνακες είναι διαθέσιμο το ACN ενός αεροσκάφους.

Στην περίπτωση που το ACN δεν είναι γνωστό μπορεί να προσδιοριστεί. Οι κατασκευαστές των αεροσκαφών, συνηθίζουν να δίνουν τα απαιτούμενα πάχη αναφοράς για τις τέσσερις κατηγορίες εδαφικής αντοχής, ενώ στην αντίθετη περίπτωση υπολογίζονται. Τα πάχη αναφοράς υπολογίζονται με χρήση της μεθόδου CBR των *United States Army Engineers* για εύκαμπτα οδοστρώματα.

Η τιμή του δείκτη ACN ενός αεροσκάφους προκύπτει από το νομογράφημα της Εικόνας 2.2 για εύκαμπτα οδοστρώματα, το οποίο έχει βασιστεί στις αρχές της μεθόδου CBR, χρησιμοποιώντας την εξής σχέση:

$$t_{\text{αναφ}} = \sqrt{\frac{DSWL}{C_1 \times CBR} - \frac{DSWL}{C_2 \times Ps}} \quad (2.1)$$

όπου: $t_{\text{αναφ}}$: το πάχος αναφοράς σε εκατοστά

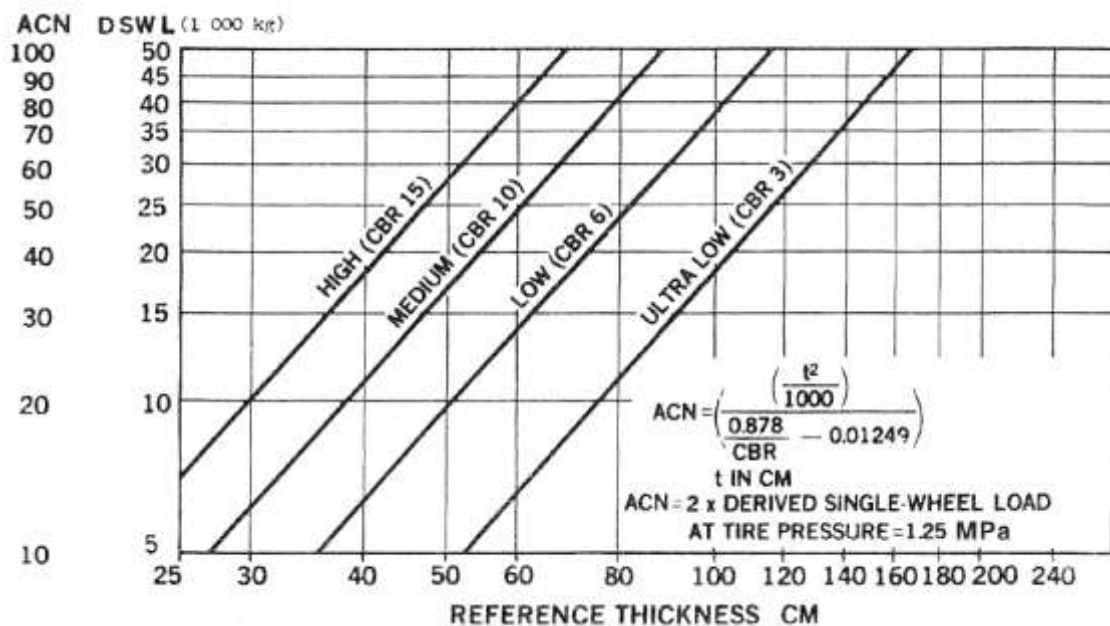
DSWL: το φορτίο μονού τροχού με πίεση 1.25 MPa

CBR: η χαρακτηριστική τιμή αντοχής του εδαφικού υλικού ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκει

Ps: πίεση 1.25 MPa

C_1, C_2 : συντελεστές απόκλισης του Bussinesq με τιμές $C_1=0,5695$ και $C_2=32,035$

Η χρήση των παραπάνω συντελεστών εξασφαλίζει την ισοδυναμία μεταξύ της επίδρασης του φορτίου όλων των τροχών ενός φορείου και του φορτίου μονού τροχού.



Εικόνα 2.2: Υπολογισμός του δείκτη ACN αεροσκαφών με βάση το πάχος αναφοράς σε εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων

Συμπερασματικά, η τιμή του δείκτη ACN είναι ακριβής και μαθηματικά καθορισμένη, γεγονός που σημαίνει πως ο προσδιορισμός της δεν υπόκειται στην διακριτική ευχέρεια των αρχών του αεροδρομίου. Το ίδιο όμως δεν ισχύει και για την τιμή του δείκτη PCN.

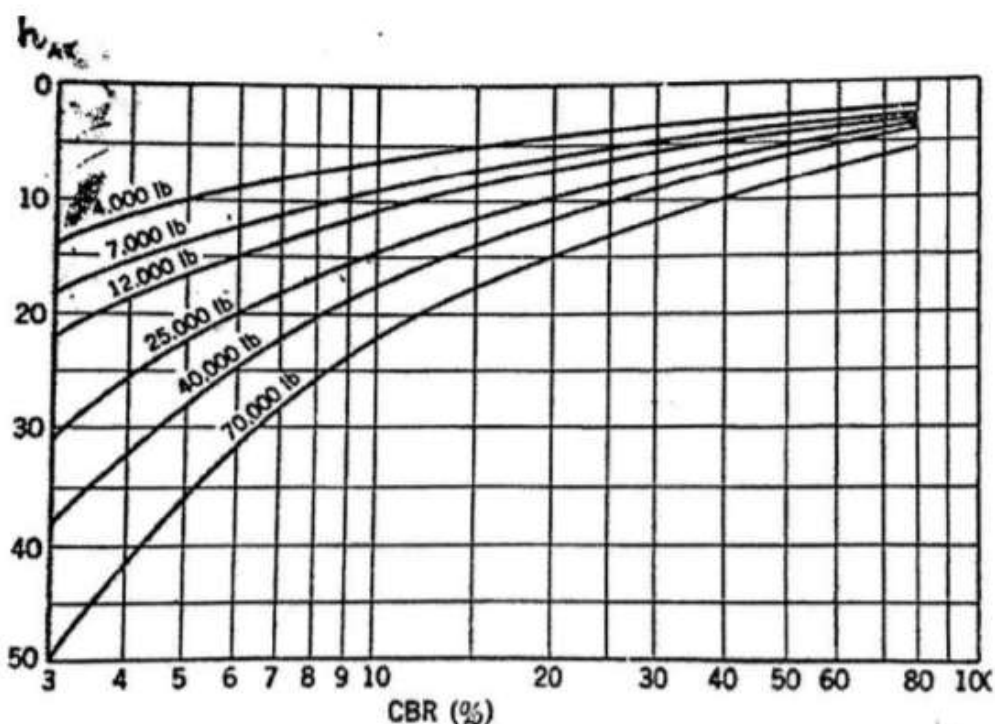
2.4.1 Μέθοδος CBR

Η μέθοδος CBR, η οποία χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό των οδοστρώματων αεροδρομίων είναι στην βάση της μία εμπειρική μέθοδος. Παρόλα αυτά, το εμπειρικό υπόβαθρο της μεθόδου έχει διερευνηθεί σε τέτοιο βαθμό, ώστε έχουν αναπτυχθεί αξιόπιστοι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των πραγματικών συστημάτων των τροχών των αεροσκαφών και του προσομοιώματος του μονού τροχού της μεθόδου, διασφαλίζοντας έτσι την αξιοπιστία της διαδικασίας σχεδιασμού.

Για τον υπολογισμό των παχών των στρώσεων εύκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου η μέθοδος της FAA χρησιμοποιεί μια σειρά διαγραμμάτων σχεδιασμού. Τα διαγράμματα διαστασιολόγησης έχουν αναπτυχθεί με βάση τη μέθοδο CBR του Σώματος Μηχανικών των ΗΠΑ συνδυάζοντας το εμπειρικό υπόβαθρο της μεθόδου με τα αποτελέσματα εκτεταμένων ερευνών που έχουν

πραγματοποιηθεί από την FAA. Οι καμπύλες των διαγραμμάτων δίνουν το συνολικό απαιτούμενο πάχος του οδοστρώματος καθώς και το ελάχιστο πάχος των ασφαλτικών στρώσεων. Διαγράμματα διαστασιολόγησης έχουν αναπτυχθεί για όλα τα τυπικά φορεία (μονού, διπλού και διπλού δίδυμου τροχού), καθώς και για τα αεροσκάφη ευρείας ατράκτου.

Στην Εικόνα 2.3 φαίνεται το γενικό νομογράφημα της μεθόδου CBR με βάση το οποίο υπολογίζεται το απαιτούμενο πάχος στρώσης οδοστρώματος σε συσχέτιση με τη φέρουσα ικανότητα του υλικού της υποκείμενης στρώσης και το μέγεθος φόρτισης του οδοστρώματος (Λοΐζος και Πλατή, 2018).



Εικόνα 2.3: Γενικό νομογράφημα της μεθόδου CBR

2.5. Λογισμικό Υπολογισμών COMFAA 3.0

Ακολουθώντας τις εξελίξεις στον τομέα της κατάταξης οδοστρωμάτων αεροδρομίων, η FAA τροποποίησε και βελτίωσε τη διαδικασία προσδιορισμού του δείκτη PCN των οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Η τελική μορφή της μεθόδου, η οποία βρίσκεται σε ισχύ, ολοκληρώθηκε το 2014 (FAA, 2014). Η εφαρμογή της μεθόδου πραγματοποιείται μέσω της χρήσης του λογισμικού COMFAA 3.0. Το υπόψη λογισμικό διαθέτει μια αυτοματοποιημένη διαδικασία υπολογισμού του δείκτη PCN ενός οδοστρώματος και είναι ιδιαίτερος φιλικό προς τον χρήστη.

Σημειώνεται πως το συγκεκριμένο λογισμικό, εκτός από τη δυνατότητα υπολογισμού του δείκτη PCN ενός οδοστρώματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εκτίμηση των τιμών ACN διαφόρων τύπων αεροσκαφών, σύμφωνα με τις συνθήκες που ορίζονται από τον ICAO. Στο πλαίσιο

υπολογισμού των τιμών ACN ενός αεροσκάφους, πραγματοποιείται και υπολογισμός του απαιτούμενου πάχους οδοστρώματος (*πάχος οδοστρώματος αναφοράς*), σύμφωνα με τις συνθήκες που ορίζει ο ICAO για την εκτίμηση του δείκτη ACN. Το υπόψη πάχος οδοστρώματος δε σχετίζεται με τις διαδικασίες σχεδιασμού νέων οδοστρωμάτων, τις οποίες διαθέτει η FAA. Παρόλα αυτά, οι επίσημες τιμές ACN των αεροσκαφών παρέχονται από τους κατασκευαστές των αεροσκαφών.

Υπολογισμός δείκτη ACN:

1. Καθορίζεται:

- α. Το είδος του οδοστρώματος, εύκαμπτο ή δύσκαμπτο
- β. Ο τύπος του αεροσκάφους από τις ομάδες αεροσκαφών
(υπάρχει δυνατότητα προσαρμογής του βάρους του αεροσκάφους, του ποσοστού κατανομής του βάρους στα φορεία του αεροσκάφους και της πίεσης των ελαστικών)

2. Γίνεται υπολογισμός της τιμής του δείκτη ACN

Για κάθε μια από τις τέσσερις κατηγορίες εδαφικής αντοχής πραγματοποιείται ο υπολογισμός του δείκτη ACN, όπως αυτός περιγράφηκε στις προηγούμενες παραγράφους.

Στην Εικόνα 2.4 παρουσιάζεται το περιβάλλον εργασίας του λογισμικού COMFAA 3.0, όπου ο χρήστης εκτελεί τις απαραίτητες ενέργειες για τον υπολογισμό του δείκτη ACN, ενώ στην Εικόνα 2.5 απεικονίζονται τα σχετικά αποτελέσματα.

Υπολογισμός του δείκτη PCN:

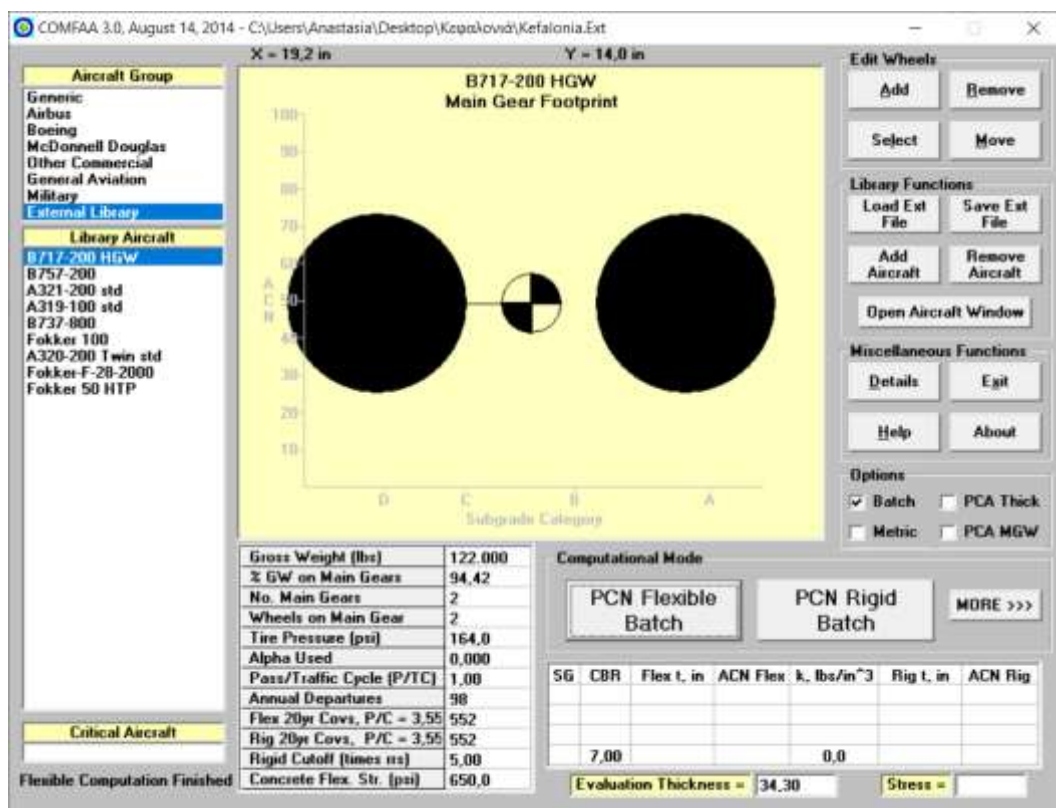
1. Ο χρήστης:

- α. Καθορίζει τη σύνθεση της κυκλοφορίας των αεροσκαφών από τη διατιθέμενη βάση δεδομένων αεροσκαφών
- β. Επιβεβαιώνει (ή τροποποιεί) τα χαρακτηριστικά του κάθε αεροσκάφους της σύνθεσης
- γ. Εισάγει τον ετήσιο αριθμό απογειώσεων ή των καλύψεων-διελεύσεων των αεροσκαφών
- δ. Εισάγει το πάχος αξιολόγησης και την τιμή CBR της στρώσης έδρασης
- ε. Καθορίζει το είδος του οδοστρώματος, εύκαμπτο ή δύσκαμπτο

2. Γίνεται υπολογισμός της τιμής του δείκτη PCN

Επιπλέον, για τον υπολογισμό του πάχους αξιολόγησης χρησιμοποιείται το βοηθητικό υπολογιστικό φύλλο EXCEL του COMFAA.

Στην Εικόνα 2.6 παρουσιάζεται το περιβάλλον εργασίας του λογισμικού COMFAA 3.0, όπου ο χρήστης εκτελεί τις απαραίτητες ενέργειες για τον υπολογισμό του δείκτη PCN, ενώ στην Εικόνα 2.7 απεικονίζονται τα σχετικά αποτελέσματα.



Εικόνα 2.6: Περιβάλλον εργασίας λογισμικού COMFAA για την εκτίμηση του δείκτη PCN

COMFAA ACN Computation, Detailed Output

Unit: Centimeters | Show Alpha | Show Units | Traffic Level: CH | Other Calculation Modes: PCN, ACN Batch, Thickness, Life, MW | Back

Save PCN Output to a Text File

Evaluation pavement type is Flexible and Design procedure is CEE.
Alpha Values are those approved by the ICD in 1997.

Design parameters: CBR = 1.00 (Highway Category is C10)
Base to Traffic Cycle (BTC) Ratio = 1.00
Maximum number of vehicle pass (MVP) = 4
Maximum number of years per aircraft = 2

At least one aircraft has 4 or more wheels per gear. The FAA recommends a substance section assuming 4 inches of HMA and 2 inches of crushed aggregate for equivalent thickness calculations.

Summary Table 1: Input Traffic Data

No.	Aircraft Name	Gross Weight	PGW/MT	Tire Gross Wt	Tire Stress	Annual Dept	20-yr. Damage	ACN
1	B737-200 HAW	122,000	94.42	184.0	88	88	882	12.22
2	B737-200	122,000	91.18	184.0	122	122	1,224	11.99
3	A321-200 STD	137,000	84.99	212.0	104	104	1,040	17.92
4	A321-200 STD	141,978	82.49	172.4	173	173	940	15.46
5	B747-400	174,700	93.82	348.0	114	114	11,134	18.89
6	Falcons STD	94,800	94.80	182.4	32	32	172	14.92
7	A321-200 STD STD	142,312	86.49	200.4	124	124	1,240	16.64
8	Falcons T-25-0000	88,000	94.80	171.0	100	100	4,702	18.90
9	Falcons STD STD	88,000	94.80	171.0	174	174	4,400	12.18

Summary Table 2: ACN Values

No.	Aircraft Name	Overall Equivalent	Thickens	Ratio	ACN Thick as	ACN	ACN as	
1	B737-200 HAW	12,000,000	32.49	122.783	29.94	9,000	42.4	
2	B737-200	12,000,000	32.49	122.811	29.82	8,000	42.3	
3	A321-200 STD	4,000	28.49	147.382	39.87	3,378	79.9	
4	A321-200 STD	2,884,746	32.49	124.849	25.09	3,203	40.8	
5	B747-400	39,334	91.59	209.800	16.15	6,076	62.9	
6	Falcons STD	19,000,000	30.77	101.188	21.22	6,000	40.8	
7	A321-200 STD STD	86,882	31.49	148.121	32.22	6,000	54.9	
8	Falcons T-25-0000	12,000,000	27.49	92.424	23.71	6,000	27.2	
9	Falcons STD STD	12,000,000	28.18	81.889	21.78	6,000	27.2	
							TOTAL ACN =	5,1124

Summary Table 3: Flexible ACN at Indicated Gross Weight and Strength

No.	Aircraft Name	Gross Weight	ACN at 100 psi	ACN at 120 psi	ACN at 150 psi	ACN at 180 psi
1	B737-200 HAW	122,000	94.42	184.0	27.61	34.6
2	B737-200	122,000	91.18	184.0	28.51	40.3
3	A321-200 STD	137,000	84.99	212.0	34.58	47.9
4	A321-200 STD	141,978	82.49	172.4	27.88	36.4
5	B747-400	174,700	93.82	348.0	41.44	51.3

Εικόνα 2.7: Σύνοψη αποτελεσμάτων λογισμικού COMFAA για την εκτίμηση του δείκτη PCN

2.6. Καθορισμός του δείκτη PCN

Ο προσδιορισμός της τιμής του δείκτη PCN ενός οδοστρώματος αποτελεί την πιο απαιτητική διαδικασία της μεθόδου ACN-PCN, καθώς είναι το βασικότερο στοιχείο το οποίο προκύπτει κατά την κρίση του εκάστοτε μελετητή του οδοστρώματος. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι οι αρχές του αεροδρομίου θα πρέπει να καθορίσουν μια τέτοια τιμή του δείκτη PCN, έτσι ώστε να επιτρέπεται ικανοποιητικός αριθμός επιχειρήσεων αεροσκαφών χωρίς αδικαιολόγητη επιβάρυνση του οδοστρώματος, αλλά ταυτόχρονα να μην προσδιοριστεί και μια υπερβολικά υψηλή τιμή του δείκτη PCN, εισάγοντας έτσι μια μη ρεαλιστική δομική επάρκεια του οδοστρώματος.

Ένα εξίσου σημαντικό στοιχείο για τον δείκτη PCN – γεγονός που δεν ισχύει για τον δείκτη ACN – είναι πως απαιτείται να γίνεται επικαιροποίησή του, βάσει των παραμέτρων από τις οποίες εξαρτάται και της μεθοδολογίας υπολογισμού του. Με την πάροδο του χρόνου, αλλάζουν τα χαρακτηριστικά της γεωτεχνικής υποδομής και συγκεκριμένα η φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης, επομένως δεν νομιμοποιείται η χρήση του ίδιου δείκτη PCN. Για παράδειγμα, οι αρχές του αεροδρομίου θα πρέπει να επαναξιολογήσουν τον δημοσιευμένο δείκτη PCN ενός οδοστρώματος σε περίπτωση που παρατηρηθούν σημαντικές αλλαγές στην σύνθεση της κυκλοφορίας αεροσκαφών, καθώς ο υπάρχων δείκτης PCN είχε προσδιοριστεί με διαφορετικά δεδομένα κυκλοφορίας αεροσκαφών.

Για τον προσδιορισμό της τιμής του δείκτη PCN του οδοστρώματος ενός αεροδρομίου, ο ICAO δεν προτείνει κάποια συγκεκριμένη μεθοδολογία, αλλά επιτρέπει στις αρχές του αεροδρομίου να επιλέγουν την -κατά την κρίση τους- πιο κατάλληλη.

Εκτός από την αριθμητική τιμή του, ο δείκτης PCN ενός οδοστρώματος συνοδεύεται και από τέσσερις ακόμα παραμέτρους, καταλήγοντας σε μια έκφραση του δείκτη PCN, υιοθετώντας την παρακάτω μορφή η οποία απεικονίζεται στον Πίνακα 2.2:

Πίνακας 2.2: Μορφή έκφρασης του δείκτη PCN - Κωδικοποίηση

Δείκτης PCN	Τύπος Οδοστρώματος	Κατηγορία Εδαφικής Αντοχής	Μέγιστη Επιτρεπόμενη Πίεση Ελαστικών	Μεθοδολογία Υπολογισμού
Αριθμητική τιμή	F: Flexible R: Rigid	A: Υψηλή (CBR \geq 13%) B: Μέτρια (8% $<$ CBR $<$ 13%) C: Χαμηλή (4% $<$ CBR \leq 8%) D: Πολύ χαμηλή (CBR \leq 4%)	W: χωρίς περιορισμό X: έως 1.75 MPa Y: έως 1.25 MPa Z: έως 0.50 MPa	U: Εμπειρική T: Υπολογιστική

Τύπος οδοστρώματος: Χαρακτηρισμός του οδοστρώματος αν είναι εύκαμπτο, οπότε χρησιμοποιείται ο χαρακτήρας F (Flexible), ή δύσκαμπτο και χρησιμοποιείται ο χαρακτήρας R (Rigid) αντίστοιχα.

Κατηγορία εδαφικής αντοχής: Ανάλογα με την τιμή του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης το οδόστρωμα κατατάσσεται σε μία από τις κατηγορίες εδαφικής αντοχής (A,B,C,D), όπως ακριβώς αυτές έχουν καθοριστεί για το ACN (Πίνακας 2.1).

Μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση ελαστικών: Τα αποτελέσματα μελετών, οι οποίες έγιναν κατά τον σχεδιασμό της μεθόδου ACN-PCN, καθώς και αποτελέσματα από παλαιότερες έρευνες, επιβεβαιώνουν ότι η επίδραση της πίεσης των ελαστικών στην εντατική κατάσταση, η οποία δημιουργείται στο οδόστρωμα είναι δευτερεύουσα ως προς το φορτίο και τα διαστήματα των τροχών, με μόνη εξαίρεση κάποιες ασυνήθιστες περιπτώσεις (όπως εύκαμπτα οδοστρώματα με πολύ μικρό πάχος ασφαλτικού τάπητα ή «φτωχές» ανώτερες στρώσεις). Για το λόγο αυτό θεωρείται ικανοποιητική η κατάταξη των οδοστρωμάτων σε μία από τις τέσσερις ακόλουθες κατηγορίες (W,X,Y,Z), σύμφωνα με τη μέγιστη επιτρεπόμενη, για το οδόστρωμα, πίεση των αεροθαλάμων των τροχών:

- 1.Κατηγορία W: υψηλή, χωρίς περιορισμό πίεσης
- 2.Κατηγορία X: μέση, με μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση έως 1.75 MPa
3. Κατηγορία Y: χαμηλή, με μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση έως 1.25 MPa
4. Κατηγορία Z: πολύ χαμηλή, με μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση έως 0.5 MPa

Μεθοδολογία Υπολογισμού: Υπάρχει η περίπτωση το PCN ενός οδοστρώματος να προσδιορίζεται εμπειρικά, εάν υπάρχει εμπειρία μακράς χρήσης του αεροδρομίου από συγκεκριμένους τύπους αεροσκαφών. Στην περίπτωση αυτή το PCN χαρακτηρίζεται με τον κωδικό U (*Using aircraft method*), ενώ εάν ο προσδιορισμός έχει γίνει με κάποια υπολογιστική μέθοδο ο αντίστοιχος κωδικός είναι T (*Technical evaluation method*).

Κατά αυτόν τον τρόπο, η μέθοδος ACN-PCN χρησιμοποιεί την παραπάνω κωδικοποίηση του δείκτη PCN προκειμένου να συμπυκνωθεί όλη η απαραίτητη πληροφορία, η οποία τον χαρακτηρίζει, χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν λιγότερους χαρακτήρες. Η κωδικοποίηση αυτή αποτελείται από πέντε χαρακτήρες, διατεταγμένους με την παρακάτω σειρά και διαχωρισμένους με πλαγιοκάθετο:

PCN=Αριθμητική τιμή/Είδος οδοστρώματος/Κατηγορία εδαφικής αντοχής/Μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση ελαστικών/Μεθοδολογία υπολογισμού του δείκτη PCN

2.6.1. Εμπειρική Μέθοδος Υπολογισμού ή Εμπειρία Μακράς Χρήσης του Αεροδρομίου (Using Aircraft Method)

Η εμπειρική μέθοδος υπολογισμού αποτελεί μια απλή διαδικασία, κατά την οποία υπολογίζονται οι τιμές του δείκτη ACN για όλους τους τύπους αεροσκαφών που χρησιμοποιούν το οδόστρωμα του αεροδρομίου την δεδομένη χρονική στιγμή. Από τις τιμές αυτές επιλέγεται η μεγαλύτερη και καταχωρείται ως η τιμή του δείκτη PCN του οδοστρώματος.

Γενικά, πρόκειται για μια μέθοδο απλή στην εφαρμογή της, καθώς δεν απαιτεί λεπτομερή γνώση της διατομής του οδοστρώματος. Μάλιστα σε περίπτωση όπου δεν υπάρχουν δεδομένα για την κατηγορία εδαφικής αντοχής συνίσταται η χρήση μέτριας κατηγορίας εδαφικής αντοχής (Κατηγορία εδαφικής αντοχής B).

Παραδοχές της μεθόδου:

Μια βασική παραδοχής της εμπειρικής μεθόδου είναι ότι το οδόστρωμα έχει την δομική επάρκεια να εξυπηρετήσει όλους τους τύπους αεροσκαφών της σύνθεσης της κυκλοφορίας και ότι κάθε αεροσκάφος της σύνθεσης μπορεί να χρησιμοποιεί το οδόστρωμα χωρίς περιορισμό του φορτίου του.

Από τεχνική άποψη, η εμπειρική μέθοδος υποθέτει ότι ο αριθμός των συνολικών κινήσεων του αεροσκάφους με την μεγαλύτερη τιμή ACN αντιστοιχεί σε 10.000 καλύψεις-διελεύσεις. Τέλος, στη μέθοδο αυτή, η οποία χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των δεικτών ACN/PCN δεν

λαμβάνεται υπόψη το αεροσκάφος σχεδιασμού, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την διαστασιολόγηση του αεροδρομίου.

Ανακρίβειες της μεθόδου:

Η ακρίβεια της εμπειρικής μεθόδου βελτιστοποιείται όταν υπάρχουν διαθέσιμα λεπτομερή στοιχεία της κυκλοφορίας των αεροσκαφών. Ωστόσο, ενδέχεται να υπερεκτιμηθεί η φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος, όταν ο καθορισμός του δείκτη PCN του οδοστρώματος υπολογίζεται βάσει ενός αεροσκάφους με μεγάλη επίδραση στο οδόστρωμα, το οποίο όμως σπανίως χρησιμοποιεί το οδόστρωμα. Αντιθέτως, είναι εξίσου πιθανό να υποτιμηθεί η φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος οδηγώντας έτσι σε αντικοινωνική χρήση του οδοστρώματος, αποκλείοντας κατά αυτό τον τρόπο την εξυπηρέτηση αποδεκτών τύπων αεροσκαφών.

Παρόλο που δεν υπάρχουν ελάχιστα όρια στη συχνότητα χρήσης ενός οδοστρώματος αεροδρομίου από ένα αεροσκάφος, η αξιολόγηση του οδοστρώματος θα πρέπει να ακολουθεί μια λογική προσέγγιση, προκειμένου να μην υπερεκτιμηθεί ή υποτιμηθεί η δομική αντοχή του οδοστρώματος. Για τον λόγο αυτό, η FAA προτείνει η μέγιστη τιμή του δείκτη ACN η οποία επιλέγεται, να αντιστοιχεί στο αεροσκάφος, το οποίο χρησιμοποιεί *συστηματικά* το οδόστρωμα. Πρακτικά, αυτή η *συστηματική χρήση* αντιστοιχεί σε 1.000 ετήσιες απογειώσεις του υπ' όψιν αεροσκάφους, για μια 20-ετή περίοδο σχεδιασμού του οδοστρώματος (FAA, 2014).

2.6.2. Υπολογιστική Μέθοδος Αξιολόγησης (Technical Evaluation Method)

Η φέρουσα ικανότητα ενός οδοστρώματος είναι δύσκολο να προσδιορισθεί επακριβώς και αυτό διότι ποικίλει ανάλογα με την σύνθεση της κυκλοφορίας αεροσκαφών, την συχνότητα των διελεύσεων των αεροσκαφών και την κατηγορία εδαφικής αντοχής. Γι' αυτό το λόγο, μέσω της υπολογιστικής μεθόδου αξιολόγησης, απαιτείται ο καθορισμός των παραπάνω παραμέτρων για την ορθή εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος.

Σε γενικές γραμμές, για μια δεδομένη διατομή οδοστρώματος και ένα δεδομένο τύπο αεροσκάφους, ο αριθμός των επιτρεπόμενων διελεύσεων του αεροσκάφους θα μειωθεί καθώς αυξάνεται η καταπόνηση στο οδόστρωμα από την επιβολή του φορτίου του αεροσκάφους. Μάλιστα, είναι πολύ πιθανό δύο οδοστρώματα διαφορετικής διατομής να παρουσιάζουν παρόμοια φέρουσα ικανότητα. Ωστόσο, όμως οι επιτρεπόμενες διελεύσεις των αεροσκαφών για τα δύο αυτά οδοστρώματα θα παρουσιάζουν διαφορές.

Συμπερασματικά, όλοι οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την δομική κατάταξη ενός οδοστρώματος είναι σημαντικοί και γι' αυτό το λόγο η αξιολόγηση ενός οδοστρώματος θα πρέπει να γίνεται με εκτίμηση μιας αντιπροσωπευτικής τιμής της φέρουσας ικανότητάς του. Μια αξιολόγηση οδοστρώματος θεωρείται επιτυχής όταν περιγράφει την φέρουσα ικανότητα του, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις μεταβλητές, οι οποίες την επηρεάζουν.

Ακρίβεια της μεθόδου:

Η ακρίβεια της υπολογιστικής μεθόδου είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την εμπειρική μέθοδο αλλά απαιτεί περισσότερο χρόνο και πόρους. Η διαδικασία αξιολόγησης του οδοστρώματος μέσω της υπολογιστικής μεθόδου είναι πιθανό να περιλαμβάνει επί-τόπου αυτοψία και δοκιμές εκτίμησης της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος.

Η αξιολόγηση ενός οδοστρώματος αεροδρομίου παραπέμπει στην δομική επάρκειά του ή στο κριτήριο αστοχίας του. Ωστόσο, στα οδοστρώματα αεροδρομίων σπανίως προκύπτει ακαριαία αστοχία της διατομής τους. Συνήθως φαινόμενα όπως η αύξηση της τραχύτητας της επιφανειακής στρώσης του οδοστρώματος καθώς και ρωγμές και τροχοαυλακώσεις ευθύνονται για την μείωση του επιπέδου εξυπηρέτησης του οδοστρώματος. Επομένως, για τον καθορισμό της δομικής επάρκειας ενός οδοστρώματος δεν θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη μόνο το μέγεθος των φορτίων των αεροσκαφών αλλά η συνδυαστική επίδραση της κυκλοφορίας αεροσκαφών για την προβλεπόμενη περίοδο σχεδιασμού του οδοστρώματος. Για τον λόγο αυτό, η κατηγορία εδαφικής αντοχής αποτελεί μια σημαντική παράμετρο για τον προσδιορισμό του δείκτη PCN με την υπολογιστική μέθοδο.

Διαδικασία υπολογισμού:

Η υπολογιστική μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του δείκτη PCN απαιτεί αξιόπιστα στοιχεία της υπάρχουσας κυκλοφορίας αεροσκαφών και των χαρακτηριστικών του οδοστρώματος. Πιο συγκεκριμένα, απαιτούνται το συνολικό πάχος του οδοστρώματος και τα στοιχεία της διατομής του οδοστρώματος, προκειμένου να προσδιοριστεί το πάχος αξιολόγησης.

Ο στόχος της υπολογιστικής μεθόδου είναι να μετατραπεί η συνολική κυκλοφορία αεροσκαφών σε ισοδύναμη κυκλοφορία ενός μόνο αεροσκάφους, να καθοριστεί το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο του αεροσκάφους και να αξιολογηθούν οι τιμές του δείκτη ACN για κάθε αεροσκάφος της σύνθεσης της κυκλοφορίας, ώστε να επιλεγεί μια ρεαλιστική τιμή για τον δείκτη PCN.

Τα βήματα της υπολογιστικής μεθόδου για προσδιορισμό του δείκτη PCN σε εύκαμπτα οδοστρώματα σύμφωνα με τη μέθοδο της FAA (FAA, 2014) είναι:

1. Καθορισμός της σύνθεσης της κυκλοφορίας αεροσκαφών για την περίοδο σχεδιασμού του οδοστρώματος (*τύπος αεροσκάφους και αριθμός ετήσιων απογειώσεων/κύκλοι φόρτισης κάθε αεροσκάφους*).
2. Καθορισμός της διατομής του οδοστρώματος αξιολόγησης βάσει του αριθμού των τροχών του κύριου φορείου του αεροσκάφους.
3. Καθορισμός των χαρακτηριστικών του οδοστρώματος αξιολόγησης, συμπεριλαμβανομένης της κατηγορίας της εδαφικής αντοχής (CBR) και του πάχους αξιολόγησης.
4. Υπολογισμός του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου κάθε αεροσκάφους της σύνθεσης για τις ισοδύναμες ετήσιες απογειώσεις.
5. Υπολογισμός του δείκτη ACN για κάθε αεροσκάφος της σύνθεσης για το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο του.
6. Επιλογή του κατάλληλου δείκτη ACN, από το σύνολο των δεικτών ACN των αεροσκαφών, όπως αυτοί προέκυψαν στο βήμα 5 και ορισμός του ως δείκτη PCN.

2.6.2.1 Προσδιορισμός Οδοστρώματος Αξιολόγησης

Το οδόστρωμα αξιολόγησης αναφέρεται στην Υπολογιστική Μέθοδο προσδιορισμού του δείκτη PCN και για τον προσδιορισμό του απαιτούνται συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της διατομής του (*πάχη επιμέρους στρώσεων, χαρακτηριστικά υλικών*), καθώς επίσης και δεδομένα των αεροσκαφών της σύνθεσης της κυκλοφορίας.

