



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΜΑΘΗΜΑ : ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Α.ΛΟΪΖΟΣ

ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΗΜΙΑΚΑΜΠΤΩΝ
ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΡΜΕΝΗ ΑΓΓΕΛΙΚΗ

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2006



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

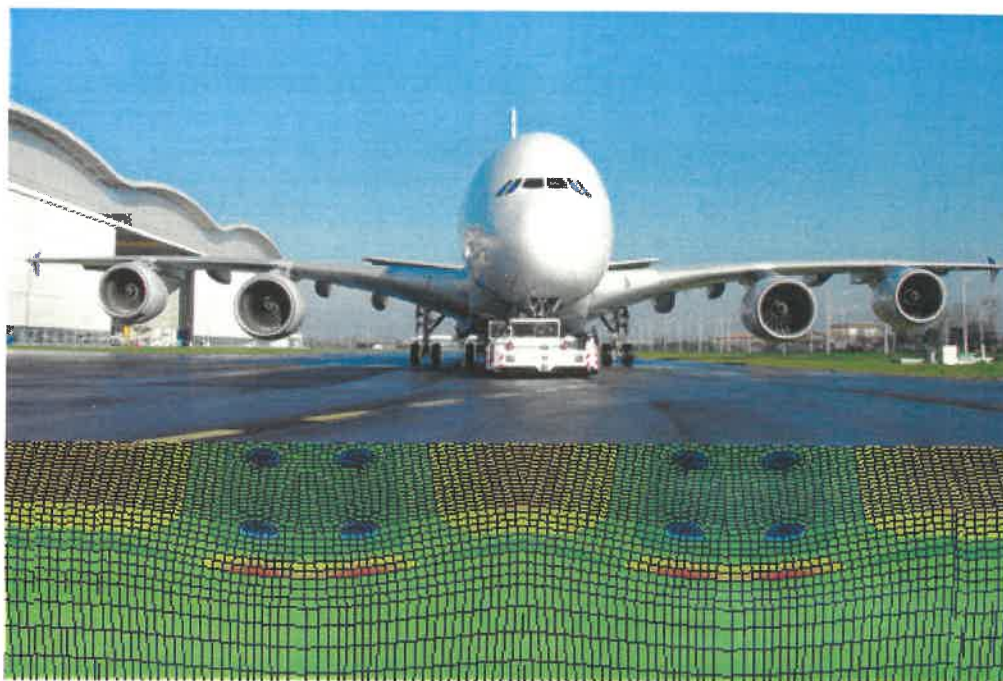
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΜΑΘΗΜΑ : ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Α.ΛΟΪΖΟΣ

ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΗΜΙΑΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΡΜΕΝΗ ΑΓΓΕΛΙΚΗ

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2006

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>Περίληψη</u>	3
<u>Abstract</u>	4
<u>Εισαγωγή</u>	5
<u>Κεφάλαιο 1^ο : Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων ACN/PCN - Κλασσικές μέθοδοι προσδιορισμού του PCN</u>	7
1.1: Εισαγωγή.....	7
1.2: Η μέθοδος ACN-PCN.....	7
1.3: Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων της FAA (Federal Aviation Administration).....	10
1.4: Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων της UFC(Unified facilities criteria).....	14
1.4.1: Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων της UFC για το ναυτικό.....	14
1.4.2: Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων της UFC για την αεροπορίας.....	17
1.5 Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων τού Γαλλικού Υπουργείου Συγκοινωνιών (Service Technique des Bases Aeriennes-STBA).....	20
1.6: Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων της Διεύθυνσης Υπηρεσιών Πολιτικού Μηχανικού της Μ.Βρετανίας (Directorate of Civil Engineering Services).....	22
<u>Κεφάλαιο 2^ο: Εφαρμογή των μεθόδων προσδιορισμού του PCN σε υφιστάμενο οδόστρωμα</u>	27
2.1: Εισαγωγή.....	27
2.2: Στοιχεία του οδοστρώματος	27
2.3:Εφαρμογή μεθόδου της FAA για τον προσδιορισμό του PCN.....	30
2.4: Εφαρμογή μεθόδου της UFC για το ναυτικό για τον προσδιορισμό του PCN.....	34
2.5: Εφαρμογή μεθόδου της UFC για την αεροπορία για τον προσδιορισμό του PCN.....	36
2.6: Εφαρμογή μεθόδου του Γαλλικού Υπουργείου Συγκοινωνιών για τον προσδιορισμό του PCN.....	36
2.7: Εφαρμογή μεθόδου της Διεύθυνσης Υπηρεσιών Πολιτικού Μηχανικού της Μ Βρετανίας για τον προσδιορισμό του PCN.....	39
2.8: Σύγκριση αποτελεσμάτων μεθόδων.....	41
<u>Κεφάλαιο 3^ο : Ανάλυση ευαισθησίας μεθόδων</u>	44

3.1: Εισαγωγή.....	44
3.2: Καθορισμός κυκλοφορίας και κατάλληλη επεξεργασία για την εφαρμογή των μεθόδων.....	45
3.3: Επιρροή μεταβολής πάχους ασφαλικών στρώσεων.....	47
3.4: Επιρροή μεταβολής πάχους σταθεροποιημένης βάσης.....	50
3.5: Επιρροή μεταβολής του CBR της στρώσης έδρασης.....	53
3.6: Σύνοψη-Σχόλια.....	56
<u>Κεφάλαιο 4^ο: Προσδιορισμός της φέρουσας ικανότητας του ΔΑΑ με σύγχρονες μεθόδους</u>	58
4.1: Εισαγωγή.....	58
4.2: Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	58
4.2.1: Συνοπτικό ιστορικό.....	58
4.2.2: Βασικές αρχές μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.....	59
4.3: Το λογισμικό ABAQUS.....	61
4.4: Προσομοίωση οδοστρώματος ΔΑΑ με χρήση 3DFEM.....	66
4.4.1: Προσομοίωση οδοστρώματος για φόρτιση αεροσκάφους με σύστημα προσγείωσης διπλού τροχού.....	69
4.4.2: Προσομοίωση οδοστρώματος για φόρτιση αεροσκάφους με σύστημα προσγείωσης διπλού δίδυμου τροχού	70
4.4.3: Προσομοίωση οδοστρώματος για φόρτιση αεροσκάφους με σύστημα προσγείωσης διπλού τρίδυμου τροχού.....	71
4.5: Προσδιορισμός φέρουσας ικανότητας ΔΑΑ από ανάλυση με 3DFEM.....	73
4.6: Προσομοίωση οδοστρώματος ΔΑΑ με χρήση του APSA-Προσδιορισμός φέρουσας ικανότητας.....	77
<u>Κεφάλαιο 5^ο: Σύνδεση φέρουσας ικανότητας με το δείκτη κατάταξης</u>	79
5.1: Εισαγωγή.....	79
5.2: Δημοσίευση της φέρουσας ικανότητας.....	79
<u>Κεφάλαιο 6^ο: Διερεύνηση της επάρκειας του ΔΑΑ στην επιβολή του φορτίου του A380</u>	83
<u>Κεφάλαιο 7^ο: Συμπεράσματα</u>	87
<u>Βιβλιογραφία</u>	90
<u>Παράρτημα</u>	92

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σαν αντικείμενο τη δομική κατάταξη ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Αρχικά γίνεται μία παρουσίαση της επίσημης μεθόδου ACN/PCN του ICAO που εφαρμόζεται διεθνώς, παρουσιάζονται συνοπτικά οι κυριότερες μέθοδοι προσδιορισμού του PCN από τη διεθνή βιβλιογραφία και πραγματοποιείται μία πρώτη εφαρμογή τους σε ένα υφιστάμενο ημιάκαμπτο οδόστρωμα. Το οδόστρωμα που επελέγη ήταν το οδόστρωμα των διαδρόμων του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών όπου κατά την ανάλυση παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα των μεθόδων. Συνεπώς κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί διερεύνηση της ευαισθησίας τους στη μεταβολή ορισμένων βασικών παραμέτρων που καθορίζουν τη συμπεριφορά των ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης επιβεβαιώνεται ότι οι μέθοδοι προσδιορισμού του PCN δεν μπορούν να δώσουν ακριβή τιμή του δείκτη κατάταξης καθώς και της φέρουσας ικανότητας στην οποία αντιστοιχεί. Δεδομένου ότι η συμβατότητα της φέρουσας ικανότητας με το δείκτη κατάταξης είναι κρίσιμης σημασίας για τη διαχείριση ενός οδοστρώματος αυτό διερευνάται περαιτέρω για το οδόστρωμα του ΔΑΑ. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιείται ένας αναλυτικός υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος με σύγχρονες μεθόδους προσομοίωσης και ανάλυσης. Στο πλαίσιο αυτό επιλέχθηκε και χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και συγκεκριμένα ένα τρισδιάστατο μοντέλο (3DFEM) που προσομοιώνει καλύτερα το σύνθετο πρόβλημα που εξετάζεται. Αφού προσδιοριστεί και ελεγχθεί η φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος γίνεται μία προσπάθεια σύνδεσης της με τον δείκτη κατάταξης PCN. Το αποτέλεσμα που προκύπτει αξιολογείται και σε σχέση με τα αποτελέσματα των μεθόδων προσδιορισμού του PCN.

Λέξεις κλειδιά: ACN, PCN, ημιάκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων, πεπερασμένα στοιχεία, φέρουσα ικανότητα, δομική κατάταξη.

ABSTRACT

The present diploma thesis deals with the structural classification of semi-rigid airfield pavements. Firstly, the internationally used ACN/PCN method of ICAO and the major methodologies for defining PCN of semi-rigid airport pavements are briefly presented. Secondly a comparative application has been undertaken; the pavement selected for the analysis was that of the Athens International Airport (AIA) runways. Due to the significant deviation among the results of different approaches, it was decided to further investigate the PCN estimation methods through an analysis of their sensitivity to some important parameters which affect the mechanical behaviour of the semi-rigid pavements. The results of the analysis confirm that in most cases the methods cannot provide a single value for pavement classification index and its corresponding bearing capacity. Given that the compatibility between the bearing capacity and the PCN has always been of great importance for the management of airport pavements, this fact was further investigated: The AIA pavement bearing capacity was estimated with the aid of contemporary computational methods and pavement analyses tools. The model developed was based on 3-Dimensional Finite Elements (3DFEM) theory and was used to estimate the pavement response under the traffic load. Afterwards, by making use of semi-rigid pavement mechanics, the structural adequacy has been determined and checked with respect to the air traffic. Finally correlation of the AIA pavement bearing capacity with PCN was investigated and the result has been appreciated in comparison with the respective values by other methodologies, internationally used for this purpose.

Key words: ACN, PCN, semi-rigid airfield pavements, finite element method, bearing capacity, structural classification.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μέρες μας ένα μεγάλο μέρος της παγκόσμιας διακίνησης εμπορευμάτων και επιβατών πραγματοποιείται μέσω των αερομεταφορών. Ο έλεγχος της δομικής και λειτουργικής κατάστασης του οδοστρώματος ενός αεροδρομίου είναι ιδιαίτερως σημαντικός εφόσον αυτό καλείται να δεχτεί μία πληθώρα διαφορετικών φορτίων, τόσο ως προς το μέγεθος όσο και ως προς τον τρόπο επιβολής τους. Η διατήρηση των οδοστρωμάτων, καθώς και όλων των υπόλοιπων στοιχείων που απαρτίζουν ένα αεροδρόμιο, σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο λειτουργίας θα πρέπει να αποτελεί πρωτεύοντα στόχο των αρχών του αεροδρομίου. Δεδομένης της φθοράς που προκαλείται σε ένα οδόστρωμα από τα αεροσκάφη που το χρησιμοποιούν στο πέρασμα του χρόνου, κρίνεται απαραίτητη η ορθολογική διαχείριση των οδοστρωμάτων του αεροδρομίου ώστε να αποφευχθούν εκτεταμένες βλάβες ή και καταστροφή του.

Απαραίτητο στοιχείο για τη σωστή διαχείριση ενός αεροδρομίου είναι η γνώση της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων του. Τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας του μεταβάλλονται συνεχώς εξαιτίας της κατασκευής ολοένα και πιο εξελιγμένων αεροσκαφών (μεγαλύτερα βάρη και διαφορετικές διατάξεις τροχών) καθώς και της συνεχώς αυξανόμενης μεταφορικής ζήτησης. Κατά συνέπεια, οι αρχές του θα πρέπει να είναι σε θέση να κρίνουν κατά πόσο η φέρουσα ικανότητα των οδοστρωμάτων είναι επαρκής για να παραληφθούν με ασφάλεια τα νέα φορτία των αεροσκαφών. Σύμφωνα με την μέθοδο δομικής κατάταξης οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACN-PCN (Aircraft classification Number-Pavement Classification Number), η φέρουσα ικανότητα ενός οδοστρώματος μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του δείκτη PCN. Η μέθοδος εισήχθη από τον ICAO (=International Civil Aviation Organisation) το 1981 με στόχο να γίνει διεθνώς αποδεκτή σαν ο κύριος τρόπος ελέγχου δομικής επάρκειας των αεροδρομίων και εφαρμόζεται μέχρι και σήμερα [1].

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι ο ICAO κατατάσσει τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα στα εύκαμπτα παρόλο που αυτοί οι δύο τύποι οδοστρωμάτων παρουσιάζουν μία εντελώς διαφορετική μηχανική συμπεριφορά. Γι' αυτό κρίνεται σκόπιμη η διερεύνηση της μεθόδου ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο αυτή η παραδοχή είναι κατάλληλη για την κατάταξη της φέρουσας ικανότητας. Επίσης είναι σκόπιμο να εξεταστεί και η αξιοπιστία της κατ' αναλογία με παρόμοιες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν από τον Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής του ΕΜΠ για τα εύκαμπτα και τα δύσκαμπτα οδοστρώματα [2].

Για τους λόγους που αναφέρθηκαν πραγματοποιήθηκε διερεύνηση των κυριότερων μεθόδων προσδιορισμού του PCN με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία και ακολούθησε μία εφαρμογή τους σε υφιστάμενο ημιάκαμπτο οδόστρωμα αεροδρομίου. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκε το

οδόστρωμα των διαδρόμων του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών (ΔΑΑ), το οποίο παρουσιάζει πρόσθετο ενδιαφέρον εξαιτίας της σπουδαιότητας του αεροδρομίου.

Από τα αποτελέσματα της εφαρμογής παρατηρήθηκε ότι οι μέθοδοι παρουσιάζουν μεγάλες διαφοροποιήσεις και γι' αυτό κρίθηκε σκόπιμη μία εμβάθυνση της διερεύνησης τους. Πραγματοποιήθηκε λοιπόν μία ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων των μεθόδων στη μεταβολή ορισμένων βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων με σκοπό τον προσδιορισμό των στοιχείων που επηρεάζουν και το PCN. Από την παραπάνω ανάλυση προέκυψε ότι οι κλασσικές μέθοδοι προσδιορισμού του PCN δεν μπορούν να απεικονίσουν με σαφήνεια την κατάσταση της φέρουσας ικανότητας ενός ημιάκαμπτου οδοστρώματος και κρίθηκε σκόπιμη μία περαιτέρω έρευνα όσον αφορά στη σύνδεσης της φέρουσας ικανότητας με το δείκτη κατάταξης.

Στο πλαίσιο αυτής της διερεύνησης πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος του ΔΑΑ με χρήση αναλυτικών εργαλείων και προσομοιωμάτων. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας υπολογιστικά εργαλεία που στηρίζονται στη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων (3DFEM) καθώς επίσης και στη θεωρία των ελαστικών επάλληλων στρώσεων, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση του ημιάκαμπτου οδοστρώματος και ανάλυση της συμπεριφοράς του στην επιβολή διαφορετικών φορτίσεων. Στη συνέχεια έγινε ένας έλεγχος της επάρκειας της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος του ΔΑΑ και πραγματοποιήθηκε μία προσπάθεια συσχέτισης της φέρουσας ικανότητας με την κατάταξη του οδοστρώματος. Τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης αξιολογήθηκαν και συγκρίθηκαν σε σχέση με τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από την διερεύνηση των κλασσικών μεθόδων προσδιορισμού του δείκτη κατάταξης. Τέλος αναφέρονται συγκεντρωτικά ορισμένα σχόλια, παρατηρήσεις και συμπεράσματα από τη πραγματοποιηθείσα ανάλυση.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Αν. Καθηγητή του ΕΜΠ κ. Ανδρέα Λοΐζο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου την εργασία αυτή και για την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Γιώργο Χαρωνίτη για την πολύτιμη συμβολή του στην πραγματοποίηση της εργασίας.

Αθήνα, Νοέμβριος 2006

Αγγελική Αρμένη

1 ΔΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ – ΜΕΘΟΔΟΙ

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ

1.1 Εισαγωγή

Ο προσδιορισμός της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων των αεροδρομίων είναι καθοριστικής σημασίας τόσο γιατί επηρεάζει τους τύπους αεροσκαφών που μπορεί να εξυπηρετήσει όσο και γιατί συμβάλλει στη σωστή διαχείριση του αεροδρομίου. Στην περίπτωση που τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας ενός αεροδρομίου μεταβάλλονται, είτε λόγω αύξησης της μεταφορικής ζήτησης είτε λόγω εμφάνισης νέου είδους αεροσκαφών, οι αρχές θα πρέπει να μπορούν να εκτιμήσουν αν το οδόστρωμα μπορεί να ανταποκριθεί με ασφάλεια στις καινούργιες απαιτήσεις.

Αρκετές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί στο παρελθόν για τον έλεγχο και τη δημοσίευση της φέρουσας ικανότητας οδοστρώματος αεροδρομίου άλλοτε με βάση το μέγιστο βάρος α/φ που μπορεί με ασφάλεια να εξυπηρετήσει και άλλοτε με βάση το μέγιστο φορτίο φορείου τροχών που μπορεί με ασφάλεια να φέρει. Στις μέρες μας οι επικρατούσες μέθοδοι βασίζονται στον αριθμό κατάταξης του οδοστρώματος σε καθορισμένο σύστημα αναφοράς φορτίων.

Με στόχο την αποτελεσματική και ασφαλή χρήση των οδοστρωμάτων των αεροδρομίων ο διεθνής οργανισμός πολιτικής αεροπορίας ICAO (International Civil Aviation Organisation) προσπάθησε να δημιουργήσει μια διεθνώς αποδεκτή μέθοδο κατάταξης. Η μέθοδος αυτή θα έδινε τη δυνατότητα στους κατασκευαστές αεροσκαφών να εξασφαλίσουν μια συμβατότητα ανάμεσα στα οδοστρώματα αεροδρομίων και στα υπό εξέλιξη αεροσκάφη. Επιπλέον θα επέτρεπε στις αρχές του αεροδρομίου να δηλώνουν ποια αεροσκάφη μπορούν να δεχτούν και θα τους έδινε την δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν οποιαδήποτε διαδικασία αξιολόγησης για να εξακριβώσουν το φορτίο που μπορεί να δεχτεί το οδόστρωμα.

Στο πλαίσιο αυτό το 1981 λοιπόν ο ICAO εισήγαγε τη μέθοδο ACN-PCN (Aircraft Classification Number- Pavement Classification Number) για την κατάταξη των οδοστρωμάτων των αεροδρομίων.

1.2 Η μέθοδος ACN-PCN

Η μέθοδος ACN-PCN δίνει περισσότερη έμφαση στον προσδιορισμό ενός δείκτη που χαρακτηρίζει το φορτίο ενός αεροσκάφους και λιγότερη στην έκφραση της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος η οποία εκφράζεται συναρτήσει του δείκτη κατάταξης του αεροσκάφους που μπορεί αυτό να εξυπηρετήσει για απεριόριστο αριθμό διελεύσεων του.

Σύμφωνα με τα παραπάνω εισάγεται ο δείκτης ACN ο οποίος είναι ένας αριθμός που εκφράζει τη σχετική επίδραση ενός αεροσκάφους σε ένα οδόστρωμα για μια προκαθορισμένη αντοχή του εδάφους. Το ACN υπολογίζεται αριθμητικά ως το διπλάσιο φορτίο ενός μονού τροχού (εκφρασμένο σε χιλιάδες kgr) που δρώντας με σταθερή πίεση 1,25 Μpa, προκαλεί την ίδια ένταση με το πραγματικό σύστημα τροχών του αεροσκάφους σε οδόστρωμα πάχους ίσο με το πάχος αναφοράς. Το πάχος αναφοράς για τα εύκαμπτα οδοστρώματα είναι ίσο με το συμβατικό πάχος του οδοστρώματος που επιτρέπει 10,000 διελεύσεις του πραγματικού συστήματος τροχών του αεροσκάφους για μια καθορισμένη κατηγορία εδαφικής αντοχής [1].

Ακολουθώντας το PCN είναι ένας αριθμός που εκφράζει τη φέρουσα ικανότητα ενός οδοστρώματος και ορίζεται ως το ACN του αεροσκάφους που προκαλεί τη μέγιστη ένταση που μπορεί να δεχτεί το οδόστρωμα για απεριόριστο αριθμό διελεύσεων του αεροσκάφους.

Το PCN ενός οδοστρώματος προσδιορίζεται από πέντε στοιχεία:

- i) Την αριθμητική του τιμή, η οποία είναι ίση με το μέγιστο ACN για τη συγκεκριμένη εδαφική κατηγορία.
- ii) Τον τύπο οδοστρώματος: στην περίπτωση που το οδόστρωμα είναι εύκαμπτο χρησιμοποιείται ο χαρακτήρας F (Flexible) ενώ αν αυτό είναι δύσκαμπτο χρησιμοποιείται ο χαρακτήρας R (Rigid). Τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα κατατάσσονται στα εύκαμπτα.
- iii) Την κατηγορία εδαφικής αντοχής. Ανάλογα με το CBR της στρώσης έδρασης το οδόστρωμα κατατάσσεται σε μία κατηγορία εδάφους. Πιο συγκεκριμένα για τα εύκαμπτα-ημιάκαμπτα οδοστρώματα ισχύει η κατάταξη που φαίνεται στον πίνακα 1.1.

Κατηγορία εδαφικής αντοχής	Εύρος τιμών αντοχής εδάφους (CBR)	Χαρακτηριστική τιμή (CBR)
A (υψηλή)	>13%	15%
B (μέτρια)	8%-13%	10%
C (χαμηλή)	4%-8%	6%
D (πολύ χαμηλή)	<4%	3%

Πίνακας 1.1: Κατηγορίες εδαφικής αντοχής μεθόδου ACN-PCN

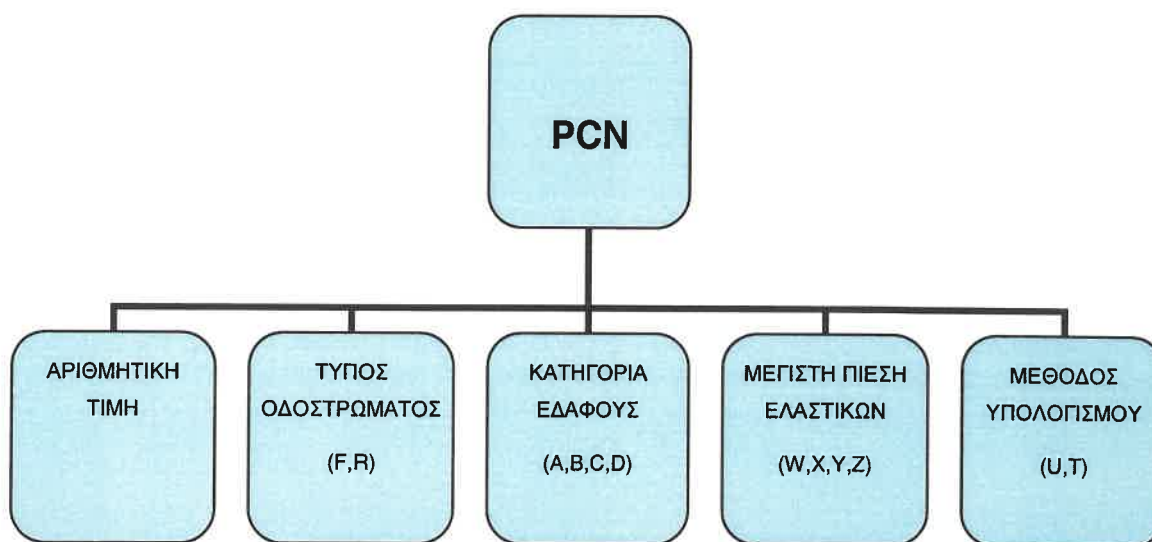
- iv) Την μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση ελαστικών: Σύμφωνα με τη μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση των αεροθαλάμων των τροχών το οδόστρωμα μπορεί να καταταχτεί σε μία από τις παρακάτω κατηγορίες (πίνακας 1.2):

Κατηγορία πίεσης	Εύρος τιμών (Mpa)
W (υψηλή)	Χωρίς περιορισμό πίεσης
X (μέση)	με μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση 1,5 Mpa
Y (χαμηλή)	με μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση 1,0 Mpa
Z (πολύ χαμηλή)	με μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση 0,5 Mpa

Πίνακας 1.2: Κατηγορίες πίεσης ελαστικών μεθόδου ACN-PCN

- ν) Τη μεθοδολογία υπολογισμού. Στην περίπτωση που το PCN υπολογίζεται εμπειρικά το οδόστρωμα χαρακτηρίζεται από τον κωδικό U ενώ αν χρησιμοποιηθεί κάποια υπολογιστική μέθοδο ο αντίστοιχος κωδικός είναι T .

Στο σχήμα 1.1 που ακολουθεί φαίνονται συνοπτικά τα πέντε στοιχεία που αποτελούν τον κωδικό έκφρασης του PCN.



Σχήμα 1.1: Στοιχεία που αποτελούν τον κωδικό έκφρασης του PCN

Για να μπορέσει ένα οδόστρωμα να εξυπηρετήσει χωρίς κίνδυνο αστοχίας ένα αεροσκάφος θα πρέπει να ισχύει η σχέση 1.1:

$$\text{PCN οδοστρώματος} \geq \text{ACN αεροσκάφους}$$

(σχέση 1.1)

Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να αναφέρουμε ότι ο ICAO δεν προτείνει κάποια συγκεκριμένη μεθοδολογία προσδιορισμού του PCN επιτρέποντας στις αρχές του αεροδρομίου να επιλέγουν εκείνη που θεωρούν πιο κατάλληλη. Ανατρέχοντας στη διεθνή

βιβλιογραφία διαπιστώνουμε την ύπαρξη διαφόρων μεθόδων. Στην παρούσα διπλωματική επιλέχθηκαν πέντε ευρέως αποδεκτές μέθοδοι και παράλληλα αντιπροσωπευτικές του συνόλου των υπάρχουσών μεθόδων προσδιορισμού του PCN για την διερεύνηση της δομικής κατάταξης των ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Οι μέθοδοι αυτές είναι:

- Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων της FAA (Federal Aviation Administration)
- Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων της UFC για το ναυτικό (Unified facilities criteria)
- Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων της UFC για την αεροπορία (Unified facilities criteria)
- Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων του Γαλλικού Υπουργείου Συγκοινωνιών (Service Technique des Bases Aeriennes)
- Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων της Διεύθυνσης Υπηρεσιών Πολιτικού Μηχανικού της Μ.Βρετανίας (Directorate of Civil Engineering Services)

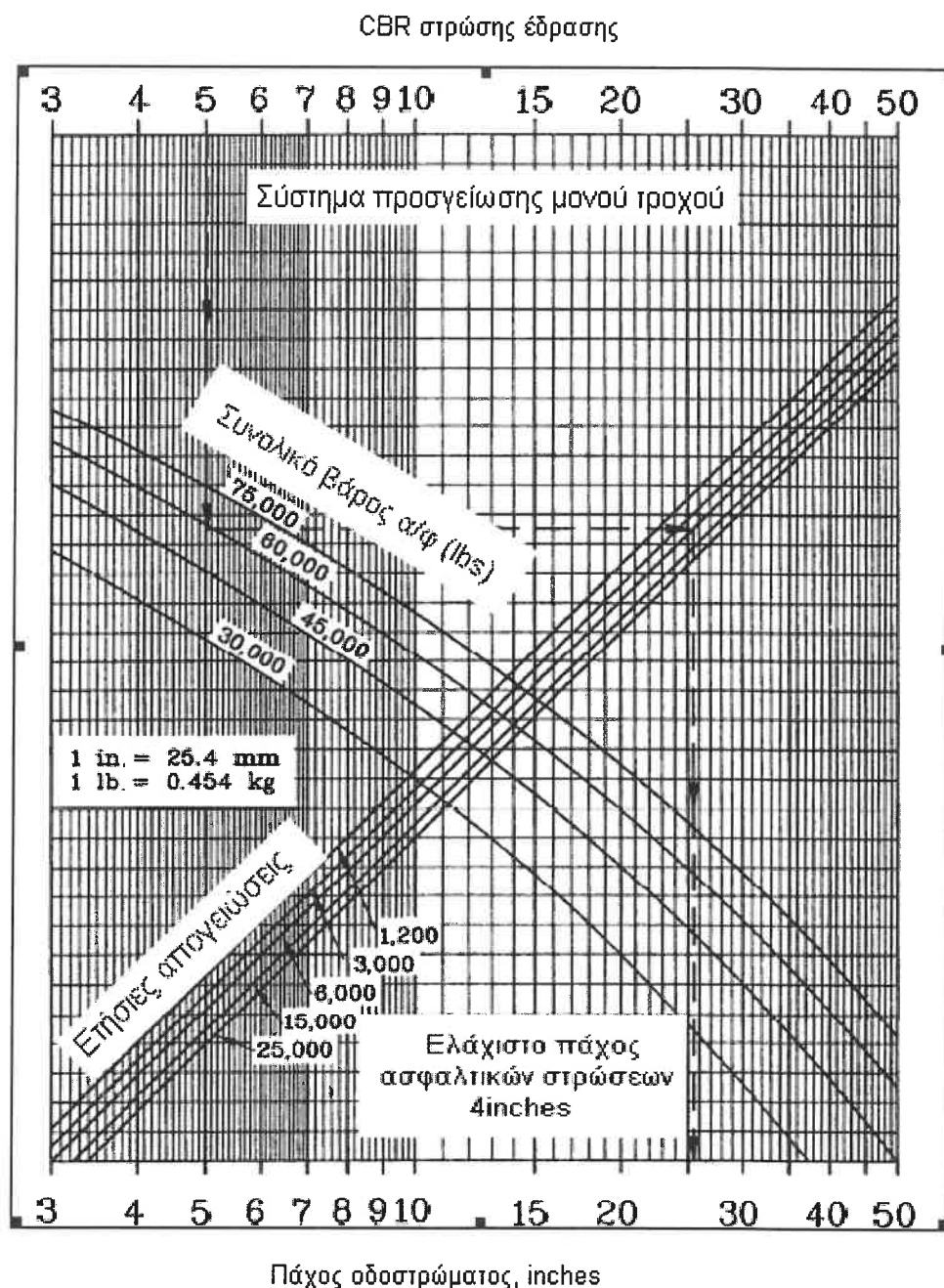
και παρουσιάζονται συνοπτικά στα κεφάλαια που ακολουθούν.

1.3 Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων της FAA (Federal Aviation Administration)

Στο παρόν κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί μια συνοπτική παρουσίαση της μεθοδολογίας προσδιορισμού του PCN σύμφωνα με τη μέθοδο της FAA. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων της FAA ακολουθεί την αντίστροφη διαδικασία του σχεδιασμού ενός οδοστρώματος για τον προσδιορισμό του PCN του. Η αρχική μορφή της μεθόδου σχεδιασμού οδοστρωμάτων αεροδρομίων της FAA εισήχθη το 1958, ενώ η σημερινή μορφή του εγχειριδίου εκδόθηκε το 1995 [3] και συμπληρώθηκε με διορθώσεις στα επόμενα χρόνια.

Επειδή στη γενική περίπτωση η κυκλοφορία που δέχεται ένα οδόστρωμα αποτελείται από μία ποικιλία αεροσκαφών με διαφορετικά βάρη και συστήματα προσγείωσης, η επίδραση της υπολογίζεται με βάση το αεροσκάφος σχεδιασμού. Ως αεροσκάφος σχεδιασμού κατά την FAA θεωρείται αυτό που απαιτεί το μεγαλύτερο πάχος οδοστρώματος. Γνωρίζοντας το συνολικό βάρος, το σύστημα προσγείωσης και τις ετήσιες διελεύσεις κάθε αεροσκάφους καθώς επίσης και το CBR της στρώσης έδρασης είναι δυνατός, με τη βοήθεια των κατάλληλων διαγραμμάτων της μεθόδου, ο προσδιορισμός του αεροσκάφους που απαιτεί το μεγαλύτερο πάχος οδοστρώματος το οποίο και ταυτίζεται με το αεροσκάφος σχεδιασμού. Η μέθοδος παρέχει για τα εύκαμπτα οδοστρώματα καμπύλες σχεδιασμού γενικού τύπου -για τις οικογένειες αεροσκαφών με συστήματα προσγείωσης μονού, διπλού και διπλού δίδυμου τροχού- που ανταποκρίνονται περισσότερο στα χαρακτηριστικά παλαιότερων αεροσκαφών καθώς επίσης και καμπύλες σχεδιασμού για συγκεκριμένα, πιο εξελιγμένα, αεροσκάφη.

Ενδεικτικά παραθέτουμε το διάγραμμα γενικού τύπου των καμπύλων σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων για την περίπτωση αεροσκάφους μονού τροχού (διάγραμμα 1.1).



Διάγραμμα 1.1: Καμπύλες σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων, για σύστημα προσγείωσης α/φ μονού τροχού-μέθοδος της FAA [3].

Στη συνέχεια οι διελεύσεις όλων των αεροσκαφών μετατρέπονται σε διελεύσεις του ίδιου συστήματος τροχών με το αεροσκάφος σχεδιασμού. Για την επίτευξη αυτής της μετατροπής η μέθοδος παρέχει τους συντελεστές που φαίνονται στον πίνακα 1.3 που ακολουθεί :

Για μετατροπή από	σε	Πολ/σιασμός με
Μονό τροχό	Διπλό τροχό	0,8
Μονό τροχό	Διπλό δίδυμο τροχό	0,5
Διπλό τροχό	Διπλό δίδυμο τροχό	0,6
Τετραπλό δίδυμο τροχό	Διπλό δίδυμο τροχό	1,0
Διπλό δίδυμο τροχό	Μονό τροχό	2,0
Διπλό δίδυμο τροχό	Διπλό τροχό	1,7
Διπλό τροχό	Μονό τροχό	1,3
Τετραπλό δίδυμο τροχό	Διπλό τροχό	1,7

Πίνακας 1.3: Συντελεστές ισοδυναμίας συστημάτων τροχών

Αφού τα αεροσκάφη κατηγοριοποιηθούν με βάση την διάταξη των τροχών τους απαιτείται η μετατροπή των διελεύσεων τους σε ετήσιες ισοδύναμες διελεύσεις του αεροσκάφους σχεδιασμού με τη βοήθεια της σχέσης 1.2:

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

(σχέση 1.2)

όπου:

W_2 =φορτίο τροχού του α/φ του οποίου μετατρέπουμε τις διελεύσεις

W_1 =φορτίο τροχού του αεροσκάφους σχεδιασμού

R_1 =ισοδύναμες ετήσιες διελεύσεις α/φ σχεδιασμού

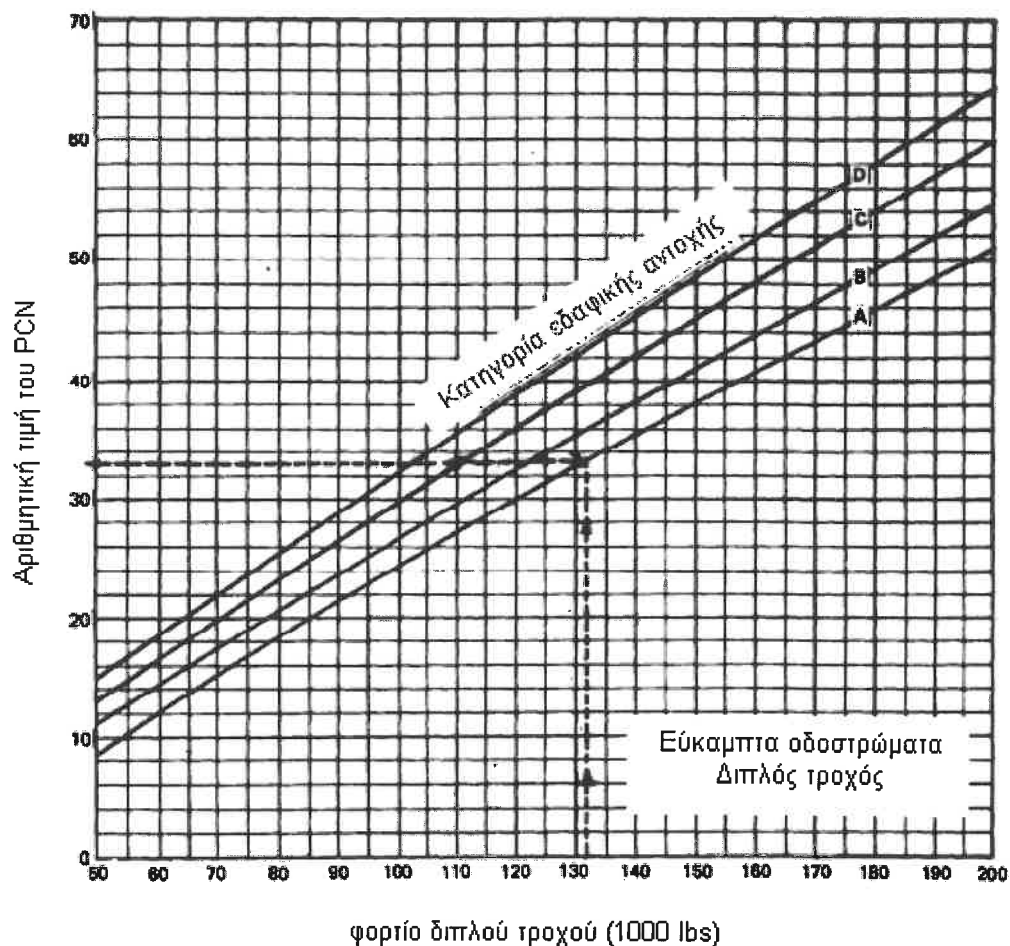
R_2 =διελεύσεις αεροσκάφους μετά την μετατροπή τους σε ισοδύναμες του ίδιου συστήματος τροχών με το αεροσκάφος σχεδιασμού.

Για τον προσδιορισμό του φορτίου του τροχού (W_2) πρέπει να αναφερθεί ότι η μέθοδος θεωρεί ότι το 95% του συνολικού βάρους του αεροσκάφους κατανέμεται στα κύρια φορεία τροχών και το υπόλοιπο 5% στο ρηνιαίο σύστημα τροχών.

Κατόπιν αθροίζοντας τις διελεύσεις που προκύπτουν από την παραπάνω διαδικασία (R_1) προκύπτει ο συνολικός αριθμός ισοδύναμων ετήσιων διελεύσεων του αεροσκάφους σχεδιασμού, ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί στους επόμενους υπολογισμούς.

Η μέθοδος κατατάσσει τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα στα εύκαμπτα και παρέχει συντελεστές ισοδυναμίας για τη μετατροπή των σταθεροποιημένων στρώσεως σε μη σταθεροποιημένες και τον τελικό προσδιορισμό του ισοδύναμου πάχους του οδοστρώματος. Χρησιμοποιώντας την αντίστροφη πορεία του σχεδιασμού και με βάση το CBR της στρώσης έδρασης, τον

αριθμό των ισοδύναμων ετήσιων διελεύσεων του αεροσκάφους σχεδιασμού και το ισοδύναμο συνολικό πάχος του οδοστρώματος προσδιορίζει με τη βοήθεια των αντίστοιχων διαγραμμάτων (παρόμοιων του 1.1 διαγράμματος) το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίου που μπορεί να δεχτεί ένα οδόστρωμα. Στη συνέχεια, γνωρίζοντας την εδαφική κατηγορία στην οποία ανήκει η στρώση έδρασης, το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο, το σύστημα προσγείωσης του αεροσκάφους σχεδιασμού και τον τύπο του οδοστρώματος γίνεται τελικά ο προσδιορισμός του PCN με χρήση των κατάλληλων διαγραμμάτων [3]. Στη συνέχεια παρατίθεται ενδεικτικά το διάγραμμα υπολογισμού του PCN εύκαμπτων οδοστρωμάτων για την περίπτωση αεροσκάφους σχεδιασμού διπλού τροχού (διάγραμμα 1.2). Παρόμοια διαγράμματα παρέχονται από τη μέθοδο και για τις υπόλοιπες κατηγορίες αεροσκαφών.



Διάγραμμα 1.2 : Αριθμητική τιμή του PCN εύκαμπτων οδοστρωμάτων για περίπτωση α/φ σχεδιασμού διπλού τροχού (dual wheel)- μέθοδος της FAA [4].

Από την παραπάνω διαδικασία προκύπτει ο προσδιορισμός του PCN. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι οι καμπύλες σχεδιασμού που παρέχει η μέθοδος βασίζονται στη μέθοδο του CBR [3]. Οι καμπύλες αυτές έχουν δημιουργηθεί από δοκιμές και παρατηρήσεις χρησιμοποιούμενων οδοστρωμάτων κατά τις οποίες προσδιορίζεται το απαιτούμενο πάχος οδοστρώματος για την προστασία υλικών δεδομένου CBR από αστοχία.

1.4 Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων της UFC(Unified facilities criteria)

Η μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων της UFC είναι μία μέθοδος που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση οδοστρωμάτων κυρίως στρατιωτικών αεροδρομίων. Βρίσκει όμως εφαρμογή και στα πολιτικά αεροδρόμια [5]. Κύριος στόχος της μεθόδου είναι ο προσδιορισμός του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου που μπορεί ένα οδόστρωμα να φέρει. Παρέχει επίσης διαφορετικές διαδικασίες υπολογισμού του PCN ενός οδοστρώματος. Πιο συγκεκριμένα, το ναυτικό και ο στρατός ξηράς παρέχουν την ίδια διαδικασία για τον προσδιορισμό του PCN ενώ η αεροπορία διαφορετική. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθεί κάθε σώμα.

1.4.1 Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων της UFC για το ναυτικό

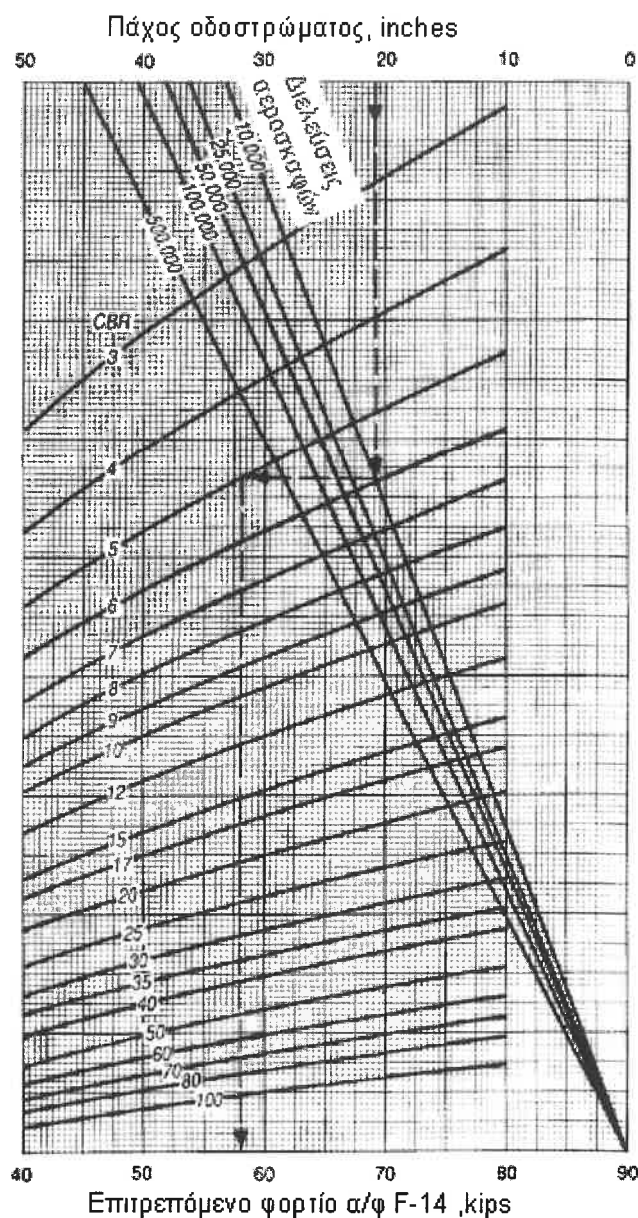
Η μέθοδος της UFC για το ναυτικό κατατάσσει τα αεροσκάφη σε πέντε κατηγορίες όπως φαίνεται στον πίνακα 1.4. που ακολουθεί. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης εκφράζονται συναρτήσει αυτών των 5 κατηγοριών ή ενός υποσυνόλου αυτών που περιλαμβάνει την πραγματική κυκλοφορία. Το πρώτο αεροσκάφος είναι το αντιπροσωπευτικό αεροσκάφος κάθε κατηγορίας. Η αξιολόγηση με τη συγκεκριμένη μέθοδο απαιτεί τον προσδιορισμό του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου του πιο κρίσιμου αεροσκάφους που μπορεί να χρησιμοποιήσει το οδόστρωμα για τον αριθμό των ισοδύναμων διελεύσεων που αναμένεται να πραγματοποιηθούν τα επόμενα 10 χρόνια. Σαν κρίσιμο αεροσκάφος σχεδιασμού θεωρείται αυτό που απαιτεί το μεγαλύτερο πάχος οδοστρώματος .

Η μέθοδος απαιτεί τη μετατροπή όλης της κυκλοφορίας σε διελεύσεις της ίδιας κατηγορίας αεροσκαφών. Αρχικά μετατρέπονται όλες οι διελεύσεις σε διελεύσεις του F-14, στη συνέχεια του P3, κατόπιν του C-130, μετά του C-141 και τέλος του C-5A (αντιπροσωπευτικά αεροσκάφη των πέντε κατηγοριών). Οι μετατροπές πραγματοποιούνται για όλες τις κατηγορίες αεροσκαφών που χρησιμοποιούν το οδόστρωμα, κατά συνέπεια θα είναι συνολικά πέντε ή λιγότερες. Μετά από κάθε μετατροπή και χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο διάγραμμα προκύπτει για κάθε κατηγορία αεροσκάφους το απαιτούμενο πάχος οδοστρώματος. Το αεροσκάφος που απαιτεί το μεγαλύτερο πάχος είναι το αεροσκάφος σχεδιασμού.

1	2	3	4	5
F-14 ¹	P-3 ¹	C-130 ¹	C-141 ¹	C-5A ¹
C-23	C-119		KC-135	
F-4E	C-124		DC-8	
F-8E	C-131		DC-10-10	
F-15	UH-46		DC-10-10CF	
F/A-18	DC-9		L-1011	
F-111	CH-53		B-707	
T-1	CH-54		B-757	
T-2C	B-727		B-767	
T-39A	B-737		E-3A	
A-3B	T-43		E-6A	
A-4M	C-7			
A-5	C-9B			
A-6E	C-118A			
A-7K	C-121			
P-2	C-140			
RA-5	C-22			
S-3A				
E-2C				
T-28D				
C-117				
T-34				
T-45				

Πίνακας 1.4: Κατηγοριοποίηση αεροσκαφών για τη μέθοδο του ναυτικού [5]

Χρησιμοποιώντας λοιπόν το διάγραμμα που αντιστοιχεί στο αεροσκάφος σχεδιασμού και εισάγοντας το πάχος του οδοστρώματος, τις ισοδύναμες ετήσιες διελύσεις του αεροσκάφους σχεδιασμού και το CBR της στρώσης έδρασης, υπολογίζεται το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο. Παραθέτουμε ενδεικτικά το διάγραμμα υπολογισμού του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου για το F-14 για την περίπτωση εύκαμπτου οδοστρώματος (διάγραμμα 1.3).



Διάγραμμα 1.3: Ενδεικτικές καμπύλες αξιολόγησης εύκαμπτων οδοστρώματων για το α/φ F-14 – μέθοδος της UFC για το ναυτικό [5].

Στη συνέχεια, με βάση το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο που μόλις υπολογίστηκε, την εδαφική κατηγορία της στρώσης έδρασης, το είδος του αεροσκάφους σχεδιασμού και την περιοχή κυκλοφορίας του αεροσκάφους μπορεί, από τη χρήση του κατάλληλου διαγράμματος που παρέχει η μέθοδος, να προσδιοριστεί το PCN του οδοστρώματος. Παρακάτω παρατίθεται το διάγραμμα προσδιορισμού του PCN για την περίπτωση εύκαμπτων οδοστρώματων και για το αεροσκάφος F-14 (διάγραμμα 1.4).

Διάγραμμα 1.4: Διάγραμμα υπολογισμού PCN για εύκαμπτα οδοστρώματα, για το α/φ F-14, μέθοδος της UFC για το ναυτικό [5].

Για να περιοριστούν οι υπολογισμοί και να απλοποιηθεί η διαδικασία της δομικής αξιολόγησης του οδοστρώματος ,τα αεροσκάφη που χρησιμοποιούνται στην αεροπορία έχουν μοιραστεί σε 14 κατηγορίες όπως φαίνεται στον πίνακα 1.5. που ακολουθεί. Το πρώτο αεροσκάφος κάθε κατηγορίας είναι αυτό που επιβάλλει το μεγαλύτερο φορτίο στο οδόστρωμα . Στον πίνακα 1 του παραρτήματος 1 φαίνεται η διάταξη των τροχών των αεροσκαφών της μεθόδου.

1	2	3	4	5	6	7
C-23 ¹	F-15 ¹	F-111 ¹	C-130 ¹	C-9 ¹	T-43 ¹	B-727 ¹
C-12	A-7	F-117		C-7	737	C-22
C-21	A-10			DC-9		P-3
C-27	C-20			C-140		
A-37	F-4					
	F-5					
	F-14					
	F-16					
	F-22					
	F-100					
	F-101					
	F-102					
	F-105					
	F-106					
	T-1A					
	T-33					
	T-38					
	T-39					
8	9	10	11	12	13	14
E-3 ¹	C-141 ¹	C-17 ¹	C-5 ¹	KC-10 ¹	E-4 ¹	B-52 ¹
707E-8	B-1			DC-10	747	
C-135	B-757			L-1011	VC-25	
KC-135	B-2					
VC-137						
DC-8						
EC-18						
A-300						
B-767						

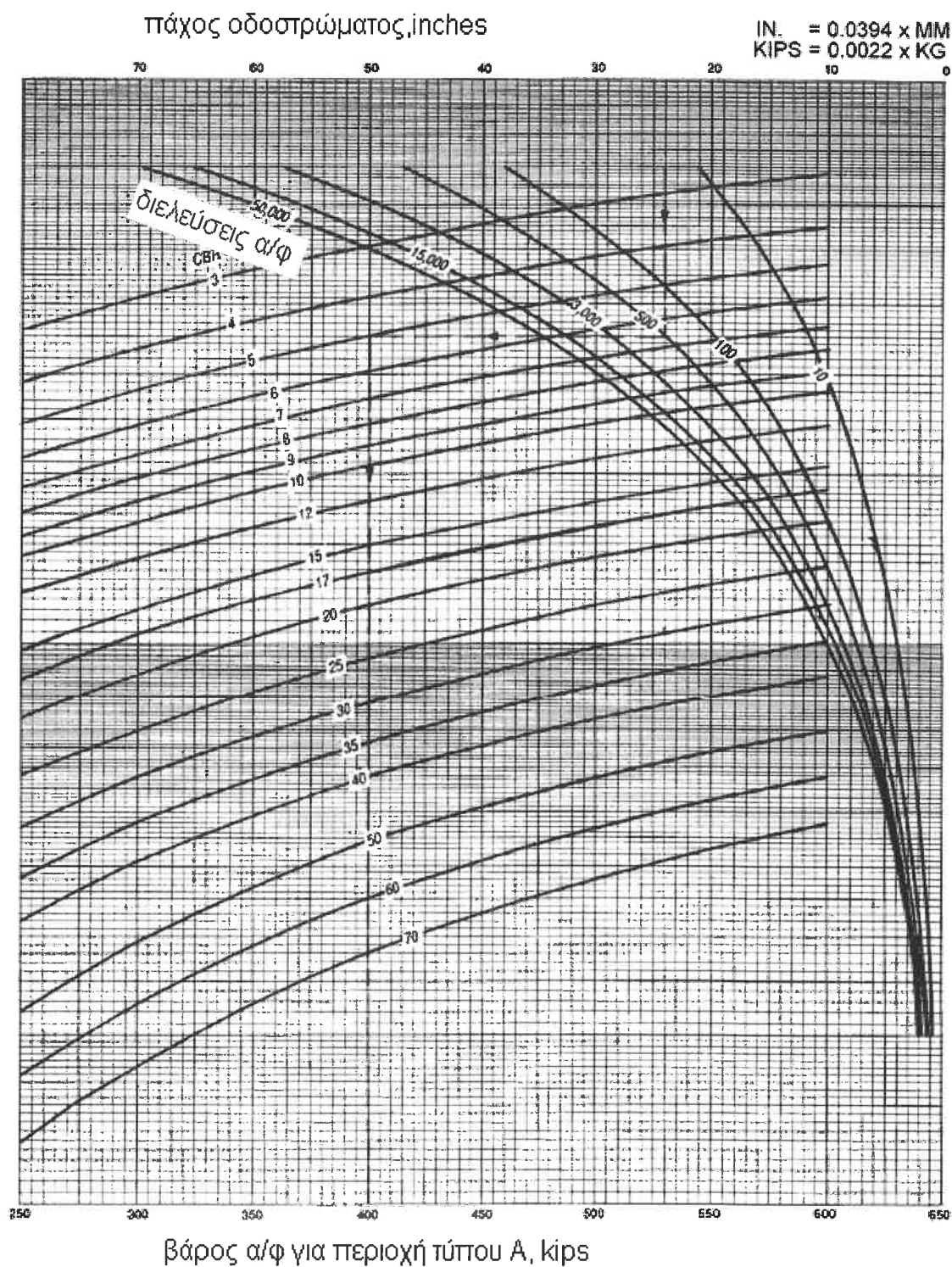
Πίνακας 1.5: Κατηγοριοποίηση αεροσκαφών για τη μέθοδο της αεροπορίας [5]

Για τον προσδιορισμό του PCN με τη μέθοδο της αεροπορίας απαιτείται ο υπολογισμός του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου που μπορεί να φέρει το οδόστρωμα για 50,000 διελεύσεις του C-17 (κατηγορία 10).

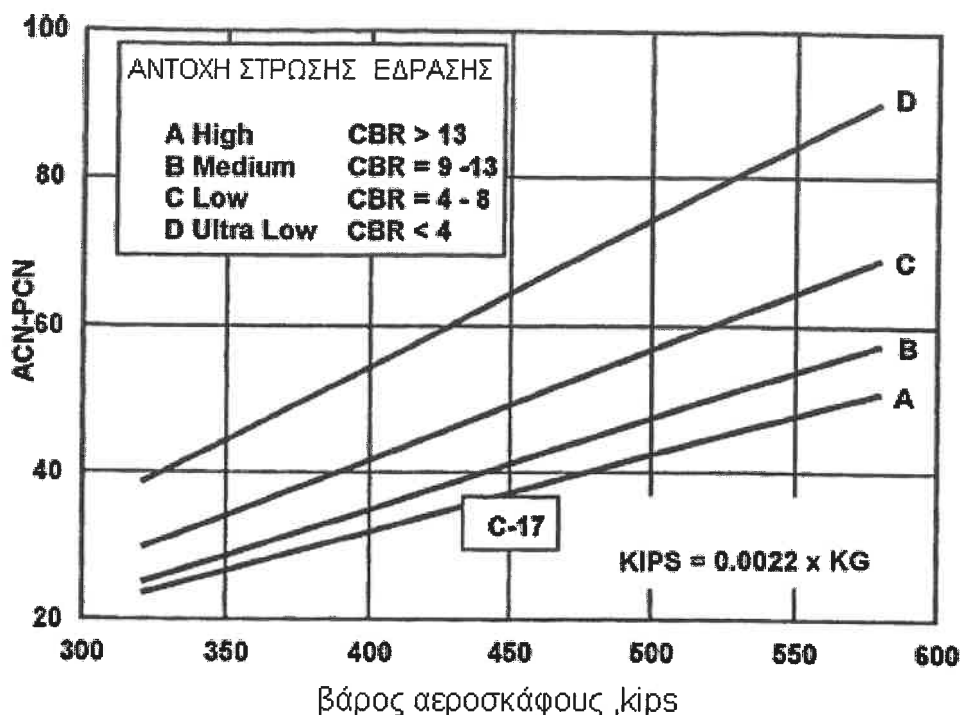
Με βάση το πάχος του οδοστρώματος, τον αριθμό των διελεύσεων του αεροσκάφους και το CBR της στρώσης έδρασης υπολογίζεται το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο από το αντίστοιχο διάγραμμα. Με βάση αυτό, τον τύπο του οδοστρώματος και την κατηγορία εδαφικής αντοχής της στρώσης έδρασης καθορίζεται ξανά με τη βοήθεια διαγραμμάτων το PCN του οδοστρώματος.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι για τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα το πάχος που εισάγεται στους υπολογισμούς είναι εκείνο που προκύπτει μετά τη μετατροπή των σταθεροποιημένων στρώσεων σε μη σταθεροποιημένες με χρήση των κατάλληλων συντελεστών ισοδυναμίας. Τόσο για την αεροπορία όσο και για το ναυτικό οι συντελεστές παρατίθενται στο παράρτημα 1 (πίνακας 2).

Στη συνέχεια παρατίθεται τα διαγράμματα υπολογισμού του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου (διάγραμμα 1.5) και του PCN (διάγραμμα 1.6) για το αεροσκάφος C-17.



Διάγραμμα 1.5: Διάγραμμα προσδιορισμού μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου για το α/φ C-17, μέθοδος της UFC για την αεροπορία [5] .

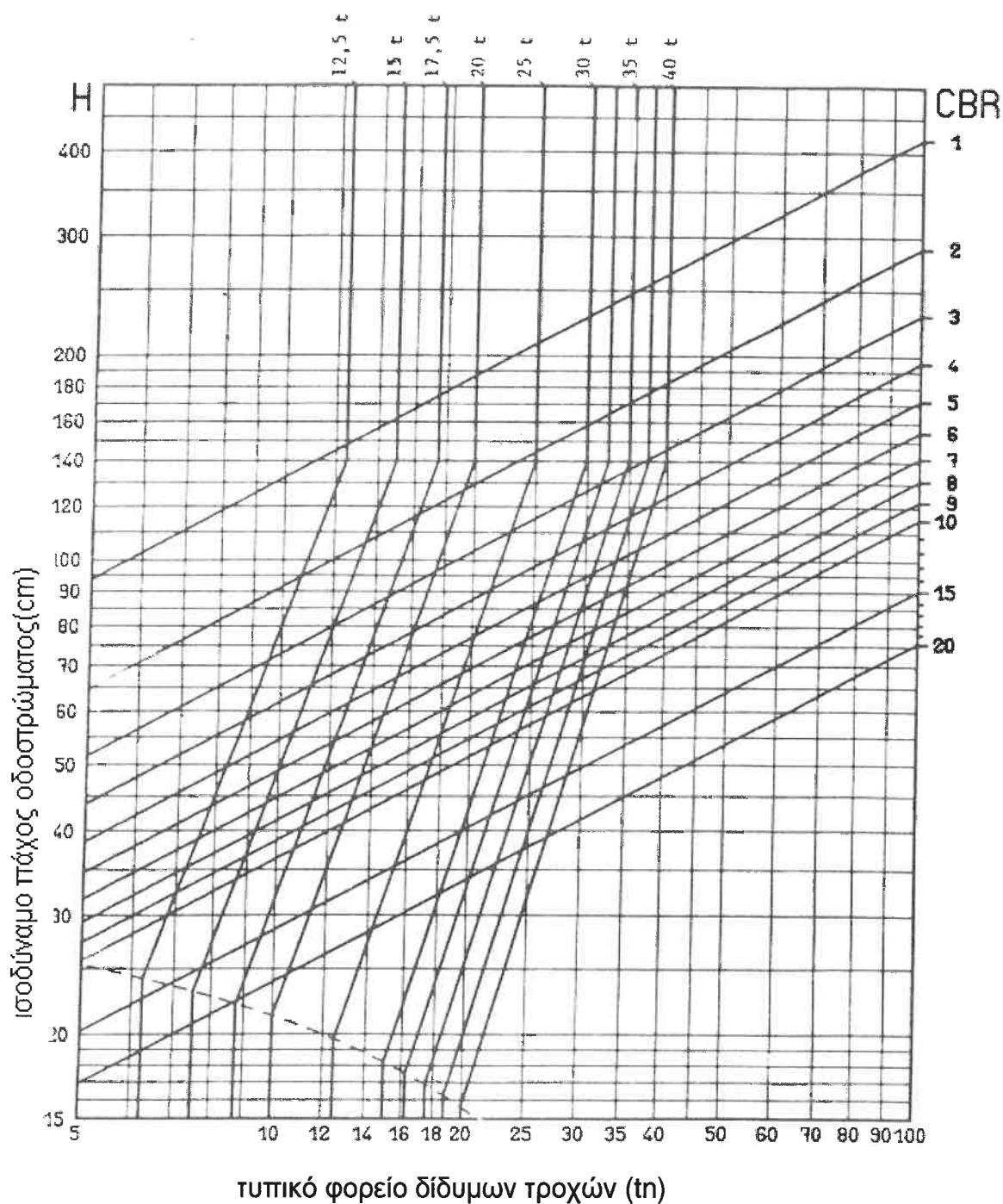


Διάγραμμα 1.6: Διάγραμμα προσδιορισμού PCN για το C-17, μέθοδος της UFC για την αεροπορία [5]

1.5 Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων του Γαλλικού Υπουργείου Συγκοινωνιών (Service Technique des Bases Aeriennes -STBA)

Η μέθοδος του Γαλλικού Υπουργείου Συγκοινωνιών (STBA) ασχολείται με τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση των οδοστρωμάτων [6]. Η διαδικασία υπολογισμού του PCN περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

- Αρχικά απαιτείται ο προσδιορισμός των αεροσκαφών που χρησιμοποιούν ή που αναμένεται να χρησιμοποιήσουν το οδόστρωμα.
- Στη συνέχεια, εφαρμόζοντας την αντίστροφη διαδικασία του σχεδιασμού, υπολογίζεται το επιτρεπόμενο φορτίο P_o για κάθε αεροσκάφος με βάση τα χαρακτηριστικά της στρώσης έδρασης (CBR) και του οδοστρώματος (ισοδύναμο πάχος). Πιο συγκεκριμένα, με τη βοήθεια των κατάλληλων διαγραμμάτων προσδιορίζεται για κάθε αεροσκάφος το επιτρεπόμενο φορτίο για κάθε κύριο φορείο τροχών (P_o). Ενδεικτικά παραθέτουμε ένα διάγραμμα για την περίπτωση φορείου με διπλό τροχό (διάγραμμα 1.7).



Διάγραμμα 1.7: Διάγραμμα προσδιορισμού επιτρεπόμενου φορτίου για τυπικό φορείο δίδυμων τροχών [6].

- Γνωρίζοντας επιπλέον το ποσοστό της συνολικής μάζας του αεροσκάφους που κατανέμεται σε κάθε φορείο μπορεί να υπολογιστεί η συνολική επιτρεπόμενη μάζα (tn) του αεροσκάφους.

- Ακολουθεί για κάθε εδαφική κατηγορία ο προσδιορισμός του ACN που αντιστοιχεί στο επιτρεπόμενο φορτίο P_o με τη βοήθεια της σχέσης 1.3.

$$ACN = \min ACN + \frac{(\max ACN - \min ACN) * (tm - m)}{(M - m)} \quad (\text{σχέση 1.3.})$$

- Για κάθε κατηγορία το PCN λαμβάνεται ανάμεσα στη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή του ACN που έχει προκύψει από το προηγούμενο βήμα.
- Κατόπιν υπολογίζεται το P_o' με τη βοήθεια της σχέσης 1.4.

$$P_o' = m + (M - m) \frac{PCN - \min ACN}{\max ACN - \min ACN} \quad (\text{σχέση 1.4.})$$

Όπου

m =ελάχιστη μάζα αεροσκάφους

M = μέγιστη μάζα αεροσκάφους

$\min ACN$ = τιμή του ACN που αντιστοιχεί στην ελάχιστη μάζα m

$\max ACN$ = τιμή του ACN που αντιστοιχεί στην μέγιστη μάζα M

- Τέλος αναζητείται ανάμεσα στα ζευγάρια εδαφικής κατηγορίας – PCN εκείνη η τιμή που παράγει επιτρεπόμενο φορτίο P_o' το οποίο πλησιάζει περισσότερο στο P_o . Με αυτό τον τρόπο προκύπτει η αριθμητική τιμή του PCN.

1.6 Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων της Διεύθυνσης Υπηρεσιών Πολιτικού Μηχανικού της Μ.Βρετανίας (Directorate of Civil Engineering Services)

Στη Μ.Βρετανία η πρώτη επίσημη προσπάθεια διερεύνησης της διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων των αεροδρομίων πραγματοποιήθηκε το 1937. Μετά από αρκετές τροποποιήσεις προέκυψε η σημερινή μορφή του εγχειριδίου της μεθόδου το οποίο εκδόθηκε το 1989 [6] και συμπεριλαμβάνει και τη μέθοδο ACN-PCN.

Η μέθοδος αποτελεί την αντίστροφη διαδικασία του σχεδιασμού. Αρχικά απαιτείται ο προσδιορισμός του επιπέδου της κυκλοφορίας που χρησιμοποιεί το οδόστρωμα. Η μέθοδος καθορίζει τα τρία επίπεδα κυκλοφορίας που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 1.6:

Συχνότητα Κυκλοφορίας	Αριθμός διελεύσεων (coverages) για την περίοδο σχεδιασμού του οδοστρώματος
χαμηλή	10.000
μεσαία	100.000
υψηλή	250.000

Πίνακας 1.6 : Επίπεδα κυκλοφορίας

Ένα συγκεκριμένο σημείο του οδοστρώματος αναμένεται να αναπτύξει μία μέγιστη τάση σαν αποτέλεσμα ενός δεδομένου αριθμού διελεύσεων αεροσκαφών. Η σχέση ανάμεσα στον αριθμό των διελεύσεων (passes) και τον αριθμό των φορών που το συγκεκριμένο σημείο θα αναπτύξει μέγιστη τάση (coverages) εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι ο αριθμός και η διάταξη των τροχών του κυρίου συστήματος τροχών του αεροσκάφους, το εύρος της επιφάνειας επαφής των τροχών και η πλευρική κατανομή της τροχιάς των αεροσκαφών σε σχέση με την κεντρική γραμμή του οδοστρώματος. Εκφράζεται με μία αναλογία διελεύσεων προς τον αριθμό εμφάνισης μέγιστης τάσης σε ένα σημείο (Pass-to-coverage Ratio = passes/coverages) και παίρνει τις ακόλουθες τιμές για τα πιο συνηθισμένα συστήματα τροχών:

Κύριο σύστημα τροχών προσγείωσης	Αναλογία (Pass-to-coverage Ratio)
Διπλός τροχός	3,2
Διπλός δίδυμος τροχός	1,6

Πίνακας 1.7 : Αναλογία (Pass-to-coverage Ratio)

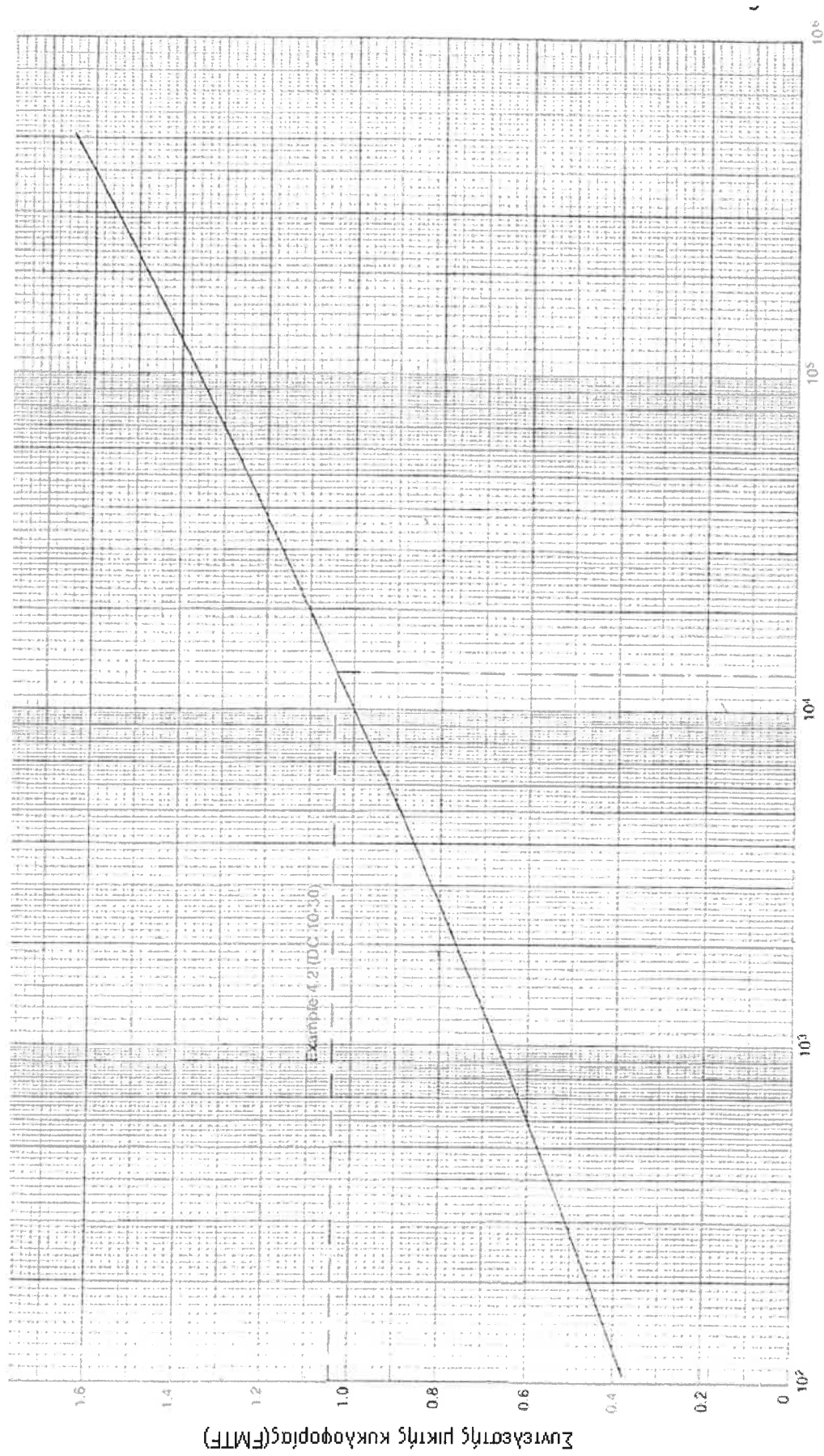
Η παραπάνω αναλογία αποτελεί σημαντικό στοιχείο της μεθόδου μιας και ο προσδιορισμός του επιπέδου κυκλοφορίας προκύπτει από τις διελεύσεις των αεροσκαφών (passes) αλλά μετατρέπεται και εκφράζεται σε διελεύσεις μέγιστης τάσης (coverages). Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διαδικασία προσδιορισμού του επιπέδου κυκλοφορίας.

Στις περιπτώσεις που ένα οδόστρωμα αποτελείται από μία ποικιλία αεροσκαφών κρίνεται απαραίτητο να συσχετιστεί η επίδραση της φόρτισης κάθε τύπου αεροσκάφους με αυτήν του αεροσκάφους σχεδιασμού και ως εκ τούτου να υπολογιστεί ο αριθμός των ισοδύναμων διελεύσεων του αεροσκάφους σχεδιασμού. Αφού καθοριστεί η διάρκεια ζωής του οδοστρώματος (προτείνεται παραδοχή 20 χρόνια για τα εύκαμπτα οδοστρώματα), προσδιορίζεται ο τύπος των αεροσκαφών που θα το χρησιμοποιήσουν και υπολογίζεται το ACN του καθενός για την πραγματική εδαφική κατηγορία και το κατάλληλο βάρος. Ορίζεται ο αριθμός των ετήσιων διελεύσεων κάθε αεροσκάφους και καθορίζεται το αεροσκάφος σχεδιασμού. Η μέθοδος θεωρεί σαν αεροσκάφος σχεδιασμού εκείνο που έχει το μεγαλύτερο

ACN. Υπολογίζεται ο λόγος του ACN κάθε αεροσκάφους προς το ACN του αεροσκάφους σχεδιασμού και στην συνέχεια προσδιορίζεται με τη βοήθεια διαγράμματος για κάθε αεροσκάφος με βάση τον αριθμό των διελεύσεων τους έναν συντελεστή μικτής κυκλοφορίας (FMTF=flexible mixed traffic factor). Τροποποιείται ο συντελεστής FMTF πολλαπλασιάζοντας τον με τον λόγο των ACN που υπολογίστηκε παραπάνω και χρησιμοποιώντας το διάγραμμα 1.8 και εφαρμόζοντας την αντίστροφη πορεία υπολογίζεται για κάθε αεροσκάφος ο αριθμός των ισοδύναμων διελεύσεων .