Χαρακτηριστικά διατομής οδοστρώματος αξιολόγησης για εύκαμπτα οδοστρώματα – Προσδιορισμός πάχους αξιολόγησης

Για λόγους αξιολόγησης, είναι αναγκαία η μετατροπή του πραγματικού πάχους του οδοστρώματος σε μια τυπική διατομή οδοστρώματος, το οδόστρωμα αξιολόγησης. Η τυπική αυτή διατομή αποτελείται από ένα συγκεκριμένο πάχος ασφαλτικών στρώσεων, ένα συγκεκριμένο πάχος βάσης από αδρανές υλικό με CBR 80% ή μεγαλύτερο και ένα μεταβλητό πάχος υπόβασης με CBR 20% ή μεγαλύτερο.

Για τα εύκαμπτα οδοστρώματα, ορίζονται δύο διαφορετικές διατομές του οδοστρώματος αξιολόγησης, βάσει του συστήματος τροχών των αεροσκαφών:

- * Όταν κανένα αεροσκάφος της σύνθεσης της κυκλοφορίας δεν έχει πάνω από τέσσερις ή παραπάνω τροχούς στο κύριο φορείο, η διατομή η οποία χρησιμοποιείται είναι η εξής: 3 inches πάχος ασφαλικής στρώσης (Υλικό P-401) και 6 inches πάχος βάσης από θραυστό αμμοχάλικο (Υλικό P-209).
- * Όταν ένα ή περισσότερα αεροσκάφη της σύνθεσης της κυκλοφορίας έχουν τέσσερις ή παραπάνω τροχούς στο κύριο φορείο η διατομή η οποία χρησιμοποιείται είναι η εξής: 5 inches πάχος ασφαλικής στρώσης (Υλικό P-401) και 8 inches πάχος βάσης από θραυστό αμμοχάλικο (Υλικό P-209).

Πίνακας 2.3: Τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος αξιολόγησης ανάλογα με την διάταξη τροχών του αεροσκάφους (FAA, 2014)

Πάχη επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος αξιολόγησης (inches)	Λιγότερους από τέσσερις τροχούς στο κύριο φορείο	Τέσσερις ή παραπάνω τροχούς στο κύριο φορείο
Ασφαλτόμιγμα (Υλικό της FAA: P-401)	3	5
Υψηλής ποιότητας βάση από αδρανές υλικό (Υλικό της FAA: P-209)	6	8

Σε περίπτωση όπου το οδόστρωμα έχει πλεονάζον υλικό ή βελτιωμένα υλικά, το πάχος αξιολόγησης αυξάνεται χρησιμοποιώντας τους συντελεστές ισοδυναμίας του Πίνακα 2.4.

Ασφαλική στρώση: Όταν το πάχος της ασφαλικής στρώσης του οδοστρώματος είναι μεγαλύτερο από το ελάχιστο πάχος της ασφαλικής στρώσης του οδοστρώματος αξιολόγησης, τότε το πλεονάζον ασφαλικό υλικό μετατρέπεται σε επιπλέον πάχος οδοστρώματος αξιολόγησης.

Βάση: Όταν το πάχος της βάσης του οδοστρώματος, η οποία είτε αποτελείται από υψηλής ποιότητας θραυστό αμμοχάλικο είτε πρόκειται για σταθεροποιημένη βάση, είναι μεγαλύτερο από το ελάχιστο πάχος της βάσης του οδοστρώματος αξιολόγησης, τότε το πλεονάζον υλικό της βάσης μετατρέπεται σε επιπλέον πάχος αξιολόγησης. Ομοίως, επιπλέον βελτιωμένα υλικά της βάσης ενδέχεται να μετατραπούν σε ισοδύναμα υλικά της υπόβασης και να προστεθούν στο συνολικό πάχος του οδοστρώματος αξιολόγησης.

Εάν το οδόστρωμα προς αξιολόγηση είναι ανεπαρκές όσον αφορά στα ελάχιστα πάχη της ασφαλικής στρώσης (δηλαδή λιγότερο από 3 inches) ή/και της βάσης (δηλαδή λιγότερο από 6 inches), τότε το πάχος της υπόβασης μειώνεται χρησιμοποιώντας ελαφρώς πιο συντηρητικούς συντελεστές ισοδυναμίας (*FAA, 2014*).

Στην Εικόνα 2.8 απεικονίζεται η τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος για τον υπολογισμό του πάχους αξιολόγησης.



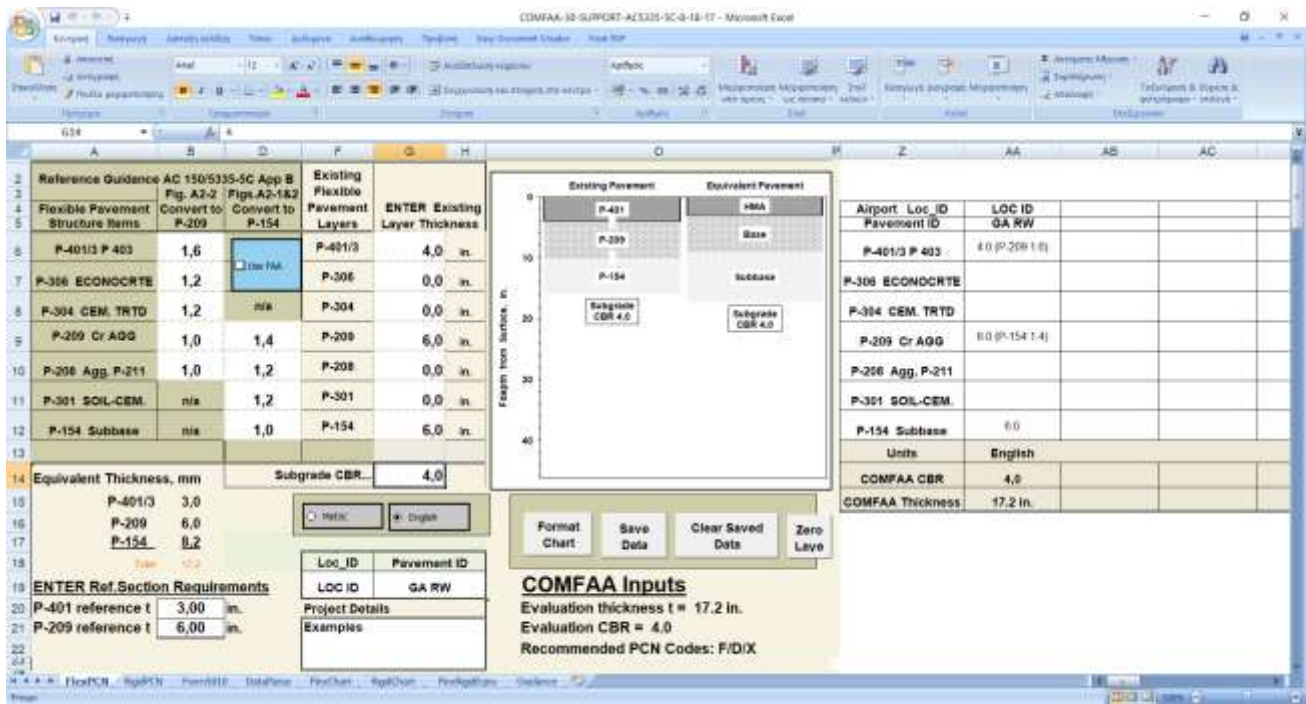
Εικόνα 2.8: Τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος για εκτίμηση πάχους αξιολόγησης

Οι συντελεστές ισοδυναμίας για εύκαμπτα οδοστρώματα συνοψίζονται στον Πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4: Εύρος τιμών των συντελεστών ισοδυναμίας για τον υπολογισμό πάχους αξιολόγησης εύκαμπτου οδοστρώματος κατά FAA (FAA, 2014)

Κατασκευαστικό Υλικό	Περιγραφή	Εύρος συντελεστών ισοδυναμίας για μετατροπή σε θραυστό αμμοχάλικο (Υλικό P-209)	Προτεινόμενη τιμή συντελεστή ισοδυναμίας για μετατροπή σε θραυστό αμμοχάλικο (Υλικό P-209)	Εύρος συντελεστών ισοδυναμίας για μετατροπή σε υλικό υπόβασης (Υλικό P-154)	Προτεινόμενη τιμή συντελεστή ισοδυναμίας για μετατροπή σε υλικό υπόβασης (Υλικό P-154)
P-401	Θερμό ασφαλτόμιγμα	1.2 έως 1.6	1.6	1.7 έως 2.3	2.3
P-403	Θερμό ασφαλτόμιγμα	1.2 έως 1.6	1.6	1.7 έως 2.3	2.3
P-306	Σταθεροποιημένη βάση από τσιμέντο	1.2 έως 1.6	1.2	1.6 έως 2.3	1.6
P-304	Σταθεροποιημένη βάση από τσιμέντο	1.2 έως 1.6	1.2	1.6 έως 2.3	1.6
P-212	Βάση (Shell base course)	—	—	—	—
P-213	Βάση από μίγμα άμμου-αργίλου	—	—	—	—
P-220	Σταθεροποιημένη βάση από τσιμέντο	—	—	—	—
P-209	Βάση από θραυστό αμμοχάλικο	1.0	1.0	1.2 έως 1.6	1.4
P-208	Βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο	1.0	1.0	1.0 έως 1.5	1.2
P-211	Βάση από ασβεστόλιθο	1.0	1.0	1.0 έως 1.5	1.2
P-154	Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο	δεν χρησιμοποιείται	—	1.0	1.0

Προς διευκόλυνση της εφαρμογής της μεθόδου δομικής κατάταξης οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACN-PCN, η FAA ανέπτυξε ένα υποστηρικτικό υπολογιστικό φύλλο (EXCEL) το οποίο ενσωματώνει τις απαιτήσεις για το οδόστρωμα αξιολόγησης και υπολογίζει το πάχος αξιολόγησης, τόσο για εύκαμπτα όσο και για δύσκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων (Εικόνα 2.9). Η υπόψη εφαρμογή ενημερώνεται περιστασιακά από την FAA.



Εικόνα 2.9: Βοηθητικό υπολογιστικό φύλλο EXCEL του λογισμικού COMFAA για τον υπολογισμό οδοστρώματος αξιολόγησης (FAA, 2014)

2.6.3. Έννοια της Ισοδύναμης Κυκλοφορίας

Η συνδυαστική επίδραση των διαφορετικών τύπων αεροσκαφών της σύνθεσης της κυκλοφορίας λαμβάνεται υπόψη μέσω του υπολογισμού του Δείκτη Αθροιστικής Φθοράς CDF (*CDF: Cumulative Damage Factor*). Πιο συγκεκριμένα, η σύνθεση της κυκλοφορίας αεροσκαφών μετατρέπεται σε ισοδύναμη κυκλοφορία ενός μόνο αεροσκάφους, του κρίσιμου αεροσκάφους. Η μετατροπή αυτή είναι απαραίτητη καθώς στην διαδικασία υπολογισμού του δείκτη ACN λαμβάνεται υπόψη ένα αεροσκάφος τη φορά. Έτσι, μετατρέποντας το σύνολο της κυκλοφορίας αεροσκαφών σε ισοδύναμη κυκλοφορία ενός κρίσιμου αεροσκάφους, καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός του δείκτη PCN, όπου και λαμβάνεται υπόψη η συνδυασμένη επίδραση των αεροσκαφών.

Σημειώνεται ότι στη μεθοδολογία καθορισμού των δεικτών ACN/PCN δεν χρησιμοποιείται το αεροσκάφος σχεδιασμού, το οποίο είναι απαραίτητο για την διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων του αεροδρομίου.

Η έννοια της ισοδύναμης κυκλοφορίας, όπως περιγράφεται παρακάτω, αναφέρεται στον προσδιορισμό του δείκτη PCN με την Υπολογιστική Μέθοδο Αξιολόγησης και μπορεί να αγνοηθεί όταν χρησιμοποιείται η Εμπειρική Μέθοδος Υπολογισμού.

Προκειμένου να προσδιοριστεί ο δείκτης PCN είναι απαραίτητο να καθοριστεί το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο (*MAGW: Maximum Allowable Gross Weigh*) κάθε αεροσκάφους της σύνθεσης. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι θα πρέπει να εξεταστούν λεπτομερώς τα χαρακτηριστικά της διατομής του οδοστρώματος προς αξιολόγηση, καθώς και οι συνθήκες φόρτισης του οδοστρώματος. Με αυτόν τον τρόπο ο αναλυτής των οδοστρωμάτων θα έχει τη δυνατότητα να εκτιμήσει έναν αξιόπιστο –από τεχνικής άποψης– δείκτη PCN (*FAA,2014*).

2.6.3.1. Ορολογία Ισοδύναμης Κυκλοφορίας

Προκειμένου να καθοριστεί ο δείκτης PCN σύμφωνα με την υπολογιστική μέθοδο, είναι απαραίτητο να αποσαφηνιστούν κοινοί όροι, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην κυκλοφορία αεροσκαφών και στη φόρτιση οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Πρόκειται για όρους όπως άφιξη, αναχώρηση, διέλευση, κάλυψη, κύκλος κυκλοφορίας και κίνηση αεροσκάφους, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την επίδραση της κυκλοφορίας αεροσκαφών στο οδόστρωμα.

Επομένως, είναι σημαντικό να καθοριστούν ποιες κινήσεις αεροσκαφών λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό των τάσεων στο οδόστρωμα και κατ' επέκταση στις διαδικασίες σχεδιασμού και αξιολόγησης οδοστρωμάτων.

Άφιξη (Προσγείωση-Landing) και Αναχώρηση (Απογείωση-Takeoff)

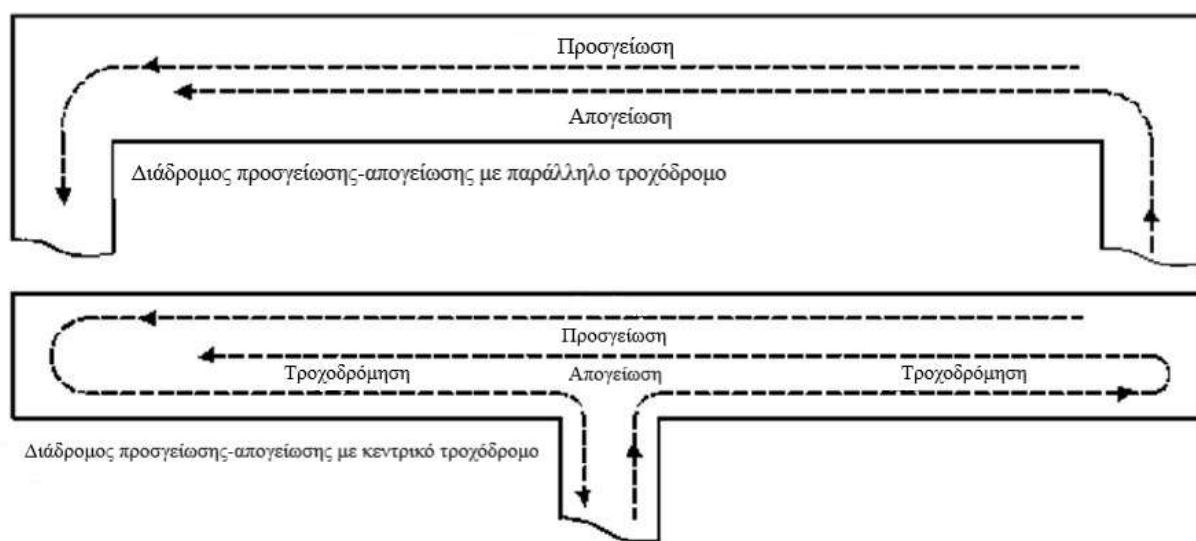
Κατά κανόνα ένα αεροσκάφος φθάνει στο αεροδρόμιο με μικρότερη ποσότητα καυσίμων από ότι αυτή, η οποία χρησιμοποιήθηκε κατά την απογείωσή του. Συνεπώς, η καταπόνηση του οδοστρώματος από το φορτίο του αεροσκάφους είναι μικρότερη κατά την προσγείωση εξαιτίας του μικρότερου φορτίου του αεροσκάφους λόγω της κατανάλωσης καυσίμων κατά τη διάρκεια της πτήσης και της ανυψωτικής ικανότητας των φτερών του. Για τον λόγο αυτό, η FAA λαμβάνει υπόψη μόνο τις απογειώσεις στον σχεδιασμό οδοστρωμάτων.

Ωστόσο, εάν δεν πραγματοποιείται ανεφοδιασμός καυσίμων για το αεροσκάφος στο αεροδρόμιο, τότε το φορτίο κατά την προσγείωση θα είναι ουσιαστικά το ίδιο με το φορτίο κατά την απογείωση

(αγνοώντας τις αλλαγές στο επιβατικό και εμπορευματικό φορτίο) και τότε η προσγείωση θα πρέπει να υπολογίζεται ως απογείωση στον κύκλο φόρτισης του οδοστρώματος. Σε αυτή την περίπτωση υπολογίζονται δύο ίσες τάσεις στο οδόστρωμα για κάθε κίνηση (αναχώρηση). Ανεξαρτήτως της μεθόδου υπολογισμού των τάσεων των φορτίων, κάθε κύκλος κυκλοφορίας αποτελείται από μια απογείωση και μια προσγείωση του ίδιου αεροσκάφους.

Διέλευση (Pass)

Μια διέλευση αποτελεί μια κίνηση του αεροσκάφους κατά μήκος του διαδρόμου προσγείωσης-απογείωσης. Ενδέχεται να είναι μια άφιξη, μια αναχώρηση, μια τροχοδρόμηση ή και οι τρεις κινήσεις μαζί, αναλόγως του μεγέθους της φόρτισης και της θέσης του τροχόδρομου. Στην Εικόνα 2.10 παρουσιάζονται τυπικές διατάξεις διαδρόμων προσγείωσης-απογείωσης, οι οποίοι είτε έχουν παράλληλο είτε κεντρικό τροχόδρομο. Στην περίπτωση παράλληλου τροχόδρομου επιτρέπεται να χρησιμοποιείται ένα πολύ μικρό τμήμα του διαδρόμου προσγείωσης-απογείωσης για τροχοδρόμηση. Αντιθέτως, η ύπαρξη κεντρικού τροχόδρομου επιτρέπει τη χρήση μεγάλου μέρους του διαδρόμου προσγείωσης-απογείωσης για τροχοδρόμηση.



Εικόνα 2.10: Σχέδια κατανομής της φόρτισης από την κίνηση των αεροσκαφών (FAA, 2014)

* Περίπτωση παράλληλου τροχόδρομου

Στην περίπτωση παράλληλου τροχόδρομου προκύπτουν δύο πιθανές συνθήκες φόρτισης. Και για τις δύο αυτές συνθήκες φόρτισης γίνεται η παραδοχή πως τόσο ο αριθμός των επιβατών όσο και το

ωφέλιμο φορτίο των εμπορευμάτων είναι περίπου τα ίδια κατά τις διαδικασίες της προσγείωσης και της απογείωσης:

1. Εάν στο αεροδρόμιο πραγματοποιείται ανεφοδιασμός με καύσιμα στο αεροσκάφος, τότε ο κύκλος κυκλοφορίας (*Traffic Cycle*) αποτελείται από μια μόνο διελευση, καθώς η φόρτιση του οδοστρώματος λόγω προσγείωσης του αεροσκάφους είναι απομειωμένη. Σε αυτή την περίπτωση προσμετράται μόνο η απογείωση του αεροσκάφους και ο λόγος διελεύσεις προς κύκλους κυκλοφορίας (P/TC) ισούται με τη μονάδα (P/TC=1).
2. Εάν στο αεροδρόμιο δεν πραγματοποιείται ανεφοδιασμός με καύσιμα στο αεροσκάφος, τότε προσμετρούνται τόσο η απογείωση όσο και η προσγείωση και ο κύκλος κυκλοφορίας αποτελείται από δύο διελεύσεις, οι οποίες προκαλούν ίσες τάσεις. Στην περίπτωση αυτή ο λόγος διελεύσεις προς κύκλους κυκλοφορίας (P/TC) ισούται με δύο (P/TC=2).

* Περίπτωση κεντρικού τροχόδρομου

Στην περίπτωση διάταξης με κεντρικό τροχόδρομο προκύπτουν επίσης, δύο πιθανές συνθήκες φόρτισης και λαμβάνεται υπόψη η ίδια παραδοχή, η οποία ισχύει και για τον παράλληλο τροχόδρομο, περί διατήρησης του ωφέλιμου φορτίου κατά τη διάρκεια του κύκλου φόρτισης:

1. Εάν στο αεροδρόμιο πραγματοποιείται ανεφοδιασμός με καύσιμα στο αεροσκάφος, τότε θα πρέπει να προσμετρούνται τόσο η απογείωση όσο και η τροχοδρόμηση για απογείωση, καθώς αποτέλεσμα των δύο αυτών κινήσεων είναι η μέγιστη φόρτιση του οδοστρώματος. Η διαδικασία της προσγείωσης μπορεί να αγνοηθεί σε αυτή την περίπτωση. Εάν και αναγνωρίζεται πως μόνο ένα κομμάτι του διαδρόμου προσγείωσης-απογείωσης χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια αυτών των κινήσεων, θεωρείται συντηρητικά πως καλύπτεται όλο το μήκος του διαδρόμου προσγείωσης-απογείωσης σε κάθε κίνηση του αεροσκάφους. Για τον λόγο αυτό, ο λόγος διελεύσεις προς κύκλους κυκλοφορίας (P/TC) ισούται με δύο (P/TC=2).
2. Εάν στο αεροδρόμιο δεν πραγματοποιείται ανεφοδιασμός με καύσιμα στο αεροσκάφος, τότε προσμετρούνται και η προσγείωση και η απογείωση του αεροσκάφους, μαζί με την τροχοδρόμησή του και ο κύκλος κυκλοφορίας αποτελείται από τρεις διελεύσεις του αεροσκάφους ίσης σημασίας. Στην περίπτωση αυτή, ο λόγος διελεύσεις προς κύκλους κυκλοφορίας (P/TC) ισούται με τρία (P/TC=3).

Μια απλούστερη, αλλά λιγότερο συντηρητική, προσέγγιση θα ήταν να θεωρηθεί ο λόγος διελύσεις προς κύκλους κυκλοφορίας (P/TC) ίσος με τη μονάδα (P/TC=1) σε όλες τις περιπτώσεις.

Καθώς κατά τη διάρκεια της προσγείωσης και της απογείωσης του αεροσκάφους, το οδόστρωμα του διαδρόμου προσγείωσης-απογείωσης δέχεται τη μέγιστη καταπόνηση στο τελευταίο 1/3 του μήκους του (ενδέχεται να είναι και το αντίθετο άκρο του διαδρόμου σε περίπτωση αλλαγής της διεύθυνσης του ανέμου), σύμφωνα με την παραπάνω παραδοχή και οι δύο κινήσεις του αεροσκάφους, προσγείωση και απογείωση, υπολογίζονται ως μία κίνηση.

Ωστόσο, προτείνεται από την FAA, οι αξιολογήσεις των οδοστρωμάτων αεροδρομίων να διεξάγονται βάσει συντηρητικών παραδοχών, οι οποίες θεωρούν ότι μία διέλευση του αεροσκάφους καλύπτει όλο το μήκος του διαδρόμου προσγείωσης-απογείωσης.

Οι λόγοι των διελύσεων προς τους κύκλους κυκλοφορίας (P/TC), οι οποίοι αντιστοιχούν σε κάθε περίπτωση συνοψίζονται στον Πίνακα 2.5.

Πίνακας 2.5: Σύνοψη τυπικών τιμών του λόγου P/TC (FAA, 2014)

Τροχόδρομος που εξυπηρετεί τον διάδρομο προσγείωσης-απογείωσης	P/TC Εφοδιασμός καυσίμων στο αεροδρόμιο (δηλαδή το μικτό βάρος απογείωσης του α/φους είναι μεγαλύτερο από το μικτό βάρος προσγείωσης του α/φους)	P/TC Μη εφοδιασμός καυσίμων στο αεροδρόμιο (δηλαδή το μικτό βάρος απογείωσης του α/φους είναι ίδιο με το μικτό βάρος προσγείωσης του α/φους)
Παράλληλος	1	2
Κεντρικός	2	3

Κάλυψη-διέλευση (Coverage)

Τα φορεία ενός αεροσκάφους σπανίως κινούνται κατά μήκος του ίδιου ίχνους οπότε ενδέχεται να χρειαστούν περισσότερες από μία διελύσεις του φορείου του αεροσκάφους ώστε ένα συγκεκριμένο σημείο του οδοστρώματος να δεχτεί τη μέγιστη επιβαλλόμενη φόρτιση. Κατά συνέπεια, μία κάλυψη-διέλευση C (Coverage) προκύπτει από έναν ορισμένο αριθμό διελύσεων αεροσκαφών (passes) και αντιστοιχεί σε μία μέγιστη φόρτιση του οδοστρώματος.

Ο απαιτούμενος αριθμός των διελύσεων αυτών εκφράζεται μέσα από τον λόγο διελύσεις προς καλύψεις (P/C: pass to coverage).

Παρόλο που ο λόγος διελεύσεις προς καλύψεις (P/C) χρησιμοποιείται τόσο για εύκαμπτα όσο και για δύσκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων παρουσιάζει μία μικρή διαφοροποίηση όσον αφορά στα εύκαμπτα οδοστρώματα λόγω της διαφορετικής απόκρισης των δύο ειδών οδοστρωμάτων στα φορτία των αεροσκαφών και στις διατάξεις των τροχών τους.

Εάν και ο αριθμός των διελεύσεων καθορίζεται βάσει παρατηρήσεων των κινήσεων των αεροσκαφών, στην πράξη οι απαιτούμενοι υπολογισμοί μέσω του λογισμικού COMFAA 3.0 πραγματοποιούνται λαμβάνοντας υπόψη τις καλύψεις-διελεύσεις. Λόγω του γεγονότος αυτού ο λόγος διελεύσεις προς καλύψεις (P/C) είναι απαραίτητος για την μετατροπή διελεύσεων σε καλύψεις-διελεύσεις. Τονίζεται πως ο λόγος αυτός είναι διαφορετικός για κάθε τύπο αεροσκάφους δεδομένου ότι κάθε αεροσκάφος αποτελείται από διαφορετικό αριθμό τροχών, διαφορετική διάταξη τροχών και επιφάνεια επαφής ελαστικών και γενικά, διαφορετικό φορτίο. Ωστόσο, ο λόγος διελεύσεις προς καλύψεις (P/C) είναι ενσωματωμένος για κάθε αεροσκάφος στα λογισμικά COMFAA 3.0 της FAA και απαιτείται μόνο ο αριθμός των διελεύσεων.

Κίνηση (Operation)

Η ερμηνεία του όρου αυτού παραμένει ασαφής όταν χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό και στην αξιολόγηση οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Ενδέχεται να προσδιορίζει μια αναχώρηση αεροσκάφους με το μέγιστο φορτίο ή μια άφιξη αεροσκάφους με το ελάχιστο φορτίο. Συχνά χρησιμοποιείται χωρίς διαφοροποίηση από τις έννοιες «διέλευση» ή «κύκλος κυκλοφορίας». Για αυτό τον λόγο, είναι σκόπιμο η έννοια αυτή, όταν χρησιμοποιείται, να συνοδεύεται από περαιτέρω πληροφορίες.

Παρόλα αυτά, το βέλτιστο είναι να προτιμούνται περισσότερο ακριβείς έννοιες.

Ετήσιες απογειώσεις και λόγος κύκλων κυκλοφορίας

Η οδηγία της FAA, όσον αφορά στον υπολογισμό των κύκλων κυκλοφορίας ενός αεροσκάφους κατά τον σχεδιασμό οδοστρωμάτων αεροδρομίων, είναι να νοούνται ως ξεχωριστές κινήσεις, η προσγείωση, η τροχοδρόμηση και η απογείωση του αεροσκάφους και να περιγράφονται με την έννοια της αναχώρησης.

Για την κατάταξη οδοστρωμάτων αεροδρομίων, όπου και καθορίζεται ο δείκτης PCN, ενδέχεται να χρειαστεί να προσαρμοστεί ο αριθμός των κύκλων κυκλοφορίας (αναχωρήσεις) ενός αεροσκάφους, σύμφωνα με τα δύο σενάρια σχετικά με την διάταξη του τροχόδρομου. Επιπλέον, απαιτείται και ο λόγος κύκλος κυκλοφορίας προς καλύψεις-διελεύσεις (TC/C) προκειμένου να οριστικοποιηθεί η έννοια της ισοδύναμης κυκλοφορίας. Μάλιστα, ο λόγος αυτός διαφέρει ανάμεσα σε εύκαμπτα και δύσκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων. Όταν πρόκειται για εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων,

ο λόγος κύκλος κυκλοφορίας προς καλύψεις-διελεύσεις (TC/C) είναι απαραίτητος, καθώς ενδέχεται κάθε κύκλος κυκλοφορίας να αποτελείται από μία ή περισσότερες διελεύσεις. Κατά κανόνα, προσμετρούνται περισσότερες από μία διελεύσεις κατά τη διάρκεια του κύκλου προσγείωσης και απογείωσης ενός αεροσκάφους, επομένως, ο λόγος κύκλος κυκλοφορίας προς καλύψεις-διελεύσεις (TC/C) απαιτείται, έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη η συνολική επίδραση στο οδόστρωμα. Το γεγονός αυτό είναι σύνηθες στην περίπτωση κεντρικών τροχόδρομων και όταν δεν πραγματοποιείται ανεφοδιασμός με καύσιμα στο αεροδρόμιο.

Ο λόγος κύκλος κυκλοφορίας προς καλύψεις-διελεύσεις (TC/C) για εύκαμπτα και δύσκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$TC/C = P/C \div P/TC \quad (2.2)$$

Όπου: TC=Κύκλοι Κυκλοφορίας

C=Καλύψεις-διελεύσεις

P=Διελεύσεις

Σημειώνεται ότι στο λογισμικό υπολογισμών COMFAA 3.0 καθορίζονται αυτομάτως οι καλύψεις-διελεύσεις βάσει των διελεύσεων και μετατρέπεται ο αριθμός των ετήσιων απογειώσεων σε καλύψεις-διελεύσεις, ενώ για να ληφθούν υπόψη τα διαφορετικά σενάρια κυκλοφορίας σε σχέση με την τροχοδρόμηση και τον ανεφοδιασμό καυσίμων, όπως αυτά περιγράφηκαν προηγουμένως, πραγματοποιείται η πράξη του πολλαπλασιασμού του αριθμού των ετήσιων απογειώσεων με τον λόγο των διελεύσεων προς τους κύκλους κυκλοφορίας (P/TC) (FAA, 2014).

2.6.3.2. Υπολογισμοί Ισοδύναμης Κυκλοφορίας

Προκειμένου να ολοκληρωθούν οι υπολογισμοί της ισοδύναμης κυκλοφορίας χρησιμοποιείται μία μεθοδολογία, η οποία βασίζεται στον Δείκτη Αθροιστικής Φθοράς CDF. Η αναλυτική αυτή διαδικασία της FAA είναι παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Η βασική διαφορά μεταξύ της αναλυτικής μεθόδου της FAA κατά τον σχεδιασμό οδοστρωμάτων αεροδρομίων και της αντίστοιχης μεθοδολογίας κατά τον υπολογισμό της ισοδύναμης κυκλοφορίας είναι ότι κατά τον σχεδιασμό η τιμή του δείκτη CDF προκύπτει από το σύνολο των διαφορετικών τύπων αεροσκαφών της κυκλοφορίας και αποτελεί το κριτήριο σχεδιασμού του οδοστρώματος, ενώ στη δεύτερη περίπτωση ο δείκτης CDF χρησιμοποιείται με σκοπό να μετατραπεί το σύνολο της κυκλοφορίας αεροσκαφών σε ισοδύναμες καλύψεις-διελεύσεις

ενός μόνο αεροσκάφους της σύνθεσης της κυκλοφορίας. Το συγκεκριμένο αεροσκάφος ορίζεται ως «κρίσιμο» αεροσκάφος ή «πιο απαιτητικό» για τον καθορισμό του δείκτη PCN.

Σύμφωνα με την αναλυτική διαδικασία της FAA, ο αριθμός των ισοδύναμων κύκλων κυκλοφορίας ενός αεροσκάφους της σύνθεσης καθορίζεται από τον αριθμό των κύκλων κυκλοφορίας του κρίσιμου αεροσκάφους, το οποίο προκαλεί την ίδια μηχανική φθορά στην στρώση έδρασης του υπόψη οδοστρώματος.

Ο Δείκτης Αθροιστικής Φθοράς CDF βασίζεται στην Αρχή Miner, σύμφωνα με την οποία η σχετική φθορά ενός οδοστρώματος ισούται με τον λόγο του αριθμού των διελεύσεων προς τις επιτρεπόμενες διελεύσεις έως την αστοχία του οδοστρώματος. Στον σχεδιασμό των οδοστρωμάτων αεροδρομίων, οι διελεύσεις των φορτίων υπολογίζονται ως καλύψεις-διελεύσεις, οπότε η σχέση υπολογισμού της ισοδύναμης κυκλοφορίας θα πρέπει αρχικά να εκφραστεί σε όρους καλύψεων-διελεύσεων.

* Δείκτης Αθροιστικής Φθοράς, ο οποίος προκύπτει από τις καλύψεις-διελεύσεις του αεροσκάφους προς μετατροπή:

$$CDF_{CNV} = \frac{C_{CNV}}{C_{CNVF}} = \frac{\text{καλύψεις-διελεύσεις του αεροσκάφους προς μετατροπή}}{\text{καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία του οδοστρώματος από το φορτίο του αεροσκάφους προς μετατροπή}} \quad (2.3)$$

* Δείκτης Αθροιστικής Φθοράς, ο οποίος προκύπτει από τις ισοδύναμες καλύψεις-διελεύσεις του κρίσιμου αεροσκάφους:

$$CDF_{CRTE} = \frac{C_{CRTE}}{C_{CRTF}} = \frac{\text{ισοδύναμες καλύψεις-διελεύσεις του κρίσιμου αεροσκάφους}}{\text{καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία του οδοστρώματος από το φορτίο του ισοδύναμου αεροσκάφους}} \quad (2.4)$$

Ο Δείκτης Αθροιστικής Φθοράς CDF είναι ένα κλάσμα της εναπομένουσας ζωής του οδοστρώματος. Συνεπώς, ο δείκτης CDF του ισοδύναμου κρίσιμου αεροσκάφους είναι ίσος με το δείκτη CDF του αεροσκάφους προς μετατροπή.

$$\text{Δηλαδή: } \frac{C_{CNV}}{C_{CNVF}} = \frac{C_{CRTE}}{C_{CRTF}} \text{ και } C_{CRTE} = \frac{C_{CRTF}}{C_{CNVF}} C_{CNV} \quad (2.5)$$

$$\text{Όμως: } TC_{CNV} = PC_{CNV} \times C_{CNV} \text{ και } TC_{CRTE} = PC_{CRTE} \times C_{CRTE}$$

Όπου:

TC_{CNV} : ο αριθμός των κύκλων κυκλοφορίας του αεροσκάφους προς μετατροπή

TC_{CRTE} : ο αριθμός των ισοδύναμων κύκλων κυκλοφορίας του αεροσκάφους προς μετατροπή ως προς τον αριθμό των κύκλων κυκλοφορίας του κρίσιμου αεροσκάφους

PC_{CNV} : ο λόγος των διελεύσεων προς τις καλύψεις-διελεύσεις του αεροσκάφους προς μετατροπή

PC_{CRT} : ο λόγος των διελεύσεων προς τις καλύψεις-διελεύσεις του κρίσιμου αεροσκάφους

Επομένως, οι ισοδύναμοι κύκλοι κυκλοφορίας του κρίσιμου αεροσκάφους, όπως προκύπτουν από τη μεθοδολογία CDF, δίνονται από την σχέση:

$$TC_{CRTE} = \frac{PC_{CRT}}{PC_{CNV}} \frac{C_{CRTF}}{C_{CNVF}} TC_{CNV} \quad (2.6)$$

Η σχέση (2.6) μπορεί να γραφεί και ως:

$$C_{CRTEI} = C_{CRTF} \times CDF_{CNVI} \quad (2.7)$$

Όπου:

C_{CRTEI} : ο αριθμός των ισοδύναμων καλύψεων-διελεύσεων του νιοστού αεροσκάφους του συνόλου των αεροσκαφών, συμπεριλαμβανομένου του κρίσιμου αεροσκάφους

CDF_{CNVI} : ο Δείκτης Αθροιστικής Φθοράς CDF του νιοστού αεροσκάφους του συνόλου των αεροσκαφών, συμπεριλαμβανομένου του κρίσιμου αεροσκάφους

Αθροίζοντας το σύνολο των αεροσκαφών της σύνθεσης της κυκλοφορίας, προκύπτει ο συνολικός αριθμός των ισοδύναμων καλύψεων-διελεύσεων του κρίσιμου αεροσκάφους, C_{CRTEI}^{Total} , ως εξής:

$$C_{CRTEI}^{Total} = \sum_{I=1}^N C_{CRTEI} = \sum_{I=1}^N C_{CRTF} \times CDF_{CNVI} = C_{CRTF} \sum_{I=1}^N CDF_{CNVI} \quad (2.8)$$

Όπου N: ο συνολικός αριθμός των αεροσκαφών της σύνθεσης, συμπεριλαμβανομένου του κρίσιμου αεροσκάφους.