Στη συνέχεια, γνωρίζοντας το είδος και το πάχος των στρώσεων του οδοστρώματος ,το CBR της στρώσης έδρασης και το επίπεδο κυκλοφορίας υπολογίζεται από το κατάλληλο διάγραμμα (chart) το PCN του οδοστρώματος. Η μέθοδος παρέχει 6 διαγράμματα για τον προσδιορισμό του PCN ανάλογα με τα στοιχεία της διατομής που εξετάζεται. Εδώ παραθέτουμε ένα από αυτά (διάγραμμα 1.9).

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι στα ημιάκαμπτα οδοστρώματα οι σταθεροποιημένες στρώσεις μπορούν να μετατραπούν σε ισοδύναμα πάχη στρώσης από αμμοχάλικα (granular) χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους συντελεστές ισοδυναμίας που δίνει η μέθοδος. Αν μετά το πρώτο στάδιο της αξιολόγησης (κατά τη διαδικασία προσδιορισμού του PCN) προκύψει «πλεόνασμα βάσης» τότε αυτό μπορεί να μετατραπεί σε υλικό υπόβασης με τη βοήθεια των κατάλληλων συντελεστών και να προκύψει ένα καινούργιο πάχος οδοστρώματος, το οποίο μπαίνει ξανά σαν δεδομένο στο διάγραμμα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το πάχος των ασφαλικών στρώσεων συν αυτό της βάσης να γίνει ίσο με το απαιτούμενο, για το ACN που προκύπτει από το τροποποιημένο συνολικό πάχος.



Ισοδύναμες Διελεύσεις (coverages)

Διάγραμμα 1.8: Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστή μικτής κυκλοφορίας για εύκαμπτα οδοστρώματα FMTF (=Flexible Mixed Traffic Factor) [7]

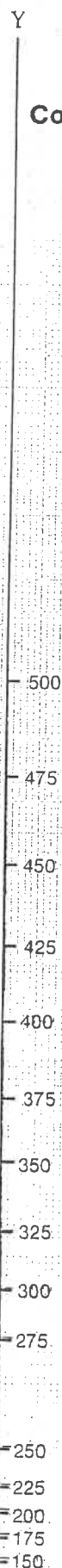
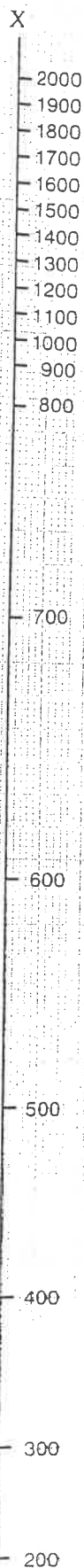
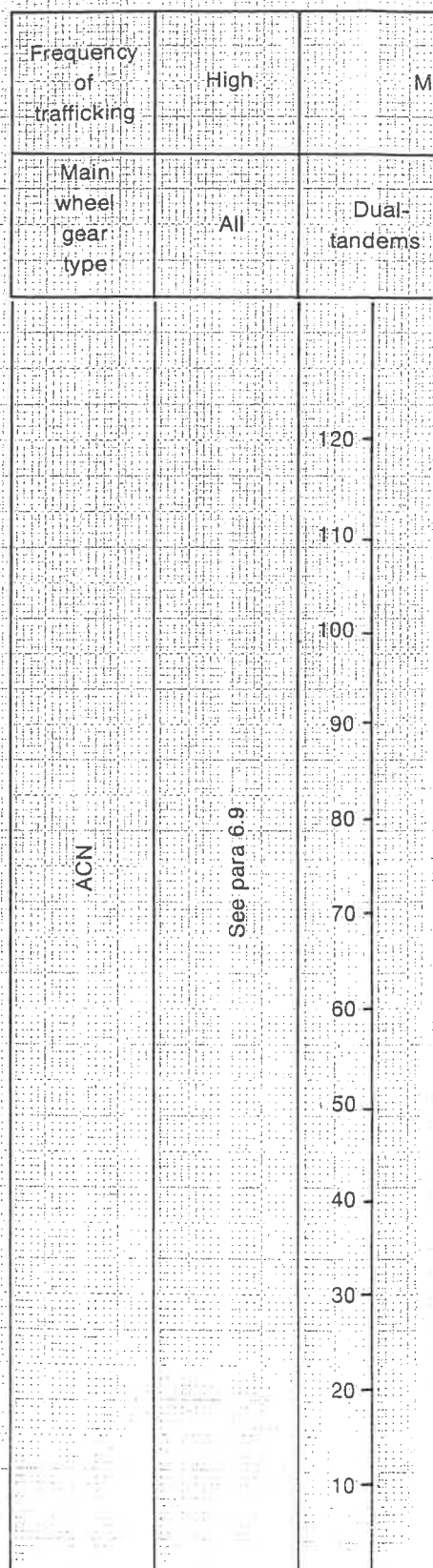


CHART 6

Evaluation of Conventional Pavements

NOTE 1: X-AXIS.

The X-Axis represents the total pavement thickness including surfacing, base and sub-base. The thickness of surfacing should not be less than 125mm for aircraft with ACN >50

NOTE 2: Y-Axis.

The Y-Axis represents the combined thickness of surfacing and granular base

2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ PCN ΣΕ **ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ**

2.1 Εισαγωγή

Στο πλαίσιο μιας πρώτης συγκριτικής διερεύνησης των μεθόδων προσδιορισμού του PCN που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί μία εφαρμογή τους σε ένα υφιστάμενο ημιάκαμπτο οδόστρωμα αεροδρομίου. Θα ακολουθήσει σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων με την επίσημη δημοσιευμένη τιμή του αεροδρομίου.

2.2 Στοιχεία οδοστρώματος

Για την υλοποίηση της προαναφερθείσας ανάλυσης θεωρήθηκε καταλληλότερη η επιλογή ενός υφιστάμενου ημιάκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου επειδή αυτό αποτελεί ένα πραγματικό πρόβλημα. Τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα δεν είναι συνηθισμένα στα Ελληνικά αεροδρόμια. Χρησιμοποιούνται όμως σε μεγάλο βαθμό σε διεθνή αεροδρόμια.

Αναζητώντας ένα οδόστρωμα αεροδρομίου που να αποτελεί μια ημιάκαμπτη κατασκευή και συνάμα να παρουσιάζει ένα ιδιαίτερο ενδιαφέρον καταλήξαμε στην επιλογή του οδοστρώματος των διαδρόμων του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών (ΔΑΑ). Όπως είναι γνωστό, ο ΔΑΑ έχει αναγνωριστεί σαν ένα από τα πιο σημαντικά αεροδρόμια εξαιτίας του υψηλού επιπέδου των υπηρεσιών που προσφέρει σε όλους τους τομείς. Επιπλέον βρίσκεται ανάμεσα σε τρεις ηπείρους και αποτελεί ένα κομβικό σημείο για τη νοτιοανατολική Ευρώπη. Συνεπώς η σημασία του αεροδρομίου, τόσο για τη μεταφορά επιβατών όσο και για τη μεταφορά αγαθών, είναι αναμφισβήτητη.

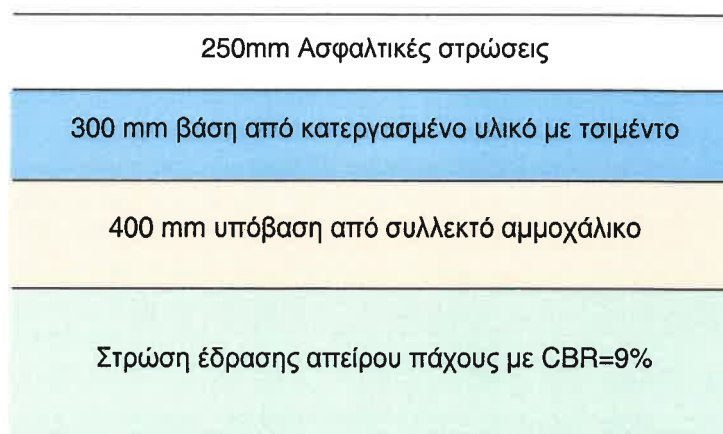
Το αεροδρόμιο περιλαμβάνει δύο διαδρόμους μήκους περίπου 4000m και πλάτους 45m. Στο μεγαλύτερο μέρος τους αποτελούν μία ημιάκαμπτη κατασκευή με εξαίρεση περίπου 500m δύσκαμπτου οδοστρώματος κοντά στις άκρες τους.

Στην εικόνα 2.1 που ακολουθεί φαίνεται μία άποψη του ανατολικού διαδρόμου του αεροδρομίου.



Εικόνα 2.1: Ανατολικός διάδρομος ΔΑΑ

Στα πλαίσια μίας συνεργασίας του τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής του ΕΜΠ με τις αρχές του Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών έχουν διατεθεί στοιχεία μελέτης και σχεδιασμού του οδοστρώματος. Σύμφωνα με αυτά το οδόστρωμα αποτελείται από 250mm ασφαλτικών στρώσεων, 300mm σταθεροποιημένης με τσιμέντο βάσης, 400mm υπόβασης από συλλεκτό αμμοχάλικο και μια στρώση έδρασης η οποία θεωρείται απείρου πάχους με CBR =9% (σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1: Διατομή οδοστρώματος διαδρόμων Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών

Όπως είναι γνωστό [8] τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα αυτού του τύπου διαφέρουν από τα άλλα είδη οδοστρωμάτων ως προς την δομική τους απόκριση στις επιπονήσεις. Πιο συγκεκριμένα, οι κατεργασμένες στρώσεις, λόγω της μεγάλης ακαμψίας που έχουν σε σχέση με την ακαμψία των ασφαλτικών στρώσεων και των στρώσεων από μη κατεργασμένα υλικά,

μεταβάλλουν την κατανομή των τάσεων στα διάφορα σημεία του οδοστρώματος και μεταθέτουν σε άλλες στρώσεις τα κρίσιμα σημεία.

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό των κατεργασμένων με υδραυλικές κονίες στρώσεων είναι η ρηγμάτωση που υφίστανται λόγω παρεμπόδισης των μετακινήσεων που προκαλούνται από συστολή πήξεως και από θερμοκρασιακές τάσεις. Οι ρωγμές αυτές είναι εγκάρσιες, η ανάπτυξη τους αρχίζει μετά την ολοκλήρωση της πήξης, μεταδίδονται στην ασφαλτική στρώση κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του οδοστρώματος και κατόπιν εμφανίζονται στην επιφάνεια του. Είναι γνωστές ως ρωγμές εξ ανακλάσεως και θεωρητικά δεν αποτελούν στοιχείο δομικής βλάβης του οδοστρώματος. Στην πράξη όμως είναι πιθανό να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα ή και λειτουργική αστοχία του οδοστρώματος. Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο στα οδοστρώματα με μεγάλο μέτρο ελαστικότητας της κατεργασμένης στρώσης ενώ εδώ δεν έχουμε τέτοια περίπτωση.

Εκτός από τα παραπάνω στοιχεία του οδοστρώματος διατέθηκαν και πλήρη στοιχεία της κυκλοφορίας του αεροδρομίου, απαραίτητα για την ενεργοποίηση των μεθόδων προσδιορισμού του PCN. Για να καταστεί δυνατή η χρήση των δεδομένων για εφαρμογές οδοστρωμάτων κρίθηκε αναγκαία η επεξεργασία αυτών. Αρχικά πραγματοποιήθηκε μια ομαδοποίηση των αεροσκαφών με βάση το βάρος τους και το σύστημα προσγείωσης τους. Στη συνέχεια παραλήφθηκαν εκείνα τα αεροσκάφη που παρουσίαζαν πολύ λίγες ετήσιες διελεύσεις (λιγότερες από 20 ετησίως) καθώς και εκείνα με αρκετές διελεύσεις αλλά πολύ μικρό βάρος (μικρότερο από 30.000 lbs) . Δημιουργήθηκαν λοιπόν 12 ομάδες αεροσκαφών με κοινά χαρακτηριστικά και επιλέγοντας για κάθε ομάδα ένα αντιπροσωπευτικό αεροσκάφος, προέκυψε η σύνθεση της κυκλοφορίας που φαίνεται στον πίνακα 2.1. Στον ίδιο πίνακα φαίνονται και οι ετήσιες διελεύσεις κάθε αεροσκάφους για τα έτη 2002, 2003, και 2004 για τα οποία υπήρχαν ολοκληρωμένα στοιχεία καθώς και η μέση ετήσια κυκλοφορία που προέκυψε από τα προαναφερθέντα έτη για τον δυτικό διάδρομο. Η μέση ετήσια κυκλοφορία του ανατολικού διαδρόμου είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με εκείνη του δυτικού διαδρόμου ενώ ο υπολογισμός της φαίνεται στον πίνακα 3 του παραρτήματος.

Δυτικός Διάδρομος 03L-21R							
	Αεροσκάφος	Μέγιστο βάρος απογείωσης	Σύστημα προσγείωσης	Ετήσια κυκλοφορία			Μέση ετήσια κυκλοφορία
				2002	2003	2004	
1	Airbus A300-600	363763	DT	3221	2964	3489	3225
2	Airbus A321	181220	D	10049	8750	11334	10044
3	Airbus A340-300	566575	DT	1068	1383	1195	1215
4	Canadair Challenger 601/604	53000	D	12284	16660	13430	14125
5	Boeing B727-200	216050	D	271	455	317	348
6	Boeing B737-400	150000	D	31082	31497	37746	33442
7	Boeing B747-400	870000	DDT	323	214	216	251
8	Boeing B757-200	255000	DT	849	899	782	843
9	Mc Donnell Douglas MD-11	660000	DT	520	537	419	492
10	British Aerospace Bae146-300F	104000	D	472	503	938	638
11	British Aerospace BAE146-200	89000	D	235	507	893	545
12	Fokker F-50	41865	D	4220	5189	7765	5725

Πίνακας 2.1 : Σύνθεση κυκλοφορίας δυτικού διαδρόμου

Από τη σύνθεση του παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι οι τρεις τελευταίες ομάδες αεροσκαφών έχουν σχετικά μικρό αριθμό διελεύσεων και μικρό βάρος απογείωσης και επομένως θα μπορούσαν να παραληφθούν. Παρέμειναν όμως στους υπολογισμούς για την εξαγωγή όσο το δυνατόν ακριβέστερων αποτελεσμάτων.

Τα στοιχεία των στρώσεων του οδοστρώματος που φαίνονται στο σχήμα 2.1 καθώς επίσης και τα στοιχεία της κυκλοφορίας του πίνακα 2.1 χρησιμοποιήθηκαν στα επόμενα υποκεφάλαια για τον προσδιορισμό του PCN των οδοστρωμάτων του αεροδρομίου με τις μεθόδους που έχουν ήδη παρουσιαστεί.

2.3 Εφαρμογή μεθόδου της FAA για τον προσδιορισμό του PCN

Χρησιμοποιώντας τη διαδικασία προσδιορισμού του PCN της μεθόδου της FAA που παρουσιάστηκε στο υποκεφάλαιο 1.3 πραγματοποιήθηκε ένας πρώτος υπολογισμός του PCN των διαδρόμων του αεροδρομίου. Αρχικά, για κάθε ένα από τα παραπάνω 12 αεροσκάφη υπολογίστηκε το απαιτούμενο πάχος οδοστρώματος με βάση το CBR της στρώσης έδρασης, το μέγιστο βάρος απογείωσης και τη μέση ετήσια κυκλοφορία χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο διάγραμμα της μεθόδου. Εισάγοντας στον πάνω άξονα του

κατάλληλου για κάθε αεροσκάφος διαγράμματος την τιμή 9% του CBR της στρώσης έδρασης, φέρνοντας κατακόρυφη ευθεία μέχρι το σημείο τομής αυτής με την καμπύλη του συνολικού βάρους του αεροσκάφους, φέροντας μια ευθεία παράλληλη στον οριζόντιο άξονα μέχρι το σημείο τομής αυτής με την ευθεία των ετήσιων απογειώσεων του και στη συνέχεια χαράσσοντας κατακόρυφη ευθεία υπολογίστηκε το απαιτούμενο πάχος οδοστρώματος του καθενός. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στον πίνακα 4 του παραρτήματος. Από τα στοιχεία του ίδιου πίνακα προκύπτει ότι το οδόστρωμα που απαιτούσε το μεγαλύτερο πάχος οδοστρώματος και συνεπώς αποτέλεσε το αεροσκάφος σχεδιασμού και για τους δύο διαδρόμους ήταν το Airbus A300-600 με μέγιστο βάρος απογείωσης 363763 lbs και σύστημα προσγείωσης διπλού δίδυμου τροχού (DT).

Στη συνέχεια ήταν απαραίτητη η μετατροπή των διελεύσεων κάθε αεροσκάφους σε διελεύσεις του ίδιου συστήματος τροχών με το αεροσκάφος σχεδιασμού (R_2). Σύμφωνα με τους συντελεστές ισοδυναμίας της μεθόδου, για τη μετατροπή των διελεύσεων ενός αεροσκάφους διπλού τροχού (D) σε διελεύσεις διπλού δίδυμου τροχού (DT) θα πρέπει να πολλαπλασιαστούν οι διελεύσεις του διπλού τροχού με έναν συντελεστή ίσο με 0.6. Αντίστοιχα για τη μετατροπή των διελεύσεων ενός αεροσκάφους τετραπλού δίδυμου τροχού (DDT) σε διελεύσεις διπλού δίδυμου τροχού (DT) θα πρέπει να ακολουθήσει πολλαπλασιασμός των διελεύσεων του τετραπλού δίδυμου τροχού με έναν συντελεστή ίσο με 1.0. Απαραίτητος ήταν και ο προσδιορισμός του φορτίου του τροχού κάθε αεροσκάφους (W_2), ο οποίος πραγματοποιήθηκε με θεώρηση κατανομής 95% του συνολικού βάρους του αεροσκάφους στα κύρια φορεία τροχών και διαίρεση με τον αριθμό των τροχών του κύριου συστήματος. Με τον ίδιο τρόπο προσδιορίστηκε και το φορτίο του τροχού του αεροσκάφους σχεδιασμού (W_1).

Από τους παραπάνω υπολογισμούς και με τη βοήθεια της σχέσης 1.2 υπολογίστηκαν οι ισοδύναμες ετήσιες διελεύσεις του αεροσκάφους σχεδιασμού (R_1) για κάθε αεροσκάφος. Αθροίζοντας τις διελεύσεις που προκύπτουν από την παραπάνω διαδικασία καταλήξαμε στο συνολικό αριθμό ισοδύναμων ετήσιων διελεύσεων του αεροσκάφους σχεδιασμού. Αυτός ο αριθμός χρησιμοποιήθηκε σαν δεδομένο στα διαγράμματα υπολογισμού. Οι υπολογισμοί που προκύπτουν από την παραπάνω διαδικασία φαίνονται στις αντίστοιχες στήλες του πίνακα 2.2 για τον δυτικό διάδρομο. Αντίστοιχοι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν και για τον ανατολικό διάδρομο και φαίνονται στον πίνακα 5 του παραρτήματος.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι σε όλους τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε το μέγιστο βάρος απογείωσης του αεροσκάφους αφού πρόκειται για μια διαδικασία κατάταξης οδοστρωμάτων και παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ο προσδιορισμός της κατάστασης του οδοστρώματος εάν αυτό καταπονείται από τη μεγαλύτερη δυνατή κυκλοφορία.

ΔΙΑΔΡΟΜΟΣ 03L-21R										
	Αεροσκάφος	Μέγιστο βάρος απογείωσης (lbs)	Σύστημα προσγείωσης	Μέση ετήσια κυκλοφορία	R2	LOGR2	W1(lbs)	W2 (lbs)	LOGR1	R1
1	Airbus A300-600	363763	DT	4579	4579	3,6608	43197	43197	3,6608	4579
2	Airbus A321	181220	D	11209	6726	3,8277	43197	43040	3,8208	6619
3	Airbus A340-300	566575	DT	1051	1051	3,0216	43197	67281	3,7710	5902
4	Canadair Challenger 601/604	53000	D	12185	7311	3,8640	43197	12588	2,0859	122
5	Boeing B727-200	216050	D	333	200	2,3002	43197	51312	2,5069	321
6	Boeing B737-400	150000	D	33377	20026	4,3016	43197	35625	3,9064	8062
7	Boeing B747-400	870000	DDT	267	267	2,4265	43197	51656	2,6535	450
8	Boeing B757-200	255000	DT	1151	1151	3,0611	43197	30281	2,5629	366
9	Mc Donnell Douglas MD-11	660000	DT	658	658	2,8182	43197	78375	3,7961	6253
10	British Aerospace Bae146-300F	104000	D	593	356	2,5512	43197	24700	1,9292	85
11	British Aerospace BAE146-200	89000	D	530	318	2,5022	43197	21138	1,7503	56
12	Fokker F-50	41865	D	5328	3197	3,5047	43197	9943	1,6814	48
	ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΔΙΕΛΕΥΣΕΙΣ									32863

Πίνακας 2.2: Υπολογισμός ισοδύναμων ετήσιων διελεύσεων αεροσκάφους σχεδιασμού δυτικού διαδρόμου, μέθοδος της FAA

Είναι αναγκαίο να αναφερθεί ότι για να είναι δυνατή η εφαρμογή της μεθόδου και στα ημιάκαμπτα οδοστρώματα, η FAA έχει καθιερώσει ορισμένους συντελεστές ισοδυναμίας για τη μετατροπή του πάχους των σταθεροποιημένων στρώσεων σε ισοδύναμο πάχος μη σταθεροποιημένων στρώσεων. Ειδικότερα για την περίπτωση στρώσεων από σταθεροποιημένο υλικό με τσιμέντο παρέχει τις τιμές : $1,2 \div 1,6$. Από τη χρήση των παραπάνω συντελεστών ισοδυναμίας και δεδομένου ότι το υπό εξέταση οδόστρωμα αποτελείται από ασφατικές στρώσεις πάχους 250 mm, βάση από σταθεροποιημένο με τσιμέντο υλικό πάχους 300 mm, υπόβαση από συλλεκτό αμμοχάλικο πάχους 400 mm και από στρώση έδρασης απείρου πάχους προκύπτει το ισοδύναμο συνολικό πάχος οδοστρώματος που φαίνεται στον πίνακα 2.3.

Συντελεστής ισοδυναμίας σταθεροποιημένης στρώσης	Συνολικό πάχος οδοστρώματος σε cm	Συνολικό πάχος οδοστρώματος σε inches
1,2	101	39,76
1,4	104	42,13
1,6	113	44,49

Πίνακας 2.3 : Ισοδύναμο συνολικό πάχος οδοστρώματος

Με βάση λοιπόν το συνολικό πάχος του οδοστρώματος, όπως αυτό προκύπτει μετά τη χρήση των συντελεστών ισοδυναμίας, το CBR=9% της στρώσης έδρασης και τον αριθμό των ισοδύναμων ετήσιων διελεύσεων του αεροσκάφους σχεδιασμού υπολογίστηκε το μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος αεροσκάφους για κάθε διάδρομο. Οι υπολογισμοί μας πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του διαγράμματος 1 του παραρτήματος.

Στη συνέχεια, γνωρίζοντας το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο, τον τύπο του οδοστρώματος, την εδαφική κατηγορία στην οποία αυτό ανήκει και το σύστημα προσγείωσης του αεροσκάφους σχεδιασμού επιλέχθηκε το διάγραμμα 2 του παραρτήματος για τον προσδιορισμό του PCN του οδοστρώματος. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι στις περιπτώσεις που οι τιμές βρισκότουσαν εκτός διαγραμμάτων έγινε επέκταση αυτών. Στην περίπτωση που δεν πραγματοποιούνταν επέκταση διαγραμμάτων και γινόταν αποδεκτή η μέγιστη τιμή του διαγράμματος το PCN θα είχε σταθερή τιμή ίση με 71.

Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας φαίνονται συνοπτικά στον πίνακα 2.4 που ακολουθεί. Ο υπολογισμός του PCN έχει πραγματοποιηθεί για τα τρία διαφορετικά ισοδύναμα συνολικά πάχη οδοστρώματος που προέκυψαν από τις τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή ισοδυναμίας της σταθεροποιημένης στρώσης. Από αυτά τα αποτελέσματα θα μπορούσε να επιλεγεί εκείνο που αντιστοιχεί σε μία μέση τιμή (1,4) του συντελεστή ισοδυναμίας της σταθεροποιημένης βάσης για την περαιτέρω ανάλυση.

Συντελεστής ισοδυναμίας σταθεροποιημένης βάσης	Συνολικό πάχος (cm)	Συνολικό πάχος (inches)	Μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος (lbs)	PCN	
				03L-21R	03R-21L
1,2	39,76	101	400000	71/F/B/W/T	71/F/B/W/T
1,4	42,126	104	470000	84/F/B/W/T	84/F/B/W/T
1,6	44,488	113	500000	90/F/B/W/T	90/F/B/W/T

Πίνακας 2.4 : PCN του οδοστρώματος των διαδρόμων του ΔΑΑ για διαφορετικές τιμές του συντελεστή ισοδυναμίας σταθεροποιημένης βάσης

Η χρήση των υπολοίπων συμβόλων στην έκφρασης του PCN αιτιολογείται ως εξής:

F: εύκαμπτο οδόστρωμα

B: κατηγορία εδαφικής αντοχής (CBR στρώσης έδρασης=9%)

W: δεν υπάρχει περιορισμός της πίεσης των ελαστικών

T : έγινε χρήση υπολογιστικής μεθόδου

2.4 Εφαρμογή μεθόδου της UFC για το ναυτικό για τον προσδιορισμό του PCN

Η μέθοδος προσδιορισμού του PCN της UFC για το ναυτικό καθορίζει τις εξής 5 κατηγορίες αεροσκαφών F-14, P-3, C-130, C-141 και C-5A. Χρησιμοποιώντας τους συντελεστές ισοδυναμίας της FAA πραγματοποιήθηκε μετατροπή όλων των διελεύσεων σε διελεύσεις του ίδιου συστήματος τροχών. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν δύο από τις πέντε δυνατές μετατροπές μιας και τα συστήματα τροχών των C-130, C-5A και F-14 δεν συμπεριλαμβάνονταν στην πραγματική κυκλοφορία.

Οι μετατροπές που έλαβαν χώρα για τον δυτικό διάδρομο 03L-21R ήταν:

➤ Μετατροπή σε dual P-3

$(3225+1215+843+492)*1.7+(10044+14125+348+33442+638+545+5725)+251*1.7 = 75111$
διελεύσεις

➤ Μετατροπή σε dual tandem C-141

$(3225+1215+843+492)+(10044+14125+348+33442+638+545+5725)*0.6+251*1 = 44946$
διελεύσεις

Οι μετατροπές που πραγματοποιήθηκαν για τον ανατολικό διάδρομο 03R-21L ήταν:

➤ Μετατροπή σε dual P-3

$(4579+1051+1151+658)*1.7+(11209+12185+333+33377+593+530+5328)+267*1.7= 76.665$
διελεύσεις

➤ Μετατροπή σε dual tandem C-141

$(4579+1051+1151+658)+ (11209+12185+333+33377+593+530+5328)*0.6+267*1= 45.839$
διελεύσεις

Στη συνέχεια γνωρίζοντας τα μέγιστα επιτρεπόμενα βάρη ,τις ισοδύναμες διελεύσεις και το CBR της στρώσης έδρασης υπολογίστηκε από το αντίστοιχο διάγραμμα το απαιτούμενο πάχος οδοστρώματος για την κάθε κατηγορία. Το αεροσκάφος που απαιτούσε το μεγαλύτερο πάχος ήταν το C-141 και αποτέλεσε το αεροσκάφος σχεδιασμού.

Το ισοδύναμο πάχος του οδοστρώματος που χρησιμοποιείται παρακάτω στους υπολογισμούς προκύπτει μετά την μετατροπή των σταθεροποιημένων στρώσεων σε μη σταθεροποιημένες με τη χρήση των κατάλληλων συντελεστών . Η μέθοδος θεωρεί ότι 25mm σταθεροποιημένης με τσιμέντο βάσης ισοδυναμούν με 38mm μη σταθεροποιημένης βάσης. Επειδή το οδόστρωμα του αεροδρομίου αποτελείται από 25cm ασφαλτικών στρώσεων, 30cm σταθεροποιημένης βάσης και 40cm υπόβασης το ισοδύναμο πάχος προκύπτει:

$$25+45,6+40=110,6 \text{ cm ή } 43,5 \text{ inches}$$

Από το διάγραμμα υπολογισμού του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου που αντιστοιχεί στο C-141 (διάγραμμα 3 του παραρτήματος) για 449460 διελεύσεις του C-141, για μια διάρκεια ζωής 10 χρόνων, πάχος οδοστρώματος 43,5 inches και CBR στρώσης έδρασης 9% προέκυψε μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος αεροσκάφους 415 kips. Ομοίως για 458390 διελεύσεις του C-141 προέκυψε μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος αεροσκάφους 415 kips.

Στη συνέχεια, για μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος αεροσκάφους 415 kips και εδαφική κατηγορία B προέκυψε από το διάγραμμα υπολογισμού του PCN για το αεροσκάφος C-141(διάγραμμα 4 του παραρτήματος) το $PCN = 68$. Για τον προσδιορισμό αυτής της τιμής απαιτήθηκε επέκταση του διαγράμματος. Στην αντίθετη περίπτωση η αριθμητική τιμή του PCN θα ήταν 58.

2.5 Εφαρμογή μεθόδου της UFC για την αεροπορία για τον προσδιορισμό του PCN

Για τον προσδιορισμό του PCN με τη μέθοδο της UFC για την αεροπορία ακολουθήθηκε η διαδικασία που παρουσιάστηκε στο υποκεφάλαιο 1.4.2. Αρχικά υπολογίστηκε το ισοδύναμο πάχος του οδοστρώματος χρησιμοποιώντας τους συντελεστές ισοδυναμίας της μεθόδου. Για 25cm ασφαλικών στρώσεων, 30cm σταθεροποιημένης στρώσης και 40cm υπόβασης προέκυψε ισοδύναμο πάχος:

$$25+1,15*30+40=99,5 \approx 100\text{cm}= 39.5 \text{ inches}$$

Στη συνέχεια για περιοχή κυκλοφορίας (traffic area) τύπου A και για 50000 διελεύσεις του C-17 από το διάγραμμα 1.5 υπολογίστηκε για πάχος οδοστρώματος 39.5 inches το μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος ίσο με 720 kips .

Η παραπάνω τιμή προέκυψε μετά από επέκταση διαγραμμάτων διότι βρισκόταν εκτός των ορίων αυτών. Στην περίπτωση που γινόταν αποδεκτή η μέγιστη τιμή του διαγράμματος και δεν πραγματοποιούνταν επέκταση η αντίστοιχη τιμή θα ήταν : 600 kips

Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς και για κατηγορία εδάφους B προκύπτει η αριθμητική τιμή του PCN από το διάγραμμα 1.6 ίση με 74 για την πρώτη περίπτωση και ίση με 58 για την περίπτωση μη επέκτασης των διαγραμμάτων. Τα ίδια βέβαια αποτελέσματα ισχύουν και για τους δύο διαδρόμους του αεροδρομίου.

2.6 Εφαρμογή μεθόδου του Γαλλικού Υπουργείου Συγκοινωνιών για τον προσδιορισμό του PCN

Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο για τον προσδιορισμό του PCN αρχικά απαιτείται η δημιουργία μίας λίστας με τα στοιχεία των αεροσκαφών που χρησιμοποιούν το οδόστρωμα. Στον παρακάτω πίνακα 2.5 που ακολουθεί εκτός από τον τύπο κάθε αεροσκάφους φαίνεται η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της μάζας του, το ποσοστό του φορτίου του που κατανέμεται στο κύριο σύστημα τροχών και οι τιμές του ACN για τις τιμές 10%, 6% και 9% του CBR της στρώσης έδρασης.

	Τύπος α/φ	Μάζα (kg)	φορτίο σε κύριο σύστημα τροχών%	ACN για CBR =		
				10%	6%	9%
1	AIRBUS A300-600 DT	165000	47	56	68	59
		87100		21	24	22
2	AIRBUS A320 D	73500	47	40	44	41
		39748		19	20	19
3	DC-10-30/40 DT	260816	37,6	61	74	64
		124058		23	26	24
4	antover D	21090	46,2	10	12	11
		11884		5	6	5
5	BOEING 727-200 D	95254	46,5	55	62	57
		45677		22	25	23
6	BOEING 737-400 D	64864	46,9	37	41	38
		33643		17	18	17
7	BOEING 747-400 DT	395987	23,4	64	79	68
		178459		22	25	23
8	BOEING 757-200 DT	109316	45,2	32	39	34
		60260		14	17	15
9	MD 11 DT	274650	39,2	70	85	74
		127000		26	29	27
10	FOKKER F-100 D	44680	47,8	27	30	28
		24375		13	14	13
11	BAE 146-200 D	40000	47,1	21	23	22
		23000		10	11	10
12	FOKER F50 D	20820	47,8	10	12	11
		12649		5	6	5

Πίνακας 2.5 : Στοιχεία αεροσκαφών

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τον κατάλληλο συντελεστή ισοδυναμίας που παρέχει η μέθοδος, υπολογίστηκε το ισοδύναμο πάχος οδοστρώματος (H) :

$$H=25+30*1.5+40=109 \text{ cm}$$

Με βάση αυτό και το CBR=9% της στρώσης έδρασης πραγματοποιήθηκε ένας προσδιορισμός του επιτρεπόμενου φορτίου για κάθε κύριο φορείο τροχών από το αντίστοιχο διάγραμμα της μεθόδου. Κατόπιν με βάση την επί τοις εκατό κατανομή του βάρους κάθε αεροσκάφους στους τροχούς υπολογίστηκε η επιτρεπόμενη συνολική μάζα κάθε αεροσκάφους (tm). Τα αποτελέσματα των παραπάνω υπολογισμών φαίνονται στον πίνακα 2.6 που ακολουθεί.

		Επιτρεπόμενο φορτίο ανά φορείο τροχών (Po)	% Κατανομή φορτίου ανά φορείο τροχών	Συνολική μάζα α/φ σε τόνους (tm)
1	AIRBUS A300-600 DT	90	47	191
2	AIRBUS A320 D	40	47	85
3	DC-10-30/40 DT	90	37,6	239
4	antover D	40	46,2	87
5	BOEING 727-200 D	40	46,5	86
6	BOEING 737-400 D	24,3	46,9	52
7	BOEING 747-400 DT	86,3	23,4	369
8	BOEING 757-200 DT	105	45,2	232
9	MD 11 DT	90	39,2	230
10	FOKKER F-100 D	40	47,8	84
11	BAE 146-200 D	40	47,1	85
12	FOKER F50 D	40	47,8	84

Πίνακας 2.6: Κατανομή φορτίου σε κάθε φορείο και υπολογισμός συνολικής μάζας αεροσκάφους

Επειδή το CBR=9% της στρώσης έδρασης βρισκόταν πιο κοντά στις εδαφικές κατηγορίες B και C, για αυτές τις εδαφικές κατηγορίες προσδιορίστηκε το ACN που αντιστοιχούσε στο επιτρεπόμενο φορτίο Po με τη βοήθεια της σχέσης 1.3. Για κάθε κατηγορία το PCN έλαβε μια τιμή ανάμεσα στη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή του ACN που προέκυψε από το προηγούμενο βήμα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 2.7 που ακολουθεί :

		ACN	
		Κατηγορία εδάφους	
		B	C
1	AIRBUS A300-600 DT	68	83
2	AIRBUS A320 D	47	52
3	DC-10-30/40 DT	55	66
4	antover D	46	55
5	BOEING 727-200 D	49	52
6	BOEING 737-400 D	29	32
7	BOEING 747-400 DT	59	72
8	BOEING 757-200 DT	77	94
9	MD 11 DT	57	68
10	FOKKER F-100 D	54	61
11	BAE 146-200 D	64	72
12	FOKER F50 D	49	58
PCN		56	64

Πίνακας 2.7 : PCN για κάθε κατηγορία εδάφους

Στη συνέχεια υπολογίστηκε για κάθε εδαφική κατηγορία το Po' με τη βοήθεια της σχέσης 1.4. Τέλος αναζητήσαμε ανάμεσα στα ζευγάρια εδαφικής κατηγορίας – PCN εκείνη την τιμή που

παράγει επιτρεπόμενο φορτίο P_o' το οποίο πλησιάζει περισσότερο στο P_o . Το ζευγάρι αυτό είχε τιμή $PCN=56$ και κατηγορία εδάφους B. Κατά συνέπεια το PCN που υπολογίστηκε από την παραπάνω διαδικασία είναι:

$PCN=56/F/B/W/T$

2.7 Εφαρμογή μεθόδου της Διεύθυνσης Υπηρεσιών Πολιτικού Μηχανικού της Μ.Βρετανίας για τον προσδιορισμό του PCN

Εφαρμόζοντας τη διαδικασία προσδιορισμού του PCN που παρέχει η μέθοδος και που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 1.6 πραγματοποιήθηκε ένας επιπλέον υπολογισμός του PCN. Αρχικά επιτεύχθηκε ο υπολογισμός του επιπέδου της κυκλοφορίας που δέχονται οι διάδρομοι του αεροδρομίου. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών για τον δυτικό διάδρομο του αεροδρομίου φαίνονται στον πίνακα 2.8 που ακολουθεί ενώ οι αντίστοιχοι υπολογισμοί αλλά για τον ανατολικό διάδρομο παρατίθενται στο παράρτημα(πίνακας 6). Και για τους δύο διαδρόμους το επίπεδο κυκλοφορίας που προέκυψε είναι το ίδιο.

Στην πρώτη στήλη του πίνακα 2.8 φαίνονται οι 12 κατηγορίες αεροσκαφών, όπως αυτές προέκυψαν από την επεξεργασία της κυκλοφορίας. Στη στήλη 2 του ίδιου πίνακα παρατίθεται για κάθε αεροσκάφος η τιμή του ACN του για τις χαρακτηριστικές τιμές των εδαφικών κατηγοριών B και C ($CBR=10\%$ και 6% αντίστοιχα), καθώς και το υπολογιζόμενο με γραμμική παρεμβολή ACN του που αντιστοιχούσε στο $CBR=9\%$ της στρώσης έδρασης. Το αεροσκάφος που είχε το μεγαλύτερο ACN ήταν το MD 11 και αυτό αποτέλεσε το αεροσκάφος σχεδιασμού σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο. Στον πίνακα 2.8 έχει σημειωθεί με μπλε χρώμα το αεροσκάφος σχεδιασμού και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μετατροπής των διελεύσεων κάθε αεροσκάφους σε ισοδύναμες διελεύσεις του αεροσκάφους σχεδιασμού.

Για την περίπτωση διπλού τροχού η αναλογία διελεύσεων προς διελεύσεις που προκαλούν την μέγιστη καταπόνηση στο οδόστρωμα ήταν 3,2 ενώ ο αντίστοιχος λόγος για σύστημα προσγείωσης διπλού δίδυμου τροχού ήταν 1,6 (στήλη 3). Στη στήλη 4 του παρακάτω πίνακα φαίνονται οι ετήσιες διελεύσεις του κάθε αεροσκάφους ενώ η στήλη 5 αποτελεί τον λόγο των διελεύσεων για την 20ετή διάρκεια ζωής του οδοστρώματος προς τους συντελεστές της στήλης 3. Ο λόγος του ACN κάθε αεροσκάφους προς το ACN του αεροσκάφους σχεδιασμού φαίνεται στη στήλη 6. Με βάση τις διελεύσεις της στήλης 5 προκύπτει από το διάγραμμα 1.8 ο συντελεστής $FTMF=$ Flexible Traffic Mixed Factor (στήλη 7) ο οποίος τροποποιείται με πολλαπλασιασμό με το λόγο των ACN που έχει ήδη υπολογιστεί. Με τη βοήθεια του ίδιου διαγράμματος και του τροποποιημένου δείκτη $FTMF$ (στήλη 8) προκύπτουν τελικά οι

ισοδύναμες διελεύσεις του αεροσκάφους σχεδιασμού (στήλη 9) με εφαρμογή της αντίστροφης πορείας υπολογισμού. Αθροίζοντας τις ισοδύναμες διελεύσεις όλων των αεροσκαφών προκύπτει ένας συνολικός αριθμός διελεύσεων που αντιστοιχεί στο επίπεδο κυκλοφορίας του διαδρόμου.

	A/Φ	ACN			Pass-to-coverage ratio	διελεύσεις/έτος 03L-21R	coverages στη διάρκεια ζωής	Λόγος ACN	συντελεστής FMTF	Τροποποιημένος συντελεστής FMTF	Ισοδύναμες διελεύσεις
		10	6	9							
1	AIRBUS A320 D	40	44	41	3,2	10044	62775	0,55	1,28	0,71	1400
2	AIRBUS A300-600 DT	56	68	59	1,6	3225	40313	0,80	1,21	0,96	9000
3	DC-10-30/40 DT	61	74	64	1,6	1215	15188	0,86	1,02	0,88	7000
4	antover D	10	12	11	3,2	14125	88281	0,15	1,32	0,20	
5	BOEING 727-200 D	55	62	57	3,2	348	2175	0,77	0,71	0,55	643
6	BOEING 737-400 D	37	41	38	3,2	33442	209013	0,51	1,41	0,72	2286
7	BOEING 747-400 DT	64	79	68	1,6	251	3138	0,92	0,74	0,68	1286
8	BOEING 757-200 DT	32	39	34	1,6	843	10538	0,46	1	0,46	371
9	MD 11 DT	70	85	74	1,6	492	6150				6150
10	FOKKER F-100 D	27	30	28	3,2	638	3988	0,38	0,78	0,30	
11	BAE 146-200 D	21	23	22	3,2	545	3406	0,30	0,75	0,22	
12	FOKER F50 D	10	12	11	3,2	5725	35781	0,15	1,13	0,17	
											28136

Πίνακας 2.8 : Υπολογισμός ισοδύναμων διελεύσεων για τον δυτικό διάδρομο

Από τους παραπάνω υπολογισμούς προκύπτει ότι το επίπεδο κυκλοφορίας είναι μεσαίο. Το πάχος του οδοστρώματος αποτελείται από 250mm ασφαλικών στρώσεων, 300mm σταθεροποιημένης βάσης και 400mm υπόβασης.

Άρα από το διάγραμμα 1.9 για πάχος οδοστρώματος ίσο με 950mm, στρώση έδρασης με CBR=9%, μεσαίο επίπεδο κυκλοφορίας και σύστημα προσγείωσης διπλού δίδυμου τροχού του αεροσκάφους σχεδιασμού υπολογίστηκε το PCN=79.

Επειδή η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη από το ACN όλων των υπαρχόντων αεροσκαφών για τη συγκεκριμένη εδαφική κατηγορία η μέθοδος απαιτεί μια προσαρμογή του με βάση το αεροσκάφος με το κοντινότερο ACN. Αυτό το αεροσκάφος είναι το concord με ACN=72 για CBR=10% και ACN=81 για CBR=6%. Η προσαρμογή βασίστηκε σε μια επί τοις εκατό αύξηση (6,76%) του ACN βάσει αυτού του αεροσκάφους. Το PCN που προέκυψε τελικά ήταν:

77/F/B/W/T

2.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεθόδων

Στο παρόν κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί μία σύνοψη των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή των μεθόδων υπολογισμού του PCN στο οδόστρωμα των διαδρόμων του ΔΑΑ και θα ακολουθήσει μία σύγκριση αυτών. Στον πίνακα 2.9 που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές του PCN που προέκυψαν από τους υπολογισμούς. Στις περιπτώσεις που απαιτήθηκε επέκταση διαγραμμάτων για τον υπολογισμό του PCN των διαδρόμων του αεροδρομίου αναφέρεται η τιμή που προέκυψε χωρίς επέκταση διαγραμμάτων καθώς και εκείνη μετά την επέκταση αυτών. Όπως φαίνεται και στον πίνακα 2.9, τρεις από τις πέντε μεθόδους που εφαρμόστηκαν απαιτούσαν επέκταση διαγραμμάτων.

	Μέθοδος	PCN	
		χωρίς επέκταση διαγραμμάτων	με επέκταση διαγραμμάτων
1	FAA	71	84
2	UFC-ναυτικό	58	68
3	UFC-αεροπορία	58	74
4	STBA	56	
5	UK	77	

Πίνακας 2.9 :PCN διαδρόμων ΔΑΑ με και χωρίς επέκταση διαγραμμάτων

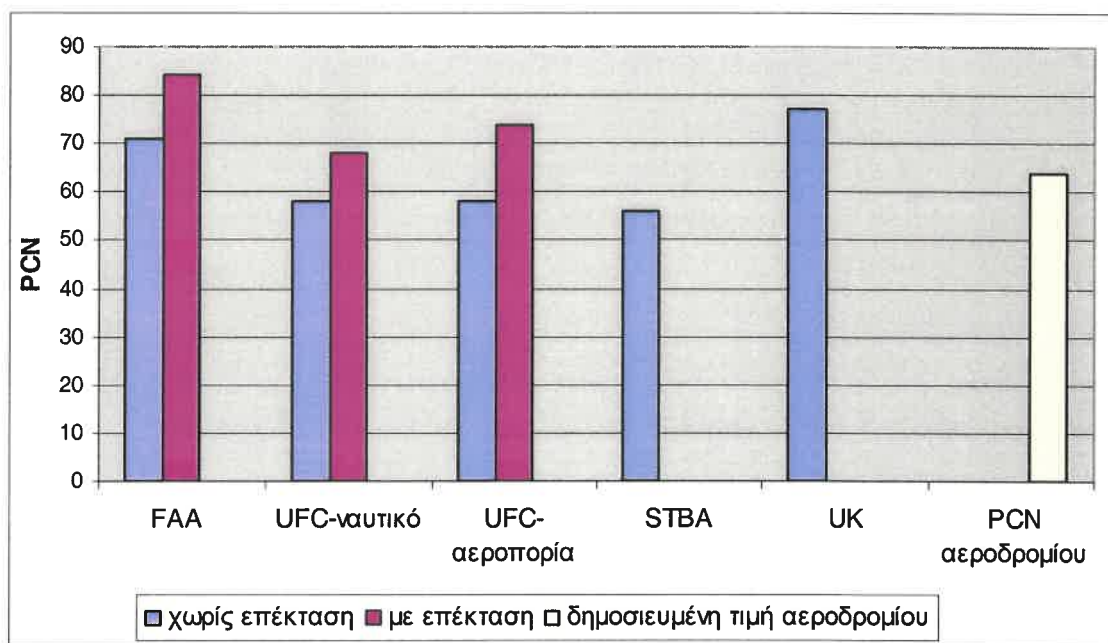
Παρατηρώντας προσεκτικά τα παραπάνω αποτελέσματα της εφαρμογής των μεθόδων διαπιστώνουμε την ύπαρξη μιας σημαντικής διαφοροποίησης των τιμών του PCN. Το γεγονός αυτό οφείλεται πιθανώς στις διαφορετικές παραδοχές κάθε μεθόδου.

Μία γενική παρατήρηση όσον αφορά στις παραδοχές των μεθόδων είναι ότι η μέθοδος της FAA και εκείνη της UFC για το ναυτικό θεωρούν σαν αεροσκάφος σχεδιασμού αυτό που απαιτεί το μεγαλύτερο πάχος οδοστρώματος ενώ η γαλλική και η αγγλική εκείνο με το μεγαλύτερο ACN.

Επιπλέον η μέθοδος της UFC βασίζεται σε στρατιωτικά αεροσκάφη που είναι διαφορετικά από αυτά που χρησιμοποιούν το υπό εξέταση οδόστρωμα (διαφορετικά συστήματα προσγείωσης και μικρότερα συνολικά βάρη απογείωσης) και δίνει διαγραμματικά μέγιστη τιμή του PCN ίση με 58. Στην περίπτωση δηλαδή που δεν πραγματοποιούσαμε επέκταση των διαγραμμάτων της μεθόδου και δεχόμασταν την μέγιστη τιμή τους θα προέκυπτε ίδια τιμή του PCN τόσο για την περίπτωση του ναυτικού όσο και για εκείνη της αεροπορίας. Στην αντίθετη όμως περίπτωση διαπιστώνεται μία σημαντική διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων. Η μέθοδος πιθανότατα έχει ένα περιορισμένο πεδίο εφαρμογής(σχετικά ελαφριά α/φ) και δεν παρέχει σαφή εικόνα μεταβολής των αποτελεσμάτων για μεγαλύτερες τιμές φορτίων αεροσκαφών και συνεπώς μεγαλύτερες τιμές PCN. Ίσως αυτό να αποτελεί και ένα από τα μειονεκτήματα της μεθόδου που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στη συνέχεια.

Επιπροσθέτως αξίζει να τονιστεί ότι ο προσδιορισμός του PCN με τη γαλλική μέθοδο επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την σύνθεση της κυκλοφορίας. Πιο συγκεκριμένα η μέθοδος ορίζει ότι η αριθμητική τιμή του PCN βρίσκεται ανάμεσα στη μικρότερη και τη μεγαλύτερη από τις υπολογιζόμενες ACN τιμές των αεροσκαφών που το χρησιμοποιούν, χωρίς να παρέχει κάποιο επιπλέον πιο συγκεκριμένο κριτήριο επιλογής αυτής της τιμής. Κατά συνέπεια, σε περιπτώσεις που η κυκλοφορία ενός αεροδρομίου απαρτίζεται από αρκετά ήδη αεροσκαφών το εύρος των πιθανών τιμών του PCN είναι μεγάλο και η επιλογή της τελικής τιμής του PCN δεν είναι μονοσήμαντη ενώ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από την κρίση του μελετητή. Επομένως τα υπολογιζόμενο PCN με τη συγκεκριμένη μέθοδο θα μπορούσε να είναι λίγο μεγαλύτερο από την αρκετά χαμηλή υπολογισθείσα αριθμητική τιμή 56.

Στο διάγραμμα 2.1 που ακολουθεί φαίνονται παραστατικά τα αποτελέσματα από τον προσδιορισμό του PCN με χρήση των μεθόδων του πίνακα 2.9 καθώς επίσης και η επίσημη δημοσιευμένη τιμή του PCN από τις αρχές του αεροδρομίου 64/F/B/X/T. Η τιμή αυτή έχει προκύψει από το αεροσκάφος σχεδιασμού των οδοστρωμάτων του αεροδρομίου που είναι το B747-400 και έχει ACN=64. Συνεπώς το PCN του αεροδρομίου θα ισούται με το ACN αυτού του αεροσκάφους.



Διάγραμμα 2.1: Υπολογιζόμενο PCN από εφαρμογή κλασικών μεθόδων και δημοσιευμένη τιμή αεροδρομίου

Συγκρίνοντας τις παραπάνω τιμές διαπιστώνουμε ότι η μέθοδος της FAA δίνει μεγαλύτερες τιμές του PCN από την επίσημη τιμή αυτού και στην περίπτωση επέκτασης και σε εκείνη μη επέκτασης των διαγραμμάτων. Αντιθέτως η UFC παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές από την

επίσημη τιμή μόνο για την περίπτωση επέκτασης διαγραμμάτων. Αρκετά μεγαλύτερη της δημοσιευμένης τιμής παρουσιάζεται και η τιμή του PCN που προέκυψε από την αγγλική μέθοδο. Οι περισσότερες μέθοδοι –εκτός της γαλλικής- δίνουν μία τιμή του PCN μεγαλύτερη από την επίσημη τιμή του αεροδρομίου. Δεν μπορεί όμως να αγνοηθεί η σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των τιμών.

Από τα παραπάνω προκύπτει ένας προβληματισμός. Σύμφωνα με τη μέθοδο ACN/PCN το PCN ενός οδοστρώματος είναι ένας δείκτης που εκφράζει τη φέρουσα ικανότητα του και κατά συνέπεια η τιμή αυτού του δείκτη πρέπει να είναι μοναδική. Παρατηρώντας τη μεγάλη διαφοροποίηση των τιμών του PCN που προέκυψε από την εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων σε ένα ημιάκαμπτο οδόστρωμα γεννάται το ερώτημα κατά πόσο μπορεί να θεωρηθεί το PCN αντιπροσωπευτικός δείκτης της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος. Τόσο οι διαφοροποιήσεις όσο και τα αίτια τους έκριναν σκόπιμη μία εμβάθυνση στη διερεύνηση των μεθόδων προσδιορισμού του PCN και γι' αυτό θα πραγματοποιηθεί στη συνέχεια μία ανάλυση ευαισθησίας των μεθόδων στην μεταβολή ορισμένων παραμέτρων.

3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΜΕΘΟΔΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της προσπάθειας διερεύνησης των μεθόδων υπολογισμού του PCN που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια θα πραγματοποιηθεί μία ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων τους στην μεταβολή ορισμένων βασικών παραμέτρων που αφορούν στη συμπεριφορά των ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει μια προσπάθεια διερεύνησης της επίδρασης της μεταβολής των εξής τριών παραμέτρων στην τιμή του PCN:

- i) Επιρροή μεταβολής πάχους ασφαλικής στρώσης: σε αυτή την περίπτωση η βάση από σταθεροποιημένο υλικό με τσιμέντο θα έχει σταθερό πάχος 25 cm , η υπόβαση θα έχει σταθερό πάχος 15 cm, το CBR της στρώσης έδρασης θα ισούται με 9% και το πάχος της ασφαλικής στρώσης θα κυμαίνεται από 12 έως 25 cm.
- i) Επιρροή μεταβολής πάχους σταθεροποιημένης με υδραυλικές κονίες βάσης : σε αυτή την περίπτωση η ασφαλική στρώση θα έχει σταθερό πάχος ίσο με 15 cm , η υπόβαση θα έχει σταθερό πάχος ίσο με 15 cm ,το CBR της στρώσης έδρασης θα ισούται με 9% ενώ το πάχος της σταθεροποιημένης στρώσης θα κυμαίνεται από 25 έως 35 cm.
- ii) Επιρροή μεταβολής CBR στρώσης έδρασης: σε αυτή την περίπτωση η ασφαλική στρώση θα έχει σταθερό πάχος ίσο με 15 cm , η βάση από σταθεροποιημένο υλικό με τσιμέντο θα έχει σταθερό πάχος 25 cm , η υπόβαση θα έχει σταθερό πάχος ίσο με 15 cm και το CBR της στρώσης έδρασης θα κυμαίνεται από 6% έως 15%.

Επισημαίνεται ότι ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά των ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων είναι το μέτρο ελαστικότητας των κατεργασμένων στρώσεων. Η επιρροή της μεταβολής αυτής της παραμέτρου δεν είναι δυνατό να διερευνηθεί δεδομένου ότι καμία μέθοδος δεν την λαμβάνει υπόψη στον υπολογισμό του PCN ενός οδοστρώματος.

Για την υλοποίηση της διερεύνησης απαιτούνται επίσης στοιχεία της διατομής του οδοστρώματος καθώς επίσης και στοιχεία της κυκλοφορίας που αυτό δέχεται. Πιο συγκεκριμένα, όλες οι μέθοδοι χρειάζονται τα πάχη των στρώσεων του οδοστρώματος, τα υλικά από τα οποία έχουν κατασκευαστεί οι στρώσεις, το CBR της στρώσης έδρασης ,το είδος των αεροσκαφών που χρησιμοποιούν το οδόστρωμα και τον αριθμό των διελεύσεων καθενός από αυτά. Εκτός λοιπόν από τα στοιχεία των τριών ειδών διατομών που

αναφέρθηκαν παραπάνω απαιτείται και ο καθορισμός της κυκλοφορίας του υπό εξέταση οδοστρώματος.

3.2 Καθορισμός κυκλοφορίας και κατάλληλη επεξεργασία για την εφαρμογή των μεθόδων

Για την πραγματοποίηση της ανάλυσης ευαισθησίας των μεθόδων προσδιορισμού του PCN επιλέξαμε μία ενδεικτική κυκλοφορία αποτελούμενη από ευρέως χρησιμοποιούμενα αεροσκάφη συνοδευμένα από μία τυπική τάξη μεγέθους του αριθμού των διελεύσεων τους και καταλήξαμε στην παρακάτω σύνθεση:

- 300 διελεύσεις του B747-200
- 3.000 διελεύσεις του A 300-600
- 15.000 διελεύσεις του B737-400

Τα χαρακτηριστικά των αεροσκαφών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.1:

ΤΥΠΟΣ Α/Φ	ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΣΓΕΙ- ΩΣΗΣ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΑΖΑ(KG) /	ACN			
		ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΜΑΖΑ(KG)	CBR=15%	CBR=10%	CBR=6%	CBR=3%
B747-200	DDT	379201	53	59	73	94
		156642	18	19	21	26
A300-600	DT	165000	49	56	68	84
		87100	19	21	24	35
B737-400	D	64864	35	37	41	45
		33643	16	17	18	21

Πίνακας 3.1 : Χαρακτηριστικά αεροσκαφών

Η παραπάνω σύνθεση της κυκλοφορίας υπέστη διαφορετική κάθε φορά επεξεργασία για να είναι δυνατή η εφαρμογή της κάθε μεθόδου.

Πιο συγκεκριμένα, για την εφαρμογή της μεθόδου της FAA ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία: για κάθε ένα από τα παραπάνω τρία αεροσκάφη υπολογίστηκε το απαιτούμενο πάχος οδοστρώματος με βάση ένα CBR=9% της στρώσης έδρασης ,το μέγιστο βάρος απογείωσης και την ετήσια κυκλοφορία χρησιμοποιώντας κάθε φορά το διάγραμμα της μεθόδου που αντιστοιχούσε στο σύστημα προσγείωσης του αεροσκάφους. Από την παραπάνω διαδικασία προέκυψε ότι το αεροσκάφος που απαιτούσε το μεγαλύτερο πάχος (αεροσκάφος σχεδιασμού) ήταν το A300-600. Στη συνέχεια μετατράπηκαν οι διελεύσεις των άλλων δύο αεροσκαφών σε διελεύσεις του ίδιου συστήματος τροχών με το αεροσκάφος σχεδιασμού (R_2). Αφού προσδιορίστηκε το φορτίο του τροχού του αεροσκάφους σχεδιασμού (W_1) και το φορτίο του τροχού κάθε αεροσκάφους (W_2) υπολογίστηκαν οι ετήσιες ισοδύναμες διελεύσεις του αεροσκάφους σχεδιασμού ($R_1=7346$ διελεύσεις). Οι ενδιάμεσοι υπολογισμοί

φαίνονται στον πίνακα 7 του παραρτήματος. Κατά συνέπεια ο υπολογισμός του PCN θα γίνει για 7346 διελεύσεις του A300-600. Χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο διάγραμμα που δίνει η μέθοδος για την περίπτωση αεροσκάφους με σύστημα προσγείωσης διπλού δίδυμου τροχού, προσδιορίστηκε για κάθε περίπτωση το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο που μπορεί να δεχτεί το οδόστρωμα. Με βάση αυτό το φορτίο υπολογίστηκε το PCN από τα αντίστοιχα διαγράμματα. Για τον υπολογισμό του ισοδύναμου πάχους του οδοστρώματος χρησιμοποιήθηκε μια μέση τιμή του συντελεστή ισοδυναμίας της σταθεροποιημένης στρώσης (ίση με 1,4).

Για τον προσδιορισμό του PCN με τη μέθοδο της UFC για την αεροπορία δεν χρειάστηκε επεξεργασία της κυκλοφορίας. Για κάθε περίπτωση οδοστρώματος υπολογίστηκε διαγραμματικά το μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος που μπορούσε αυτό να δεχτεί για 50,000 διελεύσεις του C-17. Στη συνέχεια με βάση την εδαφική κατηγορία στην οποία ανήκει η στρώση έδρασης υπολογίστηκε από το διάγραμμα την τιμή του PCN .

Αντιθέτως το ναυτικό καθορίζει 5 κατηγορίες αεροσκαφών F-14,P-3,C-130,C-141και C-5A. Χρησιμοποιώντας τους συντελεστές ισοδυναμίας της FAA μετατρέπονταν κάθε φορά όλες οι διελεύσεις σε διελεύσεις του ίδιου συστήματος τροχών. Πραγματοποιήθηκαν δύο από τις πέντε δυνατές μετατροπές μιας και τα συστήματα τροχών των C-130, C-5A και F-14 δεν συμπεριλαμβάνονταν στην πραγματική κυκλοφορία. Οι μετατροπές που έλαβαν χώρα ήταν:

- i) Μετατροπή σε dual P-3: $15.000+3.000*1.7+300*1.7=20.610$ διελεύσεις
- ii) Μετατροπή σε dual tandem C-141: $0.6*15.000+3000+300= 12.300$ διελεύσεις

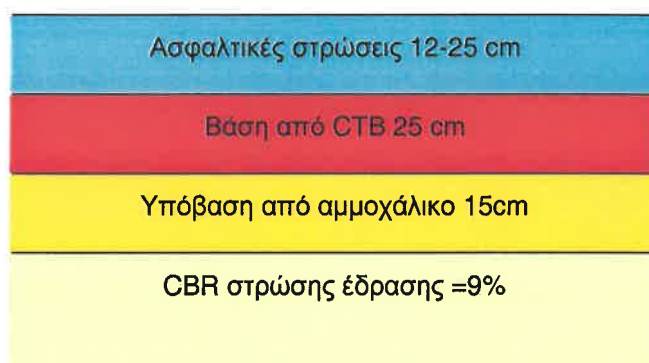
Στη συνέχεια γνωρίζοντας τα μέγιστα επιτρεπόμενα βάρη , τις ισοδύναμες διελεύσεις και το CBR της στρώσης έδρασης υπολογίστηκε από το αντίστοιχο διάγραμμα το απαιτούμενο πάχος οδοστρώματος για την κάθε κατηγορία. Το αεροσκάφος που απαιτούσε το μεγαλύτερο πάχος (27 inches) ήταν το C-141 και αποτέλεσε το αεροσκάφος σχεδιασμού. Το ισοδύναμο πάχος του οδοστρώματος που χρησιμοποιείται παρακάτω στους υπολογισμούς προκύπτει μετά την μετατροπή των σταθεροποιημένων στρώσεων σε μη σταθεροποιημένες με τη χρήση των κατάλληλων συντελεστών . Η μέθοδος θεωρεί ότι 25mm σταθεροποιημένης με τσιμέντο βάσης ισοδυναμούν με 38mm μη σταθεροποιημένης βάσης.

Για την εφαρμογή της μεθόδου της Διεύθυνσης Υπηρεσιών Πολιτικού Μηχανικού της Μ.Βρετανίας εφαρμόζοντας την διαδικασία που έχει ήδη αναφερθεί υπολογίστηκε ο συνολικός αριθμός ισοδύναμων διελεύσεων ίσος με 28550. Οι ενδιάμεσοι υπολογισμοί φαίνονται στον πίνακα 8 του παραρτήματος. Από τους παραπάνω υπολογισμούς προκύπτει ότι το επίπεδο κυκλοφορίας είναι μεσαίο. Από το διάγραμμα 1.9 υπολογίστηκε το PCN για τις διάφορες περιπτώσεις οδοστρώματος και για μεσαίο επίπεδο κυκλοφορίας και σύστημα προσγείωσης διπλού δίδυμου τροχού του αεροσκάφους σχεδιασμού.

Τέλος, για την εφαρμογή της μεθόδου του Γαλλικού Υπουργείου Συγκοινωνιών δεν απαιτήθηκε περαιτέρω επεξεργασία της κυκλοφορίας.

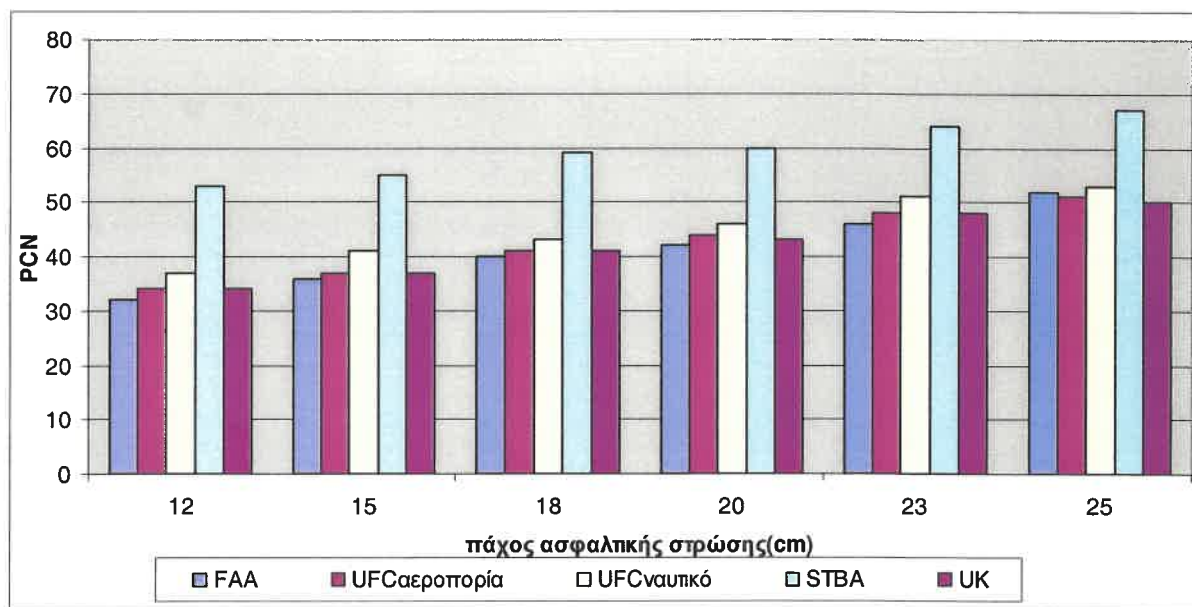
3.3 Επιρροή μεταβολής πάχους ασφαλτικών στρώσεων

Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η διατομή μεταβαλλόμενου πάχους ασφαλτικών στρώσεων που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς. Το πάχος των ασφαλτικών στρώσεων κυμαίνεται από 12 έως 25 cm, η βάση από σταθεροποιημένο υλικό με τσιμέντο έχει σταθερό πάχος 25 cm, η υπόβαση έχει σταθερό πάχος 15 cm ενώ το CBR της στρώσης έδρασης ισούται με 9%.



Σχήμα 3.1 : Διατομή μεταβαλλόμενου πάχους ασφαλτικών στρώσεων.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης φαίνονται παραστατικά στο διάγραμμα που ακολουθεί:



Διάγραμμα 3.1. : Μεταβολή του PCN με αύξηση του πάχους της ασφαλτικής στρώσης

Στον πίνακα 3.2 που ακολουθεί φαίνονται συνοπτικά τα αποτελέσματα και οι ενδιάμεσοι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν.

	πάχος στρώσεως ν	FAA			UFCαερ			UFCναυτ			STBA		UK
		ισοδύναμο πάχος οδοστρώματος	μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο	PCN	ισοδύναμο πάχος	μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο	PCN	ισοδύναμο πάχος	μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο	PCN	ισοδύναμο πάχος	PCN	
	cm	inches	lbs		inches	kips		inches	kips		cm		mm
βαση	25												
υποβάση	15												
CBR	9%												
	12	24,4	200000	32	21,9	390	34	25,6	255	37	64,5	53	520
	15	25,6	220000	36	23,1	410	37	26,8	280	41	67,5	55	550
	18	26,8	240000	40	24,3	450	41	28,0	290	43	70,5	59	580
	20	27,6	250000	42	25,1	475	44	28,7	300	46	72,5	60	600
	23	28,7	270000	46	26,3	500	48	29,9	325	51	75,5	64	630
ασφαλτικές στρώσεις	25	29,5	300000	52	27,1	525	51	30,7	340	53	77,5	67	650

Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα εφαρμογής μεθόδων για την ανάλυση ευαισθησίας του PCN στη μεταβολή του πάχους των ασφαλιστικών στρώσεων ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων

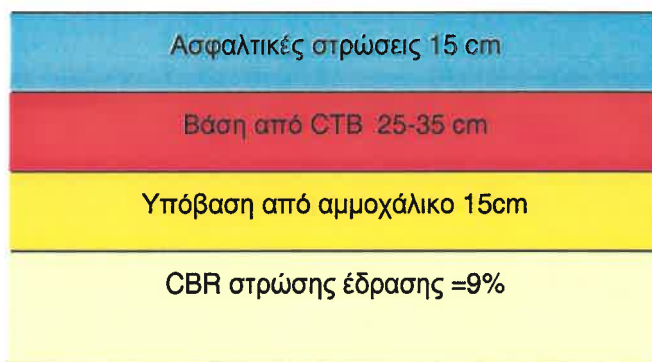
Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα διαπιστώνουμε ότι αύξηση του πάχους των ασφαλικών στρώσεων γενικά προκαλεί αύξηση της αριθμητικής τιμής του PCN και για τις πέντε μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν. Η μέθοδος της FAA παρουσιάζεται περισσότερο ευαίσθητη στη μεταβολή του πάχους των ασφαλικών στρώσεων σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους μιας και αυτή εμφανίζει μεγαλύτερη διακύμανση τιμών του PCN. Αντιθέτως, η μέθοδος που παρουσιάζει τη μικρότερη ευαισθησία στη μεταβολή του πάχους των σταθεροποιημένων στρώσεων είναι η μέθοδος του Γαλλικού Υπουργείου Συγκοινωνιών.

Αξίζει επιπλέον να παρατηρηθεί ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση ο προσδιορισμός της αριθμητικής τιμής του PCN που πραγματοποιείται από τις μεθόδους της FAA, τη μέθοδο της UFC για το ναυτικό, τη μέθοδο της UFC για την αεροπορία και τη μέθοδο της Διεύθυνσης Υπηρεσιών Πολιτικού Μηχανικού της Μ. Βρετανίας δίνει με σχετικά μικρές αποκλίσεις το ίδιο αποτέλεσμα για όλες τις διατομές ενώ η τιμή που προκύπτει από τη μέθοδο του Γαλλικού Υπουργείου Συγκοινωνιών είναι αρκετά μεγαλύτερη. Αυτό θα μπορούσε να οφείλεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην εξάρτηση σε μεγάλο βαθμό της γαλλικής μεθόδου από την κυκλοφορία και μάλιστα από τις τιμές του ACN των αεροσκαφών που χρησιμοποιούν το οδόστρωμα.

Δεν πρέπει όμως να αγνοηθεί το γεγονός ότι όσο αυξάνεται το πάχος των ασφαλικών στρώσεων τόσο μειώνεται και η διαφορά των αποτελεσμάτων της γαλλικής μεθόδου από τα αποτελέσματα των υπολοίπων. Εκτός όμως από αυτή τη διαφορά που παραμένει σημαντική, γενικότερα όσο αυξάνεται το πάχος των ασφαλικών στρώσεων τόσο μειώνονται και οι διαφορές μεταξύ των τιμών του PCN που έχουν υπολογιστεί από τις τέσσερις υπόλοιπες μεθόδους και μάλιστα αυτές φαίνεται να συγκλίνουν σταδιακά (με πολύ μικρές αποκλίσεις) σε μία τιμή.

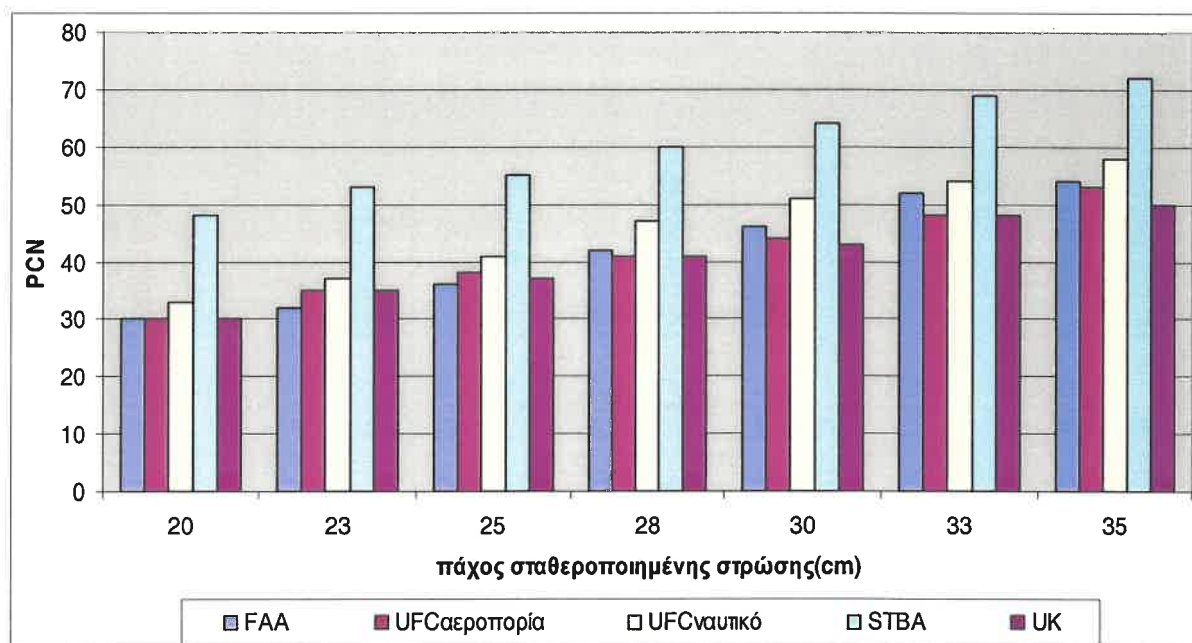
3.4 Επιρροή μεταβολής πάχους σταθεροποιημένης βάσης

Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η διατομή μεταβαλλόμενου πάχους βάσης από σταθεροποιημένο με τσιμέντο υλικό που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς μας. Το πάχος των ασφαλτικών στρώσεων έχει πάχος 15cm, το πάχος της βάσης κυμαίνεται από 25 έως 35cm, η υπόβαση έχει σταθερό πάχος 15 cm ενώ το CBR της στρώσης έδρασης ισούται με 9% .