Ο δείκτης αθροιστικής φθοράς της σύνθεσης της κυκλοφορίας, CDF_T , προκύπτει από τον λόγο του συνολικού αριθμού ισοδύναμων καλύψεων-διελεύσεων του κρίσιμου αεροσκάφους προς τον αριθμό των καλύψεων-διελεύσεων του κρίσιμου αεροσκάφους έως την αστοχία:

$$CDF_T = \frac{C_{CRTFTotal}}{C_{CRTF}} = \sum_{l=1}^N CDF_{CNVI} \quad (2.9)$$

Συνεπώς, ο δείκτης CDF της σύνθεσης της κυκλοφορίας είναι, εξ' ορισμού, το άθροισμα των δεικτών CDF των επιμέρους αεροσκαφών της σύνθεσης της κυκλοφορίας, συμπεριλαμβανομένου του δείκτη CDF του κρίσιμου αεροσκάφους (FAA, 2014).

2.7. Υπερφόρτωση Οδοστρωμάτων

Η υπερφόρτωση ενός οδοστρώματος μπορεί να είναι αποτέλεσμα της αύξησης του αριθμού των κινήσεων των αεροσκαφών, του φορτίου τους ή συνδυασμού και των δύο. Αν και η υπερφόρτωση των οδοστρωμάτων μειώνει τη διάρκεια ζωής τους, η εξυπηρέτηση φορτίων μεγαλύτερων από αυτά που προβλέπει ο σχεδιασμός δεν συνεπάγεται την άμεση καταστροφή τους. Συνήθως τα οδοστρώματα μπορούν να δεχθούν μια εύλογη υπερφόρτωση, η οποία θα προκαλέσει σχετικά μικρή αύξηση της φθοράς τους και ανάλογη μείωση του χρονικού διαστήματος, στο οποίο απαιτείται να συντηρηθούν.

Δεδομένου ότι στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπάρχουν συστηματικές αναλύσεις για τις ακριβείς επιπτώσεις της υπερφόρτωσης, στην πράξη μπορούν να χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα:

- * Περιστασιακές κινήσεις αεροσκαφών με ACN κατά 10% μεγαλύτερο από το PCN ευκάμπτου οδοστρώματος γενικά δεν αναμένεται να προκαλέσουν φθορά μείζονος σημασίας στο οδόστρωμα.
- * Περιστασιακές κινήσεις αεροσκαφών με ACN κατά 5% μεγαλύτερο από το PCN δύσκαμπτου οδοστρώματος γενικά δεν αναμένεται να προκαλέσουν φθορά μείζονος σημασίας στο οδόστρωμα.
- * Ο αριθμός των κινήσεων των υπέρβαρων αεροσκαφών κατ' έτος δεν πρέπει να υπερβαίνει το 5% των συνολικών ετήσιων κινήσεων που εξυπηρετεί το οδόστρωμα.
- * Η υπερφόρτωση των οδοστρωμάτων πρέπει να απαγορεύεται εάν εμφανιστούν ενδείξεις φθοράς ή αστοχίας των υλικών του οδοστρώματος. Επίσης, η υπερφόρτωση πρέπει να απαγορεύεται κατά διαστήματα, όπου το οδόστρωμα είναι περισσότερο ευάλωτο λόγω των συνθηκών που επικρατούν (παγετός, μείωση αντοχής ασύνδετων υλικών λόγω υδάτων, εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες κλπ).

Σε οδοστρώματα στα οποία πραγματοποιείται εξυπηρέτηση υπέρβαρων αεροσκαφών είναι αναγκαίο να πραγματοποιούνται τακτικοί προληπτικοί έλεγχοι, ώστε να αποφευχθεί η πιθανότητα εμφάνισης εκτεταμένων φθορών, σημαντικής μείωσης της εναπομένουσας ζωής και υπερβολικής αύξησης των απαιτήσεων συντήρησης/αποκατάστασής τους (FAA, 2014).

3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ ACR-PCR

3.1. Εισαγωγή

Το 2009, ο ICAO συνέστησε μια ομάδα μελετών με σκοπό να διερευνηθεί η αναβάθμιση της διεθνούς μεθόδου κατάταξης των οδοστρωμάτων, της μεθόδου ACN-PCN. Τα αποτελέσματα της σχετικής διερεύνησης οδήγησαν τον ICAO στην ανάπτυξη της μεθόδου ACR-PCR (*Aircraft Classification Rating – Pavement Classification Rating*) τον Μάρτιο του 2018. Η μέθοδος ACR-PCR είναι μια νέα μέθοδος δομικής κατάταξης οδοστρωμάτων αεροδρομίων, η οποία πρόκειται να τεθεί σε εφαρμογή από τις 28 Νοεμβρίου 2024. Το διάστημα ως τις 27 Νοεμβρίου 2024, αποτελεί μια μεταβατική περίοδο εναρμονισμού από τη μέθοδο ACN-PCN στην μέθοδο ACR-PCR. Για τον λόγο αυτό, προτείνεται από το ADOP (*Aerodrome Design and Operations Panel*) το παρακάτω χρονικό πλαίσιο:

- * Χρόνος ισχύος: Ιούλιος 2020. Η μέθοδος ACR-PCR αποτελεί πλέον την νέα μέθοδο δομικής αξιολόγησης οδοστρωμάτων, η οποία προτείνεται από τον ICAO. Έναρξη της φάσης εφαρμογής της μεθόδου μέσω εκπαίδευσης των χρηστών της, δηλαδή των Υπηρεσιών Πολιτικής Αεροπορίας (CAA: *Civil Aviation Authorities*), των διαχειριστών των αεροδρομίων και των κατασκευαστών αεροσκαφών.
- * Χρόνος εφαρμογής: Νοέμβριος 2024. Δημοσίευση των δεικτών ACR των αεροσκαφών από τους κατασκευαστές αεροσκαφών στο σχετικό εγχειρίδιο (ACAP: *Airplane Characteristics for Airport Planning*) και των δεικτών PCR από τις αρχές διαχείρισης του αεροδρομίου στα Έντυπα Αεροναυτικών Πληροφοριών (AIP: *Aeronautical Information Publication*).

3.2. Βασικές Έννοιες και Ορισμοί

3.2.1. Δείκτης ACR

Ο δείκτης ACR (*Aircraft Classification Rating*) είναι ένας αριθμός ο οποίος εκφράζει τη σχετική επίδραση ενός αεροσκάφους σε ένα οδόστρωμα για μια προκαθορισμένη αντοχή του εδάφους.

Αριθμητικά προσδιορίζεται ως το διπλάσιο φορτίο (σε εκατοντάδες Kgr) του μονού τροχού, ο οποίος έχει πίεση 1,50 MPa και προκαλεί την ίδια ένταση με το πραγματικό σύστημα τροχών του αεροσκάφους σε ένα οδόστρωμα πάχους ίσο με το πάχος αναφοράς.

3.2.2. Πάχος Αναφοράς

Το πάχος αναφοράς για εύκαμπτα οδοστρώματα, είναι ίσο με το συμβατικό πάχος του οδοστρώματος, το οποίο επιτρέπει 36.500 καλύψεις-διελεύσεις C του πραγματικού συστήματος τροχών του αεροσκάφους για μια συγκεκριμένη κατηγορία εδαφικής αντοχής.

3.2.3. Κατηγορίες Εδαφικής Αντοχής

Η κατηγορία εδαφικής αντοχής καθορίζεται με βάση την τιμή του μέτρου ελαστικότητας E της στρώσης έδρασης, τόσο για εύκαμπτα όσο και για δύσκαμπτα οδοστρώματα, προσδιορίζοντας, έτσι, τις παρακάτω τέσσερις κατηγορίες:

Υψηλή αντοχή (A): αντιπροσωπεύει όλες τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας E πάνω από 150 MPa, με χαρακτηριστική τιμή τα 200 MPa.

Μέτρια αντοχή (B): αντιπροσωπεύει τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας E από 100 έως 150 MPa, με χαρακτηριστική τιμή τα 120 MPa.

Χαμηλή αντοχή (C): αντιπροσωπεύει τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας E από 60 έως 100 MPa, με χαρακτηριστική τιμή τα 80 MPa.

Πολύ χαμηλή αντοχή (D): αντιπροσωπεύει όλες τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας E κάτω από 60 MPa, με χαρακτηριστική τιμή τα 50 MPa.

Οι κατηγορίες της εδαφικής αντοχής για τον υπολογισμό του δείκτη ACR συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Κατηγορίες Εδαφικής Αντοχής για τον υπολογισμό του δείκτη ACR (FAA, 2020)

Κατηγορία Εδαφικής Αντοχής	Χαρακτηριστική τιμή E psi (MPa)	Αντιπροσωπεύει τιμές E psi (MPa)	Κωδικοποίηση
Υψηλή	29008 (200)	$E \geq 21.756$ ($E \geq 150$)	A
Μέτρια	17405 (120)	$14.504 \leq E < 21.756$ ($100 \leq E < 150$)	B
Χαμηλή	11603 (80)	$8.702 \leq E < 14.504$ ($60 \leq E < 100$)	C
Πολύ χαμηλή	7252 (50)	$E < 8.702$ ($E < 60$)	D

3.2.4. Δείκτης PCR

Ο δείκτης PCR (*Pavement Classification Rating*) αποτελεί μια έκφραση της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος, η οποία εκτιμάται σε σχέση με το φορτίο, το οποίο μπορεί με ασφάλεια να φέρει για απεριόριστο αριθμό διελεύσεων. Βάσει αυτού, ο αριθμός PCR που εκφράζει τη φέρουσα ικανότητα ενός οδοστρώματος, ορίζεται ως το ACR του αεροσκάφους που προκαλεί τη μέγιστη ένταση την οποία μπορεί να δεχτεί το οδόστρωμα χωρίς περιορισμό του αριθμού των διελεύσεων του αεροσκάφους.

3.3. Βασική Αρχή της Μεθόδου ACR-PCR

Η μέθοδος ACR-PCR αναπτύχθηκε ώστε να λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο με τη μέθοδο ACN-PCN. Κατ' αναλογία με τη μέθοδο ACN-PCN, κάθε αεροσκάφος χαρακτηρίζεται από μία τιμή του δείκτη ACR, η οποία συγκρίνεται με την τιμή του δείκτη PCR του οδοστρώματος. Έτσι, λοιπόν καθίσταται δυνατή η εξυπηρέτηση του αεροσκάφους, χωρίς περιορισμό του αριθμού των διελεύσεων του, από οποιοδήποτε οδόστρωμα το οποίο χαρακτηρίζεται από ίση (ή μεγαλύτερη) τιμή του δείκτη PCR σε σχέση με την τιμή του δείκτη ACR του αεροσκάφους ($PCR_{\text{οδ/τος}} \geq ACR_{\text{α/φους}}$).

Σε διαφορετική περίπτωση, δηλαδή όταν $PCR_{\text{οδ/τος}} < ACR_{\text{α/φους}}$, θα πρέπει να επιβληθούν περιορισμοί στο αεροσκάφος (ελάττωση επιτρεπόμενου φορτίου ή/και μείωση του αριθμού των διελεύσεων).

Σε αντιστοιχία με την μέθοδο δομικής κατάταξης οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACN-PCN, η μέθοδος ACR-PCR εφαρμόζεται σε οδοστρώματα αεροδρομίων, τα οποία έχουν φέρουσα ικανότητα τέτοια ώστε να μπορούν να εξυπηρετήσουν αεροσκάφη με βάρος 12.500 pounds (5.700 kg) ή μεγαλύτερο. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή για οδοστρώματα αεροδρομίων τα οποία εξυπηρετούν αεροσκάφη με βάρος 12.500 pounds (5.700 kg) ή μικρότερο, απαιτείται να καταγράφεται η πίεση των ελαστικών και το μικτό βάρος του αεροσκάφους το οποίο επιχειρεί στο υπόψη οδόστρωμα.

3.4. Καθορισμός του δείκτη ACR

Ο ορισμός πάνω στον οποίο στηρίζεται η διαδικασία ACR-PCR, είναι ο αναφερόμενος στο προκύπτον ισοδύναμο φορτίο μονού τροχού (*DSWL: Derived Single Wheel Load*). Σύμφωνα με αυτό τον ορισμό, το ισοδύναμο φορτίο μονού τροχού DSWL, δρώντας με σταθερή πίεση 1,50 MPa και μεταβλητή ακτίνα επιφάνειας επαφής, παράγει το ίδιο εντατικό αποτέλεσμα με το πραγματικό σύστημα τροχών του αεροσκάφους σε οδόστρωμα πάχους ίσου με το πάχος αναφοράς. Ο

υπολογισμός του δείκτη ACR πραγματοποιείται για κάθε μια από τις τέσσερις κατηγορίες εδαφικής αντοχής και για δεδομένο φορτίο αεροσκάφους.

3.4.1. Προσδιορισμός Πάχους Αναφοράς

Η μέθοδος ACR-PCR οφείλει να καλύψει ένα μεγάλο πλήθος διαφορετικών τύπων αεροσκαφών με διαφορετικά φορτία, από μερικούς μέχρι αρκετές χιλιάδες τόνους. Για τον σκοπό αυτό, επιλέχθηκαν διατομές οδοστρώματων αναφοράς, τέτοιες ώστε να προσδιορίζεται το κατάλληλο πάχος αναφοράς για κάθε μία από τις κατηγορίες εδαφικής αντοχής και για την ποικιλία των φορτίων των αεροσκαφών. Ο προσδιορισμός του πάχους αναφοράς για τον υπολογισμό του δείκτη ACR σε εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων περιλαμβάνει τον καθορισμό των υλικών και των βασικών χαρακτηριστικών των επιμέρους στρώσεων. Έτσι, κάθε στρώση χαρακτηρίζεται από το μέτρο ελαστικότητας E , τον λόγο Poisson ν και το πάχος της. Εξάιρεση αποτελεί η στρώση σχεδιασμού (στρώση βάσης) για την οποία το πάχος είναι μεταβλητό. Λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές της Θεωρίας Πολλαπλών Ελαστικών Στρώσεων (*LEA: Layered Elastic Analysis*) θεωρείται ότι υπάρχει πλήρης συνεργασία μεταξύ των στρώσεων του οδοστρώματος.

Σύμφωνα με τη μέθοδο ACR-PCR, διακρίνονται οι παρακάτω διατομές οδοστρώματος αναφοράς αναλόγως του συστήματος των τροχών του αεροσκάφους (Πίνακας 3.2 & Πίνακας 3.3).

Πίνακας 3.2: Διατομή οδοστρώματος αναφοράς για τον υπολογισμό του δείκτη ACR σε εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων (Για αεροσκάφη με 2 ή λιγότερους τροχούς στα κύρια φορεία) (FAA, 2020)

Περιγραφή στρώσεων	Πάχος στρώσεων, in (mm)	E , psi (MPa)	ν
Επιφανειακή στρώση (άσφαλτος)	3 (76)	200.000 (1.379)	0,35
Βάση (θραυστό αδρανές)	μεταβλητό	$E=f(t)$	0,35
Στρώση έδρασης	άπειρο	$E=f$ (κατ.εδαφ.αντοχής)	0,35

Πίνακας 3.3: Διατομή οδοστρώματος αναφοράς για τον υπολογισμό του δείκτη ACR σε εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων (Για αεροσκάφη με περισσότερους από δύο τροχούς στα κύρια φορεία) (FAA, 2020)

Περιγραφή στρώσεων	Πάχος στρώσεων, in (mm)	E, psi (MPa)	ν
Επιφανειακή στρώση (άσφαλτος)	5 (127)	200.000 (1.379)	0,35
Βάση (θραυστό αδρανές)	μεταβλητό	$E=f(t)$	0,35
Στρώση έδρασης	άπειρο	$E=f$ (κατ.εδαφ.αντοχής)	0,35

Το ελάχιστο πάχος της μεταβλητής στρώσης (δηλαδή της βάσης) είναι 1 in (25.4 mm). Το γεγονός ότι διατίθενται δύο τυπικές διατομές οδοστρώματος αναφοράς ίσως να οδηγήσει σε μη ρεαλιστικό πάχος του οδοστρώματος αναφοράς, κυρίως, όσον αφορά στα μεγάλα φορτία αεροσκαφών. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν ακυρώνει την έννοια του δείκτη ACR, αφού το πάχος t της βάσης (στρώση σχεδιασμού) υποδηλώνει έναν δείκτη της σχετικής επίδρασης του βάρους του αεροσκάφους στην υπόψη στρώση και δεν χρησιμοποιείται ως πάχος για τον σχεδιασμό οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

3.4.1.1. Προσδιορισμός Μέτρου Ελαστικότητας Βάσης

Όλες οι διατομές των εύκαμπτων οδοστρωμάτων αναφοράς περιλαμβάνουν μια στρώση μεταβλητού πάχους πάνω από την στρώση έδρασης, η οποία είναι αντιπροσωπευτική μιας βάσης από θραυστό αδρανές υλικό. Το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης μεταβλητού πάχους δεν είναι προκαθορισμένο στη διαδικασία υπολογισμού του δείκτη ACR, αλλά είναι μια συνάρτηση του πάχους της στρώσης της βάσης και του μέτρου ελαστικότητας της υποκείμενης στρώσης, εν προκειμένω της στρώσης έδρασης.

Σύμφωνα με τις παραδοχές της Θεωρίας Πολλαπλών Ελαστικών Στρώσεων, η βάση υποδιαιρείται σε μικρότερες υπο-στρώσεις και για κάθε υπο-στρώση καθορίζεται ένα μέτρο ελαστικότητας με την επαναληπτική διαδικασία, όπως περιγράφεται παρακάτω. Ο καθορισμός των μέτρων ελαστικότητας των επιμέρους υπο-στρώσεων πραγματοποιείται μέσω υπολογιστικού προγράμματος και σύμφωνα με τις προδιαγραφές του τυπικού υλικού P-209 (θραυστό αδρανές) κατά FAA. Τα βήματα της διαδικασίας είναι τα εξής:

Βήμα 1: Καθορισμός του πλήθους N των υπο-στρώσεων

Εάν το πάχος t_B της βάσης είναι μικρότερο από 15 in (381 mm), τότε θεωρείται $N=1$ και η υποδιαίρεση σε υπο-στρώσεις δεν απαιτείται.

Εάν το πάχος t_B της βάσης είναι μεγαλύτερο ή ίσο με 15 in (381 mm), το πλήθος των υπο-στρώσεων είναι: $N = \text{int}\left(\frac{t_B}{254} + 0.5\right)$, (3.1)

όπου το πάχος t_B είναι σε mm, και η συνάρτηση int. επιστρέφει το ακέραιο μέρος (δηλαδή στρογγυλοποίηση προς τον πλησιέστερο ακέραιο αριθμό προς τα κάτω).

Βήμα 2: Καθορισμός του πάχους της κάθε υπο-στρώσης

Εάν $N=1$, τότε το πάχος της υπό-στρώσης είναι ίσο με το πάχος της βάσης t_B .

Εάν $N>1$, τότε το πάχος της τελευταίας, $N-1$ υπό-στρώσης είναι 10 in (254 mm), και το πάχος της πρώτης υπό-στρώσης είναι $t_B-(N-1)\times 10$ in (254 mm). (3.2)

Σημειώνεται ότι, γενικά, οι N υπο-στρώσεις δεν έχουν ίσα επιμέρους πάχη.

Βήμα 3: Προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας E της κάθε υπο-στρώσης

Το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται από κάτω προς τα επάνω σε μια διατομή οδοστρώματος.

Οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας δίνονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$E_n = E_{n-1} \times \{1 + [\log_{10}(t_n) - \log_{10}(25.4)] \times (c - d [\log_{10}(E_{n-1}) + \log_{10}(145.037)])\} \quad (3.3)$$

Όπου:

E_n : το μέτρο ελαστικότητας της υπόψη υπό-στρώσης σε MPa

E_{n-1} : το μέτρο ελαστικότητας της προηγούμενης υπό-στρώσης ή το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης εάν η υπόψη υπό-στρώση είναι η τελευταία υπό-στρώση

t_n : το πάχος της υπόψη υπό-στρώσης σε mm

$c = 10.52$ (σταθερά)

$d = 2.0$ (σταθερά)

Η παραπάνω εξίσωση εφαρμόζεται με επαναληπτική διαδικασία ξεκινώντας από την τελευταία υπό-στρώση.

Βήμα 4: Επαναπροσδιορισμός των μέτρων ελαστικότητας E των δύο αρχικών υπο-στρώσεων

Η διαδικασία προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας E του βήματος 3 θα πρέπει να τροποποιηθεί για τις δύο πάνω υπο-στρώσεις όταν το πάχος t_B της βάσης είναι μεταξύ 5 in (127 mm) και 10 in (254 mm).

Η μορφοποίηση αυτή γίνεται ώστε να διασφαλιστεί ότι το μέτρο ελαστικότητας είναι μια συνεχής συνάρτηση του πάχους των στρώσεων.

Εάν $N>1$ και το πάχος t_B της βάσης υπερβαίνει ένα ακέραιο πολλαπλάσιο των 10 in (254 mm) περισσότερο από 5 in (127 mm), αλλά λιγότερο από 10 in (254 mm), τότε:

1. Το πάχος της πρώτης υπό-στρώσης (υπό-στρώση N) είναι μεταξύ 5 in (127 mm) και 10 in (254 mm), και το πάχος όλων των κάτω υπο-στρώσεων (υπο-στρώσεις από 1 έως N-1) είναι 10 in (254 mm).
2. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση του βήματος 3, υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας E για την υπό-στρώση N, για υποτιθέμενο πάχος t_n της πρώτης υπό-στρώσης ίσο με 10 in (254 mm).
3. Υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας της υπό-στρώσης N-1 (δηλαδή της υπό-στρώσης ακριβώς κάτω από την αρχική υπό-στρώση), χρησιμοποιώντας την εξίσωση του βήματος 3, αλλά αντικαθιστώντας $t_n = 20 \text{ in (508 mm)} - t_N$, όπου t_N είναι το πραγματικός πάχος της αρχικής υπό-στρώσης μετρημένο σε χιλιοστά (mm).

Υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας της υπό-στρώσης N με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των μέτρων ελαστικότητας E_{N-1} (μέτρο ελαστικότητας της υπό-στρώσης N-1) και E_{254} :

$$E_N = E_{N-1} + t_N \times \frac{E_{254} - E_{N-1}}{254} \quad (3.4)$$

3.4.2. Σημεία Υπολογισμού των Παραμορφώσεων

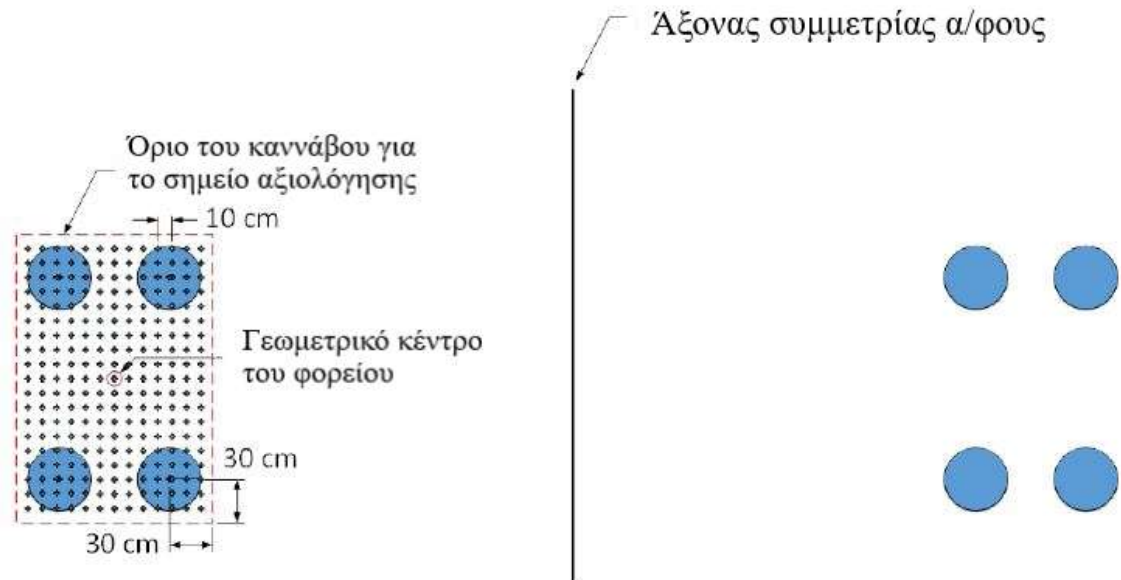
Σύμφωνα με την Θεωρία Ελαστικών Στρώσεων (LEA), η παραμόρφωση ϵ , η οποία υπολογίζεται, είναι η μέγιστη κατακόρυφη παραμόρφωση στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης.

Στο λογισμικό υπολογισμού των δεικτών ACR, ICAO-ACR 1.3, οι παραμορφώσεις υπολογίζονται σε συγκεκριμένα σημεία υπολογισμού, τα οποία βασίζονται στην γεωμετρία των φορείων των τροχών του αεροσκάφους. Τα σημεία αυτά αντιστοιχούν σε έναν ορθοκανονικό καννάβο, ο οποίος είναι παράλληλος ως προς τον άξονα συμμετρίας του αεροσκάφους και σχηματίζεται από τα εξής σημεία:

- * Σημεία, τα οποία βρίσκονται ακριβώς κάτω από το κέντρο των τροχών του αεροσκάφους
- * Σημεία του καννάβου, τα οποία απέχουν απόσταση 10 cm

Μάλιστα, διακρίνονται δύο ειδών πλέγματα, αναλόγως της πολυπλοκότητας της διάταξης των τροχών του αεροσκάφους.

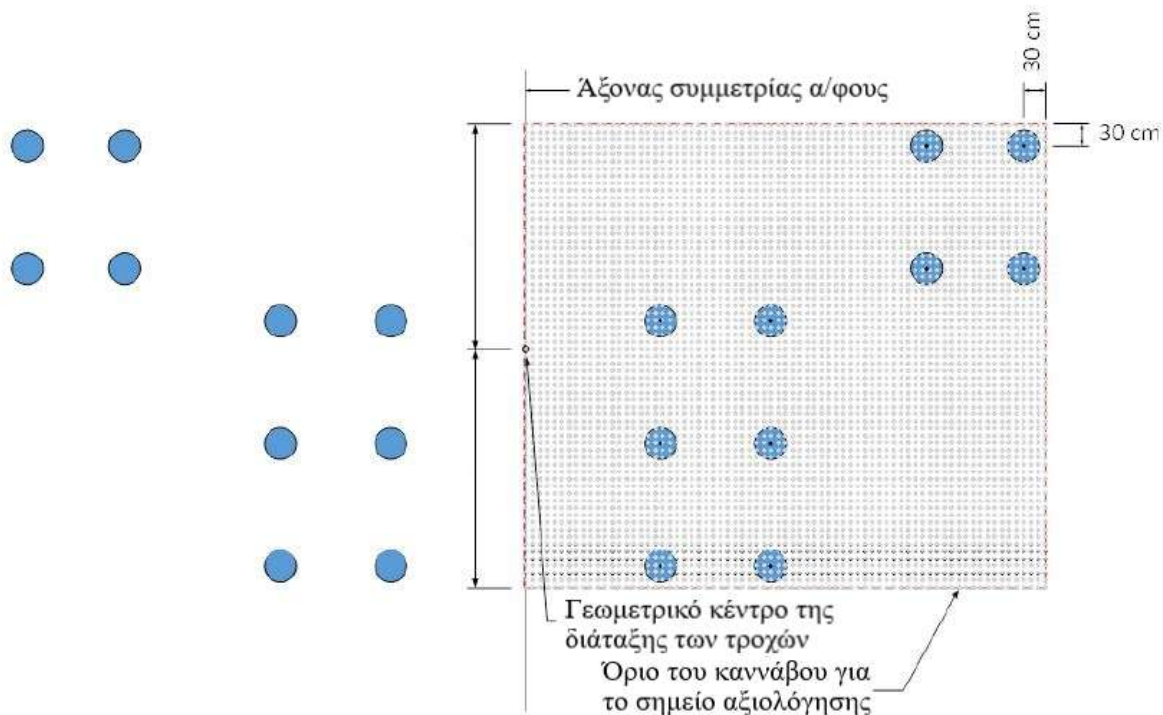
1. Για απλή διάταξη τροχών, η οποία αποτελείται από δύο φορεία τροχών, το κέντρο του καννάβου ταυτίζεται με το γεωμετρικό κέντρο του φορείου, ενώ τα όρια του καννάβου προεκτείνονται σε απόσταση 30 cm από το κέντρο του κάθε τροχού (Εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1: Καθορισμός πλέγματος για τα σημεία υπολογισμού των παραμορφώσεων για απλή διάταξη τροχών αεροσκάφους (FAA, 2020)

2. Για πολυπλοκότερες διατάξεις τροχών, οι οποίες περιλαμβάνουν πάνω από δύο φορεία τροχών, το κέντρο του καννάβου ταυτίζεται με το γεωμετρικό κέντρο ολόκληρης της διάταξης των τροχών. Ομοίως, τα όρια του καννάβου προεκτείνονται σε απόσταση 11.8 in (30 cm) από το κέντρο του κάθε εξωτερικού τροχού (Εικόνα 3.2).

Σημειώνεται ότι κατά τον υπολογισμό των συντεταγμένων του γεωμετρικού κέντρου της διάταξης, λαμβάνονται υπόψη εξίσου όλοι οι τροχοί ανεξαρτήτως των διαφορετικών φορτίων τους ή των πιέσεων των ελαστικών του.



Εικόνα 3.2: Καθορισμός πλέγματος για τα σημεία υπολογισμού των παραμορφώσεων για σύνθετη διάταξη τροχών αεροσκάφους (FAA, 2020)

3.4.3. Διαδικασία Υπολογισμού του δείκτη ACR

Η διαδικασία υπολογισμού του δείκτη ACR περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

Βήμα 1: Υπολογισμός πάχους αναφοράς

Σύμφωνα με τις απαιτήσεις του οδοστρώματος αναφοράς, οι οποίες προσδιορίζονται από τον κατασκευαστή του αεροσκάφους, υπολογίζεται το πάχος αναφοράς για δεδομένο φορτίο αεροσκάφους, συγκεκριμένη κατηγορία εδαφικής αντοχής (δηλαδή συγκεκριμένη τιμή του μέτρου ελαστικότητας E) και για 36.500 καλύψεις-διελεύσεις του αεροσκάφους. Ειδικότερα, επιλέγεται η κατάλληλη διατομή του οδοστρώματος αναφοράς (Υποκεφάλαιο 3.4.1) και λαμβάνοντας υπόψη τα σημεία υπολογισμού των παραμορφώσεων (Υποκεφάλαιο 3.4.2), υπολογίζεται η τιμή του πάχους t της βάσης (στρώση σχεδιασμού) με κριτήριο σχεδιασμού η φθορά στην στρώση έδρασης να είναι ίση με τη μονάδα ($D = 1.0$). Το συνολικό πάχος του οδοστρώματος αναφοράς αποτελεί το απαιτούμενο πάχος για τον υπολογισμό του δείκτη ACR.

Βήμα 2: Υπολογισμός Ισοδύναμου Φορτίου Μονού Τροχού DSWL

Χρησιμοποιώντας ως δεδομένο το πάχος αναφοράς και τις παραδοχές της Θεωρίας Ελαστικών Στρώσεων, προσδιορίζεται το Ισοδύναμο Φορτίο Μονού Τροχού (DSWL) για συγκεκριμένη κατηγορία εδαφικής αντοχής. Αναλυτικότερα, γίνεται προσαρμογή του Ισοδύναμου Φορτίου Μονού Τροχού, δρώντας υπό σταθερή πίεση 218 psi (1.50 MPa) και προκαλώντας φθορά ίση με τη μονάδα (CDF = 1.0) στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης για 36.500 καλύψεις-διελεύσεις του αεροσκάφους.

Βήμα 3: Υπολογισμός του δείκτη ACR

Η τιμή του δείκτη ACR, εξ ορισμού, προκύπτει ως το διπλάσιο φορτίο του μονού τροχού, $ACR=2 \times DSWL$ (σε 100 kg), για δεδομένο φορτίο αεροσκάφους και κατηγορία εδαφικής αντοχής, όπως αυτό υπολογίστηκε στο βήμα 2.

3.4.4. Λογισμικό Υπολογισμού του δείκτη ACR: ICAO-ACR 1.3

Μέσω του λογισμικού ICAO-ACR 1.3 υπολογίζονται οι τιμές των δεικτών ACR των αεροσκαφών.

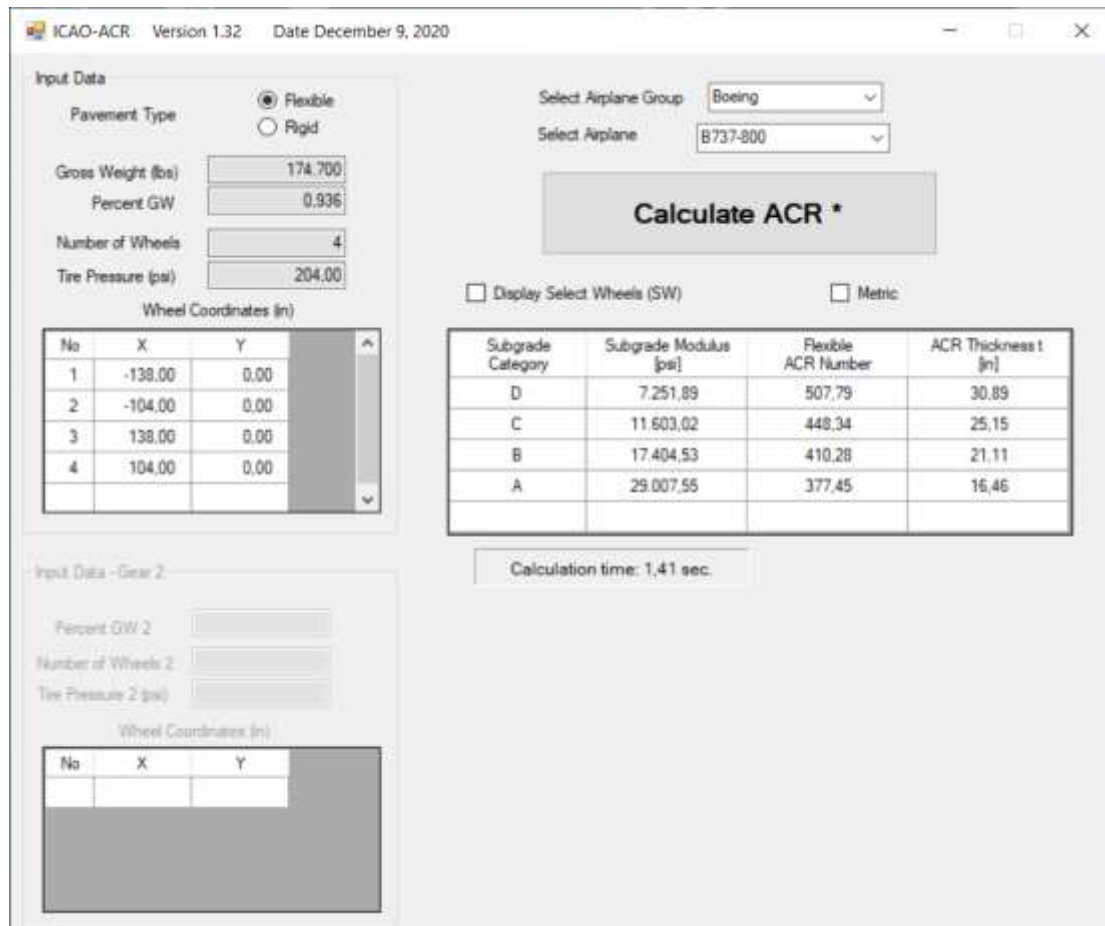
Η διαδικασία υπολογισμών πραγματοποιείται σύμφωνα με τις προτεινόμενες τροποποιήσεις από τον ICAO, οι οποίες αποσκοπούν στην αντικατάσταση της υφιστάμενης μεθόδου ACN-PCN από την νέα μέθοδο ACR-PCR.

Πρόκειται για ένα διαδραστικό λογισμικό με εύληπτη μορφή αποτελεσμάτων, όπου:

1. Ο χρήστης καθορίζει:
 - α. Το είδος του οδοστρώματος, εύκαμπτο ή δύσκαμπτο
 - β. Τον τύπο του αεροσκάφους από τις ομάδες αεροσκαφών (προσαρμόζοντας το βάρος και το ποσοστό κατανομής του βάρους στα φορεία του αεροσκάφους εφόσον είναι απαραίτητο)
2. Γίνεται υπολογισμός της τιμής του δείκτη ACR

Για κάθε μια από τις τέσσερις κατηγορίες εδαφικής αντοχής πραγματοποιείται ο υπολογισμός του δείκτη ACR, όπως αυτός περιγράφηκε στις προηγούμενες παραγράφους.

Στην Εικόνα 3.3 παρουσιάζεται το περιβάλλον του λογισμικού ICAO-ACR για τον υπολογισμό του δείκτη ACR.



Εικόνα 3.3: Περιβάλλον λογισμικού ICAO-ACR για τον υπολογισμό του δείκτη ACR

3.5. Καθορισμός του δείκτη PCR

Με τρόπο ανάλογο με τον δείκτη PCN, ο δείκτης PCR καθορίζεται από τις γνωστές πέντε παραμέτρους, οπότε και η κωδικοποίησή του εξακολουθεί να παραμένει ίδια (Πίνακας 3.4).

Η διαδικασία της επικαιροποίησης του δείκτη PCR, όπως συμβαίνει και με τον δείκτη PCN, βάσει των παραμέτρων από τις οποίες εξαρτάται και της μεθοδολογίας υπολογισμού του είναι απαραίτητη.

Πίνακας 3.4: Μορφή έκφρασης του δείκτη PCR - Κωδικοποίηση

Δείκτης PCR	Τύπος Οδοστρώματος	Κατηγορία Εδαφικής Αντοχής	Μέγιστη Επιτρεπόμενη Πίεση Ελαστικών	Μεθοδολογία Υπολογισμού
Αριθμητική τιμή	F: Flexible R: Rigid	A: Υψηλή ($E \geq 150$ MPa) B: Μέτρια ($100 \leq E < 150$ MPa) C: Χαμηλή ($60 \leq E < 100$ MPa) D: Πολύ χαμηλή ($E < 60$ MPa)	W: χωρίς περιορισμό X: έως 1.75 MPa Y: έως 1.25 MPa Z: έως 0.50 MPa	U: Εμπειρική T: Υπολογιστική

Τύπος οδοστρώματος: Χαρακτηρισμός του οδοστρώματος αν είναι εύκαμπτο, οπότε χρησιμοποιείται ο χαρακτήρας F (Flexible) ή δύσκαμπτο και χρησιμοποιείται ο χαρακτήρας R (Rigid) αντίστοιχα.

Κατηγορία εδαφικής αντοχής: Ανάλογα με το CBR της στρώσης έδρασης το οδόστρωμα κατατάσσεται σε μία από τις κατηγορίες εδαφικής αντοχής (A,B,C,D), όπως ακριβώς αυτές έχουν καθοριστεί για το ACR.

Μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση ελαστικών: Η κατηγοριοποίηση της πίεσης των ελαστικών είναι ενιαία, τόσο για εύκαμπτα όσο και για δύσκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων. Ωστόσο, η εφαρμογή της μέγιστης επιτρεπόμενης πίεσης ελαστικών διαφέρει ουσιαστικά μεταξύ των δύο ειδών οδοστρωμάτων. Οι κατηγορίες της μέγιστης επιτρεπόμενης πίεσης των ελαστικών για το οδόστρωμα, όπως αυτές καθορίζονται από τη μέθοδο ACR-PCR είναι οι εξής:

- 1.Κατηγορία W: υψηλή, χωρίς περιορισμό πίεσης
- 2.Κατηγορία X: μέση, με μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση έως 1.75 MPa
3. Κατηγορία Y: χαμηλή, με μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση έως 1.25 MPa
4. Κατηγορία Z: πολύ χαμηλή, με μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση έως 0.5 MPa

Μεθοδολογία Υπολογισμού: Υπάρχει η περίπτωση το PCR ενός οδοστρώματος να προσδιορίζεται εμπειρικά, εάν υπάρχει εμπειρία μακράς χρήσης του αεροδρομίου από συγκεκριμένους τύπους αεροσκαφών. Στην περίπτωση αυτή το PCR χαρακτηρίζεται με τον κωδικό U, ενώ εάν ο προσδιορισμός έχει γίνει με κάποια υπολογιστική μέθοδο ο αντίστοιχος κωδικός είναι T.

3.5.1. Εμπειρική Μέθοδος Υπολογισμού ή Εμπειρία Μακράς Χρήσης του Αεροδρομίου – Using Aircraft Method

Η εμπειρική μέθοδος υπολογισμού για τον προσδιορισμό του δείκτη PCR παρουσιάζεται στα παρακάτω βήματα. Με τρόπο ανάλογο για τον προσδιορισμό του δείκτη PCN, η μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιείται όταν υπάρχει περιορισμένη γνώση της υπάρχουσας κυκλοφορίας αεροσκαφών και των χαρακτηριστικών του οδοστρώματος. Η εμπειρική μέθοδος αποτελεί ιδανική επιλογή όταν εκλείπει η μηχανική ανάλυση ή όταν δεν είναι επιθυμητή κάποια ακριβέστερη διαδικασία ανάλυσης των οδοστρωμάτων του αεροδρομίου. Καθώς δεν πρόκειται για μια λεπτομερή μεθοδολογία αξιολόγησης οδοστρωμάτων, οι αρχές διαχείρισης του αεροδρομίου θα πρέπει να λαμβάνουν την δέουσα προσοχή όταν την εφαρμόζουν για τον προσδιορισμό του δείκτη PCR.

Η βασική διαδικασία προσδιορισμού του δείκτη PCR μέσω της εμπειρικής μεθόδου περιλαμβάνει τα εξής:

1. Καθορισμός του δείκτη ACR του κάθε αεροσκάφους της σύνθεσης της κυκλοφορίας.
2. Προσδιορισμός της μεγαλύτερης τιμής του δείκτη ACR ως τιμή του δείκτη PCR.

Τόσο για εύκαμπτα όσο και για δύσκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων, τα βήματα προσδιορισμού του δείκτη PCR είναι τα ακόλουθα:

1. Προσδιορισμός του είδους του οδοστρώματος (εύκαμπτο F ή δύσκαμπτο R).
2. Καθορισμός της κατηγορίας εδαφικής αντοχής ανάλογα με τα διαθέσιμα στοιχεία. Σε περίπτωση έλλειψης διαθέσιμων στοιχείων, μπορεί να γίνει παραδοχή Μέτριας (B) ή Χαμηλής (C) κατηγορίας εδαφικής αντοχής.
3. Καθορισμός του αεροσκάφους με τη μέγιστη τιμή του δείκτη ACR από όλους τους τύπους αεροσκαφών της σύνθεσης ανάλογα με το είδος του οδοστρώματος και την κατηγορία εδαφικής αντοχής, η οποία προσδιορίστηκε. Οι τιμές των δεικτών ACR των αεροσκαφών μπορούν να υπολογιστούν από το λογισμικό ICAO-ACR 1.3 ή από τα κατάλληλα διαγράμματα με τις τιμές των δεικτών ACR, τα οποία παρέχονται στα εγχειρίδια των κατασκευαστών των αεροσκαφών (*ACAP: Airplane Characteristics for Airport Planning*). Οι τιμές των δεικτών ACR για κάθε τύπο αεροσκάφους συγκρίνονται για την ίδια κατηγορία εδαφικής αντοχής και για το μέγιστο φορτίο λειτουργίας του αεροσκάφους, σύμφωνα με διαθέσιμα στοιχεία. Σε περίπτωση έλλειψης στοιχείων, χρησιμοποιείται το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο του αεροσκάφους, το οποίο είναι είτε δημοσιευμένο στα εγχειρίδια των αεροσκαφών είτε μπορεί να εκτιμηθεί.

Ως τιμή του δείκτη PCR καθορίζεται η τιμή του δείκτη ACR του αεροσκάφους με τη μέγιστη τιμή του δείκτη ACR, το οποίο χρησιμοποιεί «συστηματικά» το οδόστρωμα. Σημειώνεται ότι, σύμφωνα με τη FAA, ένα αεροσκάφος θεωρείται πως κάνει «συστηματική χρήση» του οδοστρώματος όταν για την περίοδο σχεδιασμού του οδοστρώματος (20 έτη) οι καλύψεις-διελεύσεις του αεροσκάφους υπερβαίνουν τις χίλιες (1.000).

4. Προσδιορισμός της αριθμητικής τιμής του δείκτη PCR ως μέγιστη τιμή των δεικτών ACR των αεροσκαφών της σύνθεσης και χρήση των κατάλληλων χαρακτήρων για την κατηγορία πίεσης των ελαστικών και της μεθοδολογίας υπολογισμού του δείκτη PCR.

Η αριθμητική τιμή του δείκτη PCR μπορεί να προσαρμοστεί προς τα πάνω ή προς τα κάτω

ανάλογα με την κρίση των αρχών διαχείρισης του αεροδρομίου. Η προσαρμογή αυτή δεν ακολουθεί συγκεκριμένη πρακτική, ωστόσο ενδέχεται να πραγματοποιηθεί λόγω τοπικών περιορισμών, παραχωρήσεων άδειας σε συγκεκριμένους τύπους αεροσκαφών ή λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση του οδοστρώματος.

5. Προσδιορισμός της κατηγορίας της μέγιστης επιτρεπόμενης πίεσης των ελαστικών (W, X, Y ή Z). Η επιλογή της κατηγορίας θα πρέπει να αντιπροσωπεύει την μέγιστη πίεση ελαστικών, την οποία δέχεται το οδόστρωμα από τον στόλο των αεροσκαφών. Για εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων, εάν δεν υπάρχει υψηλότερη πίεση ελαστικών πέρα από την παρατηρηθείσα, τότε προτείνεται η χρήση της κατηγορίας X (μέση κατηγορία). Καθώς τα δύσκαμπτα οδοστρώματα, λόγω της στρώσης σκυροδέματος, είναι πιο ανθεκτικά στις πιέσεις των ελαστικών, στην περίπτωση αυτή, προτείνεται η χρήση της κατηγορίας W (υψηλή κατηγορία).
6. Προσδιορισμός της μεθοδολογίας υπολογισμού του δείκτη PCR. Επειδή χρησιμοποιείται η εμπειρική μέθοδος, η μεθοδολογία υπολογισμού χαρακτηρίζεται από τον κωδικό U.

3.5.2. Υπολογιστική Μέθοδος Αξιολόγησης – Technical Evaluation Method

Σε αντιστοιχία με τα όσα έχουν αναφερθεί για τον προσδιορισμό του δείκτη PCN με την υπολογιστική μέθοδο, έτσι και για τον προσδιορισμό του δείκτη PCR ισχύουν οι ίδιες προϋποθέσεις εφαρμογής της υπολογιστικής μεθόδου, καθώς και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της.

Προκειμένου, λοιπόν, να προσδιοριστεί η φέρουσα ικανότητα ενός οδοστρώματος αεροδρομίου δεν αρκεί μόνο να καθοριστεί το μέγεθος των φορτίων που δέχεται αλλά και η συνδυαστική επίδραση της σύνθεσης της κυκλοφορίας αεροσκαφών κατά τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος.

Επομένως, για να εκτιμηθεί μία τιμή του δείκτη PCR λαμβάνονται υπόψη πληροφορίες όπως:

(1) η σύνθεση της κυκλοφορίας αεροσκαφών και η συχνότητα των διελεύσεών τους, (2) τα πάχη, τα υλικά και η δομική αντοχή των επιμέρους στρώσεων και (3) το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης.

Προτεινόμενη διαδικασία για τον προσδιορισμό του δείκτη PCR με την Υπολογιστική Μέθοδο

Η διαδικασία υπολογισμού του δείκτη PCR ενός οδοστρώματος βασίζεται στον προσδιορισμό του δείκτη ACR ενός αεροσκάφους της σύνθεσης της κυκλοφορίας. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται τα βήματα τα οποία ακολουθούνται προκειμένου να μετατραπεί το σύνολο της κυκλοφορίας

αεροσκαφών σε ισοδύναμη κυκλοφορία ενός μόνο αεροσκάφους, ή αλλιώς του αεροσκάφους αναφοράς, το οποίο έχοντας το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο παράγει φθορά ίση με τη μονάδα ($CDF=1$) στη στρώση έδρασης του οδοστρώματος προς αξιολόγηση.

Τα βήματα προσδιορισμού του δείκτη ACR ακολουθούν την διαδικασία η οποία περιγράφεται στο *Υποκεφάλαιο 3.4*. Για τον υπολογισμό του δείκτη PCR λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος και οι προβλέψεις για την κυκλοφορία αεροσκαφών για την επιθυμητή περίοδο σχεδιασμού του οδοστρώματος.

Η περίοδος σχεδιασμού του οδοστρώματος θα πρέπει να αντανakλά την περίοδο σχεδιασμού για νέα οδοστρώματα και την εναπομένουσα ζωή για υφιστάμενα οδοστρώματα. Επομένως, ο δείκτης PCR έχει ισχύ μόνο για την συγκεκριμένη περίοδο και άρα απαιτείται επικαιροποίηση του δείκτη PCR μετά από διαδικασίες αποκατάστασης του οδοστρώματος ή μετά από αλλαγές στη σύνθεση της κυκλοφορίας αεροσκαφών.

Η διαδικασία προσδιορισμού του δείκτη PCR περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. Συλλογή στοιχείων για το οδόστρωμα προς αξιολόγηση (πάχη, μέτρα ελαστικότητας και λόγος Poisson επιμέρους στρώσεων, υφιστάμενη ή προβλεπόμενη κυκλοφορία αεροσκαφών) χρησιμοποιώντας τις καλύτερες δυνατές διαθέσιμες πηγές πληροφοριών.
2. Καθορισμός της σύνθεσης της κυκλοφορίας βάσει των τύπων των αεροσκαφών, του αριθμού των ετήσιων απογειώσεων και του βάρους των αεροσκαφών που αναμένεται να εξυπηρετηθούν από το οδόστρωμα κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού του ή της προβλεπόμενης εναπομένουσας ζωής του.
Σημειώνεται πως σύμφωνα με τις παραδοχές της FAA, οι διελεύσεις των αεροσκαφών ακολουθούν κανονική (ή γκαουσιανή) κατανομή, με τυπική απόκλιση $s=30,54$ inches (776mm), ανεξαρτήτως του τύπου του αεροσκάφους.
3. Υπολογισμός του δείκτη ACR για κάθε τύπο αεροσκάφους της σύνθεσης της κυκλοφορίας για το φορτίο λειτουργίας του και καταγραφή της μεγαλύτερης τιμής των υπόψη δεικτών ACR.
4. Υπολογισμός της μέγιστης τιμής του Δείκτη Αθροιστικής Φθοράς CDF της σύνθεσης της κυκλοφορίας αεροσκαφών και καταγραφή της τιμής του.

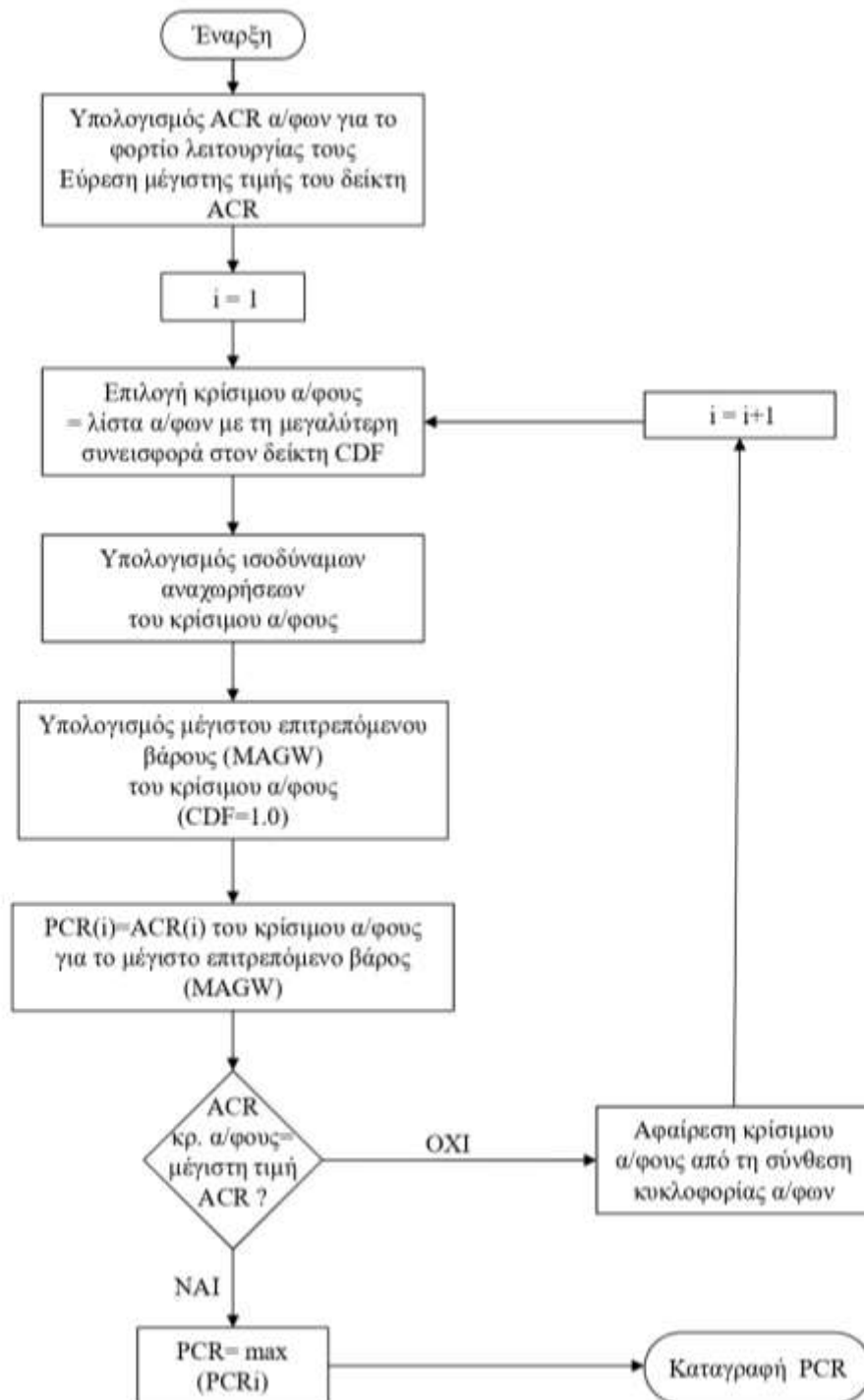
Σημειώνεται πως ο υπολογισμός του Δείκτη Αθροιστικής Φθοράς CDF πραγματοποιείται σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας, το οποίο λήφθηκε υπόψη κατά τον σχεδιασμό του οδοστρώματος.

5. Επιλογή του αεροσκάφους με τη μεγαλύτερη συνεισφορά στον Δείκτη Αθροιστικής Φθοράς CDF και ορισμός του ως κρίσιμο αεροσκάφος. Απαλοιφή όλων των υπόλοιπων αεροσκαφών της σύνθεσης της κυκλοφορίας, εκτός του κρίσιμου αεροσκάφους.
6. Προσαρμογή των ετήσιων απογειώσεων του κρίσιμου αεροσκάφους έως ότου η μέγιστη φθορά την οποία προκαλεί το κρίσιμο αεροσκάφος να είναι ίση με την μέγιστη τιμή του Δείκτη Αθροιστικής Φθοράς της σύνθεσης αεροσκαφών, όπως αυτή υπολογίστηκε στο βήμα 4, και καταγραφή των υπόψη ετήσιων απογειώσεων.
7. Προσαρμογή του φορτίου του κρίσιμου αεροσκάφους, ώστε να προκαλείται φθορά στο οδόστρωμα ίση με τη μονάδα ($CDF=1$) για τον αριθμό των ετήσιων απογειώσεων, οι οποίες υπολογίστηκαν στο βήμα 6. Πρόκειται για το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο του κρίσιμου αεροσκάφους MAGW.
8. Υπολογισμός του δείκτη ACR για το κρίσιμο αεροσκάφος και για το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο του (MAGW). Η τιμή του δείκτη ACR καταγράφεται ως τιμή για τον δείκτη PCR(i).
9. Εάν η υπολογισθείσα τιμή ACR του κρίσιμου αεροσκάφους (με μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο) ταυτίζεται με τη μέγιστη τιμή του δείκτη ACR για το ίδιο αεροσκάφος (με το φορτίο λειτουργίας), η οποία υπολογίστηκε στο βήμα 3, τότε η τιμή αυτή καταγράφεται ως τιμή για τον δείκτη PCR του οδοστρώματος.
10. Διαφορετικά, απαλείφεται το κρίσιμο αεροσκάφος από τη σύνθεση των αεροσκαφών και δημιουργείται ένα απομειωμένο σύνολο αεροσκαφών.
11. Υπολογισμός της μέγιστης τιμής του Δείκτη Αθροιστικής Φθοράς CDF για την απομειωμένη σύνθεση αεροσκαφών και επιλογή νέου κρίσιμου αεροσκάφους.
12. Επανάληψη των βημάτων 5-9 για το νέο κρίσιμο αεροσκάφος.
Στο βήμα 6, χρησιμοποιείται η μέγιστη τιμή του Δείκτη Αθροιστικής Φθοράς CDF, η οποία αναφέρεται στην αρχική σύνθεση της κυκλοφορίας αεροσκαφών, προκειμένου να υπολογιστούν οι ισοδύναμες ετήσιες απογειώσεις για την απομειωμένη σύνθεση αεροσκαφών.

13. Ως τιμή του δείκτη PCR του οδοστρώματος ορίζεται η μέγιστη τιμή των δεικτών PCR(i) της παραπάνω επαναληπτικής διαδικασίας.

Ο λόγος ύπαρξης των βημάτων 10-12 είναι για να ληφθούν υπόψη σενάρια κυκλοφορίας διάφορων τύπων αεροσκαφών, όπως για παράδειγμα περιπτώσεις μικρού ή μεσαίου μεγέθους αεροσκαφών με μεγάλο αριθμό ετήσιων απογειώσεων (όπως ο τύπος αεροσκάφους B737) ή μεγάλων αεροσκαφών με σχετικά μικρό αριθμό ετήσιων απογειώσεων (όπως ο τύπος αεροσκάφους B777).

Χωρίς αυτά τα βήματα, τα μικρότερου μεγέθους αεροσκάφη, ως επί το πλείστον, θα χαρακτηρίζονταν ως κρίσιμα αεροσκάφη, με αποτέλεσμα να επιβάλλονται παράλογοι περιορισμοί στα φορτία των μεγαλύτερων αεροσκαφών της σύνθεσης της κυκλοφορίας, δεδομένου ότι η κυκλοφορία σχεδιασμού έχει ήδη συμπεριλάβει τα φορτία των βαρύτερων αεροσκαφών (FAA, 2020).



Εικόνα 3.4: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας υπολογισμού του δείκτη PCR (FAA, 2020)

3.5.3. Λογισμικό Υπολογισμού του δείκτη PCR: FAARFIELD 2.0

Το λογισμικό FAARFIELD (*FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design*), παρόλο που εισήχθη ως λογισμικό σχεδιασμού και ανάλυσης οδοστρωμάτων αεροδρομίων από την FAA, στην πιο πρόσφατη έκδοση του (FAARFIELD 2.0) έχει ενσωματωθεί και η διαδικασία υπολογισμού του δείκτη PCR.

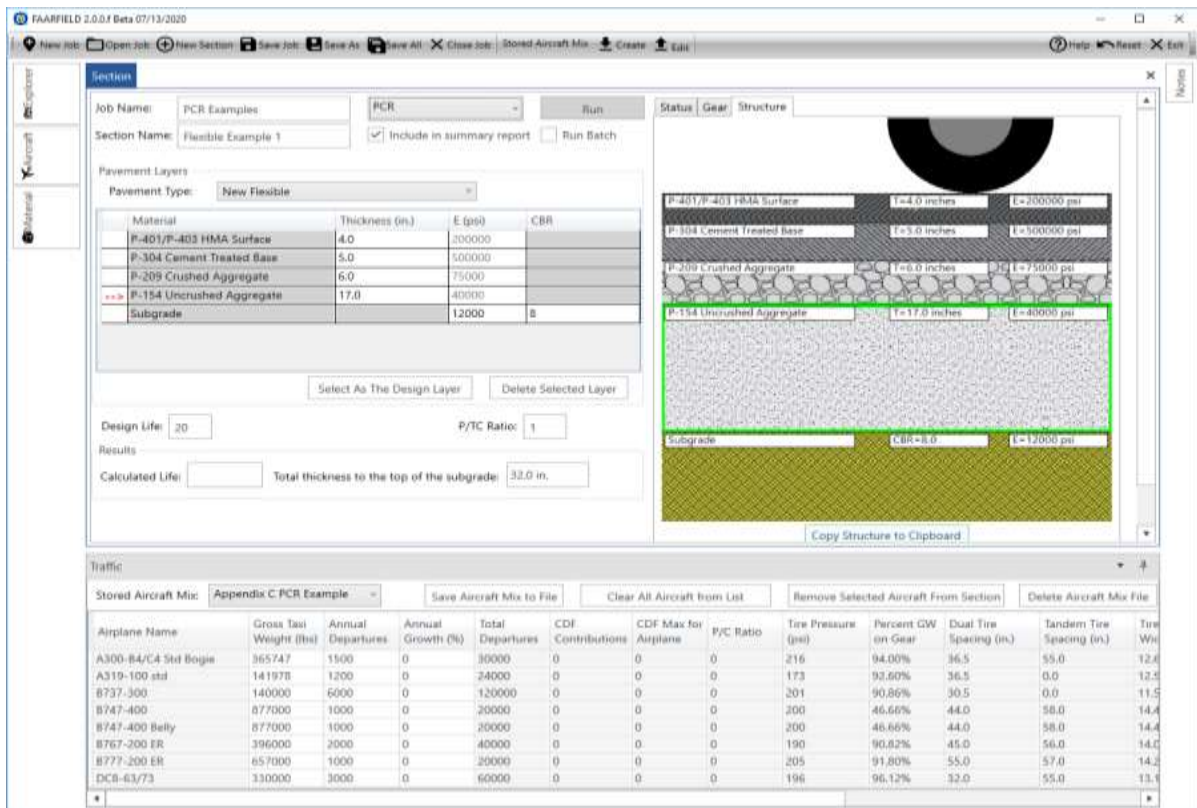
Πιο συγκεκριμένα:

1. Ο χρήστης:

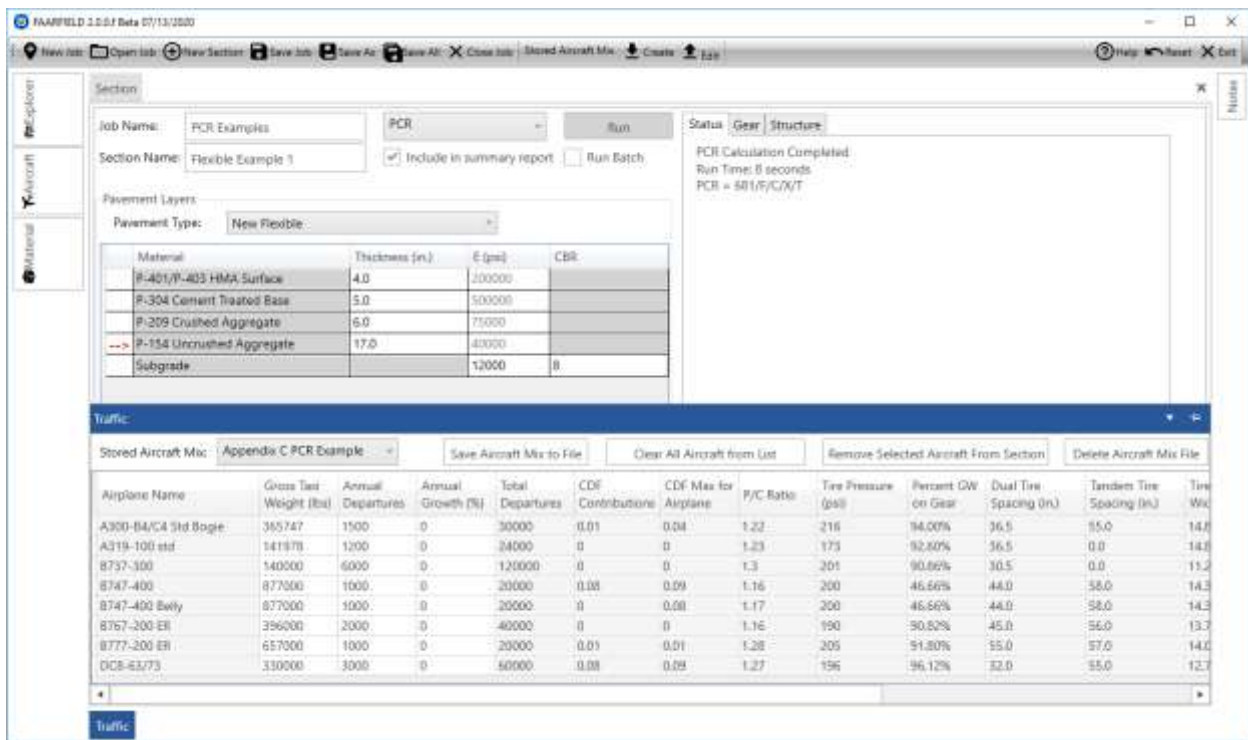
- α. Επιλέγει την λειτουργία «PCR» από τις διατιθέμενες επιλογές του λογισμικού
- β. Εισάγει τα χαρακτηριστικά της διατομής του οδοστρώματος (υλικά στρώσεων, πάχη επιμέρους στρώσεων, κατηγορία εδαφικής αντοχής)
- γ. Καθορίζει τη σύνθεση της κυκλοφορίας των αεροσκαφών από την διατιθέμενη βάση δεδομένων αεροσκαφών
- δ. Επιβεβαιώνει (ή τροποποιεί) τα χαρακτηριστικά του κάθε αεροσκάφους της σύνθεσης
- ε. Εισάγει τον ετήσιο αριθμό απογειώσεων

2. Γίνεται υπολογισμός της τιμής του δείκτη PCR

Στην Εικόνα 3.5 παρουσιάζεται το περιβάλλον εργασίας του λογισμικού FAARFIELD 2.0 για την εκτίμηση του δείκτη PCR, ενώ στην Εικόνα 3.6 παρουσιάζεται η σύνοψη των αποτελεσμάτων του υπόψη λογισμικού.



Εικόνα 3.5: Περιβάλλον εργασίας λογισμικού FAARFIELD για την εκτίμηση του δείκτη PCR (FAA, 2020)



Εικόνα 3.6: Σύνοψη αποτελεσμάτων λογισμικού FAARFIELD για την εκτίμηση του δείκτη PCR (FAA, 2020)

3.6. Υπερφόρτωση Οδοστρωμάτων

Στη διάρκεια ζωής του, ένα οδόστρωμα αεροδρομίου είναι πιθανό να δεχθεί μεγαλύτερα φορτία από την υφιστάμενη ή την μελλοντική κυκλοφορία αεροσκαφών, τα οποία υπερβαίνουν τα φορτία αξιολόγησής του. Σύμφωνα με τον ICAO, προτείνεται μια απλοποιημένη μέθοδος, ώστε να ληφθούν υπόψη σενάρια υπερφόρτωσης των οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Η μέθοδος αυτή αφορά σε σενάρια κυκλοφορίας αεροσκαφών, στα οποία ένας μικρός ή περιορισμένος αριθμός αεροσκαφών της σύνθεσης της κυκλοφορίας αποτελείται από τιμές του δείκτη ACR, οι οποίες υπερβαίνουν την τιμή του δείκτη PCR του οδοστρώματος.

Είναι λογικό πως φορτία αεροσκαφών, τα οποία είναι μεγαλύτερα από την καθορισμένη τιμή του δείκτη PCR, απομειώνουν την εναπομένουσα ζωή του οδοστρώματος. Με εξαίρεση το σενάριο της μαζικής υπερφόρτωσης ενός οδοστρώματος αεροδρομίου, τα οδοστρώματα δεν αστοχούν ακαριαία.

Επομένως, ενώ η υπερφόρτωση των οδοστρωμάτων είναι υπό προϋποθέσεις αποδεκτή, ωστόσο, αναμένεται μείωση της διάρκειας ζωής τους.

Οι παρακάτω οδηγίες μπορούν να εφαρμοστούν στην πράξη, κατά τη διαδικασία αξιολόγησης ενός οδοστρώματος αεροδρομίου (FAA, 2020):

- * Περιστασιακές κινήσεις αεροσκαφών με ACR κατά 10% μεγαλύτερο από το PCR ενός ευκάμπτου ή δύσκαμπτου οδοστρώματος γενικά δεν αναμένεται να προκαλέσουν φθορά μείζονος σημασίας στο οδόστρωμα.
- * Ο αριθμός των κινήσεων των υπέρβαρων αεροσκαφών κατ' έτος δεν πρέπει να υπερβαίνει το 5% των συνολικών ετήσιων κινήσεων που εξυπηρετεί το οδόστρωμα.
- * Η υπερφόρτωση των οδοστρωμάτων πρέπει να απαγορεύεται εάν εμφανιστούν ενδείξεις φθοράς ή αστοχίας των υλικών του οδοστρώματος. Επίσης, η υπερφόρτωση πρέπει να απαγορεύεται κατά διαστήματα, όπου το οδόστρωμα είναι περισσότερο ευάλωτο λόγω των συνθηκών που επικρατούν (παγετός, μείωση αντοχής ασύνδετων υλικών λόγω υδάτων, εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες κλπ).
- * Σε οδοστρώματα, στα οποία πραγματοποιείται εξυπηρέτηση υπέρβαρων αεροσκαφών είναι αναγκαίο να πραγματοποιούνται τακτικοί προληπτικοί έλεγχοι, ώστε να αποφευχθεί η πιθανότητα εμφάνισης εκτεταμένων φθορών, σημαντικής μείωσης της εναπομένουσας ζωής και υπερβολικής αύξησης των απαιτήσεων συντήρησης/αποκατάστασής τους.

4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΑΡΧΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΔΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ

Παρόλο που η λογική των δύο μεθόδων δομικής κατάταξης οδοστρωμάτων αεροδρομίων, ACN-PCN και ACR-PCR είναι η ίδια, όσον αφορά στην σύγκριση των δύο δεικτών, ωστόσο εντοπίζονται κάποιες διαφορές στις βασικές αρχές τους. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στην προσπάθεια εκσυγχρονισμού της υφιστάμενης μεθόδου δομικής κατάταξης οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACN-PCN με τις διεθνείς πρακτικές σχεδιασμού και ανάλυσης των οδοστρωμάτων, οι οποίες βασίζονται στην Θεωρία Πολλαπλών Ελαστικών Στρώσεων (ML^2EA), με γνώμονα να παραμείνει αναλλοίωτη η βασική αρχή της μεθόδου.