Σχήμα 3.2: Διατομή μεταβαλλόμενου πάχους βάσης από σταθεροποιημένο υλικό

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης φαίνονται παραστατικά στο διάγραμμα που ακολουθεί:



Διάγραμμα 3.2: Μεταβολή του PCN με αύξηση του πάχους της σταθεροποιημένης στρώσης

Στον πίνακα 3.3 που ακολουθεί φαίνονται συνοπτικά τα αποτελέσματα και οι ενδιάμεσοι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν.

		FAA		UFCαερ			UFCναυτ			STBA	UK	
	πάχος στρώσεως v	ισοδύναμο πάχος οδοστ/τος	μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο	PCN	ισοδύναμο πάχος οδοστ/τος	μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο	PCN	ισοδύναμο πάχος οδοστ/τος	μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο	PCN	ισοδύναμο πάχος οδοστ/τος	PCN
	cm	inches	lbs		inches	kips		inches	kips		cm	mm
ασφαλτικά	15											
υποβάση	15											
CBR	9%											
Στρώση βάσης από σταθεροποιημένο υλικό με τσιμέντο	20	22,8	178000	30	20,9	365	30	23,8	235	33	60	500
	23	24,5	200000	32	22,2	400	35	25,6	255	37	64,5	530
	25	25,6	220000	36	23,1	420	38	26,8	280	41	67,5	550
	28	27,2	250000	42	24,5	450	41	28,6	305	47	72	580
	30	28,3	270000	46	25,4	475	44	29,8	325	51	75	600
	33	30,0	300000	52	26,8	505	48	31,6	345	54	79,5	630
	35	31,1	318000	54	27,7	535	53	32,8	370	58	82,5	650

Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα εφαρμογής μεθόδων για την ανάλυση ευαισθησίας του PCN στη μεταβολή του πάχους της βάσης από σταθεροποιημένο υλικό με τσιμέντο ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων.

Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα διαπιστώνεται ότι μία αύξηση του πάχους της σταθεροποιημένης βάσης προκαλεί αύξηση της αριθμητικής τιμής του PCN και για τις πέντε μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν. Το αποτέλεσμα αυτό που παρέχεται από όλες τις μεθόδους είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι η συμπεριφορά των ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά της σταθεροποιημένης στρώσης. Αυξάνοντας το πάχος αυτής της στρώσης ενισχύεται και η φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος.

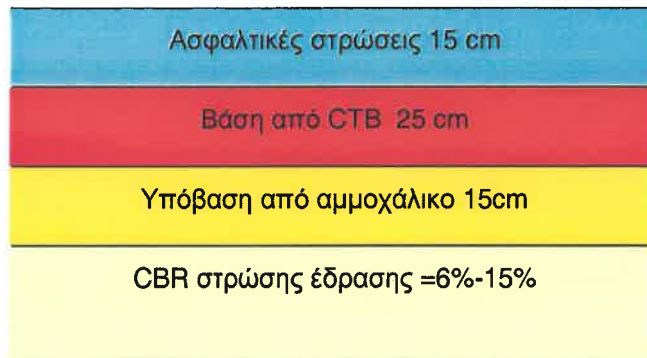
Επιπροσθέτως, η μέθοδος της FAA και της UFC για το ναυτικό παρουσιάζονται περισσότερο ευαίσθητες στη μεταβολή του πάχους της σταθεροποιημένης βάσης σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους μιας και αυτές εμφανίζουν μεγαλύτερη διακύμανση τιμών του PCN. Η μέθοδος που παρουσιάζει τη μικρότερη ευαισθησία στη μεταβολή του πάχους της σταθεροποιημένης βάσης είναι η μέθοδος της Διεύθυνσης Υπηρεσιών Πολιτικού Μηχανικού της Μ. Βρετανίας.

Αξίζει να παρατηρηθεί ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση ο προσδιορισμός της αριθμητικής τιμής του PCN που πραγματοποιείται από τις μεθόδους της FAA, τη μέθοδο της UFC για το ναυτικό, τη μέθοδο της UFC για την αεροπορία και τη μέθοδο της Διεύθυνσης Υπηρεσιών Πολιτικού Μηχανικού της Μ. Βρετανίας δίνει περίπου το ίδιο αποτέλεσμα για τη διατομή με το μικρότερο πάχος σταθεροποιημένης βάσης (20cm). Όσο όμως αυξάνεται αυτή η τιμή οι μέθοδοι δίνουν αποτελέσματα με μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ τους.

Επιπλέον, η τιμή του PCN που προκύπτει από τη μέθοδο του Γαλλικού Υπουργείου Συγκοινωνιών για κάθε διατομή είναι αρκετά μεγαλύτερη από τις τιμές που έχουν υπολογιστεί με τις υπόλοιπες μεθόδους. Αυτό θα μπορούσε να οφείλεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην εξάρτηση σε μεγάλο βαθμό της γαλλικής μεθόδου από την κυκλοφορία και μάλιστα από τις τιμές του ACN των αεροσκαφών που χρησιμοποιούν το οδόστρωμα.

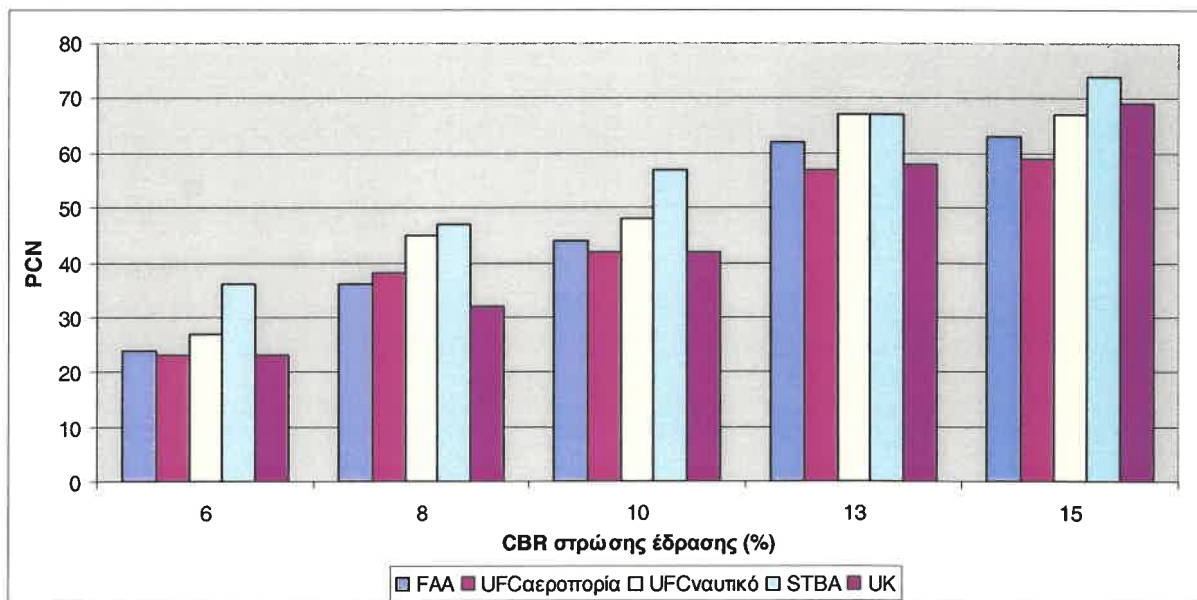
3.5 Επιρροή μεταβολής CBR στρώσης έδρασης

Στο παρόν κεφάλαιο θα εξεταστεί η επιρροή της μεταβολής του CBR στρώσης έδρασης στην τιμή του PCN. Ο δείκτης αυτός επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την κατανομή των τάσεων σε ένα οδόστρωμα καθώς επίσης και την τιμή του δείκτη ACN. Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η διατομή μεταβαλλόμενου CBR στρώσης έδρασης που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς μας. Το πάχος των ασφαλτικών στρώσεων είναι 15cm, το πάχος της βάσης 25 cm, η υπόβαση 15 cm ενώ το CBR της στρώσης έδρασης κυμαίνεται από 6% έως 15%.



Σχήμα 3.3: Διατομή μεταβαλλόμενου CBR στρώσης έδρασης

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης φαίνονται παραστατικά στο διάγραμμα που ακολουθεί



Διάγραμμα 3.3: Μεταβολή του PCN με αύξηση του CBR της στρώσης έδρασης

Στον πίνακα 3.4 που ακολουθεί φαίνονται συνοπτικά τα αποτελέσματα και οι ενδιάμεσοι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν

		FAA			UFCαερ			UFCναυτι			STBA		UK	
	πάχος στρώσεως	ισοδύναμο πάχος οδοστρ/τος	μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο	PCN	ισοδύναμο πάχος οδοστρ/τος	μέγιστο επιτρεπόμεν ο φορτίο	PCN	ισοδύναμο πάχος οδοστρ/τος	μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο	PCN	ισοδύναμο πάχος οδοστρ/τος	PCN	ισοδύναμο πάχος οδοστρ/τος	PCN
	cm	inches	lbs		inches	kips		inches	kips		cm		mm	
βαση	25													
υποβαση	15													
ασφαλτικά	15	25,6			23,13			26,77			67,5		550	
CBR στρώσης έδρασης	6		138500	24		280kips	23		180	27		36		23
	8		192000	36		370	38		255	45		47		32
	10		260000	44		460	42		315	48		57		42
	13		356000	62		575	57		410	67		67		58
	15		400000	63		650	59		475	67		74		69

Πίνακας 3.4: Αποτελέσματα εφαρμογής μεθόδων για την ανάλυση ευαισθησίας του PCN στη μεταβολή του CBR της στρώσης έδρασης ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων

(οι τιμές με κόκκινο χρώμα έχουν προκύψει από επέκταση διαγραμμάτων)

Από το διάγραμμα 3.3 προκύπτει ότι αύξηση του CBR της στρώσης έδρασης προκαλεί αύξηση της αριθμητικής τιμής του PCN για όλες τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν. Αξίζει να τονιστεί ότι η αύξηση αυτή είναι πολύ σημαντική και για τις πέντε διαφορετικές μεθόδους προσδιορισμού του PCN γεγονός που δείχνει την μεγάλη εξάρτηση των αποτελεσμάτων από αυτό το μέγεθος.

Επιπροσθέτως, η μέθοδος της Διεύθυνσης Υπηρεσιών Πολιτικού Μηχανικού της Μ. Βρετανίας παρουσιάζεται περισσότερο ευαίσθητη στη μεταβολή του CBR της στρώσης έδρασης σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους μιας και αυτή εμφανίζει μεγαλύτερη διακύμανση του PCN. Η μέθοδος που παρουσιάζει τη μικρότερη ευαισθησία στη μεταβολή του CBR της στρώσης έδρασης είναι η μέθοδος της UFC για την αεροπορία.

Παρατηρείται επίσης ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση ο προσδιορισμός της αριθμητικής τιμής του PCN που πραγματοποιείται από τις μεθόδους της FAA, τη μέθοδο της UFC για το ναυτικό, τη μέθοδο της UFC για την αεροπορία και τη μέθοδο της Διεύθυνσης Υπηρεσιών Πολιτικού Μηχανικού της Μ. Βρετανίας δίνει περίπου το ίδιο αποτέλεσμα για τη διατομή με το μικρότερο CBR της στρώσης έδρασης (6%). Όσο όμως αυξάνεται αυτή η τιμή οι μέθοδοι δίνουν αποτελέσματα με σημαντικές διαφορές μεταξύ τους.

Από την παραπάνω ανάλυση της διατομής μεταβαλλόμενου CBR της στρώσης έδρασης προκύπτει ότι μια αύξηση του CBR της στρώσης έδρασης προκαλεί αύξηση της τιμής του PCN. Η διαπίστωση όμως αυτή δεν είναι συμβατή με τον ορισμό του PCN. Είναι γνωστό ότι το PCN είναι το ACN του α/φ που προκαλεί τη μέγιστη ένταση που μπορεί να δεχτεί το οδόστρωμα για απεριορίστο αριθμό διελεύσεων του. Επομένως αν αυξάνεται το PCN αυξάνεται και το ACN. Το ACN όμως εκφράζει τη σχετική επίδραση ενός α/φ σε ένα οδόστρωμα και συνεπώς αύξηση του CBR αναμένεται γενικά να προκαλέσει μείωση του ACN.

3.6 Σύνοψη-Σχόλια

Λαμβάνοντας υπόψη τα επιμέρους αποτελέσματα των τριών παραπάνω αναλύσεων είναι δυνατή η εξαγωγή ορισμένων γενικών συμπερασμάτων για την εφαρμογή των μεθόδων προσδιορισμού του PCN στα ημιάκαμπτα οδοστρώματα.

Πιο συγκεκριμένα, παρατηρώντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας του PCN στη μεταβολή των τριών αυτών παραμέτρων διαπιστώνεται ότι μία αύξηση του πάχους των ασφαλικών στρώσεων προκαλεί αύξηση του PCN. Αντίστοιχα μία αύξηση του πάχους της σταθεροποιημένης στρώσης προκαλεί αύξηση του PCN. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι παρατηρείται το εξής φαινόμενο: μια αύξηση κατά 10cm της σταθεροποιημένης στρώσης προκαλεί μεγαλύτερη % αύξηση του PCN από μια αύξηση κατά 10cm των ασφαλικών στρώσεων. Αυτό οφείλεται στον τρόπο καταπόνησης των ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Εξαιτίας της μεγάλης ακαμψίας των κατεργασμένων στρώσεων σε σχέση με την ακαμψία των ασφαλικών και των στρώσεων από μη κατεργασμένα υλικά, μεταβάλλεται η κατανομή των τάσεων στα διάφορα σημεία του οδοστρώματος και τα κρίσιμα σημεία εντοπίζονται στον πυθμένα των σταθεροποιημένων στρώσεων. Κατά συνέπεια ενίσχυση του πάχους αυτών των στρώσεων προκαλεί μεγαλύτερη βελτίωση της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος και συνεπώς και αύξησης του PCN, σε σχέση με μια αντίστοιχη αύξηση του πάχους των ασφαλικών στρώσεων.

Ιδιαίτερο όμως ενδιαφέρον παρουσιάζει μία διαπίστωση που προκύπτει από την ανάλυση της επιρροής της μεταβολής του CBR της στρώσης έδρασης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι αύξηση του CBR της στρώσης έδρασης προκαλεί και αύξηση του PCN στα αποτελέσματα όλων των μεθόδων που εφαρμόστηκαν. Σύμφωνα όμως με τον ορισμό του PCN, το PCN είναι το ACN του α/φ που προκαλεί τη μέγιστη ένταση που μπορεί να δεχτεί το οδόστρωμα για απεριορίστο αριθμό διελεύσεων του και δεδομένου ότι το ACN είναι ο δείκτης που εκφράζει τη σχετική επίδραση ενός α/φ σε ένα οδόστρωμα αναμένεται αύξηση του CBR να προκαλέσει μείωση του ACN. Η παραπάνω παρατήρηση αποτελεί αντικείμενο προβληματισμού. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν προκύψει στο παρελθόν από την ανάλυση ευαισθησίας του PCN στην μεταβολή του CBR της στρώσης έδρασης και για την περίπτωση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων [2].

Επιπροσθέτως από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν παραπάνω προκύπτει ότι η μέθοδος της FAA παρουσιάζεται πιο ευαίσθητη στη μεταβολή του πάχους των ασφαλικών στρώσεων, η μέθοδος της UFC για το ναυτικό και η μέθοδος της FAA στη μεταβολή του πάχους της σταθεροποιημένης στρώσης και η μέθοδος της Διεύθυνσης Υπηρεσιών Πολιτικού Μηχανικού της Μ. Βρετανίας περισσότερο ευαίσθητη στη μεταβολή του CBR της στρώσης έδρασης. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι κάποιες μέθοδοι επηρεάζονται περισσότερο

από κάποιους παράγοντας και σε αυτό ίσως να οφείλεται και μία σημαντική διαφοροποίηση στα αποτελέσματα τους.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι οι μέθοδοι παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα τους για τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα, δεν συγκλίνουν σε μία μοναδική τιμή του PCN όπως θα αναμενόταν και δεν μπορούν να δώσουν μία σαφή εικόνα της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος. Γι' αυτό δεν είμαστε σε θέση να καταλήξουμε στην πραγματική τιμή του PCN ενός οδοστρώματος και παράλληλα να εντοπίσουμε την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της έτσι ώστε να επισημανθεί η καταλληλότητα της. Επομένως απαιτείται περαιτέρω έρευνα στο πλαίσιο της συσχέτισης της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος με το δείκτη κατάταξης. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα πραγματοποιηθεί μία διερεύνησης της φέρουσας ικανότητας ενός ημιάκαμπτου οδοστρώματος με αναλυτικές μεθόδους και σύγχρονα εργαλεία υπολογισμού.

4 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΔΑΑ ΜΕ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

4.1 Εισαγωγή

Σύμφωνα με την επίσημη από τον ICAO μέθοδο δομικής κατάταξης των οδοστρωμάτων ACN/PCN ο δείκτης της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος είναι το PCN του. Δεδομένης της αδυναμίας των παραπάνω μεθόδων προσδιορισμού του PCN να δώσουν σαφή εικόνα της φέρουσας ικανότητας των ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων θεωρήθηκε αναγκαία η δυνατότητα αναλυτικού προσδιορισμού της φέρουσας ικανότητας και συσχέτισης αυτής με τον δείκτη κατάταξης. Σε αυτό το κεφαλαίο θα πραγματοποιηθεί μία προσπάθεια προσδιορισμού της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων των διαδρόμων του ΔΑΑ με τη βοήθεια σύγχρονων μεθόδων προσομοίωσης και ανάλυσης. Αρχικά θα χρησιμοποιηθεί ένα λογισμικό που βασίζεται στη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων και στη συνέχεια το λογισμικό APSA που στηρίζεται στη θεωρία των ελαστικών επάλληλων στρώσεων. Στη συνέχεια παρατίθεται παρουσίαση των δύο λογισμικών και παρουσίαση της προσομοίωσης του οδοστρώματος για διαφορετικά ήδη φόρτισης.

4.2 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

4.2.1 Συνοπτικό Ιστορικό [9]

Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου πολέμου το πρόβλημα που απασχολούσε τους μηχανικούς ήταν σχετικό με την κατασκευή των πρώτων αεριωθούμενων μαχητικών αεροσκαφών τα οποία θα κινούνταν με υψηλές ταχύτητες και απαιτούσαν κεκλιμένες προς τα πίσω πτέρυγες. Μεταξύ άλλων το 1944 ο Ιωάννης Αργύρης, ο οποίος εργαζόταν ως ερευνητής στο Royal Aeronautical Society της Βρετανίας, κατατιπίστηκε με το πρόβλημα αυτό καθώς όλες οι γνωστές μέθοδοι αναλύσεως αδυνατούσαν να προσομοιώσουν με αξιοπιστία την κεκλιμένη γεωμετρία των πτερυγίων. Μετά από μεγάλη προσπάθεια επινόησε τη χρήση των τριγωνικών στοιχείων και πραγματοποίησε την πρώτη εφαρμογή στους ηλεκτρομηχανικούς υπολογιστές της εποχής με μέγιστη δυνατότητα χειρισμού αλγεβρικών συστημάτων μέχρι 64 αγνώστους. Δώδεκα χρόνια αργότερα θα ακολουθήσει η συμβολή από την άλλη πλευρά του Ατλαντικού με την εργασία των Turner, Clough, Martin και Topp .

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων στην τυπική της διατύπωση παρουσιάζεται το 1960 σε μια μονογραφία των Αργύρη και Kelsey και στην εργασία του Clough. Από την εποχή εκείνη και μετά , η ανάπτυξη της μεθόδου και η χρησιμοποίησή της για την επίλυση πρακτικών προβλημάτων του μηχανικού συμβαδίζει με την τεχνολογία των Η/Υ. Κι αυτό γιατί με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων καταλήγουμε σε ένα σύστημα αλγεβρικών

εξισώσεων που το πλήθος τους ταυτίζεται με το πλήθος των βαθμών ελευθερίας του προβλήματος και το οποίο μπορεί να επιλυθεί μόνο με τη βοήθεια Η/Υ. Η εξέλιξη των Η/Υ με τις ολοένα μεγαλύτερες δυνατότητες διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων αλλά και με την αύξηση της ταχύτητας εκτελέσεων των αριθμητικών πράξεων κατέστησε εφικτή την επίλυση, με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, σύνθετων προβλημάτων του μηχανικού τα οποία θεωρούνταν απροσπέλαστα πριν από μερικά χρόνια. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αν και επινοήθηκε και εφαρμόστηκε για την στατική ανάλυση φορέων, έχει καθολικότερη εφαρμογή σε μια ευρύτερη κατηγορία προβλημάτων του μηχανικού όπως για παράδειγμα στη ρευστομηχανική, στη μεταφορά θερμότητας, στην ακουστική, στον ηλεκτρομαγνητισμό, στην εμβιομηχανική. Από το 1960 έως τις μέρες μας, η βιβλιογραφία στην επιστημονική περιοχή των πεπερασμένων στοιχείων έχει αυξηθεί με γεωμετρική πρόοδο.

4.2.2 Βασικές αρχές μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων

Η θεμελιώδης αρχή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στην αντικατάσταση του γεωμετρικά σύνθετου πεδίου του προβλήματος με ένα σύνολο απλών υποπεδίων τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων θεωρούμε ότι ο φορέας αποτελείται από ένα σύνολο διακριτών πεπερασμένων στοιχείων τα οποία εφάπτονται μεταξύ τους χωρίς να αφήνουν κανένα κενό και συνδέονται με τους κόμβους που βρίσκονται στα σύνορα των στοιχείων. Το σύνολο αυτών των στοιχείων ονομάζεται δίκτυο ή πλέγμα και η προσομοίωση του φορέα με το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων ονομάζεται διακριτοποίηση του φορέα.

Όπως όλες οι αριθμητικές μέθοδοι έτσι και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μία προσεγγιστική μέθοδος. Δηλαδή τα αποτελέσματα που παίρνουμε από τη χρήση της μεθόδου σε μία κατασκευή περιέχουν ένα σφάλμα. Το σφάλμα αυτό γίνεται μικρότερο όσο αυξάνει ο αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή. Όμως η αύξηση των στοιχείων προκαλεί και αύξηση του αριθμού των προσδιοριστέων κομβικών παραμέτρων. Μία τέτοια αύξηση εκτός του ότι μπορεί να προσκρούσει σε πρακτικά προβλήματα (μνήμη υπολογιστή) προκαλεί και αύξηση και του κόστους (δηλαδή του χρόνου επεξεργασίας του προβλήματος στον υπολογιστή). Γι' αυτό αντί να καταφεύγουμε σε μία ομοιόμορφη μείωση του μεγέθους των στοιχείων πραγματοποιούμε μια συμπύκνωση των στοιχείων στις περιοχές που έχουμε ραγδαίες μεταβολές των τάσεων [10].

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στη μητρική ανάλυση. Κάθε στοιχείο έχει την ίδια ελαστική συμπεριφορά με το αρχικό σώμα και υπόκειται στις ίδιες καταστατικές εξισώσεις. Ο αριθμός των κόμβων του εξαρτάται από το είδος του στοιχείου που θα επιλεγεί καθώς επίσης και από την απαιτούμενη ακρίβεια ανάλυσης. Σε κάθε κόμβο ενός στοιχείου

αντιστοιχεί ένας αριθμός κομβικών παραμέτρων. Οι κομβικές παράμετροι είναι μετατοπίσεις. Για τον προσδιορισμό των μετατοπίσεων σε κάθε στοιχείο θεωρούμε πως αν γνωρίζουμε τις μετατοπίσεις των κόμβων ενός στοιχείου μπορούμε να εκφράσουμε τις μετατοπίσεις ενός σημείου μέσα στο στοιχείο με τη βοήθεια μιας κατάλληλης παρεμβολής. Όσο πιο μικρό είναι το μέγεθος του στοιχείου τόσο πιο μικρό είναι και το σφάλμα που κάνουμε με αυτή την παραδοχή.

Αφού ολοκληρωθεί η διακριτοποίηση του υπό εξέταση φορέα πραγματοποιείται υπολογισμός του τοπικού μητρώου ακαμψίας του στοιχείου εφαρμόζοντας την Αρχή των Δυνατών Έργων σε ένα απομονωμένο στοιχείο. Στη συνέχεια προκύπτει το τελικό σύστημα ακαμψίας είτε εφαρμόζοντας την ΑΔΕ σε όλο το φορέα είτε από την ισορροπία των επιμέρους κόμβων και καταλήγουμε σε μία σχέση μητρώων της μορφής:

$$[R] = [K] * [r]$$

όπου

R=δυνάμεις που δρουν στους μη παγιωμένους κόμβους του φορέα

K= ολικό μητρώο ακαμψίας φορέα

r = κομβικές μετατοπίσεις

Κατόπιν λαμβάνοντας υπόψη συνοριακές συνθήκες, όπως για παράδειγμα μηδενικές μετατοπίσεις, ακολουθεί η επίλυση του συστήματος ακαμψίας από την οποία προκύπτουν οι μετατοπίσεις των κόμβων. Από αυτές στη συνέχεια υπολογίζονται και οι παραμορφώσεις και οι τάσεις.

Οι σχέσεις μεταξύ παραμορφώσεων και μετατοπίσεων u, v, w ενός σημείου είναι:

$$\epsilon_{xx} = \partial u / \partial x \quad \gamma_{xy} = \partial u / \partial y + \partial v / \partial x$$

$$\epsilon_{yy} = \partial v / \partial y \quad \gamma_{yz} = \partial v / \partial z + \partial w / \partial y$$

$$\epsilon_{zz} = \partial w / \partial z \quad \gamma_{zx} = \partial w / \partial x + \partial u / \partial z$$

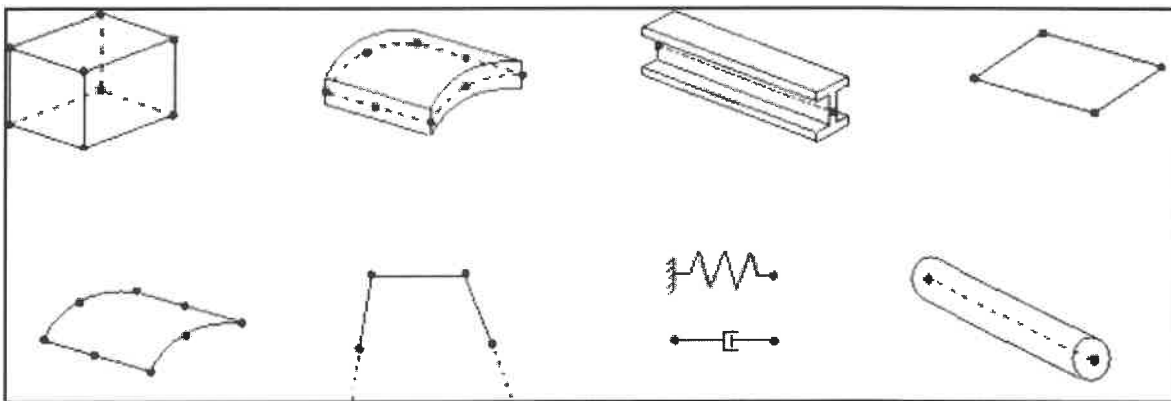
Οι τάσεις υπολογίζονται από τις παραμορφώσεις με τη βοήθεια της σχέσης $\sigma = E * \epsilon$

Στις μέρες μας υπάρχουν πολλά προγράμματα που βασίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και χρησιμοποιούνται και στην ανάλυση των οδοστρωμάτων. Μερικά από αυτά είναι : NASTRAN, ABAQUS, CAPA 3D, MICHPAVE, ILLIPAVE, CEASAR, ANSYS. Στην παρούσα διπλωματική εργασία το χρησιμοποιούμενο λογισμικό είναι το ABAQUS.

4.3 Το λογισμικό ABAQUS

Το ABAQUS είναι ένα σύνολο από προγράμματα προσομοίωσης εφαρμοσμένης μηχανικής, που βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, και που μπορεί να δώσει λύσεις σε προβλήματα που εκτείνονται από σχετικά απλές γραμμικές αναλύσεις έως σύνθετες μη γραμμικές προσομοιώσεις. Περιλαμβάνει μία εκτεταμένη βιβλιοθήκη στοιχείων που μπορούν να προσομοιώσουν πρακτικά οποιαδήποτε γεωμετρία και συμπεριφορά υλικών (π.χ. μέταλλα, σύνθετα, καουτσούκ, πολυμερή υλικά, οπλισμένο σκυρόδεμα, γεωτεχνικά υλικά όπως εδάφη και βράχοι) .

Στο παρακάτω σχήμα 4.1 φαίνονται οι πιο συνηθισμένες οικογένειες στοιχείων που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές πεπερασμένων στοιχείων.

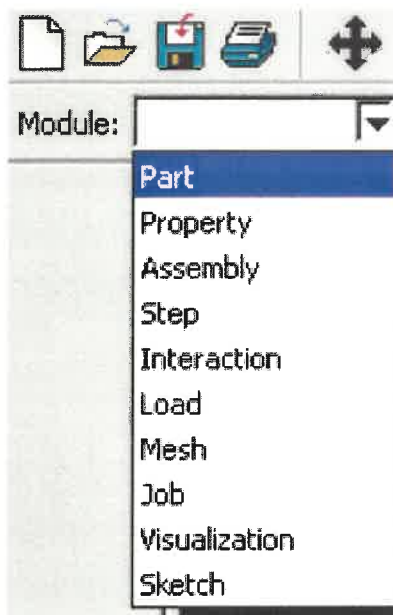


Σχήμα 4.1: Οικογένειες στοιχείων του ABAQUS [11]

Το πρόγραμμα βρίσκει εφαρμογή σε διάφορες κατηγορίες προβλημάτων όπως στατικές αναλύσεις κατασκευών, δυναμικές αναλύσεις, μεταφορά θερμότητας, μεταφορά μάζας, εδαφομηχανική, ακουστική, θερμική ανάλυση ηλεκτρικών στοιχείων. Αποτελείται από τρία υποπρογράμματα: το ABAQUS/CAE, το ABAQUS/Standard και το ABAQUS/Explicit. Το ABAQUS/Standard είναι το κυρίως πρόγραμμα της οικογένειας ABAQUS. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση όλων των προβλημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Το ABAQUS/Explicit είναι ένα πρόγραμμα με εξειδικευμένη χρήση και εφαρμογή στη μη γραμμική δυναμική ανάλυση κατασκευών κυρίως όταν τα δυναμικά φαινόμενα χαρακτηρίζονται από πολύ μικρό χρόνο απόκρισης. Τέλος το ABAQUS/CAE είναι ένα πρόγραμμα γεωμετρικής μοντελοποίησης και διακριτοποίησης σε πεπερασμένα στοιχεία. Περιλαμβάνει και το ABAQUS/Viewer, για την επεξεργασία των αριθμητικών αποτελεσμάτων.

Στη συνέχεια θα πραγματοποιηθεί μία παρουσίαση του προγράμματος ABAQUS/CAE για να επισημανθούν τα ενδιάμεσα στάδια δημιουργίας του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων καθώς και εκείνα τα βήματα που αντιστοιχούν στην επεξεργασία του προσομοιώματος και την παρουσίαση των τελικών αποτελεσμάτων. Το ABAQUS/CAE

αποτελείται από ενότητες (modules), με τη βοήθεια των οποίων εισάγει τα στοιχεία του κάθε προσομοιώματος και παρουσιάζει την πρόοδο και τελικά τα αποτελέσματα της επεξεργασίας τους. Οι ενότητες αυτές φαίνονται στο σχήμα 4.2 που ακολουθεί :



Σχήμα 4.2: Ενότητες (modules) του προγράμματος ABAQUS/CAE

Part: Η ενότητα αυτή προσφέρει διάφορα εργαλεία για το σχεδιασμό της γεωμετρίας του προσομοιώματος, το οποίο μπορεί να αποτελείται από ένα ή περισσότερα στοιχεία (parts).

Property : Σε αυτή την ενότητα μπορούν να εισαχθούν τα χαρακτηριστικά των υλικών που αποτελούν το προσομοίωμα και να τα αντιστοιχηθούν με τα τμήματα στα οποία εμφανίζονται στο μοντέλο μας .

Assembly : Επειδή κάθε ένα από τα μεμονωμένα στοιχεία που έχουν ήδη σχεδιαστεί έχει το δικό του σύστημα συντεταγμένων χρησιμοποιείται αυτή η ενότητα για τη δημιουργία ενός μοντέλου σε ένα γενικό σύστημα συντεταγμένων. Στο μοντέλο αυτό τα επιμέρους στοιχεία είναι εξαρτημένα μεταξύ τους . Ένα μοντέλο του ABAQUS περιέχει μόνο ένα assembly.

Step : Η ενότητα αυτή χρησιμοποιείται για να δημιουργήσουμε και να σχηματίσουμε βήματα ανάλυσης και να τα συνδέσουμε με ζητήματα/αποτελέσματα εξόδου. Η διαδοχή των step εξασφαλίζει έναν εύκολο τρόπο για να ληφθούν οι αλλαγές σε ένα μοντέλο (όπως οι αλλαγές των φορτίσεων ή των συνοριακών συνθηκών).

Interaction : Εδώ καθορίζονται οι μηχανικές και θερμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των περιοχών ενός μοντέλου και του περιβάλλοντός του. Ένα παράδειγμα μιας αλληλεπίδρασης είναι η επαφή μεταξύ δύο επιφανειών. Άλλες αλληλεπιδράσεις που μπορούν να οριστούν περιλαμβάνουν περιορισμούς, όπως περιορισμούς δεσμών, εξίσωσης και άκαμπτων σωμάτων. Η απόλυτη φυσική εγγύτητα δύο επιφανειών δεν είναι επαρκής για να δείξει

οποιοδήποτε είδος αλληλεπίδρασης μεταξύ των επιφανειών. Οι αλληλεπιδράσεις είναι αντικείμενα εξαρτώμενα από τα βήματα, το οποίο σημαίνει ότι πρέπει να καθορίζονται τα βήματα της ανάλυσης στα οποία είναι ενεργά.

Load : Η ενότητα αυτή επιτρέπει τον προσδιορισμό φορτίων, συνοριακών συνθηκών και πεδίων . Τα φορτία και οι συνοριακές συνθήκες είναι αντικείμενα εξαρτώμενα από τα βήματα, πρέπει δηλαδή να προσδιορίζονται τα βήματα της ανάλυσης στα οποία είναι ενεργά. Κάποια πεδία είναι εξαρτώμενα από τα βήματα, ενώ άλλα εφαρμόζονται μόνο στο ξεκίνημα της ανάλυσης.

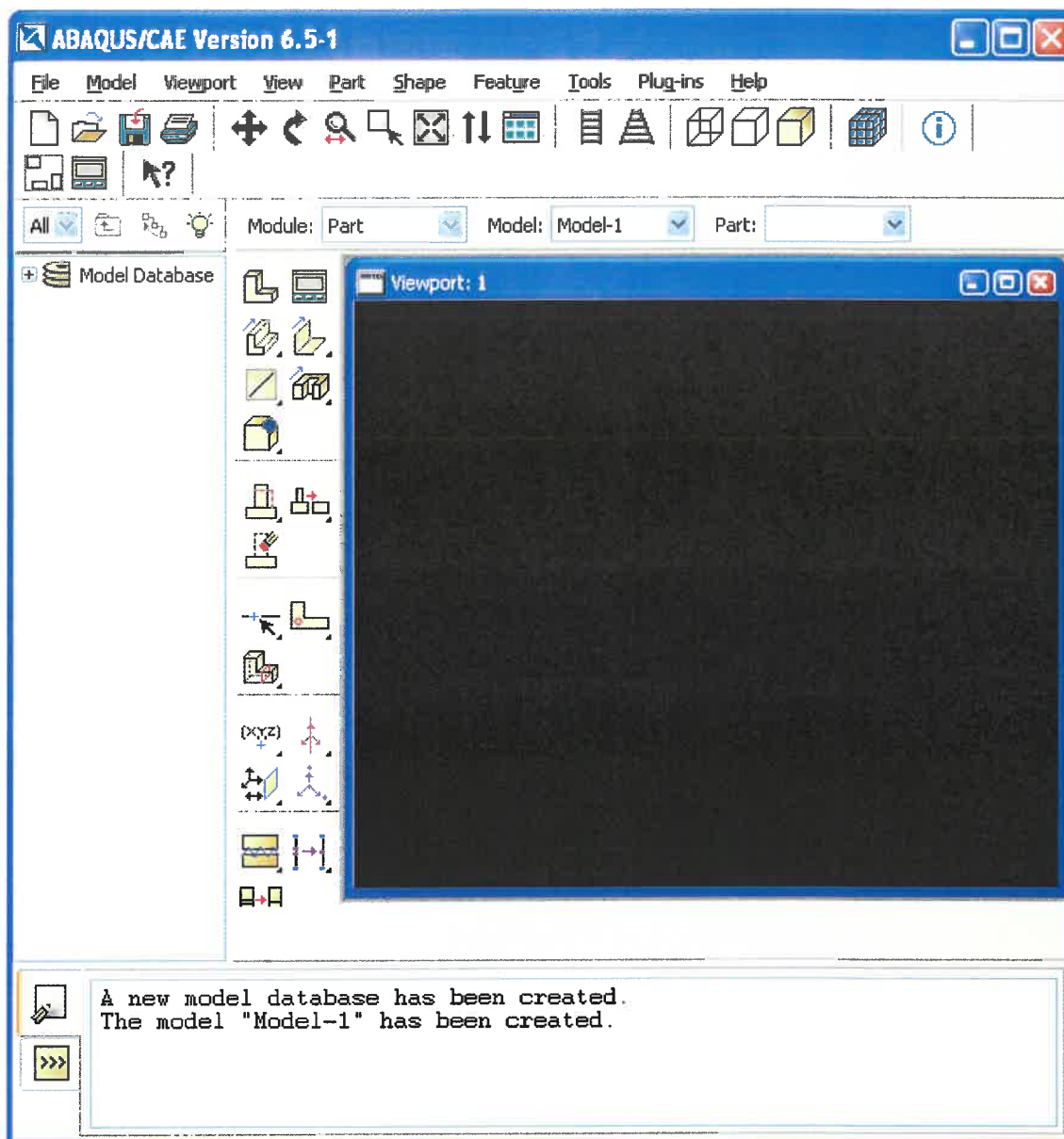
Mesh : Περιέχει εργαλεία που επιτρέπουν την κατασκευή του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων στο μοντέλο που έχει ήδη σχεδιαστεί. Παρέχοντας διάφορες τεχνικές δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας του επιθυμητού πλέγματος με την επιλογή του κατάλληλου αριθμού και είδους των στοιχείων.

Job: Με την ενότητα αυτή μπορεί να υποβληθεί μια εργασία για ανάλυση και να παρακολουθείτε η πρόοδός της.

Visualization : Εξασφαλίζει γραφική απεικόνιση των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων και των αποτελεσμάτων. Παρέχει πληροφορίες του μοντέλου και των αποτελεσμάτων από την βάση δεδομένων εξόδου.

Sketch : Τα σκαριφήματα είναι δυσδιάστατα προφίλ που χρησιμοποιούνται για να τη διαμόρφωση της γεωμετρίας. Χρησιμοποιούμε αυτή την ενότητα για να δημιουργήσουμε ένα σκαρίφημα που ορίζει ένα επίπεδο στοιχείο, μια δοκό ή για να δημιουργήσουμε ένα σκαρίφημα, το οποίο μπορεί να προεκταθεί, να κινηθεί κυκλικά ή να περιστρέφει για να διαμορφωθεί ένα τρισδιάστατο part.

Παρατήρηση: Τα περιεχόμενα του κύριου παραθύρου αλλάζουν καθώς κινούμαστε μεταξύ των διαφορετικών ενότητων. Επιλέγοντας μία ενότητα από τη λίστα της γραμμής περιεχομένων, η γραμμή περιεχομένων, η εργαλειοθήκη της ενότητας, και η γραμμή μενού αλλάζουν, ώστε να απεικονίζουν τις λειτουργίες της τρέχουσας ενότητας. Στο παρακάτω σχήμα 4.3 φαίνεται η επιφάνεια εργασίας για επιλογή module :Part.

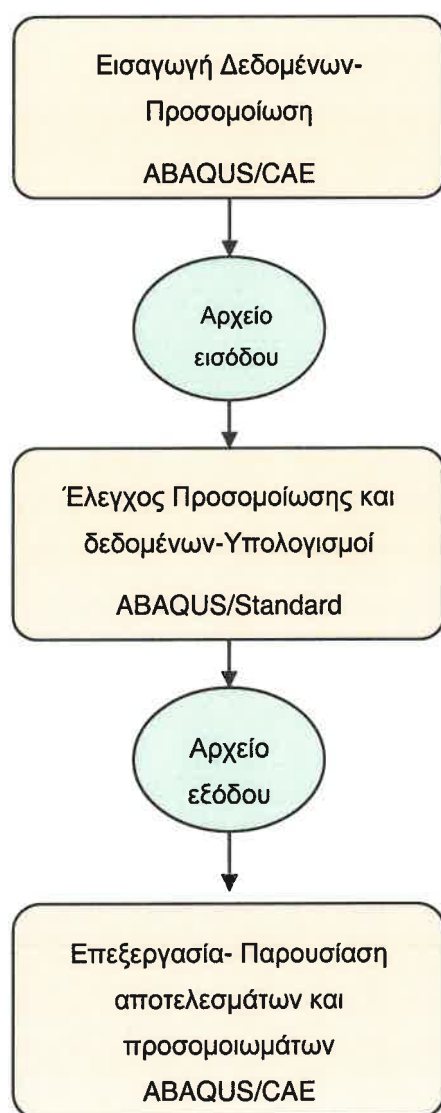


Σχήμα 4.3: Επιφάνεια εργασίας προγράμματος ABAQUS/CAE για την περίπτωση module:part
Καθώς κινούμαστε από ενότητα σε ενότητα, αναπτύσσεται σταδιακά το μοντέλο.

Η διαδικασία προσέγγισης ενός προβλήματος οδοστρωμάτων ή μηχανικής γενικότερα με το ABAQUS περιλαμβάνει τρία στάδια:

- την προ-επεξεργασία (pre-processing), δηλαδή τη διαμόρφωση της γεωμετρίας του φορέα και τη διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία που πραγματοποιείται με το ABAQUS/CAE,
- την προσομοίωση (simulation), δηλαδή την αριθμητική επίλυση των μαθηματικών εξισώσεων που προκύπτουν από την διακριτοποίηση του φορέα σε πεπερασμένα στοιχεία και που πραγματοποιείται με το ABAQUS/Standard ή το ABAQUS/Explicit και
- την μετά-επεξεργασία (post processing), δηλαδή την γραφική απεικόνιση και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που πραγματοποιείται από το ABAQUS/CAE.

Στο σχήμα 4.4. που ακολουθεί φαίνεται παραστατικά η πορεία ανάλυσης με το ABAQUS:



Σχήμα 4.4: Πορεία ανάλυσης με το ABAQUS

Πιο αναλυτικά, αφού δημιουργηθεί το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων, το ABAQUS/CAE δημιουργεί ένα αρχείο εισόδου, το οποίο υποβάλλεται στη συνέχεια για επεξεργασία. Το ABAQUS/Standard ή το ABAQUS/Explicit διαβάζει το αρχείο εισόδου που δημιουργήθηκε από το ABAQUS/CAE, εκτελεί την ανάλυση, στέλνει τις πληροφορίες στο ABAQUS/CAE, ώστε να είναι δυνατή η εποπτεία της προόδου της εργασίας, και δημιουργεί μια βάση δεδομένων εξόδου. Τέλος, χρησιμοποιώντας την ενότητα απεικόνισης του ABAQUS/CAE είναι εφικτή η παρατήρηση των αποτελεσμάτων της βάσης δεδομένων εξόδου.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι, όπως όλα τα λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων, το ABAQUS χρησιμοποιεί αριθμητική ολοκλήρωση για τον υπολογισμό των μητρώων των στοιχείων. Χρησιμοποιείται κυρίως η μέθοδος ολοκλήρωσης κατά GAUSS και συνεπώς τα ζητούμενα μεγέθη υπολογίζονται στα σημεία ολοκλήρωσης (integration points). Στην περίπτωση που απαιτείται προσδιορισμός ενός μεγέθους σε κάποιο άλλο σημείο πραγματοποιείται παρεμβολή (interpolation) ή επέκταση(extrapolation) των τιμών που δίνουν τα σημεία ολοκλήρωσης.

4.4 Προσομοίωση οδοστρώματος ΔΑΑ με χρήση 3DFEM

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα πραγματοποιήθηκε μία προσομοίωση του οδοστρώματος των διαδρόμων του ΔΑΑ. Για την προσομοίωση του οδοστρώματος απαιτήθηκε γνώση του πάχους των στρώσεων, του είδους και των τεχνικών χαρακτηριστικών (μέτρο ελαστικότητας και λόγος του Poisson) των υλικών που το αποτελούσαν. Στο σχήμα 4.5 που ακολουθεί φαίνονται συγκεντρωτικά τα παραπάνω στοιχεία του οδοστρώματος:

$H_1=270 \text{ mm}$, $E_1=6000 \text{ Mpa}$, $\nu_1=0,35$
$H_2=300 \text{ mm}$, $E_2=13000 \text{ Mpa}$, $\nu_2=0,15$
$H_3=400 \text{ mm}$, $E_3=500 \text{ Mpa}$, $\nu_3=0,40$
$H_4=\infty$, $E_3=90 \text{ Mpa}$, $\nu_3=0,45$

Σχήμα 4.5 : Στοιχεία διατομής οδοστρώματος

Η επίλυση των αναλυτικών προσομοιωμάτων απαιτεί επιπλέον στοιχεία σε σχέση με τις κλασσικές μεθόδους γι' αυτό χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από επί τόπου μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί από το Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ. Ειδικότερα, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με μη καταστροφικές μεθόδους σε αποστάσεις 5m και 10m δεξιά και αριστερά του κεντρικού άξονα του κάθε διαδρόμου. Με τη βοήθεια του FWD (Falling Weight Deflectometer = Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους) πραγματοποιήθηκε ένας υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας των υλικών του οδοστρώματος ενώ χρησιμοποιώντας το GPR (Ground Penetrating Radar= Γεωραντάρ) επιτεύχθηκε ο υπολογισμός του πάχους των στρώσεων. Από τις αναλύσεις των στοιχείων το πάχος των ασφαλτικών στρώσεων εκτιμήθηκε μεταξύ 260mm έως 290mm και γι' αυτό επελέγη μία μέση τιμή 270mm για την πραγματοποίηση των υπολογισμών.

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία δημιουργήθηκε αρχικά η γεωμετρία του φορέα. Το μοντέλο που υιοθετήθηκε ήταν ένα τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αποτελούμενο από τις τέσσερις στρώσεις του οδοστρώματος (ασφαλτική στρώση, βάση από σταθεροποιημένο υλικό, υπόβαση από θραυστό αμμοχάλικο και στρώση έδρασης απείρου πάχους). Για τη δημιουργία του φορέα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων το πάχος της στρώσης έδρασης περιορίστηκε στα 7m. Με βάση τη διεθνή εμπειρία καθώς και από αναλύσεις της παρούσας εργασίας έχει παρατηρηθεί ότι σε αυτό το βάθος οι αναπτυσσόμενες τάσεις έχουν μηδενιστεί. Στο οριζόντιο επίπεδο το μοντέλο σχεδιάστηκε να έχει 3m μήκος και 3m πλάτος. Στη συνέχεια σχεδιάστηκε η επιφάνεια επαφής των τροχών του αεροσκάφους η οποία θεωρήθηκε κυκλικής μορφής.

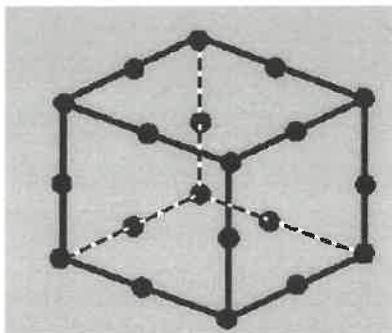
Κατόπιν κατασκευάστηκαν τέσσερις κατηγορίες ελαστικών ισότροπων υλικών εισάγοντας τα στοιχεία μέτρου ελαστικότητας και λόγου Poisson που φαίνονται στο σχήμα 4.5 και ακολούθησε μία αντιστοιχία αυτών με τις παραπάνω τέσσερις στρώσεις.

Έπειτα εισήχθησαν τα στοιχεία της φόρτισης επιλέγοντας τον τρόπο επιβολής του φορτίου και προσδιορίζοντας το μέγεθος της φόρτισης ανάλογα με την πίεση του ελαστικού του κάθε αεροσκάφους. Πιο συγκεκριμένα το φορτίο θεωρήθηκε κατακόρυφο και ομοιόμορφα κατανεμημένο. Ακολούθησε αντιστοιχία των στοιχείων της φόρτισης με την ήδη σχεδιασθείσα κυκλική επιφάνεια επαφής του ελαστικού.

Όσον αφορά στις συνοριακές συνθήκες, έχουν δεσμευτεί οι οριζόντιες μετακινήσεις για τις κατακόρυφες πλευρές του φορέα, η βάση του θεωρήθηκε πακτωμένη ενώ η άνω επιφάνεια δεν παρουσιάζει καμία δέσμευση. Οι παραπάνω δεσμεύσεις αποτελούν ένα είδος στήριξης για το προσομοίωμα και επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να υποκαθιστούν τη συνέχεια του οδοστρώματος. Κατά την εισαγωγή των στοιχείων της φόρτισης και των συνοριακών

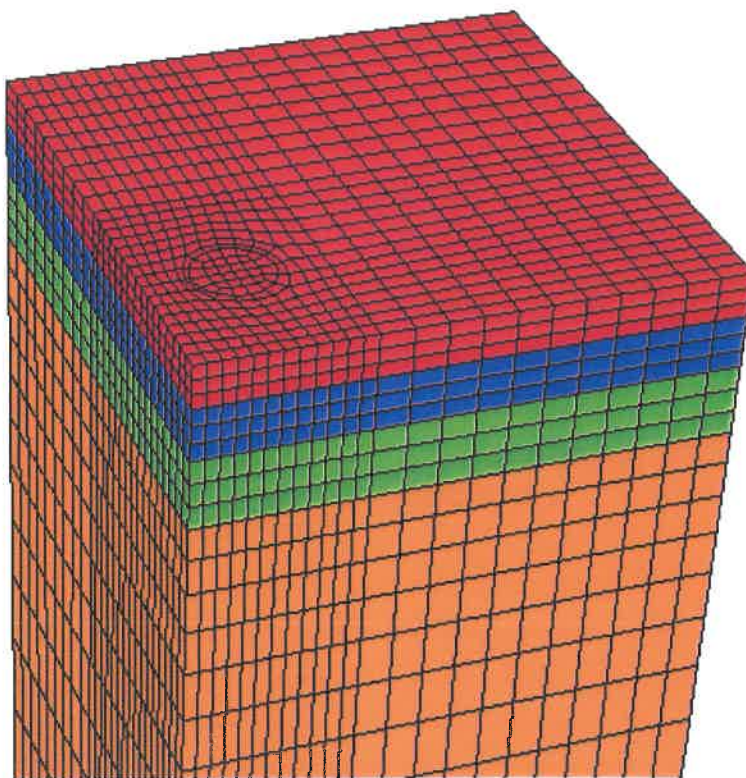
συνθηκών το πρόγραμμα απαιτεί την αντιστοιχία τους με συγκεκριμένα στάδια (steps) της μόρφωσης του φορέα.

Στη συνέχεια ακολούθησε η κατασκευή του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων. Επιλέχθηκαν τρισδιάστατα, ισοπαραμετρικά, εξαεδρικά στοιχεία συνεχούς μέσου, 20 κόμβων (C3D20-σχήμα 4.6) [11] που μπορούν να προσομοιώσουν καλύτερα τη γεωμετρία του φορέα και με σκοπό να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια στους υπολογισμούς.



Σχήμα 4.6: Εξαεδρικό στοιχείο συνεχούς μέσου 20 κόμβων-C3D20

Το πλέγμα έχει σχεδιαστεί να είναι πυκνότερο στις περιοχές επιβολής του φορτίου και στις περιοχές εμφάνισης των κρίσιμων σημείων (πυθμένας σταθεροποιημένης στρώσης) για να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια στα αποτελέσματα της ανάλυσης (σχήμα 4.7).

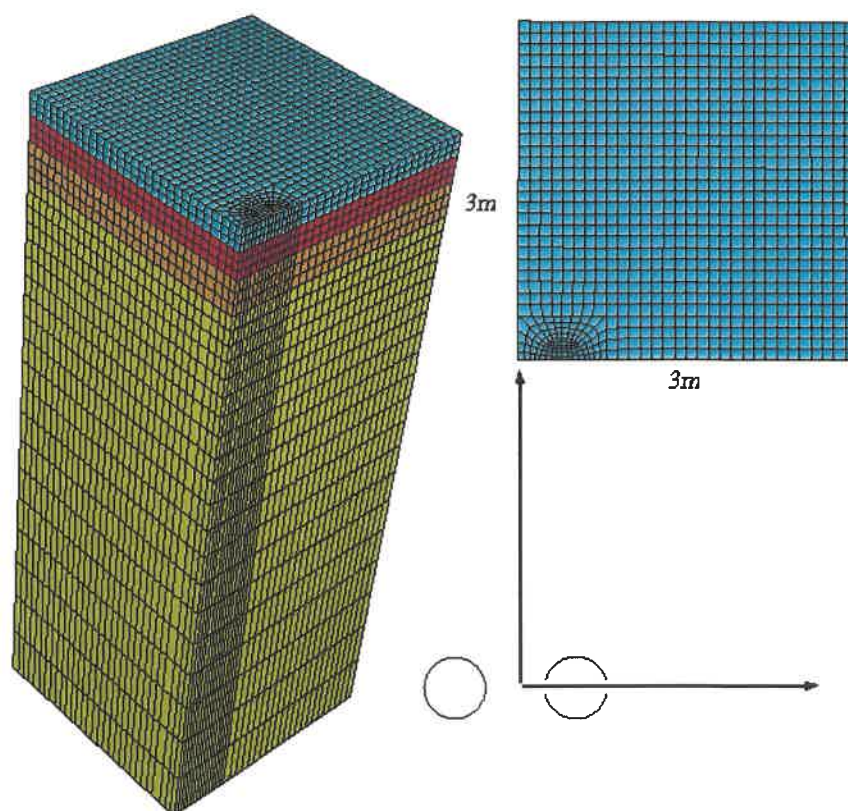


Σχήμα 4.7: Πύκνωση πλέγματος σε κρίσιμες θέσεις

Το παραπάνω μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του οδοστρώματος για διαφορετικά συστήματα προσγείωσης αεροσκαφών. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε προσομοίωση για τα αεροσκάφη A300-C4, B737-400, B747-400, Bae146-200 και το B777-300 που χρησιμοποιούν το ΔΑΑ και τα οποία θα χρησιμοποιηθούν παρακάτω στην ανάλυση του οδοστρώματος καθώς και για αεροσκάφη που είτε αναμένεται να χρησιμοποιήσουν στο μέλλον το οδόστρωμα είτε θα χρησιμοποιηθούν στην κατάταξη. Σε κάθε περίπτωση εκμεταλλευτήκαμε τη συμμετρία της διάταξης των τροχών του αεροσκάφους με σκοπό την απλοποίηση της διαδικασίας. Τα στοιχεία των αεροσκαφών που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του οδοστρώματος φαίνονται στα σχήματα 1-6 του παραρτήματος. Στη συνέχεια ακολουθούν ορισμένες προσομοιώσεις του οδοστρώματος για διαφορετικά είδη συστημάτων προσγείωσης.

4.4.1 Προσομοίωση οδοστρώματος για φόρτιση αεροσκάφους με σύστημα προσγείωσης διπλού τροχού

Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζεται ενδεικτικά το προσομοίωμα του οδοστρώματος για την περίπτωση φόρτισης από το B737-400.



Σχήμα 4.8: Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων με φόρτιση από το α/φ B737-400

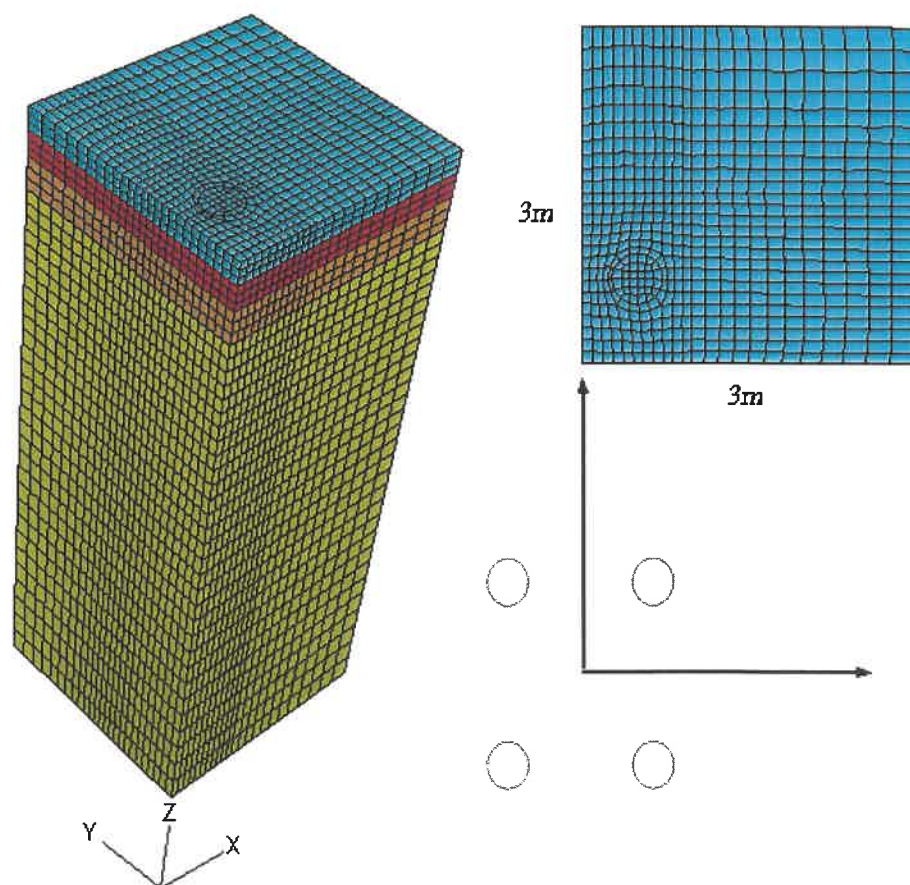
Το B737-400 είναι ένα αεροσκάφος με σύστημα προσγείωσης διπλού τροχού (dual wheel gear). Από τα προαναφερθέντα αεροσκάφη που χρησιμοποιούν το οδόστρωμα το Bae146-

200 είναι αυτό που παρουσιάζει παρόμοιο μοντέλο προσομοίωσης αφού έχει την ίδια διάταξη τροχών.

Για την προσομοίωση των υπολοίπων αεροσκαφών χρησιμοποιήθηκε το παραπάνω προσομοίωμα όσον αφορά στη γεωμετρία, στα τεχνικά χαρακτηριστικά των υλικών των στρώσεων, στα βήματα ανάλυσης και στις συνοριακές συνθήκες και μεταβλήθηκαν οι επιφάνειες φόρτισης και το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων ανάλογα με τα συστήματα τροχών των αεροσκαφών.

4.4.2 Προσομοίωση οδοστρώματος για φόρτιση αεροσκάφους με σύστημα προσγείωσης διπλού δίδυμου τροχού

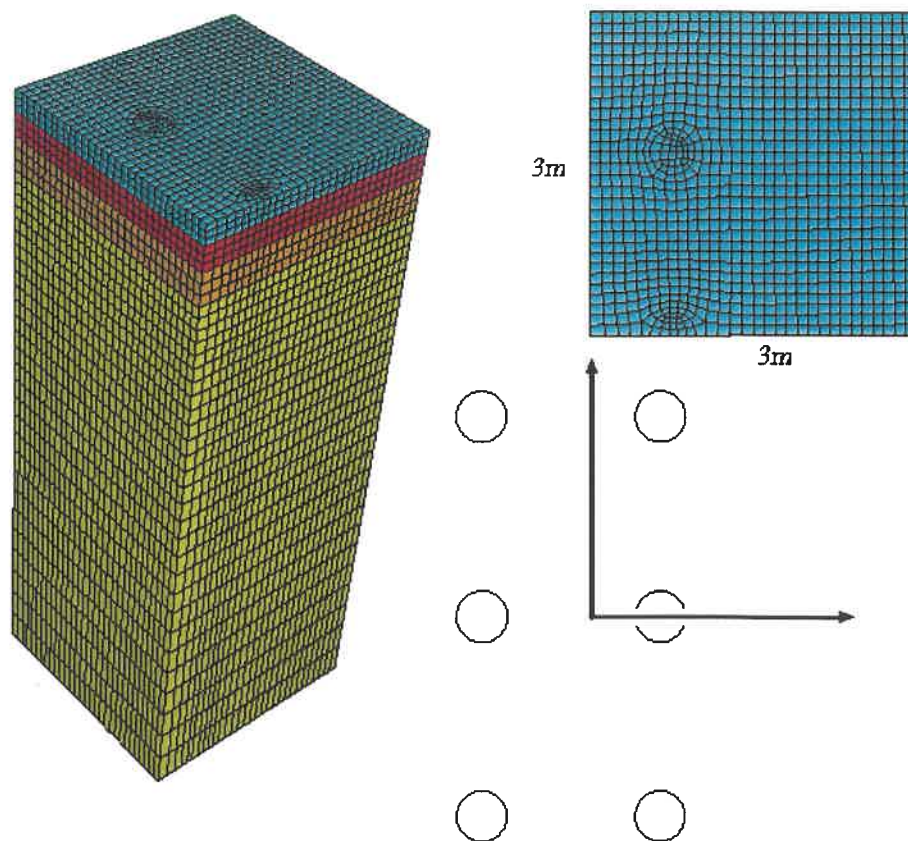
Το μοντέλο προσομοίωσης που προέκυψε για το A300-C4 ήταν παρόμοιο με εκείνο του B747-400, μιας και τα δύο αεροσκάφη έχουν σύστημα προσγείωσης διπλού δίδυμου τροχού (dual tandem wheel gear). Ενδεικτικά παρατίθεται το μοντέλο προσομοίωσης του οδοστρώματος για το A300-C4 στο σχήμα 4.9 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.9: Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων με φόρτιση από το α/φ A 300-C4

4.4.3 Προσομοίωση οδοστρώματος για φόρτιση αεροσκάφους με σύστημα προσγείωσης διπλού τρίδυμου τροχού

Στο σχήμα 4.10 παρουσιάζεται το προσομοίωμα του οδοστρώματος για την περίπτωση φόρτισης από το B777-300.



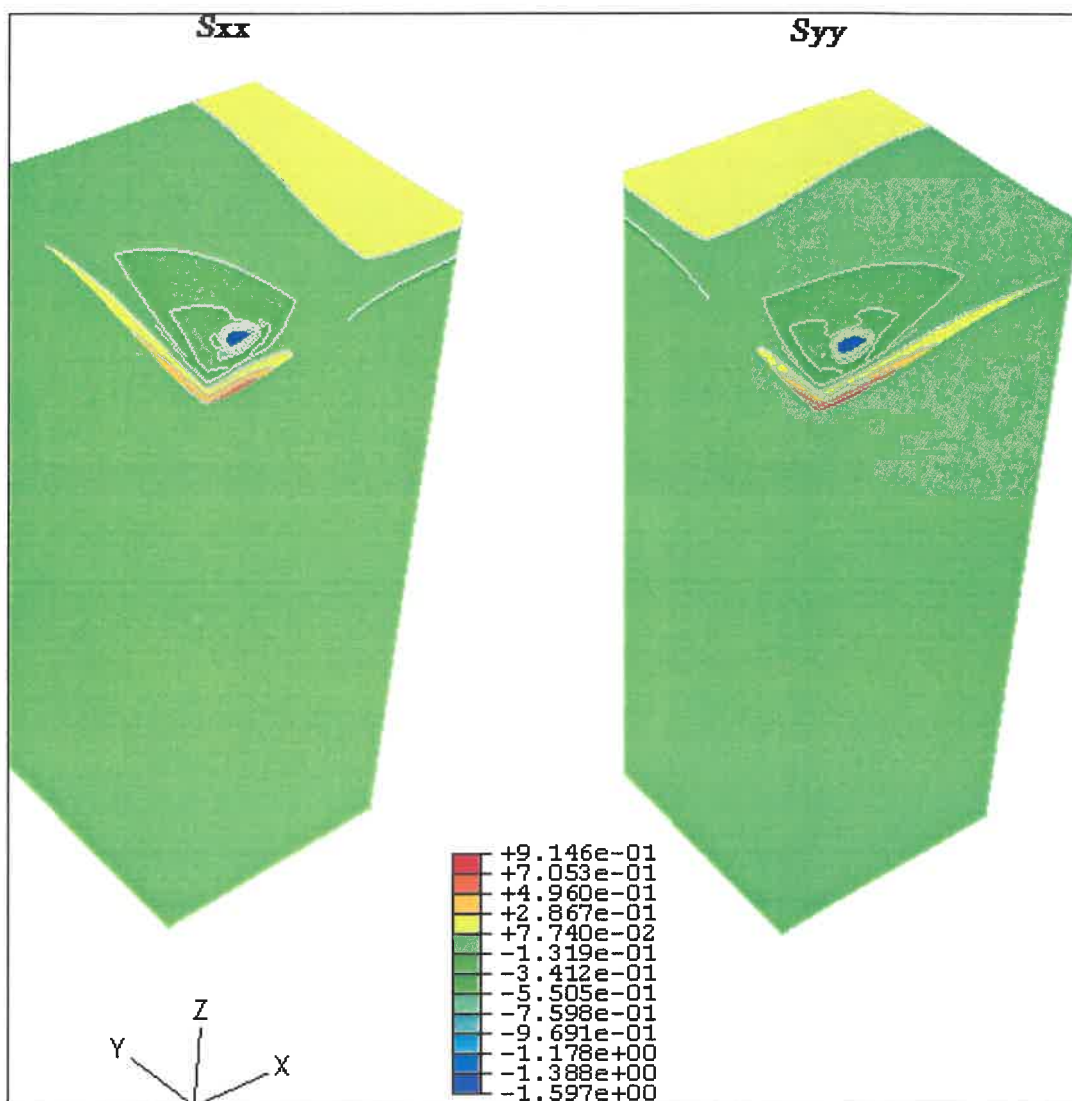
Σχήμα 4.10: Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων με φόρτιση από το α/φ B777-300

Χρησιμοποιώντας αυτά τα τρισδιάστατα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιήθηκε η ανάλυση του οδοστρώματος για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας του. Μετά την ολοκλήρωση της επεξεργασίας των δεδομένων το πρόγραμμα έδωσε την δυνατότητα απεικόνισης των αποτελεσμάτων τόσο στον παραμορφωμένο όσο και στον απαραμόρφωτο φορέα. Η κατανομή των αναπτυσσόμενων τάσεων και ο υπολογισμός των παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων ήταν μερικά από τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα εντοπισμού του στοιχείου (element) ή ακόμα και του κόμβου (node) εμφάνισης της μέγιστης παραμόρφωσης-τάσης καθώς επίσης και γενικότερες πληροφορίες ανά στοιχείο και κόμβο. Επιπλέον παρέχει τη δυνατότητα απεικόνισης των αποτελεσμάτων σε οποιοδήποτε επίπεδο XY, XZ και ZY τέμνει τον φορέα.

Στην παρούσα εφαρμογή δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στον υπολογισμό των μέγιστων οριζόντιων εφελκυστικών τάσεων στον πυθμένα της σταθεροποιημένης βάσης διότι αυτές

αποτελούν τις κρίσιμες τάσεις που καθορίζουν τη συμπεριφορά των ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Στο σχήμα 4.11 που ακολουθεί παρουσιάζεται η κατανομή των οριζόντιων τάσεων S_{xx} και S_{yy} στον παραμορφωμένο φορέα του οδοστρώματος του αεροδρομίου για την περίπτωση φόρτισης από το B737-400.

Όπως ήταν αναμενόμενο η μέγιστη οριζόντια εφελκυστική τάση εμφανίζεται στον πυθμένα της σταθεροποιημένης βάσης. Από αυτό το σημείο και κάτω οι τάσεις παρουσιάζονται αισθητά μειωμένες και μάλιστα μετατρέπονται σε θλιπτικές, όπως υποδηλώνει και το αρνητικό πρόσημο τους στο πινακάκι που συνοδεύει τα σχήματα. Η σταθεροποιημένη λοιπόν βάση είναι εκείνη που φέρει κυρίως την επιβαλλόμενη φόρτιση.



Σχήμα 4.11: Κατανομή οριζόντιας τάσης για το B737-400: α) διεύθυνση x-x, β) διεύθυνση y-y

4.5 Προσδιορισμός φέρουσας ικανότητας του ΔΑΑ από ανάλυση με 3DFEM

Για τον έλεγχο του οδοστρώματος των διαδρόμων του ΔΑΑ χρειάστηκε να πραγματοποιηθεί μια περεταίρω επεξεργασία των στοιχείων της κυκλοφορίας. Τα αεροσκάφη που είχαν ήδη προκύψει από την αρχική επεξεργασία της κυκλοφορίας (πίνακας 2.1) ομαδοποιήθηκαν σε 5 κατηγορίες -με βάση το μέγιστο βάρος απογείωσης και τη διάταξη των τροχών τους- και επιλέχθηκε για κάθε κατηγορία ένα αντιπροσωπευτικό αεροσκάφος με βάση το οποίο έγινε ο προσδιορισμός των εντατικών μεγεθών. Η παραπάνω ομαδοποίηση καθώς επίσης και η μέση ετήσια κυκλοφορία ανά αεροσκάφος και η μέση ετήσια κυκλοφορία ανά ομάδα αεροσκαφών φαίνονται στον πίνακα 9 του παραρτήματος. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η προβλεπόμενη κυκλοφορία για τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος η οποία ορίστηκε στα 25 χρόνια (πίνακας 4.1). Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι η διάρκεια ζωής του οδοστρώματος επελέγη να είναι ίδια με την προβλεπόμενη περίοδο διαχείρισης του από την παρούσα εταιρεία διαχείρισης του αεροδρομίου.

Αεροσκάφος	Προβλεπόμενες Διελύσεις για 25ετία	
	03 L-21R	03R-21L
A300-C4 DT 330,000 lbs	132075	169525
B737-400 D 150,000 lbs	1095850	1122975
B747-400 DDT 870000 lbs	6275	6675
B777-300 TRIDEM 660,000 lbs	7225	9425
Bae146-200 D 88,250lbs	525825	465900

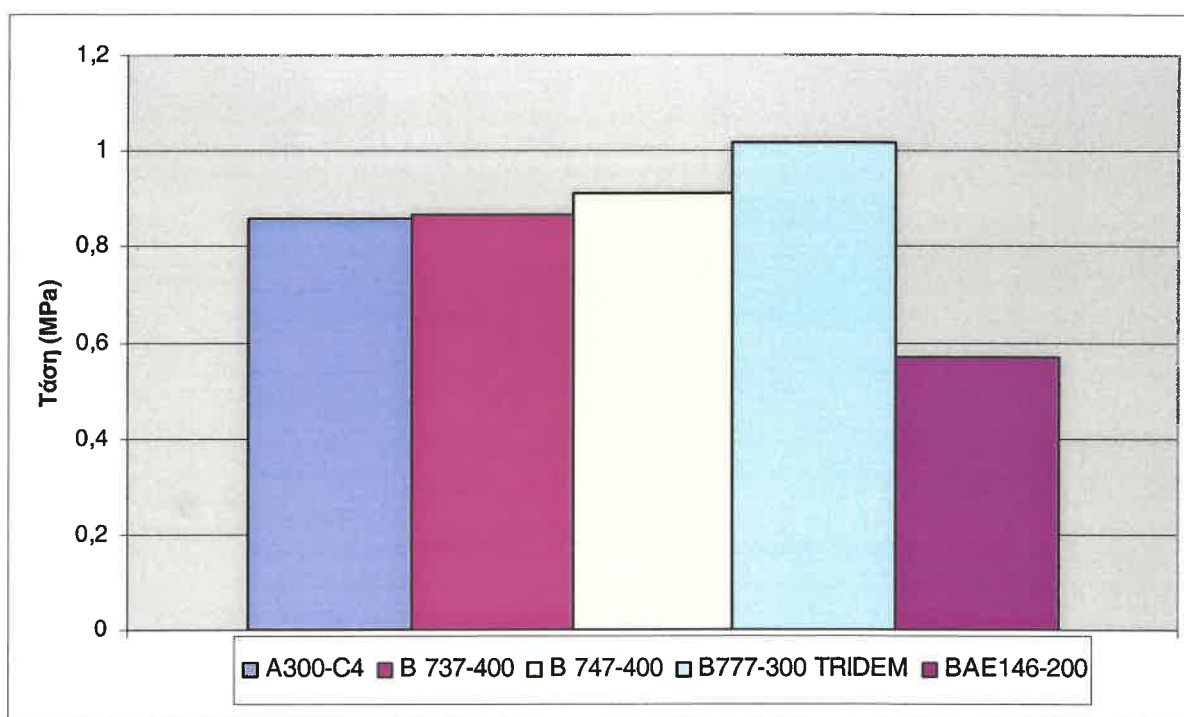
Πίνακας 4.1: Προβλεπόμενες διελύσεις αεροσκαφών ανά διάδρομο για 25ετή περίοδο

Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τα προσομοιώματα του οδοστρώματος που βασίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και τα οποία παρουσιάστηκαν στα υποκεφάλαια 4.4.1 έως 4.4.3, πραγματοποιήθηκε ένας υπολογισμός των μέγιστων οριζόντιων εφελκυστικών τάσεων που αναπτύσσονται στον πυθμένα της σταθεροποιημένης βάσης.