Πράγματι, η μέθοδος CBR στην οποία στηρίζεται η μέθοδος ACN-PCN δεν χρησιμοποιείται πλέον καθώς περιλαμβάνει εμπειρικές μεθόδους υπολογισμού με αποτέλεσμα να μην αντανακλάται η πραγματική μηχανική συμπεριφορά του οδοστρώματος.

Στον Πίνακα 4.1 συνοψίζονται οι μέθοδοι υπολογισμού και ανάλυσης οδοστρωμάτων αεροδρομίων τόσο για τον σχεδιασμό όσο και για την δομική κατάταξή τους.

Πίνακας 4.1: Σύνοψη μεθόδων υπολογισμού και ανάλυσης οδοστρωμάτων αεροδρομίων (Fabre C., 2017)

Μέθοδος Σχεδιασμού Οδοστρωμάτων Αεροδρομίων	Μέθοδος Δομικής Κατάταξης Οδοστρωμάτων Αεροδρομίων
CBR έως 2004	Βασισμένη στη μέθοδο CBR από το 1983
ML^2EA από 2004 (ΗΠΑ), 2014 (Γαλλία)	Βασισμένη στην ML^2EA από το 2020

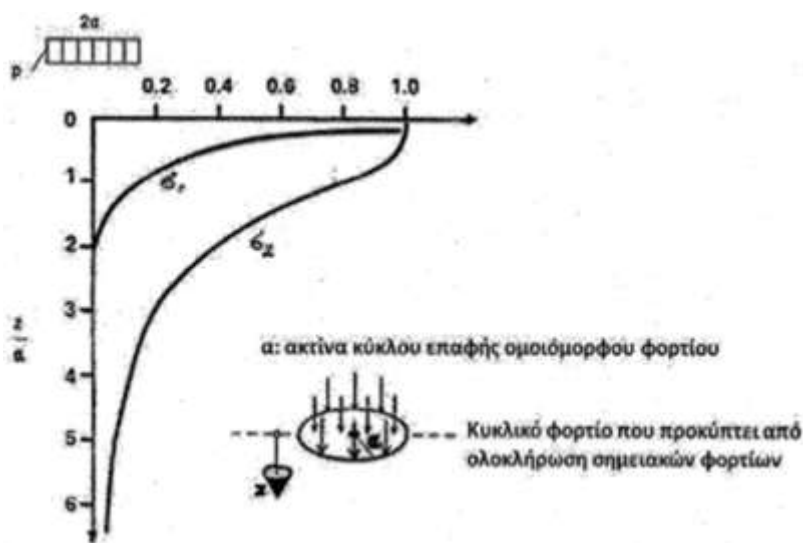
Αναλυτικότερα, σύμφωνα με την βιβλιογραφία εντοπίζονται οι παρακάτω διαφορές ως προς τις βασικές αρχές των δύο μεθόδων δομικής κατάταξης οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

1. Μέθοδος ανάλυσης οδοστρώματος - Μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης

Μέθοδος ACN-PCN: Η μέθοδος ACN-PCN βασίζεται στην εμπειρική μέθοδο CBR (Υποκεφάλαιο 2.4.1), η οποία βασίζεται κατεξοχήν στη φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης και οι απαιτούμενοι υπολογισμοί πραγματοποιούνται σύμφωνα με τις εξισώσεις του Boussinesq για τάσεις και παραμορφώσεις σε ομογενή, ισότροπο ελαστικό ημίχωρο κάτω από φορτιζόμενη επιφάνεια.

Η θεωρία Boussinesq, γνωστή και από την εδαφομηχανική, αναπτύχθηκε στο τέλος του 19^{ου} αιώνα (1875). Οι αναπτυσσόμενες τάσεις κατά Boussinesq είναι συνάρτηση του ομοιόμορφου φορτίου (q), του βάθους (z) και της ακτίνας επαφής του ομοιόμορφου φορτίου (a), ενώ οι παραμορφώσεις εξαρτώνται, εκτός των προαναφερθέντων παραμέτρων, και από το μέτρο ελαστικότητας (E) και τον λόγο Poisson (ν).

Η επίδραση της κυκλοφορίας αεροσκαφών λαμβάνεται υπόψη μέσω της μετατροπής των διελεύσεων όλων των αεροσκαφών σε ισοδύναμες διελεύσεις του κρίσιμου αεροσκάφους, μέσω της έννοιας της ισοδύναμης κυκλοφορίας (Υποκεφάλαιο 2.6.3).



Εικόνα 4.1: Αναπτυσσόμενες τάσεις κατά Boussinesq - Κυκλικό φορτίο
(Λοΐζος και Πλατή, 2018)

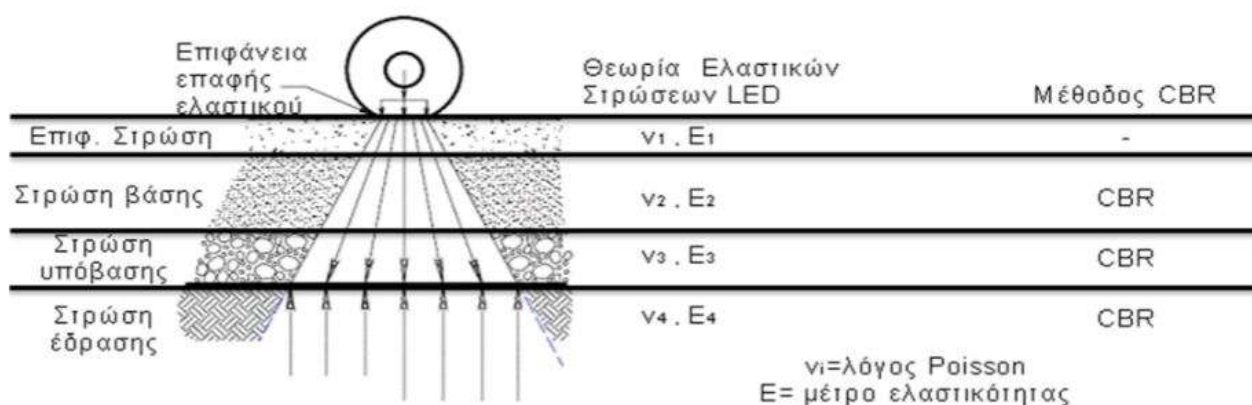
Μέθοδος ACR-PCR: Στη νέα μέθοδο ACR-PCR, οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται σύμφωνα με την Θεωρία Πολλαπλών Ελαστικών Στρώσεων (ML^2EA).

Στην περίπτωση αυτή, το οδόστρωμα (εύκαμπτο ή δύσκαμπτο), προσομοιώνεται από ομοιογενείς, ελαστικές και ισότροπες στρώσεις. Κάθε στρώση i χαρακτηρίζεται από το μέτρο ελαστικότητας E_i , τον λόγο Poisson ν_i και ένα ενιαίο πάχος στρώσης t_i . Οι στρώσεις θεωρείται ότι εκτείνονται πλευρικά στο άπειρο, ενώ η τελευταία στρώση (στρώση έδρασης) επεκτείνεται στο άπειρο, τόσο πλευρικά όσο και κατακόρυφα (δηλαδή η στρώση έδρασης προσομοιώνεται από έναν ελαστικό ημίχωρο). Χάρη στις γραμμικές, ελαστικές παραδοχές του μοντέλου προσομοίωσης, τα μεμονωμένα

φορτία των τροχών του αεροσκάφους δύναται να αθροιστούν, και έτσι να προκύψουν οι συνολικές συνδυαστικές τάσεις και παραμορφώσεις των πολύπλοκων συστημάτων τροχών των αεροσκαφών. Αξιοποιώντας, δηλαδή, τα σημεία υπολογισμού των παραμορφώσεων (Υποκεφάλαιο 3.4.2) λαμβάνεται υπόψη το πραγματικό σύστημα τροχών κάθε αεροσκάφους και υπολογίζεται η επίδραση κάθε αεροσκάφους ξεχωριστά.

Σύμφωνα με τη Θεωρία Πολλαπλών Ελαστικών Στρώσεων (ML^2EA), η κύρια ιδιότητα των υλικών εκφράζεται μέσω του μέτρου ελαστικότητας, ενώ αντίθετα στη μέθοδο CBR χαρακτηρίζεται από τον δείκτη CBR. Μάλιστα, στη διαδικασία σχεδιασμού του οδοστρώματος αναφοράς που απαιτείται υπολογισμό των δεικτών ACN και ACR, με βάση την μέθοδο CBR είναι καθοριστική η τιμή του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης, ενώ στην ανάλυση πολλαπλών ελαστικών στρώσεων, οι υπολογισμοί γίνονται με βάση τα χαρακτηριστικά των υλικών των επιμέρους στρώσεων όπως είναι οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας (E) και του λόγου Poisson (ν).

Στην Εικόνα 4.2 συγκρίνονται οι δύο διαφορετικοί τρόποι ανάλυσης του οδοστρώματος.



Εικόνα 4.2: Σύγκριση Θεωρίας Πολλαπλών Ελαστικών Στρώσεων & Μεθόδου CBR

2. Κατηγορίες Εδαφικής Αντοχής

Μέθοδος ACN-PCN: Η κατηγορία εδαφικής αντοχής καθορίζεται με βάση την τιμή του Καλιφορνιακού Δείκτη (*CBR: Californian Bearing Ratio*) της στρώσης έδρασης για εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων. Με τον δείκτη CBR εκφράζεται η αντοχή (φέρουσα ικανότητα) εδαφικών υλικών ή αδρανών υλικών οδοστρωσίας ως ποσοστό της αντοχής ενός τυποποιημένου «πρότυπου» υλικού, το οποίο λαμβάνεται ως μέτρο σύγκρισης.

Μέθοδος ACR-PCR: Η κατηγορία εδαφικής αντοχής καθορίζεται με βάση την τιμή του μέτρου ελαστικότητας E (ή της τιμής του δείκτη CBR) της στρώσης έδρασης για εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων. Μάλιστα, οι κατηγορίες εδαφικής αντοχής έχουν αναπροσαρμοστεί ώστε να υπάρχει κοινή κατηγοριοποίηση για εύκαμπτα και δύσκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων. Οι ισχύουσες, καθώς και οι νέες κατηγορίες εδαφικής αντοχής συνοψίζονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Σύγκριση κατηγοριών εδαφικής αντοχής εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων των δύο μεθόδων δομικής κατάταξης ACN-PCN & ACR-PCR (White G., 2021)

Κατηγορία Εδαφικής Αντοχής	Μέθοδος ACN-PCN		Μέθοδος ACR-PCR	
	Ονομαστική τιμή δείκτη CBR	Εύρος τιμών δείκτη CBR	Ονομαστική τιμή δείκτη CBR	Εύρος τιμών δείκτη CBR
A	15%	$\geq 13\%$	20%	$\geq 15\%$
B	10%	8%-12%	12%	10%-14%
C	6%	4%-8%	8%	6%-9%
D	3%	$< 4\%$	5%	$\leq 5\%$

3. Υπολογισμός Πάχους Αναφοράς

Μέθοδος ACN-PCN: Συνήθως το πάχος αναφοράς για τον προσδιορισμό του δείκτη ACN δίνεται από τους κατασκευαστές αεροσκαφών. Ωστόσο, σε περίπτωση που αυτό δεν είναι γνωστό, μπορεί να υπολογιστεί με τη μέθοδο CBR.

Εξ' ορισμού, το πάχος αναφοράς, για εύκαμπτα οδοστρώματα, είναι ίσο με το συμβατικό πάχος του οδοστρώματος, το οποίο επιτρέπει 10.000 καλύψεις-διελεύσεις C του πραγματικού συστήματος τροχών του αεροσκάφους για μια συγκεκριμένη κατηγορία εδαφικής αντοχής. Έτσι λοιπόν, λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές της μεθόδου CBR υπολογίζεται το απαιτούμενο πάχος του οδοστρώματος αναφοράς. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζεται το πάχος της στρώσης της υπόβασης, καθώς τα πάχη των ασφαλτικών στρώσεων και της βάσης είναι καθορισμένα από τη μέθοδο ACN-PCN.

Μέθοδος ACR-PCR: Στη νέα μέθοδο ACR-PCR, διακρίνονται δύο τυπικές διατομές οδοστρώματος αναφοράς, ανάλογα με το πλήθος των τροχών στα φορεία των αεροσκαφών, ενώ η διαδικασία του υπολογισμού του πάχους αναφοράς βασίζεται στην Θεωρία Πολλαπλών Ελαστικών Στρώσεων (ML^2EA). Αυτό πρακτικά σημαίνει την κατάργηση των συντελεστών ισοδυναμίας για την μετατροπή

του συστήματος τροχών του αεροσκάφους σε ισοδύναμο φορτίο μονού τροχού, και αυτό διότι λαμβάνεται υπόψη το σύνολο των τροχών των αεροσκαφών.

Με τη βοήθεια των εξελιγμένων λογισμικών της FAA, τα οποία έχουν ενσωματωμένη την θεώρηση ελαστικών στρώσεων, υπολογίζεται το απαιτούμενο πάχος της βάσης, σύμφωνα με την επαναληπτική διαδικασία όπως περιγράφεται στο *Υποκεφάλαιο 3.4.1.1*, ενώ το πάχος της ασφαλικής στρώσης είναι καθορισμένο από τη μέθοδο ACR-PCR. Μάλιστα, στη μέθοδο ACR-PCR, για τον υπολογισμό του πάχους αναφοράς, γίνεται παραδοχή 36.500 καλύψεων-διελεύσεων του πραγματικού συστήματος τροχών του αεροσκάφους, δίνοντας, κατά αυτόν τον τρόπο, μία πιο ρεαλιστική απεικόνιση της κυκλοφορίας των αεροσκαφών.

Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι τυπικές διατομές για τον υπολογισμό του οδοστρώματος αναφοράς για τον υπολογισμό των δεικτών ACN και ACR σε εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων.

Πίνακας 4.3: Τυπικές διατομές οδοστρωμάτων αναφοράς για τον υπολογισμό των δεικτών ACN-ACR σε εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων (White G., 2021)

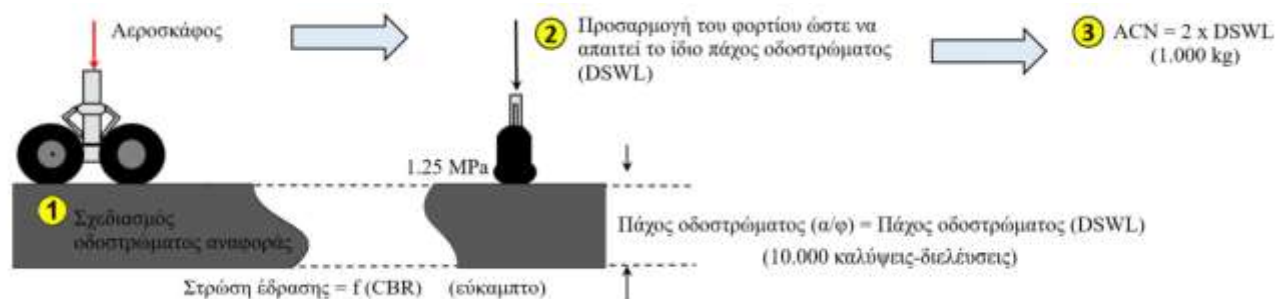
Είδος στρώσης	Μέθοδος ACN-PCN	Μέθοδος ACR-PCR	
	Επιμέρους πάχη για τον υπολογισμό του δείκτη ACN	Επιμέρους πάχη για τον υπολογισμό του δείκτη ACR (Αεροσκάφη με 1-2 τροχούς στο κύριο φορείο)	Επιμέρους πάχη για τον υπολογισμό του δείκτη ACR (Αεροσκάφη με 3 ή παραπάνω τροχούς στο κύριο φορείο)
Ασφαλτική στρώση (P-401/P-403)	75 mm	76 mm	127 mm
Βάση από θραυστό αμμοχάλικο (P-209)	150 mm	Καθορίζεται από τη μέθοδο	Καθορίζεται από τη μέθοδο
Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο (P-154)	Καθορίζεται από τη μέθοδο	Δεν χρησιμοποιείται	Δεν χρησιμοποιείται
Στρώση έδρασης	Άπειρο	Άπειρο	Άπειρο

4. Παραδοχές για τον προσδιορισμό των δεικτών ACN και ACR

Μέθοδος ACN-PCN: Ο κυριότερος ίσως ορισμός, πάνω στον οποίο στηρίζεται η διαδικασία ACN-PCN, είναι ο αναφερόμενος στο προκύπτον ισοδύναμο φορτίο μονού τροχού (*DSWL*). Σύμφωνα με αυτό τον ορισμό, το ισοδύναμο φορτίο μονού τροχού, *DSWL*, δρώντας με σταθερή πίεση 1,25 MPa και μεταβλητή ακτίνα επιφάνειας επαφής, παράγει το ίδιο εντατικό αποτέλεσμα με το πραγματικό σύστημα τροχών του αεροσκάφους σε οδόστρωμα πάχους ίσου με το πάχος αναφοράς. Το πάχος αναφοράς, για εύκαμπτα οδοστρώματα, είναι ίσο με το συμβατικό πάχος του οδοστρώματος, το οποίο επιτρέπει 10.000 καλύψεις-διελεύσεις C του πραγματικού συστήματος τροχών του αεροσκάφους για μια συγκεκριμένη κατηγορία εδαφικής αντοχής. Στα εύκαμπτα οδοστρώματα, η κατηγορία εδαφικής αντοχής καθορίζεται από την τιμή του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης.

Μέσω κατάλληλων υπολογισμών, προκύπτει ο δείκτης ACN, όπου εξ' ορισμού αριθμητικά προσδιορίζεται ως το διπλάσιο φορτίο (σε χιλιάδες Kgf) του μονού τροχού, ο οποίος έχει πίεση 1,25 MPa και προκαλεί την ίδια ένταση με το πραγματικό σύστημα τροχών του αεροσκάφους σε ένα οδόστρωμα πάχους ίσο με το πάχος αναφοράς.

Στην Εικόνα 4.3 συνοψίζεται η διαδικασία υπολογισμού του δείκτη ACN καθώς και οι παραδοχές, οι οποίες λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό του.



Εικόνα 4.3: Διαδικασία υπολογισμού του δείκτη ACN σε εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων

Μέθοδος ACR-PCR: Η εκσυγχρονισμένη μέθοδος ACR-PCR, ομοίως, βασίζεται στον ορισμό του ισοδύναμου φορτίου μονού τροχού (*DSWL*). Η διαφορά με την υφιστάμενη μέθοδο ACN-PCN, έγκειται στις παραδοχές οι οποίες ισχύουν για τον προσδιορισμό της τιμής του δείκτη ACR καθώς και στη μέθοδο ανάλυσης της διαδικασίας υπολογισμού. Πιο συγκεκριμένα, το ισοδύναμο φορτίο μονού τροχού ασκεί σταθερή πίεση 1,50 MPa, ενώ για τον υπολογισμό του οδοστρώματος αναφοράς

γίνεται παραδοχή 36.500 καλύψεων-διελεύσεων του πραγματικού συστήματος τροχών του αεροσκάφους για μια συγκεκριμένη κατηγορία εδαφικής αντοχής.

Σημειώνεται πως, σε αντίθεση με την μέθοδο ACN-PCN, λαμβάνονται υπόψη όλοι οι τροχοί του κύριου συστήματος τροχών του αεροσκάφους (Υποκεφάλαιο 3.4.2. - Σημεία Υπολογισμού των Παραμορφώσεων). Τόσο για εύκαμπτα, όσο και για δύσκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων, η κατηγορία εδαφικής αντοχής καθορίζεται από το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης.

Χρησιμοποιώντας την κατάλληλη διατομή για το οδόστρωμα αναφοράς, με κριτήριο σχεδιασμού ο δείκτης σχετικής φθοράς στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης να είναι ίσος με τη μονάδα και λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές της Θεωρίας Πολλαπλών Ελαστικών Στρώσεων (ML^2EA), υπολογίζεται η τιμή του ισοδύναμου φορτίου μονού τροχού. Ο δείκτης ACR αριθμητικά προσδιορίζεται ως το διπλάσιο φορτίο (σε εκατοντάδες Kgr) του μονού τροχού, ο οποίος έχει πίεση 1,50 MPa και προκαλεί την ίδια ένταση με το πραγματικό σύστημα τροχών του αεροσκάφους σε ένα οδόστρωμα πάχους ίσο με το πάχος αναφοράς.

Στην Εικόνα 4.4 συνοψίζεται η διαδικασία υπολογισμού του δείκτη ACR καθώς και οι παραδοχές, οι οποίες λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό του και διαφέρουν σε σχέση με αυτές που ισχύουν για τον δείκτη ACN.



Εικόνα 4.4: Διαδικασία υπολογισμού του δείκτη ACR σε εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων

5. Λογισμικά Υπολογισμών

Μέθοδος ACN-PCN: Το λογισμικό υπολογισμών, το οποίο χρησιμοποιείται τόσο για τον δείκτη ACN, όσο και για τον δείκτη PCN, είναι το COMFAA 3.0. Μάλιστα, για τον υπολογισμό του δείκτη PCN χρησιμοποιείται επιπλέον και το βοηθητικό φύλλο υπολογισμού EXCEL.

Μέθοδος ACR-PCR: Για τον υπολογισμό του δείκτη ACR χρησιμοποιείται το λογισμικό υπολογισμών ICAO-ACR 1.3, ενώ για τον υπολογισμό του δείκτη PCR χρησιμοποιείται το ενιαίο λογισμικό σχεδιασμού και ανάλυσης οδοστρωμάτων FAARFIELD 2.0.

Στον Πίνακα 4.4. συνοψίζονται τα λογισμικά που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των αντίστοιχων δεικτών ACN-ACR και PCN-PCR των δύο μεθόδων δομικής κατάταξης οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

Πίνακας 4.4: Λογισμικά υπολογισμών των δύο μεθόδων δομικής κατάταξης οδοστρωμάτων αεροδρομίων

	Μέθοδος ACN-PCN	Μέθοδος ACR-PCR
Δείκτες ACN-ACR	COMFAA 3.0	ICAO-ACR 1.3
Δείκτες PCN-PCR	COMFAA 3.0 + βοηθητικό υπολογιστικό φύλλο EXCEL	FAARFIELD 2.0

6. Υπερφόρτωση οδοστρωμάτων

Σε γενικές γραμμές ισχύουν οι ίδιες οδηγίες για την περίπτωση υπερφόρτωσης των οδοστρωμάτων και για τις δύο μεθόδους δομικής κατάταξης οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Ωστόσο, εντοπίζεται η εξής διαφοροποίηση όσον αφορά στο ποσοστό υπέρβασης των δεικτών ACN/ACR ως προς τους δείκτες PCN/PCR για εύκαμπτα και δύσκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων. Η διαφοροποίηση αυτή απεικονίζεται στον Πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5: Σύγκριση ποσοστών υπέρβασης των αντίστοιχων δεικτών αναλόγως του είδους του οδοστρώματος

	Μέθοδος ACN-PCN	Μέθοδος ACR-PCR
Εύκαμπτα οδοστρώματα	10%	10%
Δύσκαμπτα οδοστρώματα	5%	10%

5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΔΟΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ

5.1. Γενική Ιδέα

Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή των υπόψη μεθόδων στην πράξη. Για τον λόγο αυτό, συλλέχθηκαν στοιχεία κυκλοφορίας αεροσκαφών, αντιπροσωπευτικά του στόλου των αεροδρομίων του Ελλαδικού χώρου. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν δέκα (10) περιφερειακά αεροδρόμια της χώρας, οπότε σε κάθε αεροδρόμιο αντιστοιχεί και ένα σενάριο κυκλοφορίας.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε σχεδιασμός διατομών εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων, σύμφωνα με τις οδηγίες σχεδιασμού της FAA (FAA, 2021), για τρεις (3) χαρακτηριστικές τιμές του δείκτη CBR της στρώση έδρασης ($CBR=7\%$, $CBR=9\%$, $CBR=10\%$). Από την υπόψη διαδικασία προέκυψαν συνολικά τριάντα (30) διατομές, δηλαδή δέκα (10) διατομές οδοστρωμάτων για κάθε κατηγορία εδαφικής αντοχής και για κάθε σενάριο κυκλοφορίας.

Κατόπιν για όλους τους τύπους αεροσκαφών των σεναρίων κυκλοφορίας υπολογίστηκαν οι τιμές των δεικτών ACN-ACR και για κάθε διατομή οδοστρώματος εκτιμήθηκαν οι δείκτες PCN-PCR. Ακολούθησε η σύγκριση μεταξύ των δεικτών από την οποία προέκυψαν τα σχετικά σχόλια-συμπεράσματα.

5.2. Σχεδιασμός Διατομών Οδοστρωμάτων σύμφωνα με την Αναλυτική Μέθοδο της FAA

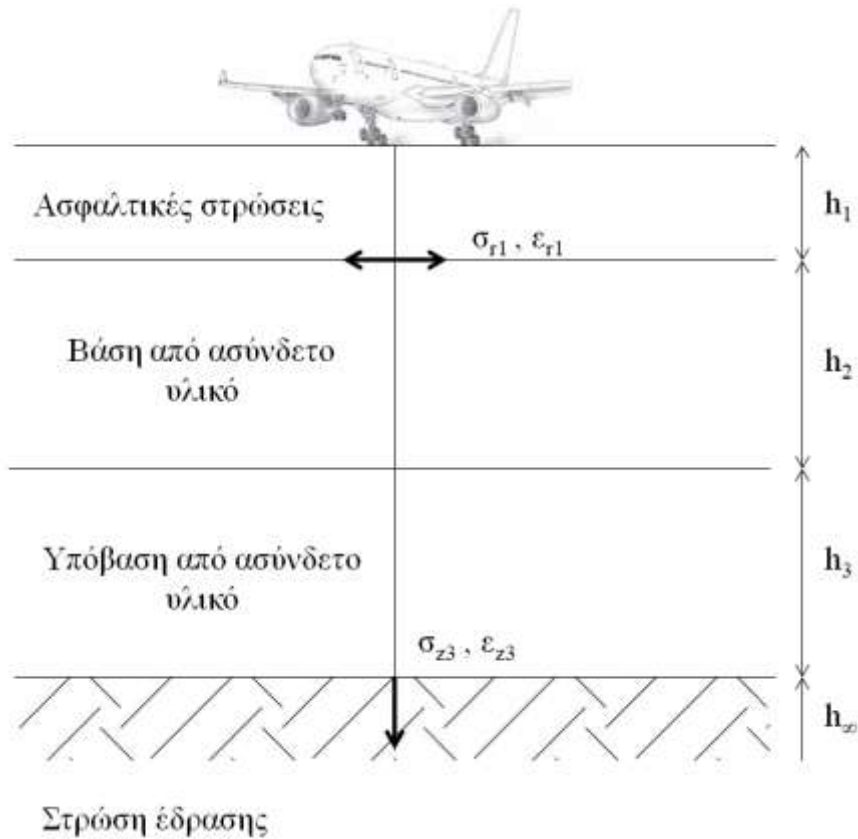
5.2.1. Γενικές Αρχές Σχεδιασμού

Η ανάλυση και ο σχεδιασμός οδοστρωμάτων αεροδρομίων αφορούν στην αλληλεπίδραση τεσσάρων εξίσου σημαντικών παραγόντων: της στρώσης έδρασης, των υλικών των επιμέρους στρώσεων (επιφανειακή στρώση, βάση και υπόβαση), των χαρακτηριστικών των εφαρμοζόμενων φορτίων και των περιβαλλοντικών συνθηκών.

Τα οδοστρώματα των αεροδρομίων σχεδιάζονται και κατασκευάζονται με σκοπό να παρέχουν επαρκή υποστήριξη στα επιβαλλόμενα φορτία των αεροσκαφών, προσφέροντας μια σταθερή, ομαλή και αντλιοσθητική επιφάνεια, η οποία δεν θα επηρεάζεται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, παρέχοντας, έτσι, ένα υψηλό επίπεδο εξυπηρέτησης στα αεροσκάφη. Για την επίτευξη τέτοιων απαιτήσεων είναι αναγκαία η επιλογή κατάλληλων παχών οδοστρωμάτων αεροδρομίων και η επιλογή υλικών υψηλής ποιότητας, σε συνδυασμό με πιστοποιημένες κατασκευαστικές μεθόδους. (FAA, 2021).

Για τον σχεδιασμό ενός οδοστρώματος με την αναλυτική μέθοδο της FAA λαμβάνεται υπόψη η αθροιστική φθορά που προκαλούν τα αεροσκάφη που δέχεται το οδόστρωμα στις κρίσιμες θέσεις

του οδοστρώματος. Για τα εύκαμπτα οδοστρώματα, οι κρίσιμες θέσεις είναι ο πυθμένας των ασφαλτικών στρώσεων (ενδεχόμενη αστοχία λόγω κόπωσης του υλικού από την επαναλαμβανόμενη οριζόντια εφελκυστική τάση/παραμόρφωση) και η επιφάνεια της στρώσης έδρασης (υπάρχει πιθανότητα αστοχίας λόγω παραμενουσών παραμορφώσεων από την κατακόρυφη τάση/παραμόρφωση). Οι κρίσιμες θέσεις αστοχίας απεικονίζονται στην Εικόνα 5.1.



Εικόνα 5.1: Κρίσιμες θέσεις αστοχίας εύκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου

Η μηχανική φθορά εκφράζεται συναρτήσει του δείκτη CDF (*Cumulative Damage Factor*), ο οποίος προκύπτει από την αθροιστική φθορά όλων των αεροσκαφών της κυκλοφορίας. Δεδομένου ότι η κυκλοφορία αποτελείται από διαφορετικούς τύπους αεροσκαφών, η αθροιστική φθορά προκύπτει ως το άθροισμα των επιμέρους φθορών που προκαλεί ο κάθε τύπος αεροσκάφους χωριστά.

Ο υπολογισμός της φθοράς (CDF_i), την οποία προκαλεί ένα αεροσκάφος (i) υπολογίζεται από την σχέση:

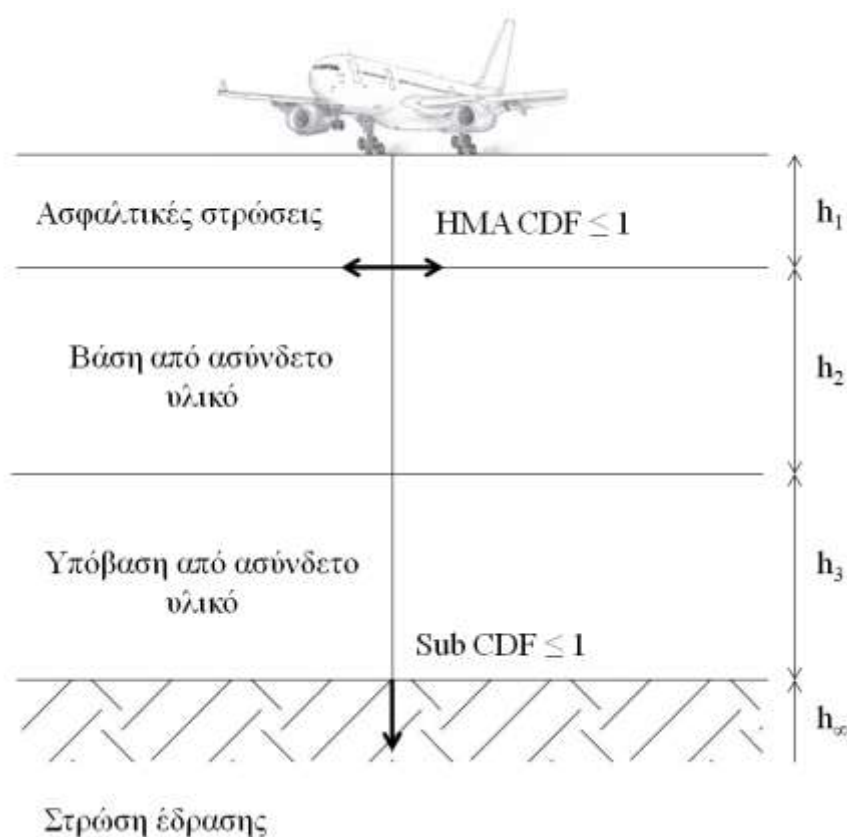
$$CDF_i = \frac{(\text{ετήσιες απογειώσεις } \alpha/\varphi_i) \times (\text{περίοδος σχεδιασμού σε έτη})}{\left(\frac{P}{C}\right) \times (\text{Καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία})} \quad (5.1)$$

Όπου:

P/C: ο λόγος των διελεύσεων προς τις καλύψεις-διελεύσεις C (*pass-to-coverage ratio*)

Καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία: Επιτρεπόμενες καλύψεις-διελεύσεις (προκύπτουν από τους νόμους κόπωσης/αστοχίας υλικών)

Σημειώνεται ότι για να μην αστοχήσει κάποια από τις κρίσιμες θέσεις του οδοστρώματος θα πρέπει να ισχύει η αρχή Miner, δηλαδή η αθροιστική φθορά της υπόψη θέσης να είναι μικρότερη από την μονάδα ($CDF < 1$). Στην Εικόνα 5.2 απεικονίζονται τα κριτήρια αστοχίας στις κρίσιμες θέσεις μιας διατομής εύκαμπτου οδοστρώματος.



Εικόνα 5.2: Κριτήριο αστοχίας στις κρίσιμες θέσεις μιας διατομής εύκαμπτου οδοστρώματος

5.2.2. Τυπικά Υλικά της FAA

Στον Πίνακα 5.1 συγκεντρώνονται τα τυπικά υλικά της FAA, τα οποία χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Για κάθε ένα υλικό αναφέρεται το είδος της στρώσης στην οποία χρησιμοποιείται (ασφαλτική στρώση, βάση και υπόβαση), τα χαρακτηριστικά του (μέτρο ελαστικότητας E και λόγος Poisson) καθώς και η κωδικοποίησή του.

Πίνακας 5.1: Τυπικά υλικά της FAA- Επιτρεπόμενα μέτρα ελαστικότητας E και λόγοι Poisson (FAA, 2021)

Είδος Στρώσης Οδοστρώματος	Τυπικά Υλικά της FAA	Εύκαμπτο Οδόστρωμα psi (MPa)	Λόγος Poisson
Ασφαλτική στρώση	P-401/P-403/P-404 Asphalt Mixture Ασφαλτόμιγμα	200.000 (1.380)	0,35
Σταθεροποιημένη Βάση και Υπόβαση	P-401/P-403 Asphalt Mixture Ασφαλτόμιγμα	400.000 (3.000)	0,35
	P-306 Lean Concrete Σταθεροποιημένη βάση από τσιμέντο	700.000 (5.000)	0,20
	P-304 Cement Treated Aggregate Base Σταθεροποιημένη βάση από τσιμέντο	500.000 (3.500)	0,20
	P-220 Cement Treated Soil Base Σταθεροποιημένη βάση από τσιμέντο	250.000 (1.700)	0,20
	Υλικά με μεταβλητό μέτρο ελαστικότητας	150.000 έως 400.000 (1.000 έως 3.000)	0,35
	Μη Σταθεροποιημένη Βάση και Υπόβαση	P-209 Crushed Aggregate Βάση από θραυστό αμμοχάλικο	Καθορίζεται από το λογισμικό
P-208 Aggregate Βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο		Καθορίζεται από το λογισμικό	0,35
P-219 Recycled Concrete Aggregate Ανακυκλώσιμο σκυρόδεμα με αδρανή		Καθορίζεται από το λογισμικό	0,35
P-211 Lime rock Ασβεστόλιθος		Καθορίζεται από το λογισμικό	0,35
P-207 Recycled Asphalt Aggregate Base Βάση από ανακυκλωμένο ασφαλτικό αδρανές υλικό		25.000 έως 500.000	0,35
P-154 Uncrushed Aggregate Μη θραυστό αμμοχάλικο		Καθορίζεται από το λογισμικό	0,35
Στρώση έδρασης		Εδαφικό υλικό	1.000 έως 50.000 (7 έως 350)

5.2.3. Δομή Εύκαμπτου Οδοστρώματος Αεροδρομίου

Σύμφωνα με την FAA, μια τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου αποτελείται από μία επιφανειακή ασφαλτική στρώση, την βάση και την υπόβαση (εφόσον απαιτείται) για την προστασία της στρώσης έδρασης. Επειδή στα εύκαμπτα οδοστρώματα η μεταφορά των φορτίων γίνεται δια μέσου των στρώσεων του, σκοπός της κάθε στρώσης είναι να προστατεύει την υποκείμενη της στρώση.