Στον πίνακα 4.2 που ακολουθεί παραθέτονται τα αποτελέσματα ενώ στο διάγραμμα 4.1 παριστάνονται γραφικά.

Αεροσκάφος	Μέγιστη οριζόντια εφελκυστική τάση στον πυθμένα της σταθεροποιημένης βάσης (MPa)
A300-C4	0.8594
B737-400	0.8676
B747-400	0.9130
B777-300	1.0170
Bae146-200	0.5702

Πίνακας 4.2: Μέγιστη οριζόντια εφελκυστική τάση στον πυθμένα της σταθεροποιημένης βάσης (MPa) από την ανάλυση του οδοστρώματος με πεπερασμένα στοιχεία (3DFEM).



Διάγραμμα 4.1: Μέγιστη οριζόντια εφελκυστική τάση στον πυθμένα της σταθεροποιημένης βάσης (MPa)

Για τον έλεγχο της επάρκειας του οδοστρώματος στην προβλεπόμενη φόρτιση είναι αναγκαία η επιλογή ενός κατάλληλου νόμου κόπωσης που να προσεγγίζει καλύτερα τη συμπεριφορά του σταθεροποιημένου υλικού. Διεθνώς χρησιμοποιούνται διάφοροι νόμοι κόπωσης σταθεροποιημένων υλικών όπως προκύπτει και από τη σχετική βιβλιογραφία [12]. Τυπικές καμπύλες κόπωσης έχουν γενικό τύπο (σχέση 4.1) και φαίνονται στο διάγραμμα 4.2 που ακολουθεί.

$$\sigma/f = a + b \cdot \log N \quad (\text{σχέση 4.1})$$

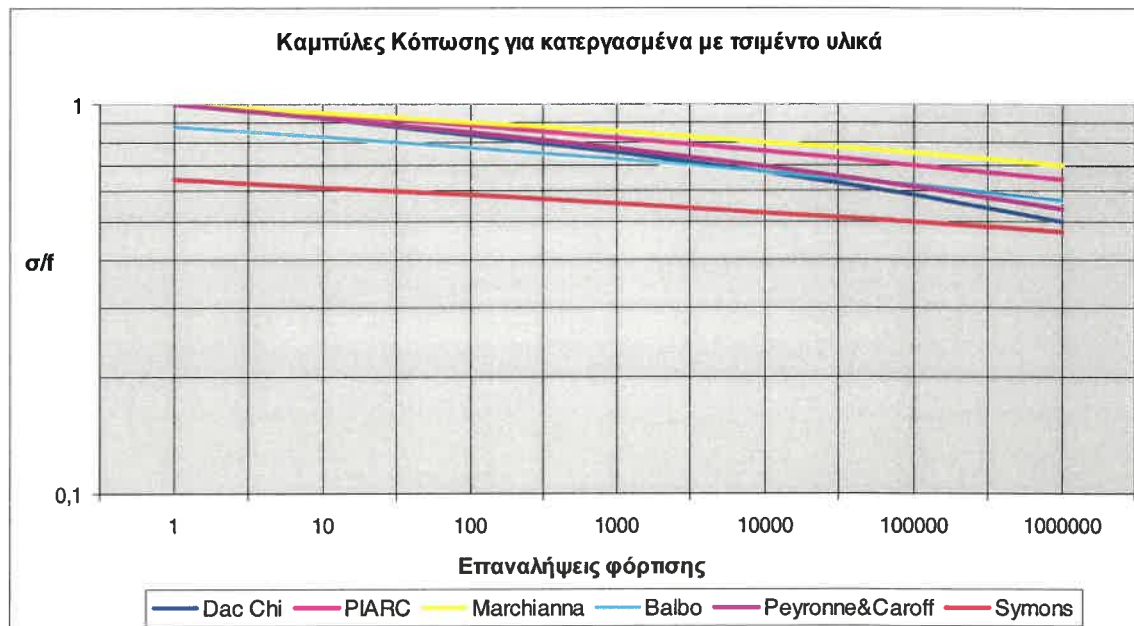
όπου:

N = αριθμός επιτρεπόμενων διελεύσεων τροχών αεροσκαφών

σ = μέγιστη οριζόντια εφελκυστική τάση στον πυθμένα της βάσης

f = αντοχή σε κάμψη

a, b = σταθερές που έχουν προκύψει από εργαστηριακές δοκιμές ή οδικά πειράματα.



Διάγραμμα 4.2: Καμπύλες αστοχίας λόγω κόπωσης σταθεροποιημένων υλικών [12]

Δεδομένου ότι δεν υπήρχαν στοιχεία για το συγκεκριμένο οδόστρωμα από δοκιμές κόπωσης και λαμβάνοντας υπόψη ότι το σταθεροποιημένο υλικό του οδοστρώματος που εξετάζεται είναι ένα Κατεργασμένο Θραυστό Αμμοχάλικο με σχετικά χαμηλό μέτρο ελαστικότητας πραγματοποιήθηκε η επιλογή του νόμου αστοχίας (σχέση 4.2) με βάση τη διεθνή εμπειρία. Το υλικό από το οποίο την επεξεργασία έχει προέλθει η παραπάνω σχέση έχει παραπλήσια μηχανική συμπεριφορά και χαρακτηριστικά με το υλικό του οδοστρώματος του ΔΑΑ σύμφωνα με σχετικές έρευνες του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ. Προφανώς η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται στην παρούσα ανάλυση μπορεί να εφαρμοστεί για οποιαδήποτε άλλη αντίστοιχη σχέση.

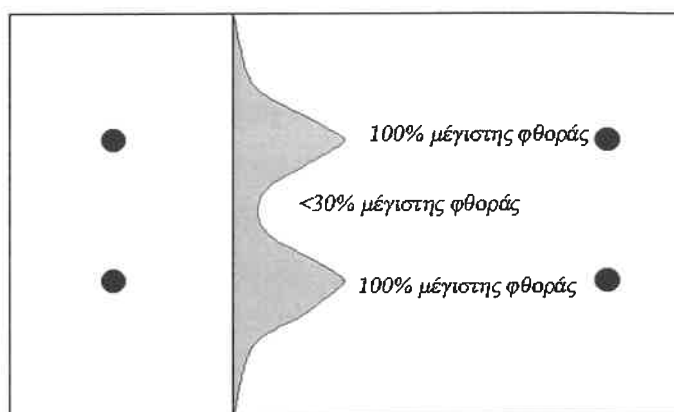
$$\sigma/f = 0.874 - 0.051 \cdot \log N \quad (\text{Balbo 1993}) \quad (\text{σχέση 4.2})$$

όπου N = αριθμός επιτρεπόμενων διελεύσεων τροχών αεροσκαφών

σ = μέγιστη οριζόντια εφελκυστική τάση στον πυθμένα της βάσης

f = αντοχή σε κάμψη (0,8-1,7 Mpa)

Με βάση τη σχέση 4.2 υπολογίστηκε ο αριθμός των επιτρεπόμενων διελεύσεων τροχών του κάθε αεροσκάφους. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι όπως έχει διαπιστωθεί από έρευνες [13] κατά τη διέλευση ενός αεροσκάφους με σύστημα προσγείωσης διπλού δίδυμου τροχού (dual tandem-σχήμα 4.12) παρουσιάζεται διπλή επανάληψη της μέγιστης φόρτισης. Γι' αυτό για τον προσδιορισμό του επιτρεπόμενου αριθμού διελεύσεων του κάθε αεροσκάφους N_i πρέπει να διαιρεθεί ο αριθμός που προκύπτει από τη σχέση 4.2 με τον συντελεστή 2. Ομοίως, για την περίπτωση αεροσκαφών με σύστημα προσγείωσης διπλού τρίδυμου τροχού (dual tridem) απαιτείται η διαίρεση του επιτρεπόμενου αριθμού διελεύσεων με 3.



Σχήμα 4.12: Επανάληψη μέγιστης φόρτισης σε διάταξη τροχών α/φ διπλού δίδυμου τροχού

Επειδή η κυκλοφορία του οδοστρώματος είναι μία μικτή κυκλοφορία για να υπολογιστεί η συνολική φθορά από όλα τα αεροσκάφη εφαρμόστηκε η αρχή του Miner [1]. Σύμφωνα με την αρχή αυτή η κυκλοφορία ενός οδοστρώματος χωρίζεται σε ομάδες και για κάθε ομάδα υπολογίζεται ο αριθμός N_i των επιτρεπόμενων φορτίσεων με τη βοήθεια του κατάλληλου νόμου κόπωσης. Αν n_i είναι ο προβλεπόμενος αριθμός διελεύσεων για κάθε ομάδα φορτίων αντίστοιχα τότε για να μην αστοχήσει το οδόστρωμα θα πρέπει να ισχύει:

$$n_1 / N_1 + n_2 / N_2 + n_3 / N_3 + \dots + n_v / N_v \leq 1 \quad (\text{σχέση 4.3})$$

Η αρχή αυτή εκφράζει ότι κάθε φόρτιση καταναλώνει από τη ζωή του υλικού ποσοστό ανάλογο με τον αριθμό των επαναλήψεων της.

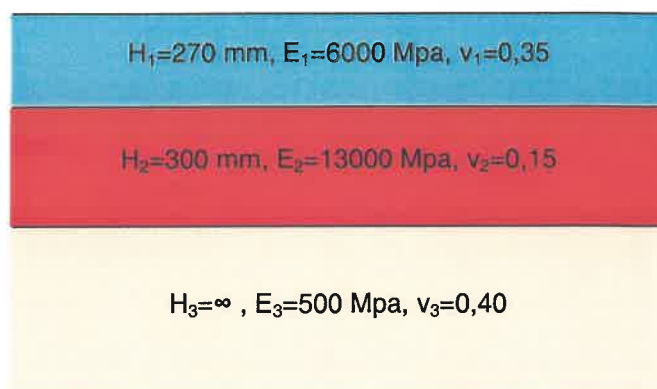
Εισάγοντας στη σχέση 4.3 τα αποτελέσματα των παραπάνω υπολογισμών προέκυψε ότι το οδόστρωμα μπορεί να φέρει με ασφάλεια τα προβλεπόμενα φορτία .

4.6 Προσομοίωση οδοστρώματος ΔΑΑ με χρήση του APSA-προσδιορισμός φέρουσας ικανότητας

Εκτός από την προσομοίωση του οδοστρώματος του ΔΑΑ με χρήση του λογισμικού των πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη ενότητα πραγματοποιήθηκε και μια ενδεικτική υλοποίηση της μεθοδολογίας με χρήση του λογισμικού APSA. Το APSA (Airfield Pavement Structural Analysis) είναι ένα λογισμικό που δημιουργήθηκε από το Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ και βασίζεται στη θεωρία των ελαστικών επάλληλων στρώσεων [14].

Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα του υπολογισμού των μέγιστων τάσεων και παραμορφώσεων που αναπτύσσονται σε ένα οδόστρωμα αεροδρομίου κάτω από το φορτίο οποιουδήποτε αεροσκάφους με τη βοήθεια του αλγόριθμου BISAR (Bituminous Structural Analysis for Roads). Πιο συγκεκριμένα μειώνει την απαιτούμενη προσπάθεια για τον προσδιορισμό των κρίσιμων σημείων ενός οδοστρώματος (σημεία που αναμένεται να αναπτυχθούν οι μέγιστες τάσεις- παραμορφώσεις) δημιουργώντας αυτομάτως μία σειρά από συνεχόμενα πλέγματα γύρω από τον κορμό του αεροσκάφους. Σε κάθε γύρο το λογισμικό αναγνωρίζει το σημείο του πλέγματος που παρουσιάζεται η μέγιστη τάση-παραμόρφωση και στη συνέχεια δημιουργεί ένα καινούργιο πλέγμα γύρω από αυτό το σημείο για να προσδιορίσει την ζητούμενη τάση-παραμόρφωση με μεγαλύτερη ακρίβεια. Η παραπάνω διαδικασία ολοκληρώνεται μετά την δημιουργία τριών διαδοχικών πλεγμάτων. Το πρώτο πλέγμα εισάγεται γύρω από το μισό κορμό του αεροσκάφους, έχει διαστάσεις 2x8m ή 6x8m ανάλογα με τον τύπο του αεροσκάφους και το βήμα του είναι 500mm. Η θέση των τροχών σε αυτή την περιοχή καθορίζεται από τις συντεταγμένες τους X και Y. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφέρουμε ότι παρόλο που τα στοιχεία πολλών ευρέως χρησιμοποιούμενων αεροσκαφών υπάρχουν στο αρχείο δεδομένων του προγράμματος, η εισαγωγή τους απευθείας από το πληκτρολόγιο είναι ακόμα δυνατή. Κάθε ένα από τα επόμενα δύο πλέγματα αναπτύσσεται γύρω από το σημείο του προηγούμενου πλέγματος όπου εμφανίζεται η μέγιστη τάση-παραμόρφωση. Το μέγεθος τους είναι ίδιο με εκείνο του πρώτου πλέγματος αλλά το βήμα τους είναι 250mm και 125mm αντιστοίχως.

Τα απαιτούμενα στοιχεία του οδοστρώματος είναι ο αριθμός και το πάχος των στρώσεων, το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος του Poisson των υλικών. Μιας και το οδόστρωμα ορίζει σαν μέγιστο αριθμό στρώσεων οδοστρώματος τις 3 πραγματοποιήθηκε μία ενοποίηση της υπόβασης και της στρώσης έδρασης και προέκυψε η διατομή του σχήματος 4.13 που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς μας.



Σχήμα 4.13: Στοιχεία διατομής οδοστρώματος για την ανάλυση με το APSA

Το κύριο χαρακτηριστικό του προγράμματος είναι η ελαχιστοποίηση της εμπλοκής του χρήστη στη διαδικασία του υπολογισμού. Το APSA διαθέτει μία φιλική στο χρήστη διαδικασία εισόδου δεδομένων κατευθείαν από το πληκτρολόγιο κάνοντας την διαδικασία υπολογισμού ευκολότερη και ταχύτερη.

Χρησιμοποιώντας το παραπάνω λογισμικό πραγματοποιήθηκε ένας επιπλέον υπολογισμών των μέγιστων εφελκυστικών τάσεων στον πυθμένα της σταθεροποιημένης με τσιμέντο βάσης της ημιάκαμπτης δομής του οδοστρώματος. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στον πίνακα 4.3 που ακολουθεί.

Αεροσκάφος	Μέγιστη οριζόντια εφελκυστική τάση στον πυθμένα της σταθεροποιημένης βάσης (Mpa)
A300-C4	0,693331
B737-400	0,705220
B747-400	0,688265
B777-300	0,948142
Bae146-200	0,455564

Πίνακας 4.3: Μέγιστη οριζόντια εφελκυστική τάση στον πυθμένα της σταθεροποιημένης βάσης (Mpa) από την ανάλυση του οδοστρώματος με το APSA.

Εισάγοντας τις τιμές του πίνακα 4.3 στον παραπάνω νόμο κόπωσης (σχέση 4.2) πραγματοποιήθηκε ένας επιπλέον υπολογισμός του επιτρεπόμενου αριθμού διελύσεων κάθε αεροσκάφους. Στη συνέχεια με τη βοήθεια της σχέσης του Miner πραγματοποιήθηκε ένας επιπλέον έλεγχος της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος και προέκυψε ότι το οδόστρωμα επαρκεί.

5 ΣΥΝΔΕΣΗ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΟ ΔΕΙΚΤΗ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ

5.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε μία παρουσίαση της διαδικασίας αναλυτικού προσδιορισμού της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος με τη βοήθεια σύγχρονων υπολογιστικών μεθόδων. Στη συνέχεια θα πραγματοποιηθεί μία προσπάθεια σύνδεσης της φέρουσας ικανότητας με το δείκτη κατάταξης.

5.2 Δημοσίευση της φέρουσας ικανότητας

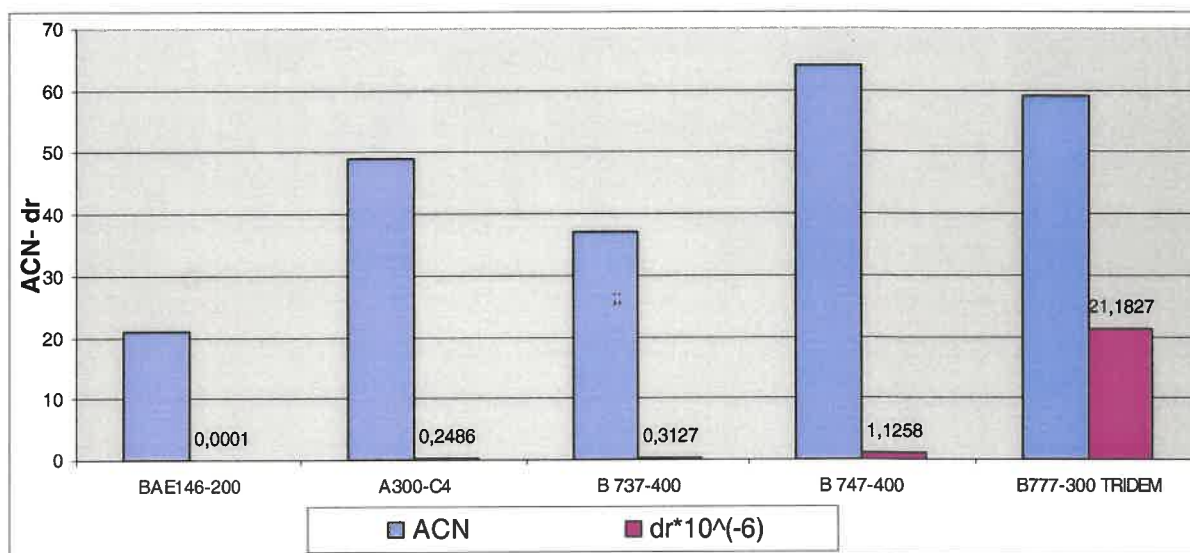
Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO) που εισήγαγε τη μέθοδο ACN-PCN για τη δομική κατάταξη των οδοστρωμάτων δεν έχει καθορίσει ένα συγκεκριμένο τρόπο προσδιορισμού του PCN. Προς τούτο συνδυάζοντας τον ορισμό του PCN με τα αποτελέσματα της ανάλυσης του οδοστρώματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων διερευνάται κατά πόσο είναι δυνατή η έκφραση της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος του ΔΑΑ συναρτήσει του PCN.

Με βάση τους ορισμούς το PCN είναι ένας αριθμός που εκφράζει την φέρουσα ικανότητα ενός οδοστρώματος αεροδρομίου και ισούται με το ACN του αεροσκάφους που προκαλεί τη μεγαλύτερη ένταση που μπορεί να δεχτεί το οδόστρωμα για απεριόριστο αριθμό διελεύσεων του. Ο αριθμός αυτός των διελεύσεων έχει οριστεί για τα εύκαμπτα-και κατά συνέπεια και για τα ημιάκαμπτα-οδοστρώματα να είναι 10,000 διελεύσεις. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η ανάλυση του οδοστρώματος του ΔΑΑ με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων έδειξε ότι αυτό μπορεί να αντέξει περισσότερες από 10,000 διελεύσεις από όλα τα αεροσκάφη που χρησιμοποιούν το οδόστρωμα οπότε η τιμή του PCN θα μπορούσε για τις ανάγκες της δημοσίευσης να καθοριστεί από το μεγαλύτερο ACN όλων των αεροσκαφών. Ανάμεσα στα αεροσκάφη που χρησιμοποιούν το οδόστρωμα εκείνο που έχει τη μεγαλύτερη τιμή του ACN είναι το B747-400, το οποίο έχει ACN ίσο με 64. Όμως πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει κάποιο αεροσκάφος από αυτά που χρησιμοποιούν το οδόστρωμα που να επιτρέπει περίπου 10000 διελεύσεις. Προσεγγίζοντας λοιπόν τον ίδιο ορισμό με ένα διαφορετικό τρόπο το PCN θα μπορούσε να εκτιμηθεί με βάση το δυσμενέστερο αεροσκάφος. Σύμφωνα με τα παραπάνω αναμένεται το δυσμενέστερο αεροσκάφος να είναι αυτό που έχει τη μεγαλύτερη τιμή ACN. Ανάμεσα στα αεροσκάφη που χρησιμοποιούν το οδόστρωμα προσδιορίστηκε εκείνο που προκαλεί τη μεγαλύτερη ένταση στο οδόστρωμα, δηλαδή αυτό με τη δυσμενέστερη επίπτωση. Το αεροσκάφος αυτό ήταν το B777-300 το οποίο έχει ACN=59. Δεχόμενοι ότι το PCN του οδοστρώματος είναι ίσο με το ACN του δυσμενέστερου αεροσκάφους προκύπτει ότι το PCN=59.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το αεροσκάφος με το μεγαλύτερο ACN δεν είναι αυτό που προκαλεί και τη μεγαλύτερη φθορά στο οδόστρωμα. Το ACN όμως εκφράζει τη σχετική επίδραση ενός αεροσκάφους σε ένα οδόστρωμα και θα έπρεπε το αεροσκάφος με το μεγαλύτερο ACN να αντιστοιχεί σε αυτό που προκαλεί τη δυσμενέστερη επίπτωση. Στον πίνακα 5.1 και στο σχήμα 5.1 που ακολουθεί φαίνεται η σχέση ανάμεσα στη τιμή του ACN κάθε αεροσκάφους και στη σχετική φθορά d_r που προκαλεί στο οδόστρωμα για την ίδια εδαφική κατηγορία. Η σχετική φθορά ορίζεται ως ο λόγος : $d_r = 1/\text{Νεπιτρεπόμενο}$ [15].

Αεροσκάφος	d_r	ACN
Bae 146-200	$7.087 \cdot 10^{-11}$	21
A300-C4	$2.4858 \cdot 10^{-7}$	49
B 737-400	$3.1268 \cdot 10^{-7}$	37
B 747-400	$1.1258 \cdot 10^{-6}$	64
B777-300 TRIDEM	$2.1183 \cdot 10^{-5}$	59

Πίνακας 5.1: Σχέση ανάμεσα στο ACN κάθε αεροσκάφους και στη σχετική φθορά του στο οδόστρωμα για την ίδια εδαφική κατηγορία (B).



Σχήμα 5.1: ACN - σχετική φθορά αεροσκάφους

Το διάγραμμα δείχνει ότι σε ορισμένες περιπτώσεις αεροσκάφη με ACN μικρότερο από άλλων προκαλούν μία δυσμενέστερη επίδραση στο οδόστρωμα. Η ανακρίβεια αυτή όσον αφορά στο ACN επηρεάζει και το PCN, αφού αυτό γενικά υπολογίζεται από το ACN. Σημειώνεται ότι παρόμοιες παρατηρήσεις έχουν προκύψει και από αναλύσεις σε εύκαμπτα οδοστρώματα [2].

Εξαιτίας της παραπάνω παρατήρησης αναζητήθηκε ένας εναλλακτικός τρόπος συσχέτισης της φέρουσας ικανότητας με το δείκτη κατάταξης PCN. Γι' αυτό το σκοπό πραγματοποιήθηκε

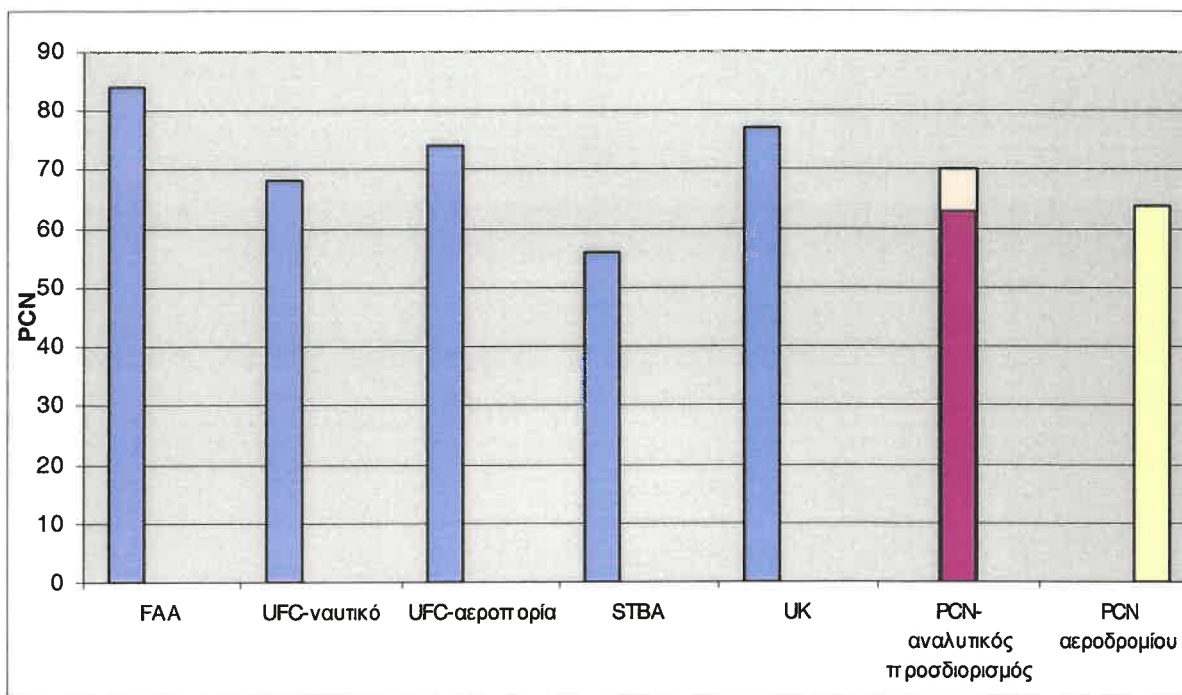
μία προσπάθεια καθορισμού ενός αεροσκάφους που να προκαλεί την ίδια φθορά στο οδόστρωμα με την αναμενόμενη φθορά της συνολικής κυκλοφορίας για την περίοδο της ανάλυσης. Αρχικά προσδιορίστηκαν οι αναμενόμενες ισοδύναμες επαναλήψεις φορτίου για τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος. Ο λόγος των προβλεπόμενων προς τις επιτρεπόμενες διελεύσεις του αεροσκάφους ισούται με τη συνολική φθορά του οδοστρώματος που προκαλείται από όλη την κυκλοφορία. Συνεπώς έχοντας υπολογίσει τις ισοδύναμες προβλεπόμενες διελεύσεις είναι γνωστός και ο αριθμός των επιτρεπόμενων. Από αυτές και με τη βοήθεια του κατάλληλου νόμου κόπωσης υπολογίστηκε η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση εξαιτίας αυτού του αεροσκάφους. Στη συνέχεια βρίσκοντας ένα αεροσκάφος στο οποίο να αντιστοιχεί κατά προσέγγιση αυτή η τάση και γνωρίζοντας την τιμή του ACN αυτού μπορεί να προσδιοριστεί η τιμή του PCN του αεροδρομίου. Η αριθμητική τιμή του PCN που προέκυψε από την παραπάνω διαδικασία ήταν 63.

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές και τα δεδομένα των αναλύσεων επισημαίνεται ότι η τιμή του PCN που προκύπτει από την παραπάνω διαδικασία θα μπορούσε να είναι μεγαλύτερη. Με βάση διερευνήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια των αναλυτικών μεθόδων το οδόστρωμα μπορεί να εξυπηρετήσει ικανοποιητικό αριθμό διελεύσεων από αεροσκάφη με ACN τιμές μεγαλύτερες από 63. Κατά συνέπεια και η τιμή του δείκτη κατάταξης PCN μπορεί να κυμανθεί σε ένα υψηλότερο εύρος τιμών και η αριθμητική τιμή 63 να αποτελέσει ένα κάτω όριο, δεδομένου ότι προκύπτει από μία ιδιαιτέρως συντηρητική προσέγγιση. Για παράδειγμα δεν έχει ληφθεί υπόψη κάποια αναλογία διελεύσεων προς τις διελεύσεις που εμφανίζουν την μεγαλύτερη τάση (ισοδύναμες διελεύσεις) στο οδόστρωμα (pass-to-coverage ratio), μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί η συγκεκριμένη διαδικασία μεθοδολογικά και να εφαρμοστεί οποιαδήποτε αναλογία ισοδύναμων διελεύσεων. Επιπλέον η χρήση του μέγιστου βάρους απογείωσης των αεροσκαφών σε όλους τους υπολογισμούς κάνει ακόμα πιο συντηρητική την προσέγγιση.

Έχοντας ολοκληρώσει τον προσδιορισμό του PCN με χρήση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης του οδοστρώματος με τη σύγχρονη μέθοδο ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να πραγματοποιηθεί μία σύγκριση τους με τα αποτελέσματα των κλασσικών μεθόδων και της δημοσιευμένης τιμής του PCN του ΔΑΑ (σχήμα 5.2). Οι τιμές των μεθόδων αντιστοιχούν σε αυτές που έχουν προκύψει μετά από επέκταση των διαγραμμάτων.

Παρατηρώντας το διάγραμμα διαπιστώνεται ότι οι περισσότερες κλασσικές μέθοδοι προσδιορισμού του PCN δίνουν μία τιμή που είναι αρκετά μεγαλύτερη της επίσημης τιμής του αεροδρομίου. Το γεγονός αυτό είναι σχετικά εύλογο δεδομένου ότι η φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος είναι αρκετά μεγάλη όπως προέκυψε και από την ανάλυση του οδοστρώματος με αναλυτικές μεθόδους. Παρουσιάζουν όμως σημαντική διακύμανση στα

αποτελέσματα τους και δεν παρέχουν σαφή εικόνα για την φέρουσα ικανότητα ενός οδοστρώματος.



Σχήμα 5.2: Αποτελέσματα μεθόδων προσδιορισμού PCN, αναλυτικού προσδιορισμού και δημοσιευμένη τιμή ΔΑΑ.

Αντιθέτως, η ανάλυση του οδοστρώματος με χρήση πεπερασμένων στοιχείων παρέχει μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος, αν και στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι δύσκολη η σύνδεση της με το δείκτη κατάταξης PCN. Πέραν της ανακρίβειας του συστήματος πιθανότατα αυτό συμβαίνει και γιατί ο συγκεκριμένος δείκτης κατάταξης επηρεάζεται άμεσα από το ACN. Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν αεροσκάφη με μεγάλες τιμές του ACN κατά συνέπεια και το PCN έχει ένα περιορισμένο πεδίο τιμών. Λαμβάνοντας υπόψη και τα αποτελέσματα των υπολοίπων μεθόδων προκύπτει ότι η μέθοδος ACN/PCN παρουσιάζει μία δυσκολία εφαρμογής σε ιδιαίτερα ισχυρά οδοστρώματα όπως αυτό του ΔΑΑ.

Παρόλα αυτά πρέπει να παρατηρηθεί ότι η τιμή του PCN που προκύπτει από αναλυτικές μεθόδους είναι μία εύλογη και σχετικά ασφαλής τιμή σύμφωνα με τη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος ενώ οι τιμές που δίνουν ορισμένες άλλες μέθοδοι, όπως για παράδειγμα η μέθοδος της FAA, παρουσιάζουν μία αυξημένη τιμή σε σχέση με τις αναλύσεις.

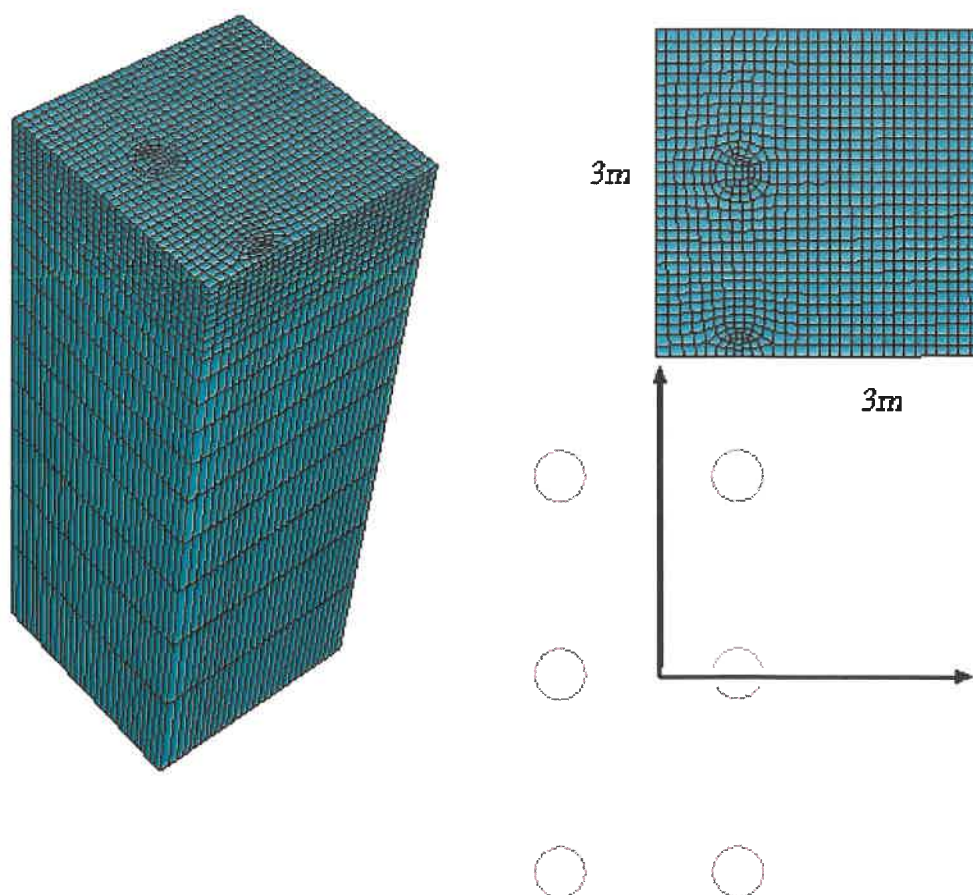
6 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΤΟΥ ΔΑΑ ΣΤΗΝ ΕΠΙΒΟΛΗ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΤΟΥ A380

Στο πλαίσιο της διερεύνησης της επάρκειας του οδοστρώματος στην επιβολή φορτίων μεγάλων αεροσκαφών πραγματοποιήθηκε προσομοίωση του οδοστρώματος για τη φόρτιση του A380. Η διερεύνηση της επάρκειας του οδοστρώματος στην επιβολή του φορτίου του νέου αεροσκάφους A380 της Airbus παρουσιάζει ενδιαφέρον, παρόλο που μέχρι στιγμής το αεροσκάφος δεν χρησιμοποιεί το αεροδρόμιο. Το αεροσκάφος φαίνεται στην εικόνα 6.1 που ακολουθεί.



Εικόνα 6.1: Αεροσκάφος A380

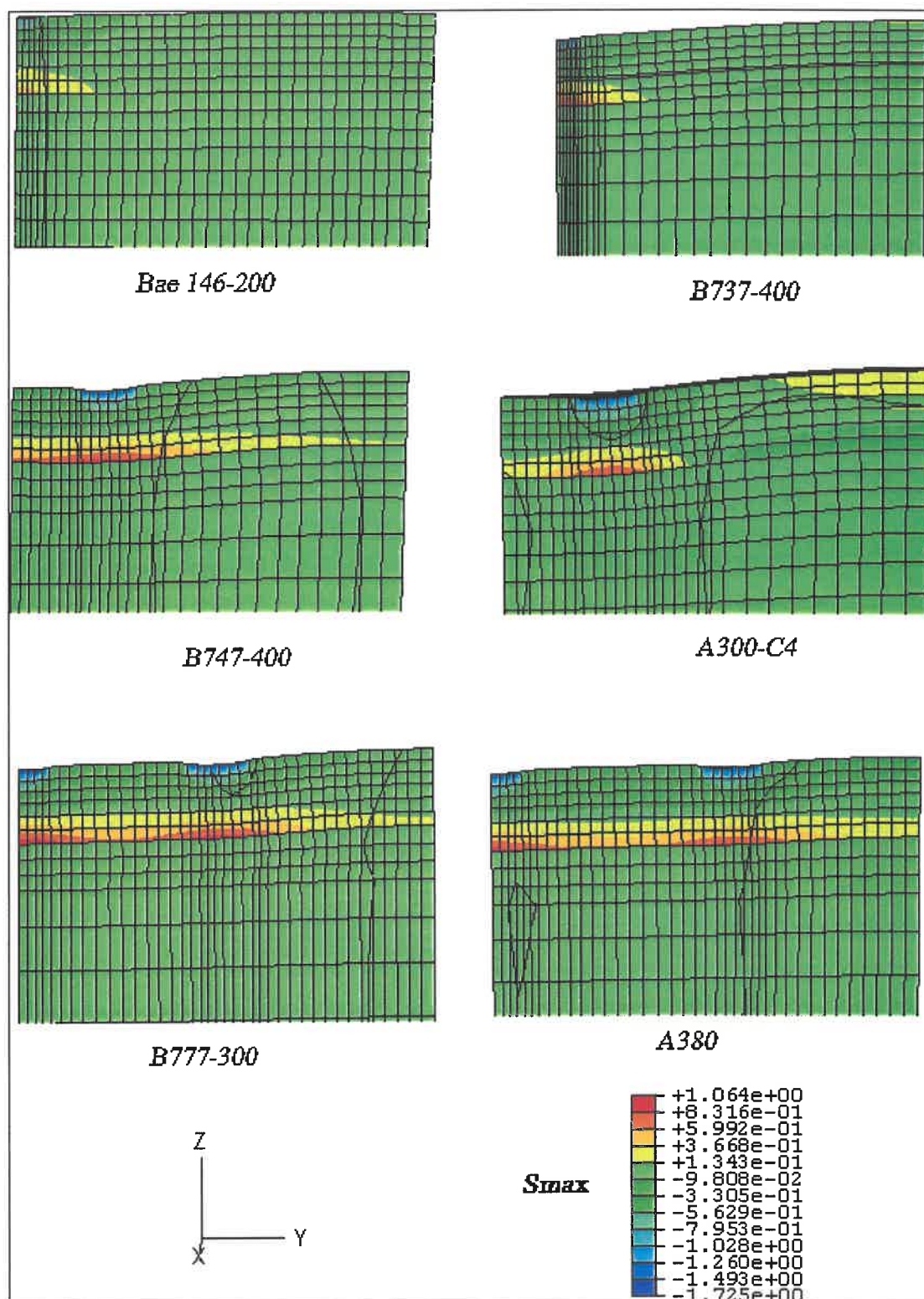
Το κύριο σύστημα προσγείωσης τροχών του A380 αποτελείται από δύο φορεία διπλού δίδυμου τροχού (4 τροχοί) και δύο φορεία διπλού τρίδυμου(dual tridem -6 τροχοί) συμμετρικά μεταξύ τους. Έρευνες και μελέτη της διεθνούς βιβλιογραφίας έχει δείξει ότι το φορείο του διπλού τρίδυμου τροχού έχει την δυσμενέστερη επίδραση στο οδόστρωμα και ότι η αλληλεπίδραση ανάμεσα στο φορείο του διπλού δίδυμου τροχού και το φορείο του διπλού τρίδυμου τροχού είναι πρακτικά ασήμαντη. Κατά συνέπεια η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για το φορείο των 6 τροχών. Λαμβάνοντας υπόψη τη συμμετρία του συστήματος προσγείωσης προκύπτει το προσομοίωμα του σχήματος 6.1.