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

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1 το υλικό που χρησιμοποιείται στην επιφανειακή στρώση του οδοστρώματος είναι το P-401 και επιλέγεται προκειμένου να εξυπηρετήσει αεροσκάφη με βάρος άνω των 60.000 pounds (27.215 kg). Το υλικό P-403 μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην επιφάνεια του οδοστρώματος προκειμένου να εξυπηρετήσει αεροσκάφη βάρους 60.000 pounds (27.215 kg) ή λιγότερο. Τα παραπάνω υλικά έχουν μέτρο ελαστικότητας 200.000 psi (1.380 MPa) και λόγο Poisson 0,35.

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

Η ποιότητα και το πάχος της βάσης επιλέγονται έτσι ώστε η στρώση της βάσης να είναι σε θέση να αποτρέψει την αστοχία των υποκείμενων στρώσεων, να αντιστέκεται στις κατακόρυφες τάσεις λόγω των φορτίων των αεροσκαφών, οι οποίες ενδέχεται να προκαλέσουν παραμορφώσεις στις επιφανειακές στρώσεις, καθώς και να αποτρέπει ογκομετρικές αλλαγές λόγω της διακύμανσης των ποσοστών υγρασίας.

Διακρίνονται δύο κατηγορίες βάσης, η σταθεροποιημένη και η μη σταθεροποιημένη βάση, αναλόγως των τύπων των αεροσκαφών της σύνθεσης της κυκλοφορίας σχεδιασμού. Πιο συγκεκριμένα, όταν τα αεροσκάφη της κυκλοφορίας σχεδιασμού έχουν μικτό βάρος 100.000

pounds (45.359 kg) ή περισσότερο, τότε απαιτείται η χρήση σταθεροποιημένης βάσης. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται υλικά όπως τα P-401 ή P-403, P-304, P-306, σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1. Εάν τα αεροσκάφη της κυκλοφορίας σχεδιασμού με μικτό βάρος 60.000 pounds (27.200 kg) ή λιγότερο, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί μη σταθεροποιημένη βάση. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται υλικά όπως τα P-209, P-208, P-219, P-211, σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1.

- * **Σταθεροποιημένη βάση:** Για σταθεροποιημένη βάση υπάρχει η δυνατότητα επιλογής δύο ειδών υλικών σταθεροποίησης, είτε με ασφαλτικό υλικό (εύκαμπτη) είτε με τσιμέντο (δύσκαμπτη). Μια τυπική εύκαμπτη σταθεροποιημένη βάση αποτελείται από θερμό ασφαλτόμιγμα P-401/P-403 με μέτρο ελαστικότητας 400.000 psi (3.000 MPa). Ωστόσο, ενδέχεται να αποτελείται και από υλικά με μεταβλητό μέτρο ελαστικότητας. Ως υλικά μιας τυπικής δύσκαμπτης σταθεροποιημένης βάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα υλικά P-304 και P-306.
- * **Μη σταθεροποιημένη βάση:** Το τυπικό υλικό για τη στρώση της βάσης σε εύκαμπτα οδοστρώματα είναι το υλικό P-209 (βάση από θραυστό αμμοχάλικο). Σε περίπτωση που όλα τα αεροσκάφη της σύνθεσης της κυκλοφορίας έχουν μικτό βάρος μικρότερο από 60.000 pounds (27.200 kg), μπορεί να χρησιμοποιηθεί το υλικό P-208 (βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο). Το μέτρο ελαστικότητας μιας μη σταθεροποιημένης βάσης καθορίζεται αυτόματα από το λογισμικό υπολογισμού, καθώς αυτό εξαρτάται από τα μέτρα ελαστικότητας των υποκείμενων στρώσεων. Γενικώς, στρώσεις από αδρανή υλικά μπορούν να τοποθετηθούν οπουδήποτε σε μια διατομή ενός εύκαμπτου οδοστρώματος, εκτός από την επιφανειακή στρώση και την στρώση έδρασης. Ο μέγιστος αριθμός των στρώσεων από αδρανή υλικά είναι δύο και μάλιστα, σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί και θραυστό και ασύνδετο αμμοχάλικο, η στρώση από θραυστό αμμοχάλικο θα πρέπει να είναι υπερκείμενη της στρώσης από ασύνδετο αμμοχάλικο.
- * **Υπόβαση:** Σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα, η χρήση της υπόβασης απαιτείται όταν η στρώση έδρασης χαρακτηρίζεται από τιμή CBR μικρότερη του 20%. Το τυπικό υλικό για την στρώση της υπόβασης, P-154 (Πίνακας 5.1), παρέχει ισοδύναμη φέρουσα ικανότητα, όση αντιστοιχεί σε μια στρώση έδρασης με τιμή CBR ίση με 20%. Τα υλικά, τα οποία χρησιμοποιούνται ως υλικά υπόβασης μπορεί να αποτελούνται από επεξεργασμένα ή μη επεξεργασμένα αδρανή.

Λόγω της επιβολής μικρότερων εντατικών μεγεθών στη στρώση της υπόβασης, οι απαιτήσεις των χαρακτηριστικών των υλικών είναι μικρότερες σε σχέση με αυτές της στρώσης της βάσης. Προτεινόμενα υλικά για την στρώση της υπόβασης είναι τα εξής: P-154, P-210, P-212, P-213 και P-301. Γενικά, εάν ένα υλικό κρίνεται κατάλληλο για την στρώση της βάσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ίδιο και για την υπόβαση.

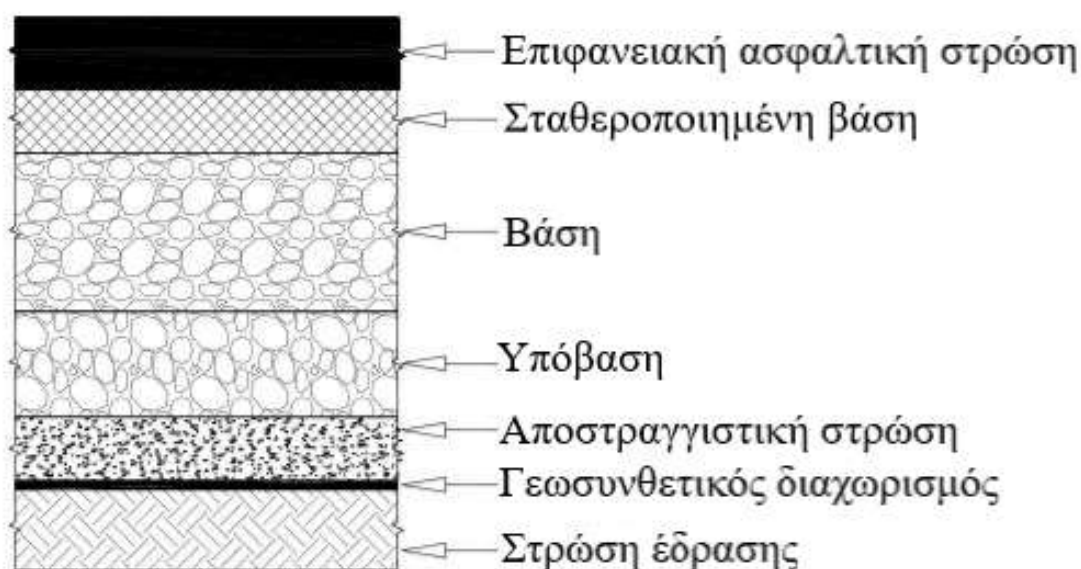
Προκειμένου να υπολογιστούν τα μέτρα ελαστικότητας των στρώσεων από αδρανή υλικά (P-209: θραυστό αμμοχάλικο και P-154: μη θραυστό αμμοχάλικο), πραγματοποιείται αυτόματα από το λογισμικό υπολογισμών FAARFIELD μια διαδικασία επιμερισμού των υπόψη στρώσεων. Πιο συγκεκριμένα, η στρώση από αδρανές υλικό χωρίζεται σε υπο-στρώσεις και για την κάθε υπο-στρώση προσδιορίζεται ένα μέτρο ελαστικότητας μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας υπολογισμών. Η παραπάνω διαδικασία, όπως αυτή καθορίζεται από την FAA (FAA Modulus subroutine), ακολουθεί δύο βασικούς κανόνες:

- * Όλες οι υπο-στρώσεις κάτω από την πρώτη υπό-στρώση (ανώτερη υπό-στρώση) έχουν καθορισμένο πάχος, 8 in (για το υλικό P-154) και 10 in (για το υλικό P-209).
- * Μόνο η πρώτη υπό-στρώση (ανώτερη στρώση) έχει μεταβλητό πάχος, 4 έως 12 in (για το υλικό P-154) και 5 έως 15 in (για το υλικό P-209).
- * **Στρώση έδρασης:** Η ικανότητα ενός εδάφους να αντιστέκεται στην διάτμηση και στις παραμορφώσεις ποικίλλει ανάλογα με τις ιδιότητές του, την πυκνότητά του και το ποσοστό υγρασίας. Επειδή οι τάσεις στην στρώση έδρασης απομειώνονται με το βάθος, ο έλεγχος των τάσεων πραγματοποιείται στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης. Η στρώση έδρασης πρέπει να είναι κατάλληλα διαμορφωμένη ώστε να διασφαλίζεται επαρκής δομική επάρκεια του οδοστρώματος για την προβλεπόμενη κυκλοφορία. Στην αναλυτική μέθοδο της FAA, το πάχος της στρώσης έδρασης θεωρείται πως εκτείνεται στο άπειρο και χαρακτηρίζεται είτε από το μέτρο ελαστικότητας E είτε από τον δείκτη CBR. Στον σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων υπάρχουν πολλοί τρόποι προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης, ωστόσο, ο πλέον εφαρμοζόμενος τρόπος προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση:

$$E=1.500 \times \text{CBR}, E(\text{psi}) \text{ ή } E=10 \times \text{CBR}, E(\text{MPa}) \quad (5.2)$$

Οι τιμές του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης προσδιορίζονται με επί τόπου μετρήσεις (FAA,2021).

Στην Εικόνα 5.3 παρουσιάζεται η τυπική διατομή ενός εύκαμπτου οδοστρώματος κατά FAA.



Εικόνα 5.3: Τυπική Διατομή Εύκαμπτου Οδοστρώματος κατά FAA (FAA, 2021)

5.2.4. Ελάχιστες απαιτήσεις παχών των επιμέρους στρώσεων

Η αναλυτική μέθοδος της FAA ορίζει κάποιες ελάχιστες απαιτήσεις παχών για τις επιμέρους στρώσεις ενός εύκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου, οι οποίες εξαρτώνται από την τάξη μεγέθους των φορτίων των αεροσκαφών. Το αεροσκάφος της σύνθεσης κυκλοφορίας με το μέγιστο μικτό βάρος καθορίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις των παχών, ανεξάρτητα από το επίπεδο της κυκλοφορίας. Στον Πίνακα 5.2 απεικονίζονται τα ελάχιστα πάχη των επιμέρους στρώσεων για εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων σε σχέση με το μέγιστο μικτό βάρος των αεροσκαφών.

Πίνακας 5.2: Ελάχιστα πάχη επιμέρους στρώσεων για εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων (FAA, 2021)

Είδος Στρώσης Οδοστρώματος	Τυπικά Υλικά της FAA	Μέγιστο μικτό βάρος αεροσκάφους, lbs (kg)		
		<60.000 (27.215)	<100.000 (45.360)	≥100.000 (45.360)
Ασφαλτική στρώση	P-401	3 in (75 mm)	4 in (100 mm)	4 in (100 mm)
Σταθεροποιημένη βάση	P-401 ή P-403, P-304, P-306	Δεν απαιτείται	Δεν απαιτείται	5 in (125 mm)
Βάση από θραυστό αμμοχάλικο	P-209, P-211	Δεν απαιτείται	6 in (150 mm)	6 in (150 mm)
Βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο	P-207, P-208, P-210 P-212, P-213, P-219	6 in (75 mm)	Δεν χρησιμοποιείται	Δεν χρησιμοποιείται
Υπόβαση	P-154	6 in (150 mm) (εάν απαιτείται)	6 in (150 mm) (εάν απαιτείται)	6 in (150 mm) (εάν απαιτείται)

5.2.5. Διαστασιολόγηση διατομών με το λογισμικό FAARFIELD 2.0

Η FAA ανέπτυξε το λογισμικό υπολογισμών (FAARFIELD) με στόχο τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Στην προσπάθεια βελτίωσης της διαδικασίας σχεδιασμού οδοστρωμάτων αεροδρομίων, η FAA παρουσίασε το 2021 τη νέα εξελιγμένη μορφή της αναλυτικής μεθόδου διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Στην παρούσα έκδοση του λογισμικού, FAARFIELD 2.0, τα μοντέλα αστοχίας στα οποία βασίζονται οι υπολογισμοί, έχουν προσαρμοστεί στα αποτελέσματα των πρόσφατων δοκιμών μεγάλης κλίμακας σε οδοστρώματα αεροδρομίων (NAPTF: *National Airport Pavement Test Facility*) από την FAA.

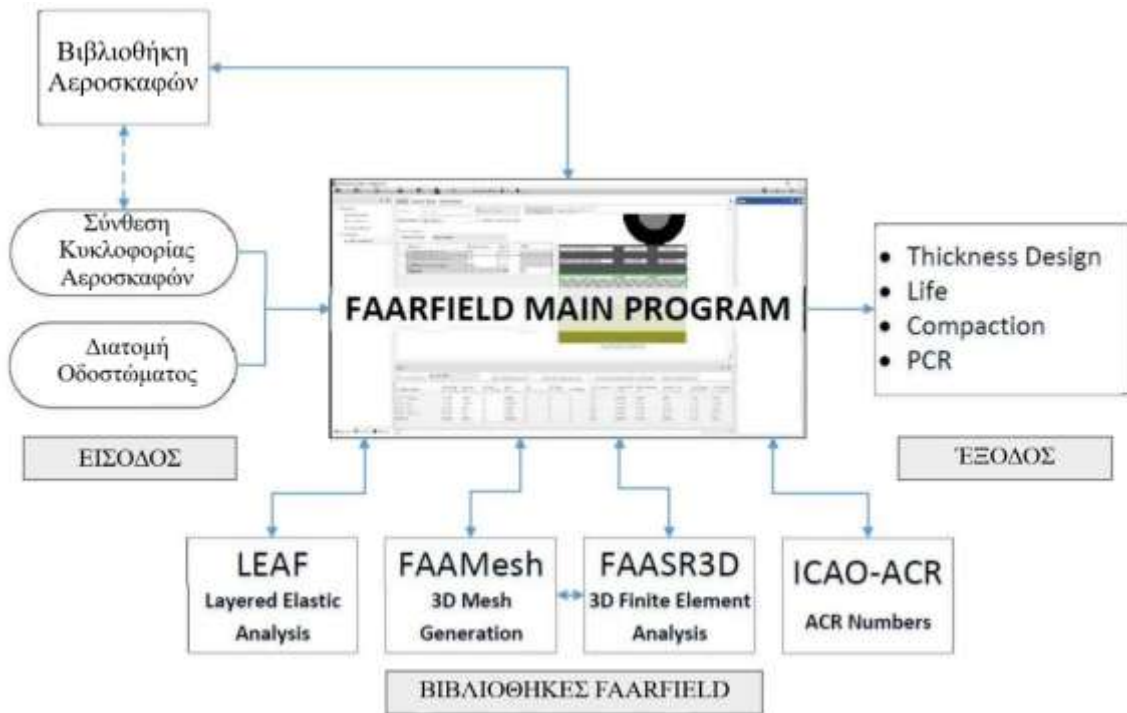
Το λογισμικό FAARFIELD 2.0, αποτελείται από ένα κύριο πρόγραμμα, το οποίο περιλαμβάνει διάφορα υπο-προγράμματα, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.4., τα οποία αφορούν:

1. Ανάλυση με Θεωρία Ελαστικών Στρώσεων (*LEAF: Layered Elastic Analysis*)
2. Δημιουργία Πλέγματος Πεπερασμένων Στοιχείων (*FAAMesh: Three-dimensional Mesh Generation for Finite Element Analysis*)
3. Ανάλυση με Πεπερασμένα Στοιχεία (*FAASR3D: Finite Element Processing*)
4. Υπολογισμό του δείκτη ACR σύμφωνα με την μεθοδολογία που προτείνεται από τον ICAO (*ICAO-ACR*)

Το λογισμικό FAARFIELD 2.0, λειτουργεί είτε με τις συνήθεις μονάδες μέτρησης των Η.Π.Α, είτε με το Μετρικό σύστημα, και περιλαμβάνει τέσσερις λειτουργίες:

1. Σχεδιασμός διατομών (*Thickness Design*)
2. Υπολογισμός διάρκειας ζωής διατομών (*Life Computation*)
3. Υπολογισμός απαιτήσεων συμπύκνωσης στρώσης έδρασης (*Compaction Requirement*)
4. Υπολογισμός δείκτη PCR (*PCR Computation*)

Η Εικόνα 5.4 συνοψίζει μια γενική επισκόπηση του λογισμικού FAARFIELD 2.0, συμπεριλαμβανομένων των υπο-προγραμμάτων του καθώς και των δεδομένων εξόδου και εισόδου.



Εικόνα 5.4: Γενική επισκόπηση του λογισμικού FAARFIELD (FAA, 2020)

Ο σχεδιασμός διατομών οδοστρώματων αεροδρομιών με το λογισμικό FAARFIELD 2.0 είναι μια επαναληπτική διαδικασία, τόσο για εύκαμπτα, όσο και για δύσκαμπτα οδοστρώματα. Τα βασικά βήματα της διαδικασίας σχεδιασμού είναι τα εξής:

Βήμα 1: Καθορισμός του είδους του οδοστρώματος.

Η περίοδος σχεδιασμού του οδοστρώματος είναι ίση με είκοσι (20) έτη.

Βήμα 2: Καθορισμός της διατομής του οδοστρώματος με προσθήκη, διαγραφή ή αλλαγή των επιμέρους στρώσεων (σύμφωνα με τις οδηγίες της FAA).

Στο βήμα αυτό εισάγονται τα ελάχιστα πάχη των επιμέρους στρώσεων (σύμφωνα με τις οδηγίες της FAA) ως αρχικά πάχη των επιμέρους στρώσεων, τα οποία ενδέχεται να αλλάξουν κατά τη διάρκεια υπολογισμών του προγράμματος, ώστε να προκύψουν τα τελικά πάχη της διατομής του οδοστρώματος.

Βήμα 3: Προσδιορισμός της σύνθεσης της κυκλοφορίας αεροσκαφών με επιλογή των κατάλληλων τύπων αεροσκαφών, οι οποίοι διατίθενται στη βάση δεδομένων αεροσκαφών του λογισμικού.

Βήμα 4: Προσαρμογή του μικτού βάρους, της ετήσιας αύξησης των απογειώσεων, ή των ετήσιων απογειώσεων των αεροσκαφών της σύνθεσης, εφόσον απαιτείται.

Βήμα 5: Ολοκλήρωση της διαδικασίας σχεδιασμού του οδοστρώματος.

Η διαδικασία σχεδιασμού ολοκληρώνεται όταν ο Δείκτης Αθροιστικής Φθοράς, CDF, στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης είναι ίσος με τη μονάδα (CDF=1).

Στο υπόψη λογισμικό υπάρχει και η δυνατότητα υπολογισμού του Δείκτη Αθροιστικής Φθοράς στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων (HMA CDF). Στο πλαίσιο ενός σωστού σχεδιασμού οδοστρώματος συνιστάται και ο έλεγχος του παραπάνω δείκτη, ώστε να αποφεύγεται η αστοχία του οδοστρώματος από κόπωση του ασφαλτομίγματος.

5.3. Υπολογισμός των δεικτών ACN-ACR

Δείκτης ACN: Ο υπολογισμός του δείκτη ACN ενός τύπου αεροσκάφους πραγματοποιείται μέσω του λογισμικού COMFAA 3.0, μέσα στο οποίο έχουν ενσωματωθεί τα βήματα υπολογισμού, όπως αυτά έχουν περιγραφεί στο *Υποκεφάλαιο 2.4*.

Δείκτης ACR: Ο υπολογισμός του δείκτη ACR ενός τύπου αεροσκάφους πραγματοποιείται μέσω του λογισμικού ICAO-ACR 1.3., μέσα στο οποίο έχουν ενσωματωθεί τα βήματα υπολογισμού, όπως αυτά έχουν περιγραφεί στο *Υποκεφάλαιο 3.4*.

Στα αποτελέσματα και των δύο λογισμικών, παρουσιάζονται οι δείκτες ACN και ACR για κάθε κατηγορία εδαφικής αντοχής, ενώ συγχρόνως περιλαμβάνονται ως δεδομένα εξόδου, τα πάχη αναφοράς και τα σημεία υπολογισμού των παραμορφώσεων.

5.4. Υπολογισμός των δεικτών PCN-PCR

Δείκτης PCN: Ο υπολογισμός του δείκτη PCN πραγματοποιείται σύμφωνα με το θεωρητικό υπόβαθρο του *Υποκεφαλαίου 2.6*, κάνοντας χρήση του λογισμικού COMFAA 3.0.

Αρχικά, ωστόσο, απαιτείται να πραγματοποιηθεί μια προεργασία στην διατομή του οδοστρώματος, για το οποίο επιθυμείται να υπολογισθεί ο δείκτης PCN, κατά την οποία η υφιστάμενη διατομή μετατρέπεται, σύμφωνα με τις οδηγίες της FAA, σε μια ισοδύναμη διατομή. Έτσι, προκύπτει το πάχος αξιολόγησης, για το οποίο θα υπολογιστεί η τιμή του δείκτη PCN.

Για την διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται το βοηθητικό υπολογιστικό φύλλο EXCEL του COMFAA 3.0. Στη συνέχεια και σύμφωνα με τις ενέργειες, όπως αυτές έχουν περιγραφεί στο *Υποκεφάλαιο 2.6*, υπολογίζεται η αριθμητική τιμή του δείκτη PCN αλλά και η τελική μορφή έκφρασης του δείκτη PCN λαμβάνοντας υπόψη τη θεωρία.

Δείκτης PCR: Ο υπολογισμός του δείκτη PCR πραγματοποιείται σύμφωνα με το θεωρητικό υπόβαθρο του *Υποκεφαλαίου 3.5*, κάνοντας χρήση του λογισμικού FAARFIELD 2.0. Το υπόψη λογισμικό, εκτός του ότι αποτελεί λογισμικό σχεδιασμού διατομών, περιλαμβάνει και λειτουργία υπολογισμού του δείκτη PCR. Ακολουθώντας την διαδικασία, η οποία περιγράφεται στο *Υποκεφάλαιο 3.5.3*, υπολογίζεται η αριθμητική τιμή του δείκτη PCR και καταγράφεται η τελική μορφή έκφρασης του δείκτη βασιζόμενη στην θεωρία της μεθόδου.

5.5. Αποτελέσματα

5.5.1. Διατομές Οδοστρωμάτων

Εφαρμόζοντας τις γενικές αρχές σχεδιασμού και τις οδηγίες της FAA, πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός των διατομών για δέκα (10) διαφορετικά σενάρια κυκλοφορίας αεροσκαφών και για τρεις (3) χαρακτηριστικές τιμές του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης ($CBR=7\%$, $CBR=9\%$, $CBR=10\%$).

Όσον αφορά στα απαραίτητα στοιχεία κυκλοφορίας αεροσκαφών, αυτά συλλέχθηκαν από τα Περιβαλλοντικά Δελτία Αερολιμένων, τα οποία είναι διαθέσιμα στην ιστοσελίδα της Fraport, με έτος αναφοράς 2019. Επιλέχθηκαν δέκα (10) περιφερειακά αεροδρόμια της χώρας, ώστε να αντιπροσωπεύσουν μια μέση κατάσταση στην Ελλάδα, και, έτσι, προέκυψαν δέκα (10) διαφορετικά σενάρια κυκλοφορίας αεροσκαφών.

Πιο συγκεκριμένα, στα Περιβαλλοντικά Δελτία Αερολιμένων, περιλαμβάνονται τα στατιστικά στοιχεία της κίνησης απεικονίζοντας τους επικρατέστερους τύπους αεροσκαφών εξυπηρέτησης πτήσεων εσωτερικού και εξωτερικού και τον αντίστοιχο αριθμό πτήσεων. Βάσει των παραπάνω προέκυψαν οι συγκεντρωτικοί πίνακες με τα ετήσια στοιχεία κυκλοφορίας για κάθε σενάριο κυκλοφορίας αεροσκαφών (Πίνακες 5.3-5.12).

1^ο Σενάριο Κυκλοφορίας: Αερολιμένας Ρόδου

Πίνακας 5.3: Ετήσια στοιχεία κίνησης για το 1^ο σενάριο κυκλοφορίας

Ετήσια στοιχεία κίνησης για τα έτος 2019			
Τύποι αεροσκαφών εξυπηρέτησης πτήσεων	Πτήσεις εσωτερικού	Πτήσεις εξωτερικού	Συνολικές πτήσεις
A320	3.878	6.360	10.238
AT45	1.612		1.612
DH8A	553		553
A321	387	1.681	2.068
A32A	356	804	1.160
B712	275		275
A319	274	842	1.116
B733	49	469	518
C550	38		38
DH8D	36		36
B73H		9.637	9.637
B738		3.102	3.102
A32B		1.246	1.246
A21N		532	532
B73W		498	498
Άλλος	423	4.416	4.839

2^ο Σενάριο Κυκλοφορίας: Αερολιμένας Σκιάθου

Πίνακας 5.4: Ετήσια στοιχεία κίνησης για το 2^ο σενάριο κυκλοφορίας

Ετήσια στοιχεία κίνησης για τα έτος 2019			
Τύποι αεροσκαφών εξυπηρέτησης πτήσεων	Πτήσεις εσωτερικού	Πτήσεις εξωτερικού	Συνολικές πτήσεις
DH8D	463		463
AT45	186		186
AT72	177		177
AT75	122		122
AT46	80		80
AT43	52		52
A319	18	214	232
DH8A	14		14
SR2	12		12
PA2	8		8
B73H		320	320
A320		302	302
A32B		282	282
B75W		238	238
B73W		216	216
B738		216	216
B712		212	212
A321		208	208
A318		96	96
Άλλος	129	614	743

3^ο Σενάριο Κυκλοφορίας: Αερολιμένας Κεφαλονιάς

Πίνακας 5.5: Ετήσια στοιχεία κίνησης για το 3^ο σενάριο κυκλοφορίας

Ετήσια στοιχεία κίνησης για τα έτος 2019			
Τύποι αεροσκαφών εξυπηρέτησης πτήσεων	Πτήσεις εσωτερικού	Πτήσεις εξωτερικού	Συνολικές πτήσεις
AT45	884		884
DH8D	472		472
AT75	286		286
A320	174	532	706
AT72	110		110
AT46	52		52
AT43	40		40
B463	31		31
B73H	26	1828	1854
A32A	22	384	406
B738		322	322
A319		175	175
A321		172	172
A20N		156	156
A32B		122	122
B75W		122	122
B712		98	98
Άλλος	286	1061	1347

4^ο Σενάριο Κυκλοφορίας: Αερολιμένας Χανίων

Πίνακας 5.6: Ετήσια στοιχεία κίνησης για το 4^ο σενάριο κυκλοφορίας

Ετήσια στοιχεία κίνησης για τα έτος 2019			
Τύποι αεροσκαφών εξυπηρέτησης πτήσεων	Πτήσεις εσωτερικού	Πτήσεις εξωτερικού	Συνολικές πτήσεις
A320	2808	1988	4796
AT75	884		884
AT72	826		826
A32A	434	315	749
B73H	412	6136	6548
AT45	228		228
A321	100	708	808
D62	96		96
B733	80		80
A319	68	364	432
B738		1270	1270
A32B		836	836
B73W		414	414
A21N		382	382
B76W		278	278
Άλλος	411	1464	1875

5^ο Σενάριο Κυκλοφορίας: Αερολιμένας Θεσσαλονίκης

Πίνακας 5.7: Ετήσια στοιχεία κίνησης για το 5^ο σενάριο κυκλοφορίας

Ετήσια στοιχεία κίνησης για τα έτος 2019			
Τύποι αεροσκαφών εξυπηρέτησης πτήσεων	Πτήσεις εσωτερικού	Πτήσεις εξωτερικού	Συνολικές πτήσεις
A320	8371	9468	17839
DH8D	2131		2131
AT72	1606		1606
A319	1224	3397	4621
AT45	1060		1060
B73H	969	10133	11102
A32A	909	1541	2450
A321	817	1435	2252
B733	567	893	1460
AT43	538		538
B738		2074	2074
A32B		409	409
AT73		348	348
B73C		343	343
Άλλος	2474	5031	7505

6^ο Σενάριο Κυκλοφορίας: Αερολιμένας Ζακύνθου

Πίνακας 5.8: Ετήσια στοιχεία κίνησης για το 6^ο σενάριο κυκλοφορίας

Ετήσια στοιχεία κίνησης για τα έτος 2019			
Τύποι αεροσκαφών εξυπηρέτησης πτήσεων	Πτήσεις εσωτερικού	Πτήσεις εξωτερικού	Συνολικές πτήσεις
AT45	646		646
AT72	464		464
AT75	314		314
DH8D	228		228
AT46	164		164
A320	129	1335	1464
A32A	46	370	416
AT43	26		26
B463	25		25
PA3	16		16
B73H		3656	3656
B738		1465	1465
A321		948	948
A32B		368	368
A319		363	363
B75W		334	334
B733		322	322
B712		304	304
Άλλος	192	1481	1673

7^ο Σενάριο Κυκλοφορίας: Αερολιμένας Κέρκυρας

Πίνακας 5.9: Ετήσια στοιχεία κίνησης για το 7^ο σενάριο κυκλοφορίας

Ετήσια στοιχεία κίνησης για τα έτος 2019			
Τύποι αεροσκαφών εξυπηρέτησης πτήσεων	Πτήσεις εσωτερικού	Πτήσεις εξωτερικού	Συνολικές πτήσεις
A320	1475	3233	4708
AT45	1000		1000
AT75	530		530
DH8D	292		292
A32A	240	1498	1738
AT72	215		215
A321	47	839	886
B462	34		34
C56X	33		33
A319	32	1000	1032
B73H		6752	6752
B738		1667	1667
A32B		431	431
A20N		394	394
B73W		334	334
B737		288	288
Άλλος	704	4274	4978

8^ο Σενάριο Κυκλοφορίας: Αερολιμένας Σαντορίνης

Πίνακας 5.10: Ετήσια στοιχεία κίνησης για το 8^ο σενάριο κυκλοφορίας

Ετήσια στοιχεία κίνησης για τα έτος 2019			
Τύποι αεροσκαφών εξυπηρέτησης πτήσεων	Πτήσεις εσωτερικού	Πτήσεις εξωτερικού	Συνολικές πτήσεις
AT75	2188		2188
DH8D	2090		2090
A320	2046	1799	3845
B712	1364	842	2206
AT72	1266		1266
B73H	1175	1451	2626
A321	802		802
A32A	386	946	1332
B462	260		260
AT45	230		230
A319		682	682
A20N		318	318
A32B		306	306
B738		292	292
B73W		154	154
C56X		88	88
Άλλος	1611	1023	2634

9^ο Σενάριο Κυκλοφορίας: Αερολιμένας Κω

Πίνακας 5.11: Ετήσια στοιχεία κίνησης για το 9^ο σενάριο κυκλοφορίας

Ετήσια στοιχεία κίνησης για τα έτος 2019			
Τύποι αεροσκαφών εξυπηρέτησης πτήσεων	Πτήσεις εσωτερικού	Πτήσεις εξωτερικού	Συνολικές πτήσεις
AT45	1542		1542
DH8D	1190		1190
A320	672	2548	3220
AT75	302		302
AT72	277		277
A32A	188	304	492
AT43	114		114
A319	78	650	728
C550	38		38
A321	34	716	750
B73H		5832	5832
B738		2145	2145
A32B		320	320
B753		250	250
A20N		180	180
B76W		172	172
Άλλος	379	1866	2245

10^ο Σενάριο Κυκλοφορίας: Αερολιμένας Καβάλας

Πίνακας 5.12: Ετήσια στοιχεία κίνησης για το 10^ο σενάριο κυκλοφορίας

Ετήσια στοιχεία κίνησης για τα έτος 2019			
Τύποι αεροσκαφών εξυπηρέτησης πτήσεων	Πτήσεις εσωτερικού	Πτήσεις εξωτερικού	Συνολικές πτήσεις
DH8D	996		996
P28	64		64
A32B	50	68	118
A321	45	159	204
C172	36		36
A320	35	543	578
DA40	19		19
DA42	14		14
A319	10	336	346
D62	10		10
B73H		329	329
B73W		102	102
A32A		77	77
7S8		54	54
B738		53	53
B737		46	46
Άλλος	124	295	419

Το λογισμικό, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό των διατομών είναι το FAARFIELD 2.0. Αφού πραγματοποιήθηκε αντιστοίχιση των τύπων αεροσκαφών με τους διαθέσιμους τύπους αεροσκαφών της βάσης δεδομένων του λογισμικού FAARFIELD 2.0, προσαρμόστηκε ο αριθμός των συνολικών πτήσεις, ώστε να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εισαγωγής στο λογισμικό, όσον αφορά στα στοιχεία κυκλοφορίας.

Όσον αφορά στη διατομή του οδοστρώματος σχεδιασμού (υλικά και πάχη επιμέρους στρώσεων), προκειμένου να τηρηθούν οι οδηγίες της FAA, πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω έλεγχοι:

- * Έλεγχος του βάρους των τύπων αεροσκαφών της σύνθεσης για κάθε σενάριο κυκλοφορίας, ώστε να διαπιστωθεί εάν απαιτείται ή όχι, η χρήση σταθεροποιημένης βάσης
(5.2.3 Δομή Εύκαμπτου Οδοστρώματος)
- * Έλεγχος για απαίτηση ή μη χρήσης στρώσης υπόβασης για κάθε κατηγορία εδαφικής αντοχής
(5.2.3 Δομή Εύκαμπτου Οδοστρώματος)
- * Έλεγχος των ελάχιστων απαιτήσεων παχών των επιμέρους στρώσεων αναλόγως του μικτού βάρους των αεροσκαφών της σύνθεσης για κάθε σενάριο κυκλοφορίας
(5.2.4 Ελάχιστες απαιτήσεις παχών των επιμέρους στρώσεων)

Σημειώνεται ότι στον σχεδιασμό των διατομών λήφθηκαν υπόψη, τα εξής κριτήρια:

- * Στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης: $\text{Sub CDF} \leq 1$
- * Στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων: $\text{HMA CDF} \leq 1$

Τέλος, για κατασκευαστικούς λόγους, τα πάχη των επιμέρους στρώσεων των διατομών στρογγυλεύτηκαν προς τα πάνω στον πλησιέστερο ακέραιο αριθμό.

Σύμφωνα με τα παραπάνω προέκυψαν οι διατομές που φαίνονται στις Εικόνες 5.5-5.14 για κάθε σενάριο κυκλοφορίας αεροσκαφών και για κάθε τιμή του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης.

1^ο Σενάριο Κυκλοφορίας

<i>CBR=7%</i>	<i>CBR=9%</i>	<i>CBR=10%</i>
<hr/> P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}, h_1=14 \text{ cm}, \nu=0,35$ <hr/>	<hr/> P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}, h_1=14 \text{ cm}, \nu=0,35$ <hr/>	<hr/> P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}, h_1=14 \text{ cm}, \nu=0,35$ <hr/>
<hr/> P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}, h_2=17 \text{ cm}, \nu=0,35$ <hr/>	<hr/> P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}, h_2=16 \text{ cm}, \nu=0,35$ <hr/>	<hr/> P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}, h_2=16 \text{ cm}, \nu=0,35$ <hr/>
<hr/> P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=309 \text{ MPa}, h_3=16 \text{ cm}, \nu=0,35$ <hr/>	<hr/> P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=325 \text{ MPa}, h_3=16 \text{ cm}, \nu=0,35$ <hr/>	<hr/> P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=330 \text{ MPa}, h_3=16 \text{ cm}, \nu=0,35$ <hr/>
<hr/> P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=119 \text{ MPa}, h_4=35 \text{ cm}, \nu=0,35$ <hr/>	<hr/> P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=128 \text{ MPa}, h_4=25 \text{ cm}, \nu=0,35$ <hr/>	<hr/> P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=130 \text{ MPa}, h_4=24 \text{ cm}, \nu=0,35$ <hr/>
<hr/> Στρώση έδρασης $CBR=7\%, \nu=0,35$ $E_5=72 \text{ MPa}$ <hr/>	<hr/> Στρώση έδρασης $CBR=9\%, \nu=0,35$ $E_5=93 \text{ MPa}$ <hr/>	<hr/> Στρώση έδρασης $CBR=10\%, \nu=0,35$ $E_5=103 \text{ MPa}$ <hr/>

Εικόνα 5.5: Προτεινόμενες διατομές οδοστρωμάτων για το 1ο σενάριο κυκλοφορίας

2^ο Σενάριο Κυκλοφορίας

CBR=7%	CBR=9%	CBR=10%
P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}$, $h_1=11 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}$, $h_1=11 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}$, $h_1=11 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}$, $h_2=13 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}$, $h_2=13 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}$, $h_2=13 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=320 \text{ MPa}$, $h_3=16 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=329 \text{ MPa}$, $h_3=16 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=335 \text{ MPa}$, $h_3=16 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=121 \text{ MPa}$, $h_4=34 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=130 \text{ MPa}$, $h_4=21 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=133 \text{ MPa}$, $h_4=16 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
Στρώση έδρασης CBR=7%, $\nu=0,35$ $E_5=72 \text{ MPa}$	Στρώση έδρασης CBR=9%, $\nu=0,35$ $E_5=93 \text{ MPa}$	Στρώση έδρασης CBR=10%, $\nu=0,35$ $E_5=103 \text{ MPa}$

Εικόνα 5.6: Προτεινόμενες διατομές οδοστρωμάτων για το 2^ο σενάριο κυκλοφορίας

3^ο Σενάριο Κυκλοφορίας

CBR=7%	CBR=9%	CBR=10%
P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}$, $h_1=11 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}$, $h_1=11 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}$, $h_1=11 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}$, $h_2=13 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}$, $h_2=13 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}$, $h_2=13 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=326 \text{ MPa}$, $h_3=16 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=331 \text{ MPa}$, $h_3=16 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=337 \text{ MPa}$, $h_3=16 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=122 \text{ MPa}$, $h_4=35 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=131 \text{ MPa}$, $h_4=22 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=134 \text{ MPa}$, $h_4=17 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
Στρώση έδρασης CBR=7%, $\nu=0,35$ $E_5=72 \text{ MPa}$	Στρώση έδρασης CBR=9%, $\nu=0,35$ $E_5=93 \text{ MPa}$	Στρώση έδρασης CBR=10%, $\nu=0,35$ $E_5=103 \text{ MPa}$

Εικόνα 5.7: Προτεινόμενες διατομές οδοστρωμάτων για το 3^ο σενάριο κυκλοφορίας

4^ο Σενάριο Κυκλοφορίας

CBR=7%	CBR=9%	CBR=10%
P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}$, $h_1=13 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}$, $h_1=12 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}$, $h_1=12 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}$, $h_2=15 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}$, $h_2=14 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}$, $h_2=14 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=311 \text{ MPa}$, $h_3=16 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=329 \text{ MPa}$, $h_3=16 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=338 \text{ MPa}$, $h_3=16 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=120 \text{ MPa}$, $h_4=31 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=130 \text{ MPa}$, $h_4=21 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=135 \text{ MPa}$, $h_4=18 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
Στρώση έδρασης CBR=7%, $\nu=0,35$ $E_5=72 \text{ MPa}$	Στρώση έδρασης CBR=9%, $\nu=0,35$ $E_5=93 \text{ MPa}$	Στρώση έδρασης CBR=10%, $\nu=0,35$ $E_5=103 \text{ MPa}$

Εικόνα 5.8: Προτεινόμενες διατομές οδοστρωμάτων για το 4^ο σενάριο κυκλοφορίας

5^ο Σενάριο Κυκλοφορίας

CBR=7%	CBR=9%	CBR=10%
P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}$, $h_1=15 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}$, $h_1=14 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}$, $h_1=14 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}$, $h_2=18 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}$, $h_2=17 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}$, $h_2=17 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=283 \text{ MPa}$, $h_3=16 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=312 \text{ MPa}$, $h_3=16 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=331 \text{ MPa}$, $h_3=16 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=106 \text{ MPa}$, $h_4=33 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=121 \text{ MPa}$, $h_4=27 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=131 \text{ MPa}$, $h_4=23 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
Στρώση έδρασης CBR=7%, $\nu=0,35$ $E_5=72 \text{ MPa}$	Στρώση έδρασης CBR=9%, $\nu=0,35$ $E_5=93 \text{ MPa}$	Στρώση έδρασης CBR=10%, $\nu=0,35$ $E_5=103 \text{ MPa}$

Εικόνα 5.9: Προτεινόμενες διατομές οδοστρωμάτων για το 5^ο σενάριο κυκλοφορίας

6^ο Σενάριο Κυκλοφορίας

CBR=7%	CBR=9%	CBR=10%
P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}, h_1=11 \text{ cm}, \nu=0,35$	P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}, h_1=12 \text{ cm}, \nu=0,35$	P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}, h_1=11 \text{ cm}, \nu=0,35$
P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}, h_2=13 \text{ cm}, \nu=0,35$	P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}, h_2=13 \text{ cm}, \nu=0,35$	P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}, h_2=13 \text{ cm}, \nu=0,35$
P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=345 \text{ MPa}, h_3=16 \text{ cm}, \nu=0,35$	P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=333 \text{ MPa}, h_3=16 \text{ cm}, \nu=0,35$	P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=343 \text{ MPa}, h_3=16 \text{ cm}, \nu=0,35$
P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=126 \text{ MPa}, h_4=39 \text{ cm}, \nu=0,35$	P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=132 \text{ MPa}, h_4=23 \text{ cm}, \nu=0,35$	P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=138 \text{ MPa}, h_4=21 \text{ cm}, \nu=0,35$
Στρώση έδρασης CBR=7%, $\nu=0,35$ $E_5=72 \text{ MPa}$	Στρώση έδρασης CBR=9%, $\nu=0,35$ $E_5=93 \text{ MPa}$	Στρώση έδρασης CBR=10%, $\nu=0,35$ $E_5=103 \text{ MPa}$

Εικόνα 5.10: Προτεινόμενες διατομές οδοστρωμάτων για το 6^ο σενάριο κυκλοφορίας

7^ο Σενάριο Κυκλοφορίας

CBR=7%	CBR=9%	CBR=10%
P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}$, $h_1=14 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}$, $h_1=12 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}$, $h_1=12 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}$, $h_2=15 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}$, $h_2=15 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}$, $h_2=15 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=307 \text{ MPa}$, $h_3=16 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=325 \text{ MPa}$, $h_3=16 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=334 \text{ MPa}$, $h_3=16 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=118 \text{ MPa}$, $h_4=28 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=128 \text{ MPa}$, $h_4=19 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=132 \text{ MPa}$, $h_4=15 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
Στρώση έδρασης CBR=7%, $\nu=0,35$ $E_5=72 \text{ MPa}$	Στρώση έδρασης CBR=9%, $\nu=0,35$ $E_5=93 \text{ MPa}$	Στρώση έδρασης CBR=10%, $\nu=0,35$ $E_5=103 \text{ MPa}$

Εικόνα 5.11: Προτεινόμενες διατομές οδοστρωμάτων για το 7^ο σενάριο κυκλοφορίας

8^ο Σενάριο Κυκλοφορίας

CBR=7%	CBR=9%	CBR=10%
P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}, h_1=11 \text{ cm}, \nu=0,35$	P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}, h_1=11 \text{ cm}, \nu=0,35$	P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}, h_1=11 \text{ cm}, \nu=0,35$
P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}, h_2=13 \text{ cm}, \nu=0,35$	P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}, h_2=13 \text{ cm}, \nu=0,35$	P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}, h_2=13 \text{ cm}, \nu=0,35$
P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=339 \text{ MPa}, h_3=16 \text{ cm}, \nu=0,35$	P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=335 \text{ MPa}, h_3=16 \text{ cm}, \nu=0,35$	P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=342 \text{ MPa}, h_3=16 \text{ cm}, \nu=0,35$
P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=124 \text{ MPa}, h_4=38 \text{ cm}, \nu=0,35$	P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=133 \text{ MPa}, h_4=25 \text{ cm}, \nu=0,35$	P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=137 \text{ MPa}, h_4=20 \text{ cm}, \nu=0,35$
Στρώση έδρασης CBR=7%, $\nu=0,35$ $E_5=72 \text{ MPa}$	Στρώση έδρασης CBR=9%, $\nu=0,35$ $E_5=93 \text{ MPa}$	Στρώση έδρασης CBR=10%, $\nu=0,35$ $E_5=103 \text{ MPa}$

Εικόνα 5.12: Προτεινόμενες διατομές οδοστρωμάτων για το 8^ο σενάριο κυκλοφορίας

9^ο Σενάριο Κυκλοφορίας

CBR=7%	CBR=9%	CBR=10%
P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}$, $h_1=12 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}$, $h_1=11 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}$, $h_1=11 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}$, $h_2=14 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}$, $h_2=14 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}$, $h_2=13 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=323 \text{ MPa}$, $h_3=16 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=332 \text{ MPa}$, $h_3=16 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=341 \text{ MPa}$, $h_3=16 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=121 \text{ MPa}$, $h_4=34 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=131 \text{ MPa}$, $h_4=23 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=136 \text{ MPa}$, $h_4=19 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
Στρώση έδρασης CBR=7%, $\nu=0,35$ $E_5=72 \text{ MPa}$	Στρώση έδρασης CBR=9%, $\nu=0,35$ $E_5=93 \text{ MPa}$	Στρώση έδρασης CBR=10%, $\nu=0,35$ $E_5=103 \text{ MPa}$

Εικόνα 5.13: Προτεινόμενες διατομές οδοστρωμάτων για το 9^ο σενάριο κυκλοφορίας

10^ο Σενάριο Κυκλοφορίας

<i>CBR=7%</i>	<i>CBR=9%</i>	<i>CBR=10%</i>
P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}$, $h_1=11 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}$, $h_1=11 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Ασφαλτική στρώση $E_1=1.379 \text{ MPa}$, $h_1=11 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}$, $h_2=13 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}$, $h_2=13 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-401/P-403: Σταθεροποιημένη βάση $E_2=2.758 \text{ MPa}$, $h_2=13 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=314 \text{ MPa}$, $h_3=16 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=327 \text{ MPa}$, $h_3=16 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-209: Βάση από θραυστό αμμοχάλικο $E_3=332 \text{ MPa}$, $h_3=16 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=120 \text{ MPa}$, $h_4=32 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=129 \text{ MPa}$, $h_4=19 \text{ cm}$, $\nu=0,35$	P-154: Υπόβαση από μη θραυστό αμμοχάλικο $E_4=132 \text{ MPa}$, $h_4=15 \text{ cm}$, $\nu=0,35$
Στρώση έδρασης $CBR=7\%$, $\nu=0,35$ $E_5=72 \text{ MPa}$	Στρώση έδρασης $CBR=9\%$, $\nu=0,35$ $E_5=93 \text{ MPa}$	Στρώση έδρασης $CBR=10\%$, $\nu=0,35$ $E_5=103 \text{ MPa}$

Εικόνα 5.14: Προτεινόμενες διατομές οδοστρωμάτων για το 10^ο σενάριο κυκλοφορίας

5.5.2. Δείκτες ACN-ACR

Ο υπολογισμός των δεικτών ACN και ACR πραγματοποιήθηκε για όλους τους τύπους αεροσκαφών των δέκα (10) διαφορετικών σεναρίων κυκλοφορίας και για κάθε κατηγορία εδαφικής αντοχής (A, B, C, D). Για τον προσδιορισμό του δείκτη ACN χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό COMFAA 3.0, ενώ για τον δείκτη ACR, το λογισμικό ICAO-ACR 1.3.

Με τη βοήθεια υπολογιστικού φύλλου EXCEL, πινακοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των δύο προγραμμάτων και δημιουργήθηκαν τα κατάλληλα διαγράμματα διασποράς με τις τιμές των δεικτών ACN και ACR, τόσο για κάθε κατηγορία εδαφικής αντοχής ξεχωριστά, όσο και για όλες μαζί.

Σκοπός των διαγραμμάτων ήταν να απεικονιστεί η ύπαρξη ή μη συσχέτισης μεταξύ των δύο δεικτών.

Συσχέτιση μεταβλητών

Η συσχέτιση μετρά το βαθμό αλληλεπίδρασης που ίσως να υπάρχει μεταξύ δύο ή περισσότερων μεταβλητών. Η απλή συσχέτιση μετρά το βαθμό αλληλεξάρτησης που ίσως να υπάρχει μεταξύ δύο μόνο μεταβλητών.

Η σχέση δύο μεταβλητών X και Y είναι γραμμική, αν οι τιμές τους μπορούν να τοποθετηθούν πάνω σε μια γραμμή. Η σχέση δύο μεταβλητών X και Y είναι μη-γραμμική, όταν οι τιμές τους σχηματίζουν μια (μη-ευθύγραμμη) καμπύλη. Ένας τρόπος για να εξακριβωθεί η γραμμικότητα ή μη γραμμικότητα της σχέσης δύο μεταβλητών X και Y είναι να απεικονισθούν οι τιμές του σε ένα διάγραμμα διασποράς. Το διάγραμμα διασποράς (scatter diagram) αποτελεί την αναπαράσταση των ζευγών των παρατηρήσεων σε ένα διάγραμμα.

Σύμφωνα με τους Fotheringham & Rogerson (1993), ο όρος καλή προσαρμογή (*goodness of fit*) αφορά στην ακρίβεια με την οποία ένα μοντέλο ερμηνεύει γνωστά δεδομένα. Η ακρίβεια αυτή μπορεί να εκτιμηθεί από διαφορετικά στατιστικά μέτρα. Ένα από αυτά αποτελεί και ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2). Μια καλή φυσική ερμηνεία της συσχέτισης δύο τυχαίων μεταβλητών επιτυγχάνεται με το r^2 ή R^2 που λέγεται συντελεστής προσδιορισμού (*coefficient of determination*) και εκφράζεται συνήθως σε ποσοστό, δηλαδή $100r^2$. Ο συντελεστής προσδιορισμού δίνει το ποσοστό μεταβλητότητας των τιμών της μεταβλητής Y, το οποίο υπολογίζεται από τη μεταβλητή X (και αντίστροφα) και είναι ένας χρήσιμος τρόπος να συνοψιστεί η σχέση δύο τυχαίων μεταβλητών.

Ακριβέστερα, ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι ο λόγος της διακύμανσης των εκτιμημένων τιμών της εξαρτημένης μεταβλητής προς τη διακύμανση των πραγματικών τιμών της εξαρτημένης μεταβλητής.

Οι τιμές του συντελεστή προσδιορισμού R^2 κυμαίνονται από το 0 έως το 1 και προφανώς όσο η τιμή πλησιάζει προς το 1 τόσο καλύτερη προσαρμογή έχει το μοντέλο. Η ερμηνεία των παραπάνω ορίων έχει ως εξής:

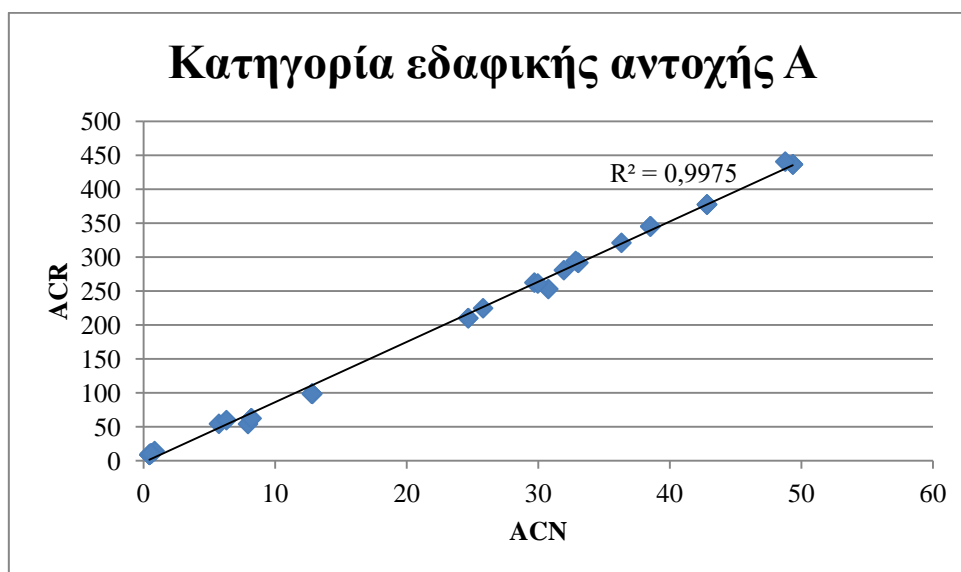
- * $R^2 = 1$ σημαίνει ότι οι ερμηνευτικές μεταβλητές εξηγούν το 100% της διακύμανσης της εξαρτημένης μεταβλητής και άρα έχουμε ένα τέλειο μοντέλο
- * $R^2 = 0$ σημαίνει ότι οι ερμηνευτικές μεταβλητές δεν εξηγούν καθόλου την διακύμανση της εξαρτημένης μεταβλητής

Στον Πίνακα 5.13 συνοψίζονται οι δείκτες ACN-ACR για κάθε τύπο αεροσκάφους και για όλες τις κατηγορίες εδαφικής αντοχής (A, B, C και D).

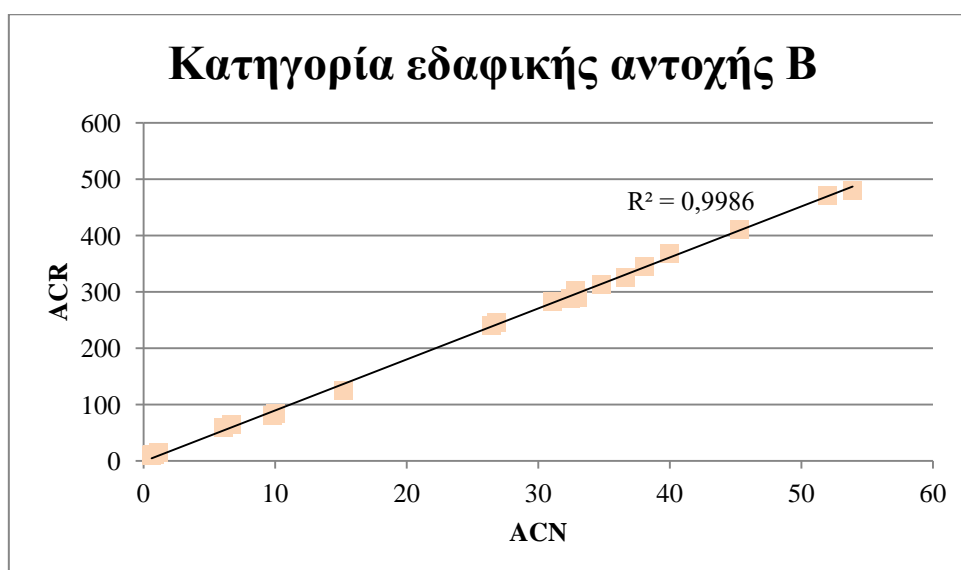
Πίνακας 5.13: Σύνοψη των δεικτών ACN-ACR για κάθε τύπο αεροσκάφους και για όλες τις κατηγορίες εδαφικής αντοχής

Τύπος α/φους	Κατηγορία εδαφικής αντοχής							
	D		C		B		A	
	ACN	ACR	ACN	ACR	ACN	ACR	ACN	ACR
A320	50,24	444,00	44,37	399,53	39,99	367,79	38,53	345,17
AT45	13,85	116,11	11,55	97,14	10,03	83,26	8,19	62,19
DH8A	13,43	122,42	11,61	96,83	9,84	79,82	7,94	53,96
A321	63,24	584,26	57,59	517,19	52,00	471,19	49,36	436,65
A32A	50,24	444,00	44,37	399,53	39,99	367,79	38,53	345,17
B712	39,46	380,37	36,50	328,59	32,48	288,26	30,77	252,88
A319	42,06	364,72	36,37	326,02	32,81	302,33	31,95	280,69
B733	42,80	389,28	38,78	345,93	34,84	313,66	33,04	291,54
C550	6,29	62,08	6,11	60,69	6,05	58,72	5,73	54,19
DH8D	19,96	173,03	16,97	143,19	15,23	124,98	12,81	98,48
B73H	55,21	507,79	50,28	448,34	45,29	410,28	42,83	377,45
B738	55,21	507,79	50,28	448,34	45,29	410,28	42,83	377,45
A32B	63,24	584,26	57,59	517,19	52,00	471,19	49,36	436,65
A21N	63,24	584,26	57,59	517,19	52,00	471,19	49,36	436,65
B73W	47,20	421,56	42,12	376,18	38,07	345,20	36,33	321,01
AT72	19,96	173,03	16,97	143,19	15,23	124,98	12,81	98,48
AT75	19,96	173,03	16,97	143,19	15,23	124,98	12,81	98,48
AT46	13,85	116,11	11,55	97,14	10,03	83,26	8,19	62,19
AT43	13,85	116,11	11,55	97,14	10,03	83,26	8,19	62,19
SR2	1,25	11,36	0,97	10,93	0,67	10,51	0,48	10,01
PA2	0,94	9,19	0,80	8,98	0,61	8,77	0,45	8,52
B75W	52,87	448,08	40,31	336,65	32,99	289,52	29,71	262,38
A318	34,79	297,06	29,64	264,99	26,80	246,29	25,81	224,58
B463	32,22	327,85	29,82	280,24	26,43	240,11	24,68	209,97
A20N	50,24	444,00	44,37	399,53	39,99	367,79	38,53	345,17
D62	1,94	17,18	1,57	15,71	1,16	14,99	0,84	14,08
B76W	86,73	738,34	65,77	557,55	53,91	479,49	48,78	440,67
AT73	19,96	173,03	16,97	143,19	15,23	124,98	12,81	98,48
B73C	42,80	389,28	38,78	345,93	34,84	313,66	33,04	291,54
PA3	1,28	11,95	1,09	11,59	0,83	11,24	0,61	10,81
B462	32,22	327,85	29,82	280,24	26,43	240,11	24,68	209,97
C56X	6,92	68,26	6,72	66,73	6,66	64,57	6,30	59,65
B737	39,31	352,29	35,17	310,54	31,10	283,07	29,97	261,05
B753	58,13	516,54	45,07	383,89	36,64	324,86	32,85	294,25
P28	0,94	9,19	0,80	8,98	0,61	8,77	0,45	8,52
C172	0,94	9,19	0,80	8,98	0,61	8,77	0,45	8,52
DA40	1,17	11,08	1,00	10,78	0,76	10,48	0,56	10,11
DA42	1,17	11,08	1,00	10,78	0,76	10,48	0,56	10,11
7S8	55,21	507,79	50,28	448,34	45,29	410,28	42,83	377,45

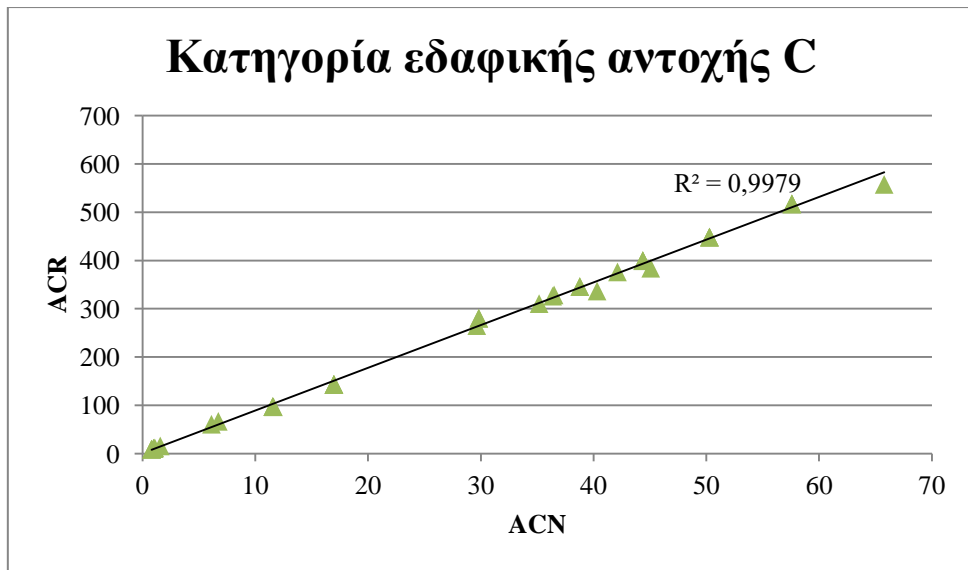
Σύμφωνα με την μορφή των διαγραμμάτων διασποράς (Εικόνες 5.15-5.20) παρατηρείται, τόσο για κάθε κατηγορία εδαφικής αντοχής (A, B, C, D) ξεχωριστά όσο και για όλες μαζί, πως υπάρχει καλή συσχέτιση μεταξύ των δεικτών ACN και ACR για κάθε τύπο αεροσκάφους. Η τάση για αύξηση των τιμών στη μια μεταβλητή (δείκτης ACN) συνοδεύεται από τάση για αύξηση των τιμών στην άλλη μεταβλητή (δείκτης ACR), η οποία εμφανίζεται ομοιόμορφα σε όλο το δείγμα (μεγάλη συσχέτιση). Μάλιστα, παρατηρώντας και τις τιμές του συντελεστή προσαρμογής πρόκειται για ισχυρή μορφή συσχέτισης.



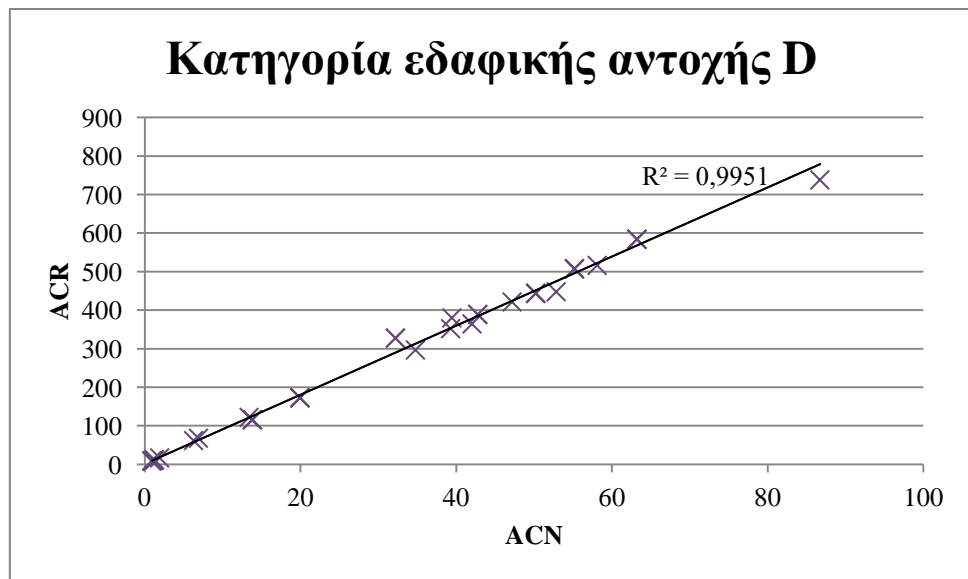
Εικόνα 5.15: Διάγραμμα συσχέτισης δεικτών ACN-ACR για κατηγορία εδαφικής αντοχής Α



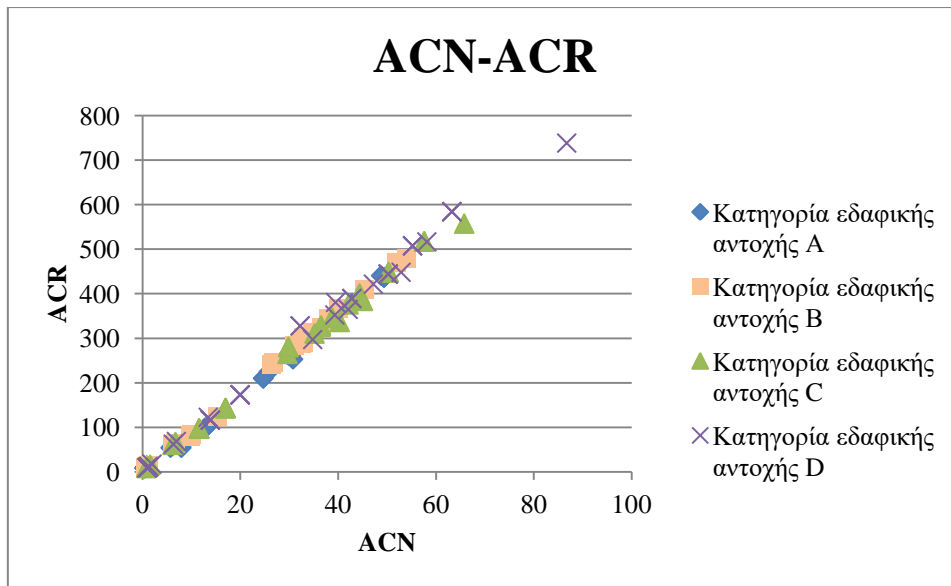
Εικόνα 5.16: Διάγραμμα συσχέτισης δεικτών ACN-ACR για κατηγορία εδαφικής αντοχής Β



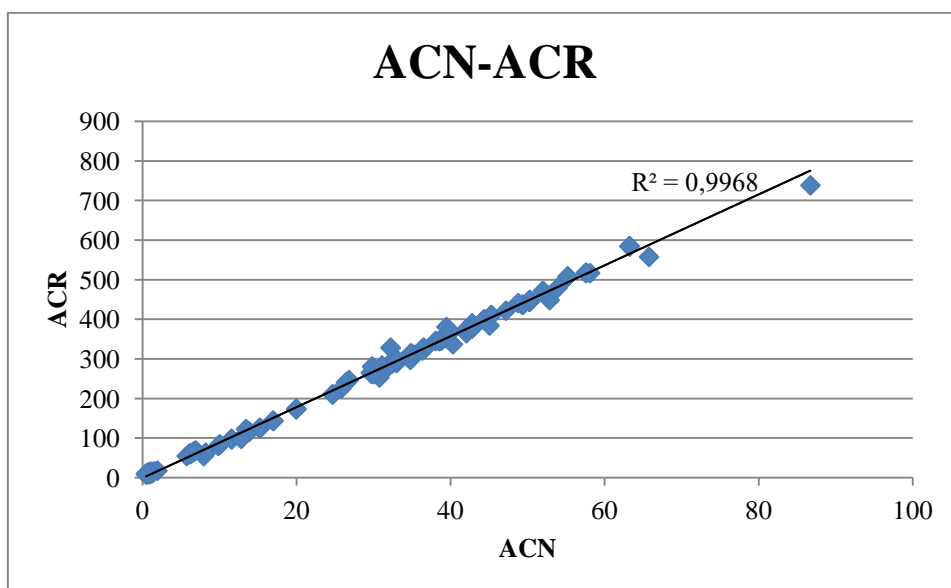
Εικόνα 5.17: Διάγραμμα συσχέτισης δεικτών ACN-ACR για κατηγορία εδαφικής αντοχής C



Εικόνα 5.18: Διάγραμμα συσχέτισης δεικτών ACN-ACR για κατηγορία εδαφικής αντοχής D



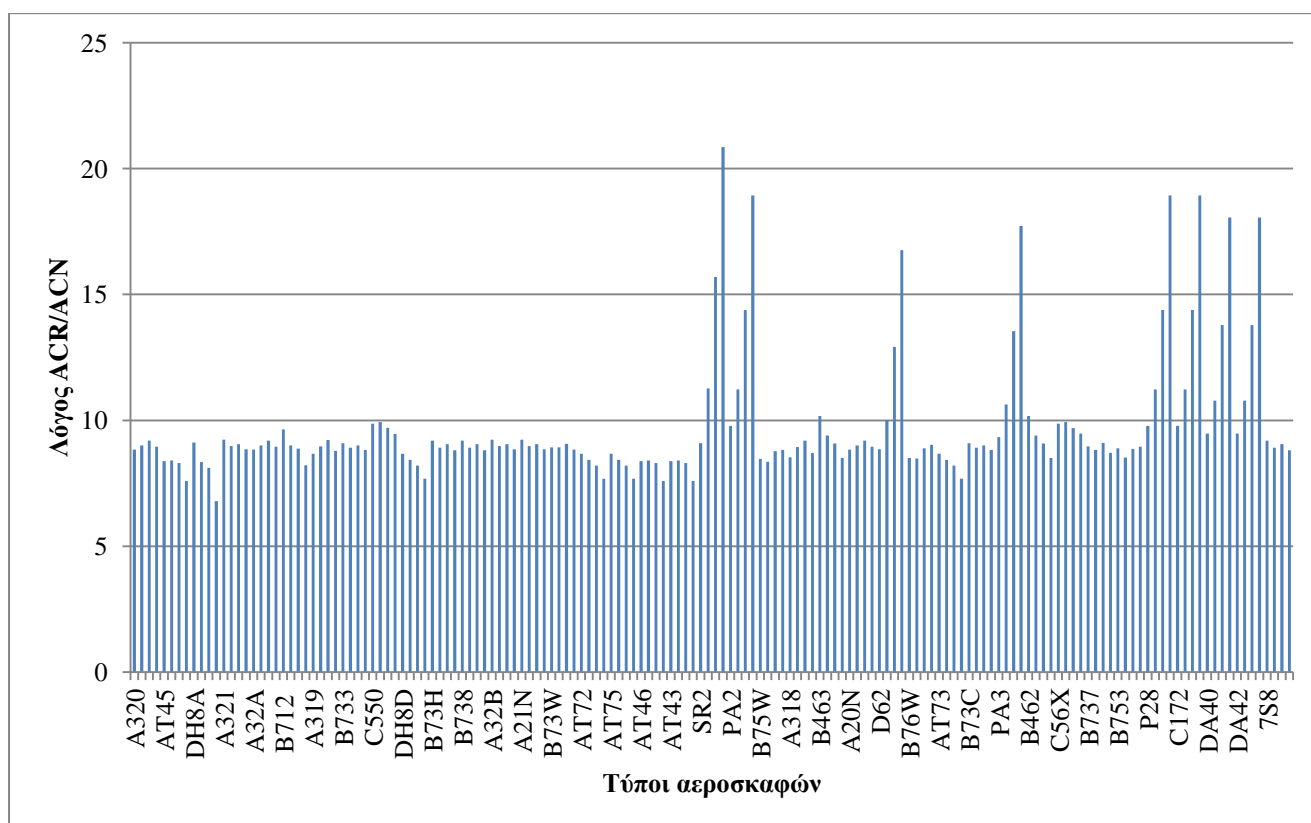
Εικόνα 5.19: Διάγραμμα συσχέτισης δεικτών ACN-ACR για όλες τις κατηγορίες εδαφικής αντοχής



Εικόνα 5.20: Διάγραμμα συσχέτισης δεικτών ACN-ACR για όλες τις κατηγορίες εδαφικής αντοχής – Συντελεστής προσαρμογής

Το σχετικό ραβδόγραμμα (Εικόνα 5.21) παρουσιάζει την διακύμανση των τιμών του λόγου ACR/ACN για κάθε τύπο αεροσκάφους. Σύμφωνα με τις εικονιζόμενες τιμές διαφαίνεται πως υπάρχει μια διακύμανση των τιμών του υπόψη λόγου στο διάστημα $6,8 \div 20,85$ με μέση τιμή ίση με 9,73. Ωστόσο παρατηρείται ότι οι περισσότερες τιμές του λόγου ACR/ACN συγκεντρώνονται «κοντά» στη μέση τιμή. Η μέγιστη τιμή του λόγου ACR/ACN είναι ίση με 20,85 και αφορά στον τύπο αεροσκάφους SR2 για υψηλή κατηγορία εδαφικής αντοχής A, ενώ η ελάχιστη τιμή του λόγου ACR/ACN είναι ίση με 6,8 και αφορά στον τύπο αεροσκάφους DH8A επίσης για υψηλή κατηγορία εδαφικής αντοχής A. Για την μείωση αποκλίσεων από την μέση τιμή που παρατηρούνται σε ορισμένους τύπους αεροσκαφών, ο ICAO αποφάσισε οι δείκτες ACR να είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτεροι από τους δείκτες ACN.

Προσεγγιστικά, λοιπόν οι τιμές του δείκτη ACR είναι δέκα (10) φορές μεγαλύτερες από τις τιμές του δείκτη ACN για τον ίδιο τύπο αεροσκάφους ($ACR \approx 10 \times ACN$).



Εικόνα 5.21: Διάγραμμα διακύμανσης των τιμών του λόγου ACR/ACN

5.5.3. Δείκτες PCN-PCR

Ο υπολογισμός των τιμών των δεικτών PCN και PCR αφορούσε στις διατομές που σχεδιάστηκαν για τα δέκα (10) διαφορετικά σενάρια κυκλοφορίας αεροσκαφών και για τις τρεις (3) τιμές του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης ($CBR=7\%$, $CBR=9\%$, $CBR=10\%$).

Πιο συγκεκριμένα, για τον προσδιορισμό του δείκτη PCN και σύμφωνα με το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου ACN-PCN, υπολογίστηκε το απαιτούμενο πάχος αξιολόγησης (inches), χρησιμοποιώντας το βοηθητικό υπολογιστικό φύλλο EXCEL του λογισμικού COMFAA 3.0. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 5.14. Με δεδομένα τη σύνθεση της κυκλοφορίας κάθε σεναρίου, τα πάχη αξιολόγησης και την κατηγορία εδαφικής αντοχής, χρησιμοποιώντας το λογισμικό COMFAA 3.0, υπολογίστηκαν οι αριθμητικές τιμές των δεικτών PCN.

Όσον αφορά στον προσδιορισμό του δείκτη PCR, σύμφωνα με τη νέα μέθοδο ACR-PCR, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό FAARFIELD 2.0, με δεδομένα εισαγωγής τη σύνθεση κυκλοφορίας κάθε σεναρίου, τα χαρακτηριστικά των διατομών (υλικά και πάχη επιμέρους στρώσεων) και την κατηγορία εδαφικής αντοχής.

Τέλος, με δεδομένες τις τιμές των δεικτών PCN και PCR και με τη βοήθεια υπολογιστικού φύλλου EXCEL, σχεδιάστηκαν τα κατάλληλα διαγράμματα διασποράς προκειμένου να διαπιστωθεί η ύπαρξη ή μη συσχέτισης μεταξύ τους.

Στον Πίνακα 5.14 παρουσιάζονται τα πάχη των οδοστρωμάτων αξιολόγησης (inches) για την εκτίμηση των δεικτών PCN, για κάθε σενάριο κυκλοφορίας και για τις τρεις (3) τιμές του δείκτη CBR ($CBR=7\%$, $CBR=9\%$ και $CBR=10\%$) της στρώσης έδρασης.

Πίνακας 5.14: Πάχη οδοστρωμάτων αξιολόγησης (inches) για την εκτίμηση των δεικτών PCN

Σενάρια κυκλοφορίας	Κατηγορία στρώσης έδρασης		
	CBR=7%	CBR=9%	CBR=10%
1 ^ο	43,8	38,9	38,5
2 ^ο	33,9	28,8	26,8
3 ^ο	34,3	29,2	27,2
4 ^ο	36,3	30,6	29,4
5 ^ο	44,8	40,6	39,1
6 ^ο	35,9	30,5	28,8
7 ^ο	39,2	33,9	32,3
8 ^ο	38,8	33,6	31,7
9 ^ο	35,7	30,5	28,0
10 ^ο	36,4	31,3	29,7

* Για στρώση έδρασης με τιμή CBR=7%:

Στον Πίνακα 5.15 συνοψίζονται οι δείκτες PCN και PCR για κάθε σενάριο κυκλοφορίας και για στρώση έδρασης με CBR=7%. Παρατηρείται πως σύμφωνα με την βιβλιογραφία των δύο μεθόδων δομικής κατάταξης οδοστρωμάτων, η συγκεκριμένη στρώση έδρασης κατατάσσεται στην κατηγορία εδαφικής αντοχής C (χαμηλή αντοχή).

Πίνακας 5.15: Σύνοψη δεικτών PCN-PCR για στρώση έδρασης με τιμή CBR=7%

Σενάρια κυκλοφορίας	PCN	PCR
1 ^ο	101/F/C/X/T	627/F/C/X/T
2 ^ο	78/F/C/X/T	560/F/C/X/T
3 ^ο	76/F/C/X/T	570/F/C/X/T
4 ^ο	80/F/C/X/T	558/F/C/X/T
5 ^ο	111/F/C/X/T	670/F/C/X/T
6 ^ο	73/F/C/X/T	557/F/C/X/T
7 ^ο	88/F/C/X/T	555/F/C/X/T
8 ^ο	90/F/C/X/T	557/F/C/X/T
9 ^ο	79/F/C/X/T	549/F/C/X/T
10 ^ο	96/F/C/X/T	560/F/C/X/T

* Για στρώση έδρασης με τιμή CBR=9%:

Στον Πίνακα 5.16 συνοψίζονται οι δείκτες PCN και PCR για κάθε σενάριο κυκλοφορίας και για στρώση έδρασης με CBR=9%. Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται το εξής: σύμφωνα με την βιβλιογραφία της υφιστάμενης μεθόδου ACN-PCN, η υπόψη στρώση έδρασης κατατάσσεται στην κατηγορία εδαφικής αντοχής B (μέτρια αντοχή), ενώ με την νέα μέθοδο ACR-PCR η κατηγορία εδαφικής αντοχής υποβιβάζεται σε C (χαμηλή αντοχή).

Πίνακας 5.16: Σύνοψη δεικτών PCN-PCR για στρώση έδρασης με τιμή CBR=9%

Σενάρια κυκλοφορίας	PCN	PCR
1 ^ο	103/F/B/X/T	665/F/C/X/T
2 ^ο	72/F/B/X/T	564/F/C/X/T
3 ^ο	70/F/B/X/T	581/F/C/X/T
4 ^ο	64/F/B/X/T	554/F/C/X/T
5 ^ο	118/F/B/X/T	732/F/C/X/T
6 ^ο	66/F/B/X/T	558/F/C/X/T
7 ^ο	84/F/B/X/T	563/F/C/X/T

8°	87/F/B/X/T	568/F/C/X/T
9°	64/F/B/X/T	564/F/C/X/T
10°	92/F/B/X/T	562/F/C/X/T

* Για στρώση έδρασης με τιμή CBR=10%:

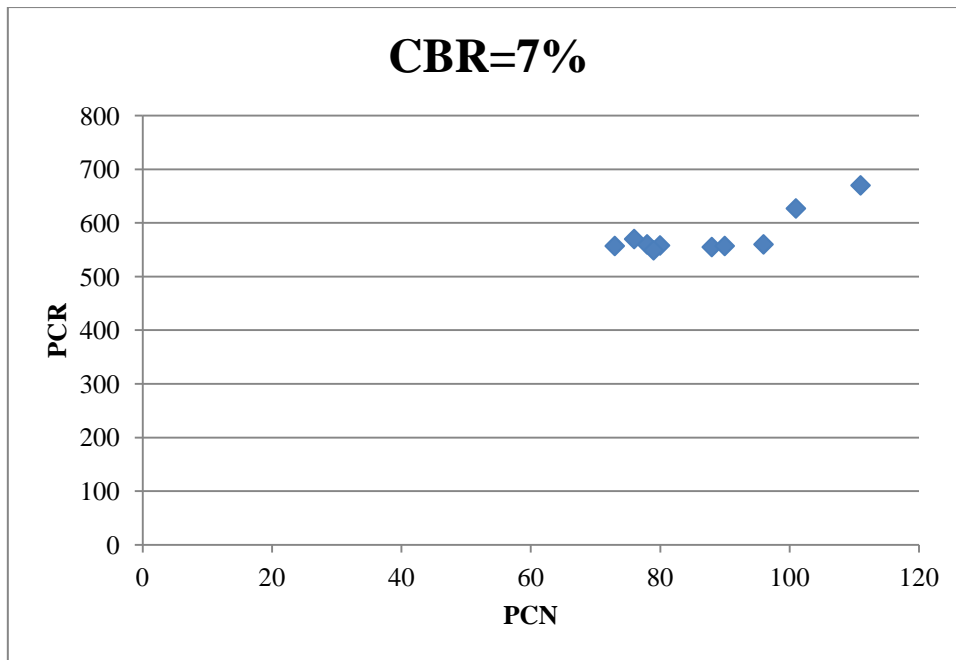
Στον Πίνακα 5.17 συνοψίζονται οι δείκτες PCN και PCR για κάθε σενάριο κυκλοφορίας και για στρώση έδρασης με CBR=10%. Παρατηρείται πως σύμφωνα με την βιβλιογραφία των δύο μεθόδων δομικής κατάταξης οδοστρωμάτων, η συγκεκριμένη στρώση έδρασης κατατάσσεται στην κατηγορία εδαφικής αντοχής B (μέτρια αντοχή).

Πίνακας 5.17: Σύνοψη δεικτών PCN-PCR για στρώση έδρασης με τιμή CBR=10%

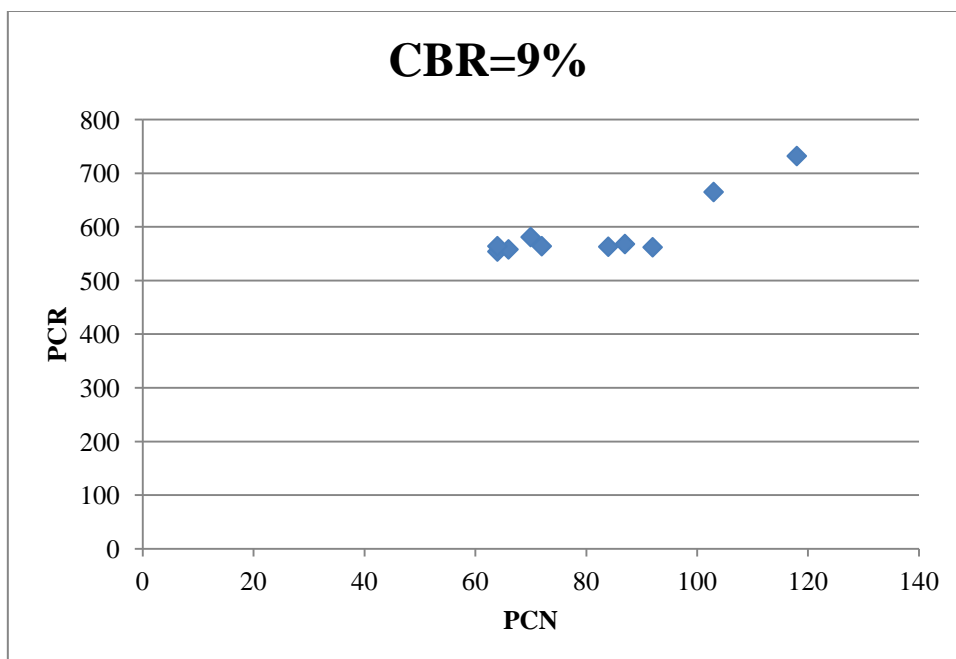
Σενάρια κυκλοφορίας	PCN	PCR
1°	116/F/B/X/T	657/F/B/X/T
2°	72/F/B/X/T	514/F/B/X/T
3°	71/F/B/X/T	528/F/B/X/T
4°	69/F/B/X/T	531/F/B/X/T
5°	125/F/B/X/T	688/F/B/X/T
6°	69/F/B/X/T	522/F/B/X/T
7°	89/F/B/X/T	525/F/B/X/T
8°	89/F/B/X/T	519/F/B/X/T
9°	63/F/B/X/T	498/F/B/X/T
10°	96/F/B/X/T	523/F/B/X/T

Σύμφωνα με την μορφή των σχετικών διαγραμμάτων διασποράς (Εικόνες 5.22, 5.23 και 5.24) των αριθμητικών τιμών των δεικτών PCN και PCR, παρατηρείται πως η τάση για αύξηση των τιμών στη μία μεταβλητή (δείκτης PCN) δεν συνδέεται με αντίστοιχη αύξηση των τιμών στην άλλη μεταβλητή (δείκτης PCR).

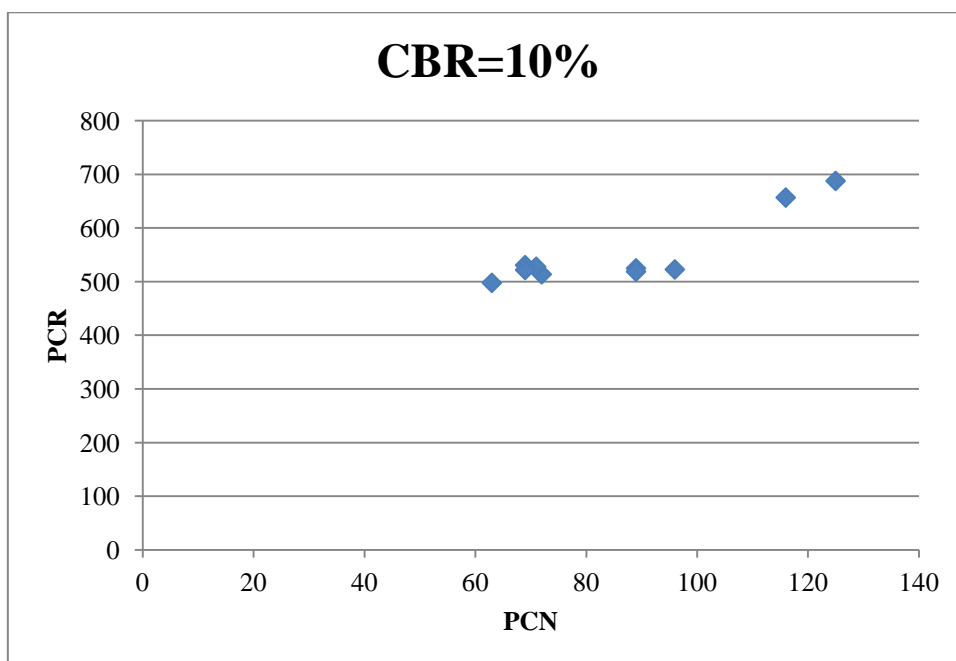
Επομένως, πρόκειται για μηδενική ή έλλειψη συσχέτισης μεταξύ των αντίστοιχων δεικτών.



Εικόνα 5.22: Διάγραμμα συσχέτισης δεικτών PCN-PCR για κατηγορία εδαφικής αντοχής CBR=7% και για όλα τα σενάρια κυκλοφορίας



Εικόνα 5.23: Διάγραμμα συσχέτισης δεικτών PCN-PCR για κατηγορία εδαφικής αντοχής CBR=9% και για όλα τα σενάρια κυκλοφορίας

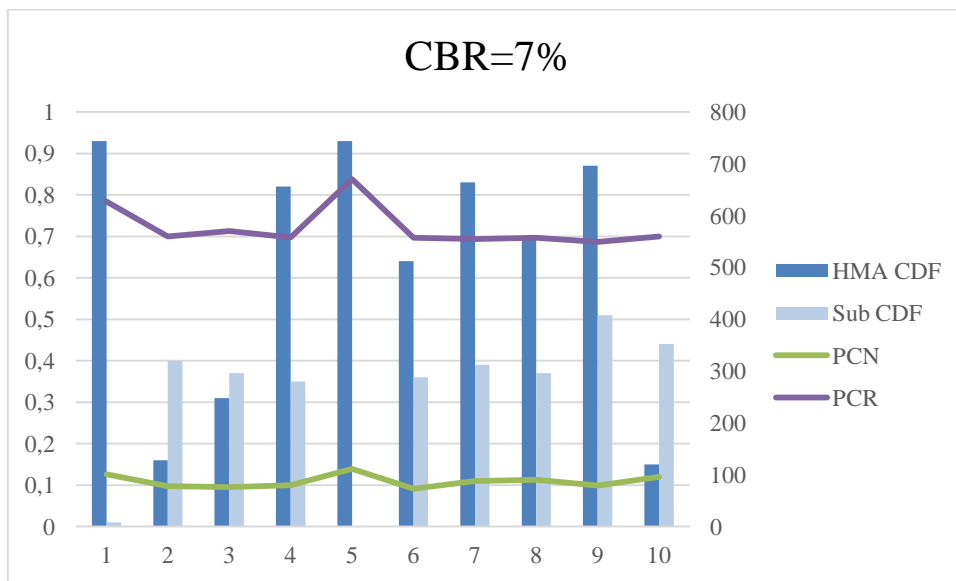


Εικόνα 5.24: Διάγραμμα συσχέτισης των δεικτών PCN-PCR για κατηγορία εδαφικής αντοχής CBR=10% και για όλα τα σενάρια κυκλοφορίας

Βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων των λογισμικών προέκυψαν τα διαγράμματα, στα οποία παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ των Δεικτών Αθροιστικής Φθοράς της ασφαλικής στρώσης (HMA CDF) και της στρώσης έδρασης (Sub CDF) με τους δείκτες PCN και PCR (Εικόνες 5.25, 5.26 και 5.27).

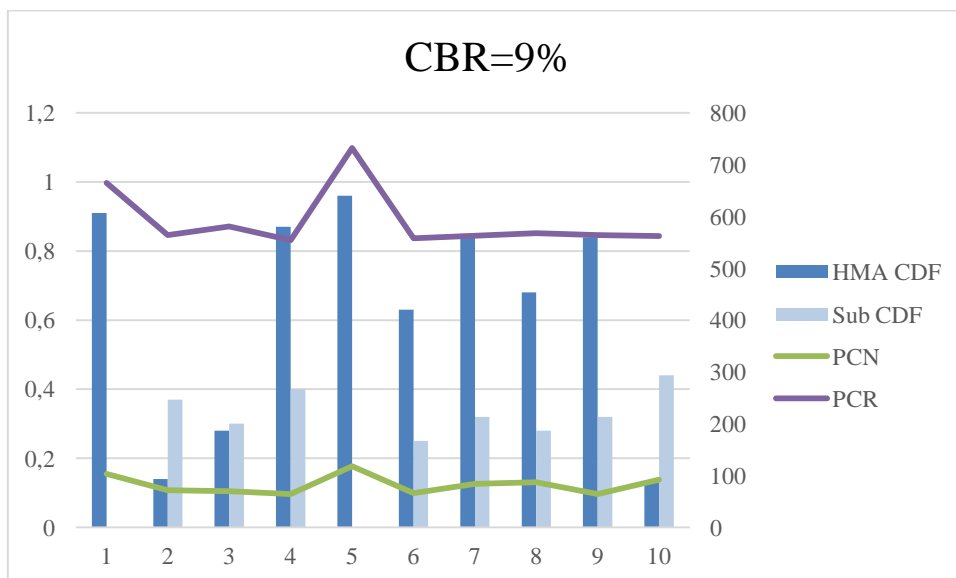
Σύμφωνα με τα υπόψη διαγράμματα παρατηρείται ότι διατομές με ίδια τιμή του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης και με ίδια σχεδόν ή παραπλήσια αριθμητική τιμή των δεικτών PCN ή PCR, παρουσιάζουν διαφορετική αριθμητική τιμή των δεικτών Sub CDF και HMA CDF και άρα διαφορετική φέρουσα ικανότητα. Συνεπώς η δομική κατάταξη ενός οδοστρώματος δεν μπορεί να αποδώσει αυτή τη διαφορετικότητα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι οι δείκτες PCN και PCR χρησιμοποιούνται κυρίως προκειμένου να συγκριθεί η φέρουσα ικανότητα οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Κατά κανόνα, οδοστρώματα αεροδρομίων με μεγαλύτερες τιμές των δεικτών PCN/PCR αναμένεται να έχουν και μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα.

* Για στρώση έδρασης με τιμή CBR=7%:



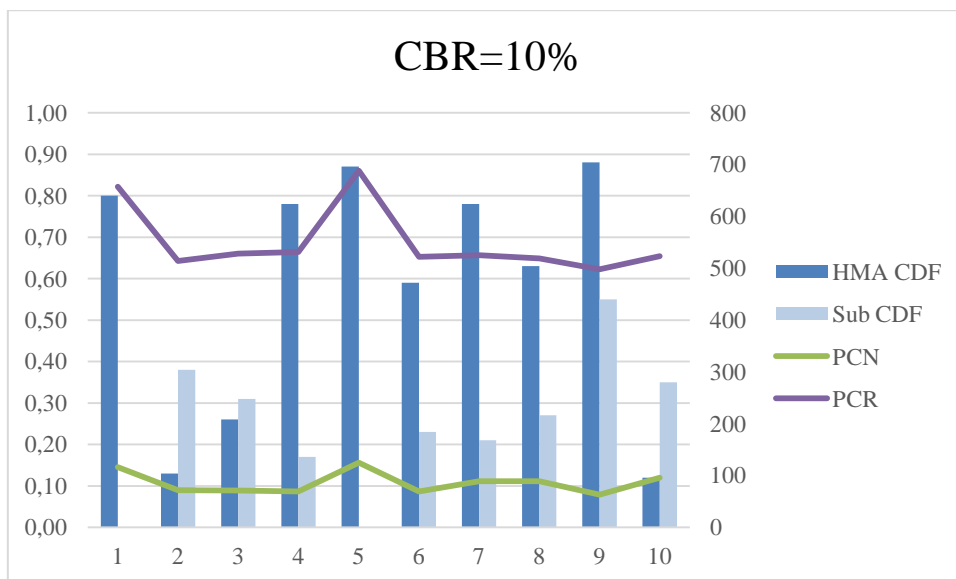
Εικόνα 5.25: Διάγραμμα συσχέτισης δεικτών PCN-PCR με τους δείκτες HMA CDF-Sub CDF για στρώση έδρασης με τιμή CBR=7%

* Για στρώση έδρασης με τιμή CBR=9%:



Εικόνα 5.26: Διάγραμμα συσχέτισης δεικτών PCN-PCR με τους δείκτες HMA CDF-Sub CDF για στρώση έδρασης με τιμή CBR=9%

* Για στρώση έδρασης με τιμή CBR=10%:



Εικόνα 5.27: Διάγραμμα συσχέτισης δεικτών PCN-PCR με τους δείκτες HMA CDF-Sub CDF για στρώση έδρασης με τιμή CBR=10%

6.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθόδων δομικής κατάταξης οδοστρωμάτων αεροδρομίων, ACN-PCN και ACR-PCR. Πιο συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η ύπαρξη ή μη συσχέτισης μεταξύ των αντίστοιχων δεικτών των δύο μεθόδων. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού ήταν απαραίτητος ο υπολογισμός και η σύγκριση των δεικτών των δύο μεθόδων ACN-ACR και PCN-PCR.

Ο καθορισμός των υπόψη δεικτών πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις παραδοχές κάθε μεθόδου και με χρήση των κατάλληλων –κάθε φορά– λογισμικών υπολογισμού. Για λόγους σύγκρισης των δεικτών, ο καθορισμός τους αφορούσε σε δέκα διαφορετικά σενάρια κυκλοφορίας αεροσκαφών, ενώ για κάθε σενάριο κυκλοφορίας αεροσκαφών σχεδιάστηκαν τρεις διαφορετικές διατομές οδοστρώματος για κάθε τιμή του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης (CBR=7%, CBR=9%, CBR=10%). Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των αναλύσεων, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Σχετικά με τη σύγκριση των τιμών δεικτών ACN-ACR

Η μορφή του διαγράμματος διασποράς των τιμών των δεικτών ACN-ACR, για όλους τους τύπους αεροσκαφών και για κάθε κατηγορία εδαφικής αντοχής, υποδηλώνει την ύπαρξη συσχέτισης μεταξύ των δύο δεικτών. Μάλιστα, διαφαίνεται πως υπάρχει καλή συσχέτιση μεταξύ των δεικτών ACN-ACR ($R^2=0,9968$: ισχυρή συσχέτιση).

Πράγματι, συγκρίνοντας τις τιμές των δεικτών ACN και ACR, παρατηρείται μια διακύμανση των τιμών του λόγου ACN/ACR, λόγου στο διάστημα $[6,8 \div 20,85]$ με μέση τιμή ίση με 9,73. Ωστόσο παρατηρείται ότι οι περισσότερες τιμές του λόγου ACR/ACN συγκεντρώνονται «κοντά» στη μέση τιμή. Οι αποκλίσεις από την μέση τιμή για ορισμένους τύπους αεροσκαφών οδήγησαν τον ICAO στην επιλογή των τιμών του δείκτη ACR να είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερες σε σχέση με τις τιμές του δείκτη ACN, έτσι ώστε αυτές να περιοριστούν.

Προσεγγιστικά, λοιπόν οι τιμές του δείκτη ACR είναι δέκα (10) φορές μεγαλύτερες από τις τιμές του δείκτη ACN για τον ίδιο τύπο αεροσκάφους ($ACR \approx 10 \times ACN$).

Επομένως, η επιλογή των τιμών του δείκτη ACR να είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερες σε σχέση με τις τιμές του δείκτη ACN αποφασίστηκε από τον ICAO, έτσι ώστε να αποφευχθεί η σύγχυση στη διαδικασία μεταφοράς από τη μέθοδο ACN-PCN στη μέθοδο ACR-PCR.

Σχετικά με τη σύγκριση των τιμών δεικτών PCN-PCR

Ένα πρώτο συμπέρασμα που προκύπτει από τον καθορισμό των δεικτών PCN και PCR, αφορά στην μορφή έκφρασης τους, δηλαδή στην κωδικοποίησή τους.

Πιο συγκεκριμένα, η στρώση έδρασης με τιμή CBR=9% στη μέθοδο ACN-PCN ανήκει στην μέτρια κατηγορία εδαφικής αντοχής (κατηγορία B), ενώ στη μέθοδο ACR-PCR ανήκει στη χαμηλή κατηγορία εδαφικής αντοχής (κατηγορία C). Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αλλαγή της κατηγοριοποίησης της εδαφικής αντοχής με βάση την νέα μέθοδο ACR-PCR.

Ένα δεύτερο συμπέρασμα προκύπτει από την παρατήρηση της μορφής των διαγραμμάτων των δεικτών PCN-PCR για τα δέκα (10) σενάρια κυκλοφορίας αεροσκαφών και για τις τρεις (3) διαφορετικές τιμές του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης (CBR=7%, CBR=9% και CBR=10%) και αφορά στην έλλειψη συσχέτισης μεταξύ των υπόψη δεικτών, καθώς η τάση για αύξηση των τιμών στη μία μεταβλητή (δείκτης PCN) δεν συνδέεται με αντίστοιχη αύξηση των τιμών στην άλλη μεταβλητή (δείκτης PCR).

Σχετικά με τη σύγκριση των τιμών δεικτών PCN-PCR και των τιμών HMA CDF-Sub CDF

Βάσει των κατάλληλων διαγραμμάτων παρατηρήθηκε ότι διατομές με ίδια τιμή του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης και με ίδια σχεδόν ή παραπλήσια αριθμητική τιμή των δεικτών PCN ή PCR, παρουσιάζουν διαφορετική αριθμητική τιμή των δεικτών Sub CDF και HMA CDF. Συνεπώς η δομική κατάταξη ενός οδοστρώματος δεν μπορεί να αποδώσει αυτή τη διαφορετικότητα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι οι δείκτες PCN και PCR χρησιμοποιούνται κυρίως προκειμένου να συγκριθεί η φέρουσα ικανότητα οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Κατά κανόνα, οδοστρώματα αεροδρομίων με μεγαλύτερες τιμές των δεικτών PCN/PCR έχουν και μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα.

Επομένως, οι δείκτες PCN/PCR δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον σχεδιασμό ή/και στην αξιολόγηση οδοστρωμάτων αεροδρομίων, καθώς οι διαδικασίες σχεδιασμού και αξιολόγησης οδοστρωμάτων αποτελούν σύνθετα προβλήματα μηχανικού και απαιτούν λεπτομερή ανάλυση.

Σχετικά με τις αρχές του αεροδρομίου

Βάσει των παραπάνω αποδεικνύεται πως για τους διαχειριστές των αεροδρομίων προκύπτει η ανάγκη επαναπροσδιορισμού της κατηγορίας εδαφικής αντοχής των οδοστρωμάτων του αεροδρομίου λόγω ενδεχόμενης αλλαγής της.

Σύμφωνα με τη νέα μέθοδο δομικής κατάταξης ACR-PCR, αλλάζει η κατηγοριοποίηση της εδαφικής αντοχής και αυτό, πρακτικά, σημαίνει ότι σε ορισμένα αεροδρόμια ενδέχεται να αλλάξει η κατηγορία εδαφικής αντοχής των οδοστρωμάτων τους κατά τη διαδικασία μετάβασης στη μέθοδο

ACR-PCR. Στην πραγματικότητα, πρόκειται για αεροδρομία με τις εξής χαρακτηριστικές τιμές του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης:

- * CBR=5%. Υποβιβασμός από την Κατηγορία Εδαφικής Αντοχής C στην D
- * CBR=9%. Υποβιβασμός από την Κατηγορία Εδαφικής Αντοχής B στην C
- * CBR=13-14%. Υποβιβασμός από την Κατηγορία Εδαφικής Αντοχής A στην B

Πράγματι, οι περισσότεροι διαχειριστές αεροδρομίου, μέσω της κωδικοποίησης του ισχύοντος δείκτη PCN των οδοστρωμάτων, γνωρίζουν σε ποια κατηγορία εδαφικής αντοχής ανήκουν τα οδοστρώματα του αεροδρομίου. Αυτό, το οποίο ίσως δεν γνωρίζουν, είναι η πραγματική τιμή CBR της στρώσης έδρασης.

Εξαιτίας, λοιπόν, της μεταφοράς από την μέθοδο ACN-PCN στη μέθοδο ACR-PCR, δημιουργείται η απαίτηση προσδιορισμού της χαρακτηριστικής τιμής CBR της στρώσης έδρασης, μέσω γεωτεχνικών μελετών, έτσι ώστε να αποφασιστεί εάν θα πρέπει να αλλάξει η κατηγορία εδαφικής αντοχής της στρώσης έδρασης. Για την παραπάνω διαδικασία ενδέχεται οι αρχές του αεροδρομίου να απευθυνθούν σε επαγγελματίες στον τομέα των οδοστρωμάτων αεροδρομίων, μια υπηρεσία, η οποία δημιουργεί επιπλέον κόστος για το αεροδρόμιο.

Επιπλέον, προκύπτει και η ανάγκη υπολογισμού και δημοσίευσης των νέων δεικτών PCR των οδοστρωμάτων, οι οποίοι θα βασίζονται στην μέθοδο ACR-PCR. Για την εκτίμηση των δεικτών PCR, είναι εξίσου πιθανό να απαιτηθεί επαγγελματική καθοδήγηση, ώστε να συμπεριληφθούν όλες εκείνες οι απαραίτητες πληροφορίες, οι οποίες αφορούν στην μέθοδο υπολογισμού του υπόψη δείκτη.

Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Είναι σαφές πως η παρούσα χρονική περίοδος αποτελεί μία σταδιακή μετάβαση από τη μέθοδο ACN-PCN στη μέθοδο ACR-PCR, ενώ η αποκλειστική εφαρμογή της νέας μεθόδου ACR-PCR θα ισχύσει από τον Νοέμβριο 2024.

Οπότε, το πρώτο βήμα, όπως και συνέβη, ήταν να δοθεί η βάση της νέας αυτής προσέγγισης, όσον αφορά στη δομική κατάταξη οδοστρωμάτων αεροδρομίων, με σκοπό να γίνει παγκόσμια αποδεκτή και να εγκριθεί από τον ICAO. Μετά την εφαρμογή της στην πράξη θα είναι εφικτό να αναγνωριστούν τα πλεονεκτήματα της μεθόδου, τα οποία τη συνοδεύουν.

Παρόμοια ανάλυση θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί σε δύσκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων και να συγκριθούν ομοίως οι αντίστοιχοι δείκτες ACN-ACR και PCN-PCR.

Τέλος, ένα ενδιαφέρον ζήτημα θα ήταν η διερεύνηση για δυνατότητα μεταφοράς από τη μέθοδο

ACN-PCN στη μέθοδο ACR-PCR, καθώς και η εύρεση των κατάλληλων μαθηματικών σχέσεων, οι οποίες ενδεχομένως να συνδέουν τους αντίστοιχους δείκτες.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. *Australian Government, Civil Aviation Safety Authority (2021): “Advisory Circular AC 139.C-07v1.0: Strength rating of aerodrome pavements”, Australia.*
2. *Chaleewong K. and Pisitpaibool C. (2018): “Pavement evaluation of airport taxiway and effect of increasing ACN to pavement remaining life”, Department of Civil Engineering, Thammasat School of Engineering, Thammasat University Thailand.*
3. *Fabre C. (2017): “Agressivité du trafic pour les chaussées, les atterrisseurs d’avions”, Conférence Journée d'Etude de la Route et des Infrastructures (JERI), Lausanne, Suisse.*
4. *Fabre C. (2018): “The Aircraft Classification Rating –Pavement Classification Rating ACR-PCR”, XIV ALACPA International Seminar Of Airport Pavement /XII FAA Airport Pavements Workshop /VII Short Course For Airfield Pavement Maintenance, Quito, Republic of Ecuador.*
5. *Fabre C., Balay J.M. (2013): “Toward a new ICAO Aircraft Classification Number (ACN) Methodology”, Ninth (9th) International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (BCRRA), Trondheim, Norway.*
6. *Federal Aviation Administration, FAA (2014): “Advisory Circular No: 150/5335-5C, subject: Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength - PCN”, U.S.A., Department of Transportation Federal Aviation Administration.*
7. *Federal Aviation Administration, FAA (2020): “Advisory Circular No: 150/5335-5D, subject: Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength - PCR”, U.S.A., Department of Transportation Federal Aviation Administration.*
8. *Federal Aviation Administration, FAA (2021): “Advisory Circular No: 150/5320-6G, subject: Airport Pavement Design and Evaluation”, U.S.A., Department of Transportation Federal Aviation Administration.*
9. *General Civil Aviation Authority (2021): “Notice of proposed amendment 2021-03, Subject: CAR Part IX: CAR – ADR Aerodromes, Issue 1”, United Arab Emirates.*

10. *International Civil Aviation Organization, ICAO (1983): "Aerodrome Design Manual, Part 3, Pavements, Second Edition", U.S.A.*
11. *Loizos A. & Charoniti G. (2005): "Investigation of Classification Parameters and Assumptions for Rigid and Flexible Airfield Pavements", Seventh (7th) International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (BCRRA), Trondheim, Norway.*
12. *White G. (2021): Eleventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Volume 1: Practical implications for the implementation of the new international airport pavement strength rating system", Eleventh (11th) International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (BCRRA), Trondheim, Norway.*
13. *Κοκολάκης Γ., Σπηλιώτης Ι. (2010): «Θεωρία Πιθανοτήτων και Στατιστική με Εφαρμογές, Κεφάλαιο 5: Ανάλυση Παλινδρόμησης και Συσχέτιση», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.*
14. *Λοΐζος Α., Πλατή Χ. (2018): «Σημειώσεις για το μάθημα: Αξιολόγηση και Συντήρηση οδοστρωμάτων, Τεύχος Α: Οδοστρώματα Αεροδρομίων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.*
15. *Λοΐζος Α., Αμπακούμκιν Κ., Χαρωνίτης Γ. (1998): «Διερεύνηση της μεθόδου ACN-PCN στο πλαίσιο της δομικής αξιολόγησης εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων, Τεχνικά Χρονικά Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, Ι, Τεύχος 2», Αθήνα.*
16. *Λοΐζος Α., Πλατή Χ. (2017): «Σημειώσεις για το μάθημα: Σχεδιασμός Οδοστρωμάτων Οδών και Αεροδρομίων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.*
17. *Common IATA Aircraft Codes: <https://www.online-coordination.com/External/Help/index.html#!WordDocuments/commoniataaircraftcodes.htm>*
18. *Fraport Greece: <https://www.fraport-greece.com/ell/>*
19. *Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα: https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/5035/1/02_chapter_6.pdf*
20. *Σημειώσεις από Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης: <https://users.auth.gr/dkugiu/Teach/DataAnalysis/Chp5.pdf>*