Σχήμα 6.1: Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων με φόρτιση από το α/φ Α380

Με τη βοήθεια του προσομοιώματος υπολογίστηκαν οι μέγιστες οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται στον πυθμένα της σταθεροποιημένης στρώσης και με τη βοήθεια του νόμου κόπωσης υπολογίστηκε ο αριθμός των επιτρεπόμενων διελεύσεων του αεροσκάφους. Από την ανάλυση προέκυψε ότι το οδόστρωμα μπορεί να αντέξει περίπου 360 διελεύσεις του Α380 ετησίως. Στην περίπτωση που θα απαιτηθεί πιο εκτεταμένη χρήση του οδοστρώματος από το συγκεκριμένο αεροσκάφος θα χρειαστεί περιοδικός έλεγχος και συντήρηση αυτού.

Στο σχήμα 6.2 που ακολουθεί φαίνεται η κατανομή των οριζόντιων τάσεων (η μέγιστη από τις S_{xx} και S_{yy} κάθε φορά) για το Α380 αλλά και για τα πέντε αεροσκάφη που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η απεικόνιση πραγματοποιείται στο κατακόρυφο επίπεδο YZ που διέρχεται από το κέντρο των κυκλικών επιφανειών επαφής των φορτίων. Ο κλίμακα παραμόρφωσης του φορέα καθώς επίσης και τα όρια της μέγιστης και της ελάχιστης οριζόντιας τάσης έχουν καθοριστεί να είναι τα ίδια για όλα τα αεροσκάφη έτσι ώστε να υπάρχει δυνατότητα σύγκρισης. Σε όλες τις περιπτώσεις η μέγιστη οριζόντια εφελκυστική τάση εμφανίζεται στον πυθμένα της σταθεροποιημένης βάσης.

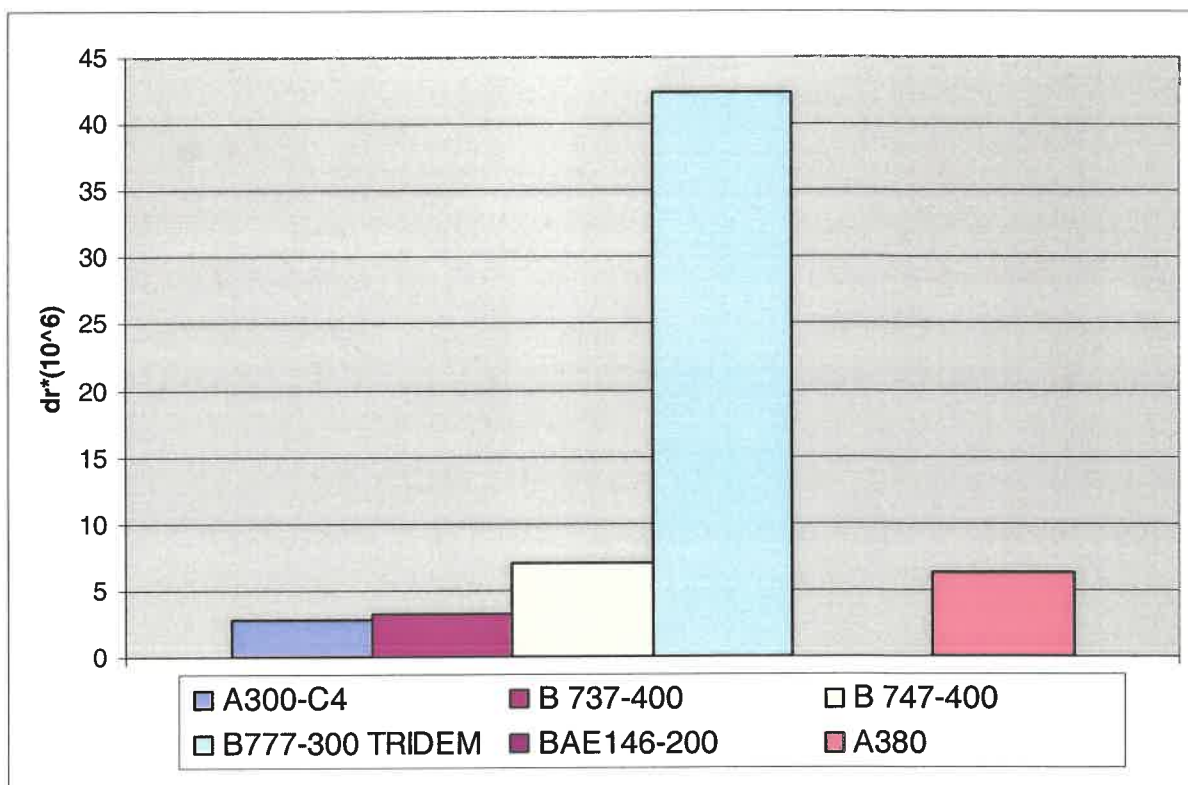


Σχήμα 6.2: Κατανομή οριζόντιας τάσης για τα α/φ A300-C4, B737-400, B747-400, Bae146-200, B777-300 και A380.

Χρησιμοποιώντας τις μέγιστες οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις που υπολογίστηκαν από την ανάλυση του οδοστρώματος με τα πεπερασμένα στοιχεία και με τη βοήθεια του νόμου κόπωσης πραγματοποιήθηκε ένας υπολογισμός του επιτρεπόμενου αριθμού διελεύσεων κάθε αεροσκάφους. Στη συνέχεια παραθέτουμε συγκεντρωτικά τη σχετική φθορά που προκαλείται από κάθε είδος αεροσκάφους με σκοπό μία σύγκριση τους με τη φθορά που προκαλείται από το A380. Όπως προκύπτει από τα στοιχεία του πίνακα 6.1 και του σχήματος 6.3 που ακολουθεί το B777-300 και το B747-400 προκαλούν μεγαλύτερη σχετική φθορά στο οδόστρωμα από το A380.

Αεροσκάφος	Σχετική φθορά (dr)
A300-C4	$2,78277 \cdot 10^{-6}$
B 737-400	$3,2023 \cdot 10^{-6}$
B 747-400	$7,01547 \cdot 10^{-6}$
B777-300 TRIDEM	$4,22937 \cdot 10^{-5}$
BAE146-200	$1,88077 \cdot 10^{-8}$
A380	$6,31385 \cdot 10^{-6}$

Πίνακας 6.1: Σχετική Φθορά οδοστρώματος ανά αεροσκάφος



Σχήμα 6.3: Σχετική Φθορά οδοστρώματος ανά αεροσκάφος

7 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε μια προσπάθεια διερεύνηση της μεθόδου δομικής κατάταξης οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACN-PCN του ICAO για τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα. Για την πραγματοποίηση της ανάλυσης επιλέχθηκαν αντιπροσωπευτικές μέθοδοι προσδιορισμού του PCN από τη διεθνή βιβλιογραφία και διερευνήθηκε η εφαρμοσιμότητα τους στο ημιάκαμπτο οδόστρωμα του ΔΑΑ. Παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα των μεθόδων και κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί διερεύνηση της ευαισθησίας τους στη μεταβολή ορισμένων βασικών παραμέτρων που καθορίζουν τη συμπεριφορά των ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης προέκυψε ότι οι μέθοδοι προσδιορισμού του PCN δεν μπορούν να δώσουν ακριβή τιμή του δείκτη κατάταξης καθώς και της φέρουσας ικανότητας στην οποία αντιστοιχεί. Γι' αυτό πραγματοποιήθηκε ένας αναλυτικός υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος με τη βοήθεια υπολογιστικών εργαλείων που βασίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και στη μέθοδο των ελαστικών επάλληλων στρώσεων. Στη συνέχεια ελέγχθηκε η φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος και έγινε μία προσπάθεια σύνδεσης της με τον δείκτη κατάταξης PCN.

Από την παραπάνω διαδικασία προέκυψε ότι:

- Τα αποτελέσματα των μεθόδων προσδιορισμού του PCN παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις. Η διερεύνηση τους έδειξε ότι άλλες μέθοδοι είναι λιγότερο και άλλες περισσότερο ευαίσθητες στη μεταβολή βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων και πιθανώς εκεί να οφείλονται και οι μεγάλες διαφοροποιήσεις που προέκυψαν.
- Από την ανάλυση της επιρροής της μεταβολής του CBR της στρώσης έδρασης στον υπολογισμό του PCN προέκυψε ότι μια αύξηση του CBR προκαλεί μεγάλη αύξηση της τιμής του PCN στα αποτελέσματα όλων των μεθόδων, το οποίο δεν είναι αναμενόμενο με βάση τις παραδοχές της μεθόδου κατάταξης.
- Επίσης οι μέθοδοι δεν λαμβάνουν υπόψη την επιρροή του μέτρου ελαστικότητας των υλικών στους υπολογισμούς παρόλο που αυτό επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά των ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων.
- Οι περισσότερες μέθοδοι δίνουν μία τιμή του PCN του ΔΑΑ που είναι αρκετά μεγαλύτερη από την επίσημη δημοσιευμένη τιμή του αεροδρομίου. Το γεγονός αυτό είναι μερικώς αναμενόμενο, δεδομένου ότι η φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος όπως προέκυψε από την ανάλυση του οδοστρώματος με σύγχρονες μεθόδους είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Ορισμένες όμως μέθοδοι, όπως για παράδειγμα αυτή της FAA,

- προτείνουν μία υπερβολικά μεγάλη τιμή του PCN η οποία δεν αντιστοιχεί στη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος που έχει υπολογιστεί από τις αναλύσεις.
- Επιπλέον οι μέθοδοι προσδιορισμού του PCN χρησιμοποιούν εμπειρικές προσεγγίσεις, παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στα αποτελεσμάτων τους, δεν συγκλίνουν σε μία τιμή του δείκτη κατάταξης και δεν μπορούν να καθορίσουν αξιόπιστα τη φέρουσα ικανότητα ενός ημιάκαμπτου οδοστρώματος. Αντιθέτως, από την ανάλυση του οδοστρώματος των διαδρόμων του ΔΑΑ με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων προέκυψε ότι με αυτόν τον τρόπο μπορεί να προσδιοριστεί η φέρουσα ικανότητας του λαμβάνοντας υπόψη κριτήρια αστοχίας των ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Πιο συγκεκριμένα η ανάλυση έδειξε ότι το οδόστρωμα μπορεί να φέρει με ασφάλεια την προβλεπόμενη φόρτιση.
 - Κατά τη διαδικασία της ανάλυσης υπήρξαν ενδείξεις ότι το ACN μπορεί να μην αποτελεί έναν ακριβή δείκτη έκφρασης της επίδρασης ενός αεροσκάφους στο οδόστρωμα. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι ορισμένα αεροσκάφη με ACN τιμές μικρότερες από άλλων προκαλούν μεγαλύτερη φθορά σε αυτό. Η διαπίστωση αυτή επηρεάζει άμεσα και το δείκτη της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος PCN, αφού αυτός υπολογίζεται με βάση το ACN.
 - Για να ξεπεραστεί η παραπάνω δυσκολία πραγματοποιήθηκε ο προσδιορισμό ενός εναλλακτικού τρόπου σύνδεσης της φέρουσας ικανότητας με τον δείκτη κατάταξης. Στα πλαίσια αυτής της προσπάθειας διαπιστώθηκε ότι στο συγκεκριμένο παράδειγμα υπάρχει μία δυσκολία σύνδεσης της φέρουσας ικανότητας με το δείκτη κατάταξης PCN. Αυτό συμβαίνει διότι ο συγκεκριμένος δείκτης κατάταξης υπολογίζεται με βάση το ACN και επιπλέον δεν υπάρχουν αεροσκάφη με τόσο μεγάλες τιμές του ACN. Τούτο υποδηλώνει ότι στην πράξη το PCN έχει ένα περιορισμένο πεδίο τιμών με αποτέλεσμα η μέθοδος ACN/PCN να παρουσιάζει μία δυσκολία εφαρμογής σε ιδιαίτερα ισχυρά οδοστρώματα όπως αυτό του ΔΑΑ.
 - Παρόλα αυτά πρέπει να τονιστεί ότι η τιμή του PCN που εκτιμάται από την ανάλυση του οδοστρώματος με χρήση πεπερασμένων στοιχείων είναι μία εύλογη και σχετικά ασφαλής τιμή σύμφωνα με τη φέρουσα ικανότητας του οδοστρώματος. Η αριθμητική τιμή 63 θα μπορούσε να αποτελέσει ένα κάτω όριο του PCN δεδομένου ότι με βάση τις διερευνήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί το οδόστρωμα μπορεί να εξυπηρετήσει ασφαλώς διελεύσεις από αεροσκάφη με ACN τιμές μεγαλύτερες από 63. Συνεπώς, με σχετική ασφάλεια λόγω της μειωμένης αξιοπιστίας εκτίμησης της επίδρασης των αεροσκαφών μέσω του ACN, η δημοσιευμένη τιμή θα μπορούσε να είναι έως και 4-6 μονάδες υψηλότερη.

Καταλήγοντας, οι σημαντικές διακυμάνσεις στα αποτελέσματα των μεθόδων προσδιορισμού του PCN δεν παρέχουν σαφή εικόνα για την φέρουσα ικανότητα ενός οδοστρώματος. Αντιθέτως, σύγχρονες αναλυτικές μέθοδοι παρέχουν μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του PCN. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι με αυτόν τον τρόπο μια ενδεχόμενη μεταβολή της τιμής του PCN με το χρόνο μπορεί να προσδιοριστεί, πραγματοποιώντας την ανάλυση με στοιχεία από επί τόπου μετρήσεις. Αυτή η τακτική θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί περιοδικά από τις αρχές του αεροδρομίου για τον έλεγχο της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος.

Από την παραπάνω διαδικασία προκύπτει ότι στη σημερινή του μορφή το PCN δεν φαίνεται να αποτελεί τον πλέον κατάλληλο και αξιόπιστο δείκτη έκφρασης της φέρουσας ικανότητας των ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων. Γι' αυτό προτείνεται μία περαιτέρω διερεύνηση στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης της μεθόδου ACN/PCN για τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα με διαχωρισμό από τα εύκαμπτα και ένας έλεγχος των δεικτών ACN και PCN. Εναλλακτικά θα μπορούσε να γίνει μία προσπάθεια προσδιορισμού ενός καταλληλότερου τρόπου σύνδεσης της φέρουσας ικανότητας με ένα διαφορετικό δείκτη κατάταξης που να στηρίζεται σε ένα πιο σύγχρονο προσομοίωμα απ' ότι η ACN/PCN.

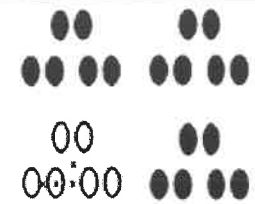
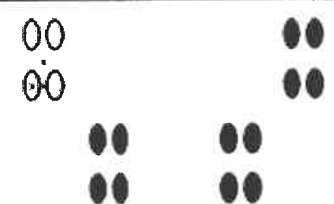
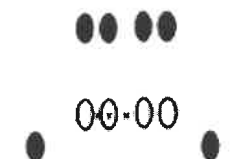
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ. Γ. Αμπακούμκιν, Α. Λοΐζος, **Δομική αξιολόγηση οδοστρωμάτων με τη μέθοδο ACN-PCN**, Σημειώσεις για το μάθημα των αεροδρομίων, Ε.Μ.Π, Αθήνα 2004
- [2] Α. Loizos, G. Charonitis, **Investigation of classification Parameters and assumptions for Rigid and Flexible Airfield Pavements**, 6th International Conference on Bearing Capacity of Roads, Railways and Airports, Trondheim 2005
- [3] Federal Aviation Administration, **Airport Pavement Design and Evaluation**, Advisory Circular No 150/5320-6D, 1995
- [4] Federal Aviation Administration, **Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength-PCN**, Advisory Circular No 150/5335-5 ,1983
- [5] Engineer Research and Development Centre (ERDC) , **Unified facilities Criteria (UFC)**, USA, May 2001
- [6] International Civil Aviation Organisation, **“Aerodrome Design Manual”(Part 3- Pavements)**, ICAO Publications, 1983
- [7] Directorate of Civil Engineering Services, **A Guide to Airfield Pavement Design and Evaluation**, Property Services Agency, Department of the Environment, United Kingdom, 1989
- [8] Σ. Κόλιας, Α. Λοΐζος, **Σημειώσεις οδοστρωμάτων**, εκδόσεις Ε.Μ.Π. , Αθήνα 1999
- [9] Μ. Παπαδρακάκης, **Ανάλυση Φορέων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων**, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2001
- [10] Γ. Ι. Τσαμασφύρος, **Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων**, Εκδόσεις Συμεών, 1994
- [11] Hibbitt, Karlsson, Sorenson, Inc , **ABAQUS user’s manual**, 2000
- [12] J. T. Balbo, J. P. Cintra, **Fatigue Verification Criteria For Semi-rigid Pavements**, 2nd International Conference on Asphalt Mixtures and Pavements, Thessaloniki 1993

- [13] A. Loizos, G. Charonitis, I. Chasiotou, **Classification of Airport Pavements: A simple Methodology**, Journal of public Works Management & Policy, Vol 5, 2000.
- [14] A. Loizos, G. Charonitis, **Alternative Aircraft Loading Index For Pavement Structural Analysis**, ASCE journal of transportation Engineering Vol 125,1999
- [15] R. Blab, **Analytische Methoden zur Modellierung der Verformungseigenschaften flexibler Fahrbahnaufbauten**, ISTU, Wien 2001

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κεφάλαιο 1^ο

 <u>SINGLE</u> F-4, F-5, F-10, F-14, F-15, F-16, F/A-18, F-100, F-106, F-111, T-33, T-37, T-38, T-39, A-7, A-10, A-37, P-2, S-3, E-2, C-12, C-20, C-21, C-23, OV-1, OV-10, UH-60	 <u>TWIN TANDEM</u> C-141, KC-135, DC-8, B-1, DC-10-10, DC-10-10CV, B-2, L-1011, B-707, B-757, B-767, E-3, VC-137, A-300, EC-18	 <u>TWIN DELTA TANDEM</u> C-5
 <u>TWIN</u> DC-9, CH-54, B-727, B-737, T-43, C-7, C-9, C-140, C-22, P-3, CH-47	 <u>TWIN TANDEM</u> DC-10-30, KC-10	 <u>TRI-TANDEM</u> C-17
 <u>SINGLE TANDEM</u> C-130, C-27	 <u>TWIN TANDEM</u> B-747, E-4, VC-25	 <u>TWIN-TWIN BICYCLE</u> B-52

Πίνακας 1:Διάταξη τροχών αεροσκαφών της UFC [5]

Table 5-1
Equivalency Factors for Army and Air Force Pavements

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

¹ Not used as base course.

Table 5-2
Equivalency Factors for Navy and Marine Corps Pavements

Material	Equivalency Factors
25 millimeters (1 inch) of lime-stabilized subbase may be substituted for	30 millimeters (1.2 inches) of unstabilized subbase course
25 millimeters (1 inch) of cement-stabilized subbase may be substituted for	30 millimeters (1.2 inches) of unstabilized subbase course
25 millimeters (1 inch) of cement-stabilized base may be substituted for	38 millimeters (1.5 inches) of unstabilized base course
25 millimeters (1 inch) of bituminous base may be substituted for	38 millimeters (1.5 inches) of unstabilized base course

Πίνακας 2: Συντελεστές μετατροπής σταθεροποιημένων στρώσεων ημιάκαμπτων οδοστρωμάτων της μεθόδου UFC για το ναυτικό και την αεροπορία [5].

Κεφάλαιο 2°

Ανατολικός Διάδρομος 03R-21L							
	Αεροσκάφος	Μέγιστο βάρος απογείωσης (lbs)	Σύστημα προσγείωσης	Ετήσια κυκλοφορία			Μέση ετήσια κυκλοφορία
				2002	2003	2004	
1	Airbus A300-600	363763	DT	3831	4532	5374	4579
2	Airbus A321	181220	D	10014	9612	14002	11209
3	Airbus A340-300	566575	DT	968	1080	1104	1051
4	Canadair Challenger 601/604	53000	D	9569	13790	13195	12185
5	Boeing B727-200	216050	D	269	406	323	333
6	Boeing B737-400	150000	D	28892	32732	38506	33377
7	Boeing B747-400	870000	DDT	318	253	230	267
8	Boeing B757-200	255000	DT	1546	1136	770	1151
9	Mc Donnell Douglas MD-11	660000	DT	698	717	559	658
10	British Aerospace Bae146-300F	104000	D	385	492	902	593
11	British Aerospace BAE146-200	89000	D	104	495	990	530
12	Fokker F-50	41865	D	3594	4578	7811	5328

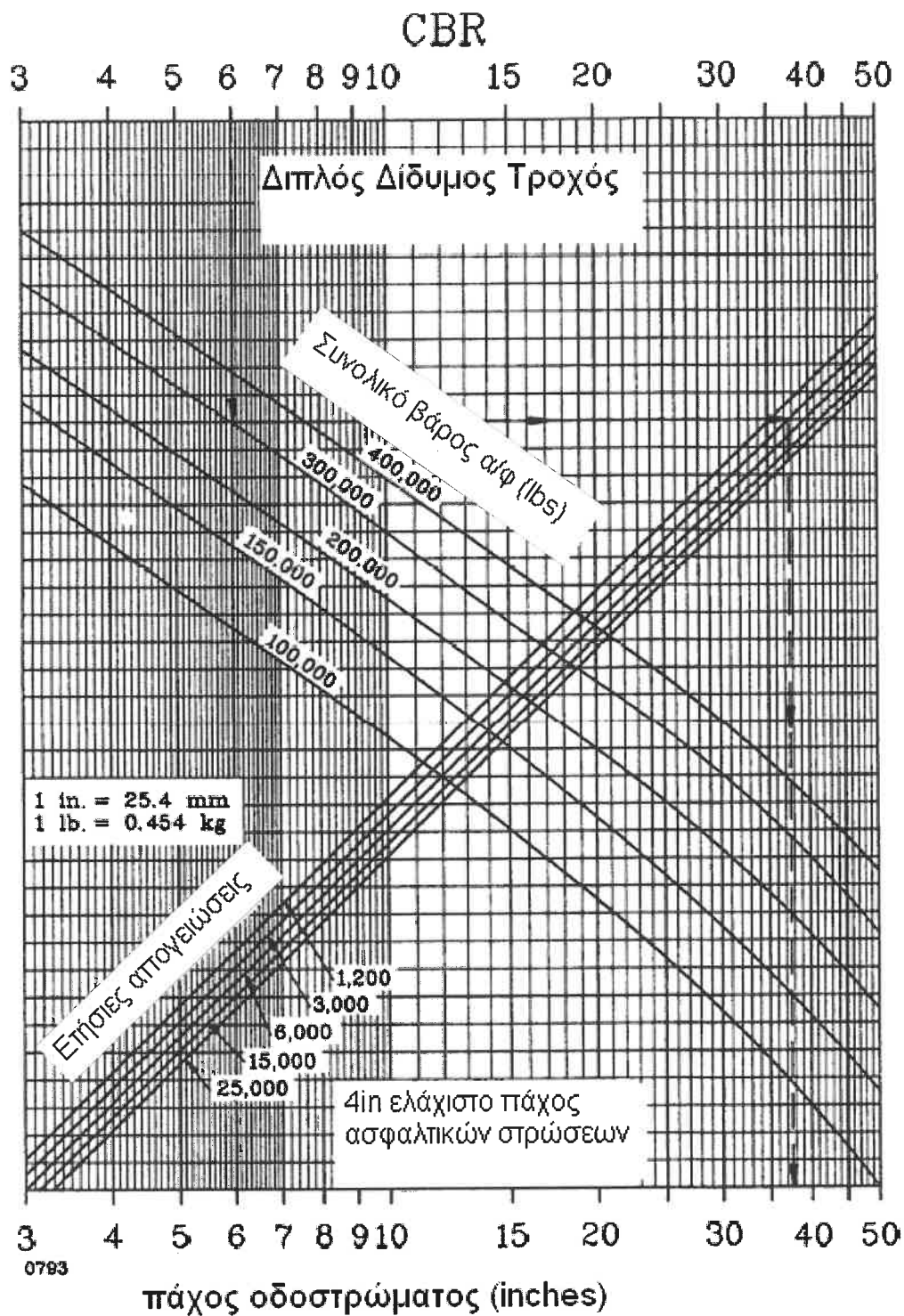
Πίνακας 3.: Σύνθεση κυκλοφορίας ανατολικού διαδρόμου

	Αεροσκάφος	Μέγιστο βάρος απογείωσης (lbs)	Διάδρομος 03R-21L		Διάδρομος 03L-21R	
			Μέση ετήσια κυκλοφορία	Πάχος οδοστρ/τος (inches)	Μέση ετήσια κυκλοφορία	Πάχος οδοστρώματος (inches)
1	Airbus A300-600	363763	3225	32	4579	33
2	Airbus A321	181220	10044	29	11209	29,5
3	Airbus A340-300	566575	1215	25	1051	25
4	Canadair Challenger 601/604	53000	14125	15	12185	14
5	Boeing B727-200	216050	348	25	333	25
6	Boeing B737-400	150000	33442	28	33377	28
7	Boeing B747-400	870000	251	31	267	31
8	Boeing B757-200	255000	843	28	1151	29
9	Mc Donnell Douglas MD-11	660000	492	27	658	28
10	British Aerospace Bae146-300F	104000	638	19	593	19
11	British Aerospace BAE146-200	89000	545	19	530	19
12	Fokker F-50	41865	5725	14	5328	14

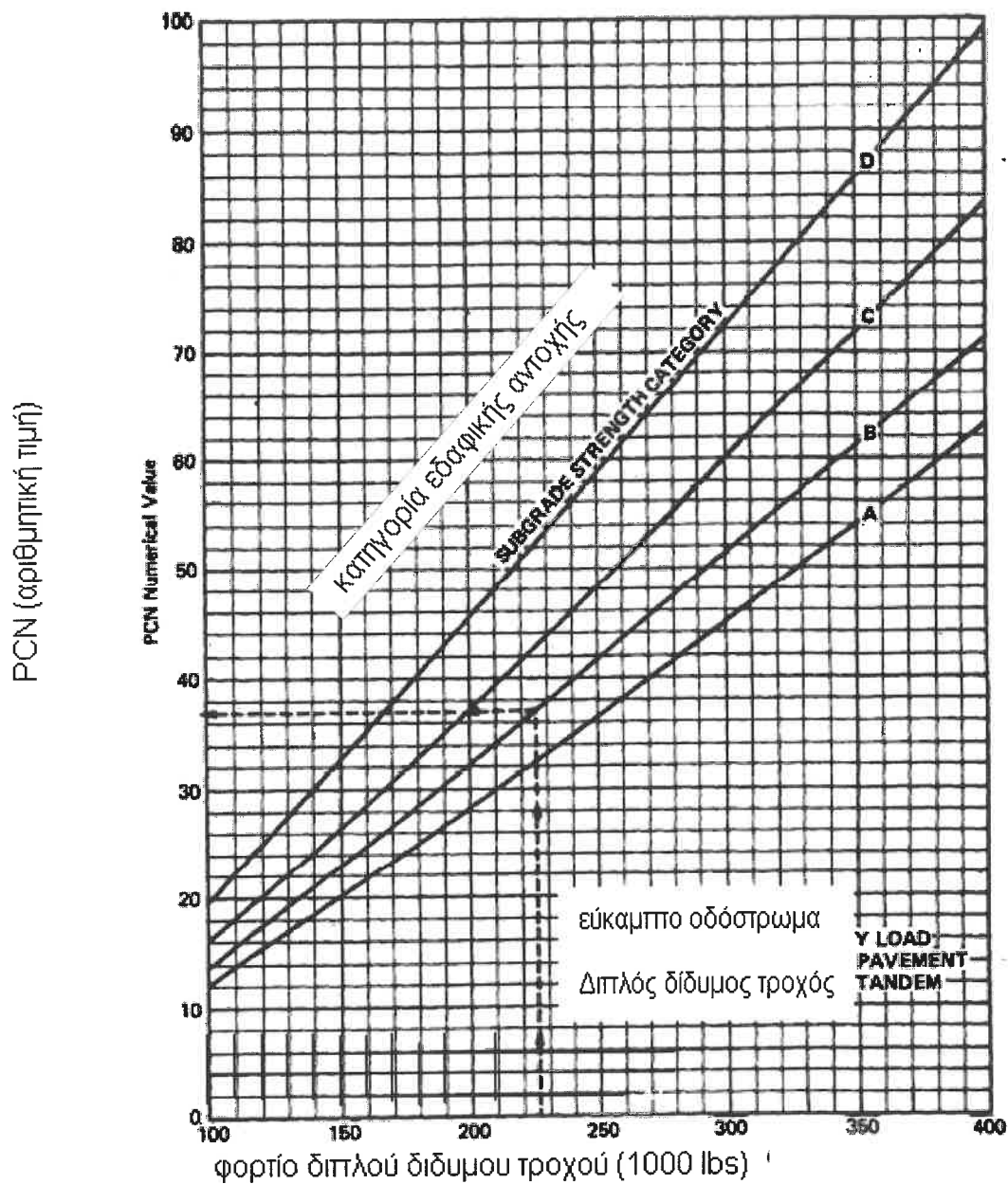
Πίνακας 4: Απαιτούμενο πάχος οδοστρώματος ανά αεροσκάφος και ανά διάδρομο προσγείωσης, μέθοδος FAA

ΔΙΑΔΡΟΜΟΣ 03R-21L										
	Αεροσκάφος	Μέγιστο βάρος απογείωσης (lbs)	Σύστημα προσγείωσης	Μέση ετήσια κυκλοφορία	R2	LOGR2	W1 (lbs)	W2 (lbs)	LOGR1	R1
1	Airbus A300-600	363763	DT	3225	3225	3,5085	43197	43197	3,5085	3225
2	Airbus A321	181220	D	10044	6027	3,7801	43197	43040	3,7732	5932
3	Airbus A340-300	566575	DT	1215	1215	3,0846	43197	67281	3,8496	7073
4	Canadair Challenger 601/604	53000	D	14125	8475	3,9281	43197	12588	2,1205	132
5	Boeing B727-200	216050	D	348	209	2,3193	43197	51312	2,5278	337
6	Boeing B737-400	150000	D	33442	20065	4,3024	43197	35625	3,9072	8076
7	Boeing B747-400	870000	DDT	251	251	2,3997	43197	51656	2,6241	421
8	Boeing B757-200	255000	DT	843	843	2,9258	43197	30281	2,4497	282
9	Mc Donnell Douglas MD-11	660000	DT	492	492	2,6920	43197	78375	3,6260	4227
10	British Aerospace Bae146-300F	104000	D	638	383	2,5827	43197	24700	1,9530	90
11	British Aerospace BAE146-200	89000	D	545	327	2,5145	43197	21138	1,7590	57
12	Fokker F-50	41865	D	5725	3435	3,5359	43197	9943	1,6964	50
	ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΔΙΕΛΕΥΣΕΙΣ									29901

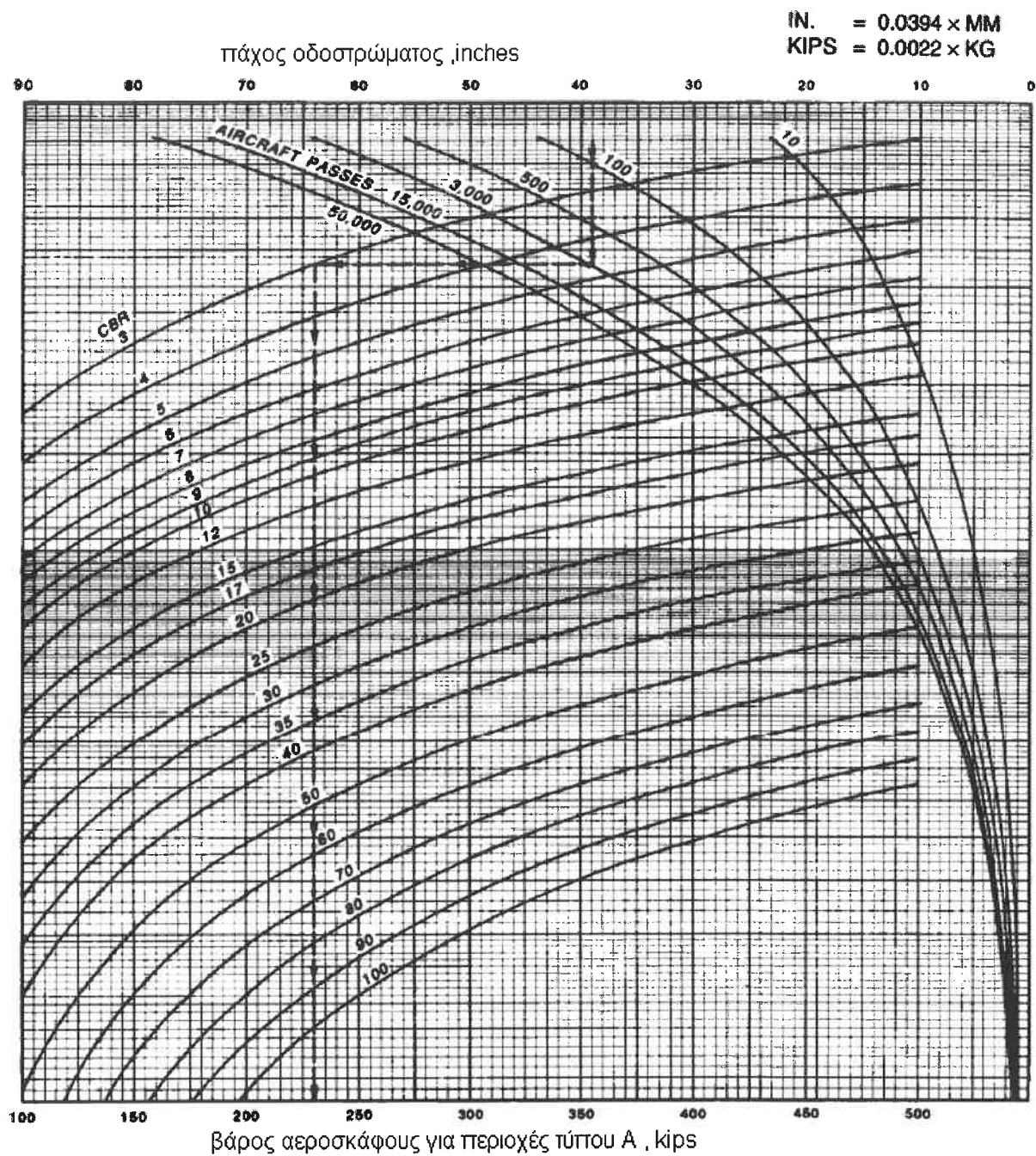
Πίνακας 5 : Υπολογισμός ισοδύναμων ετήσιων διελεύσεων αεροσκάφους σχεδιασμού ανατολικού διαδρόμου, μέθοδος FAA



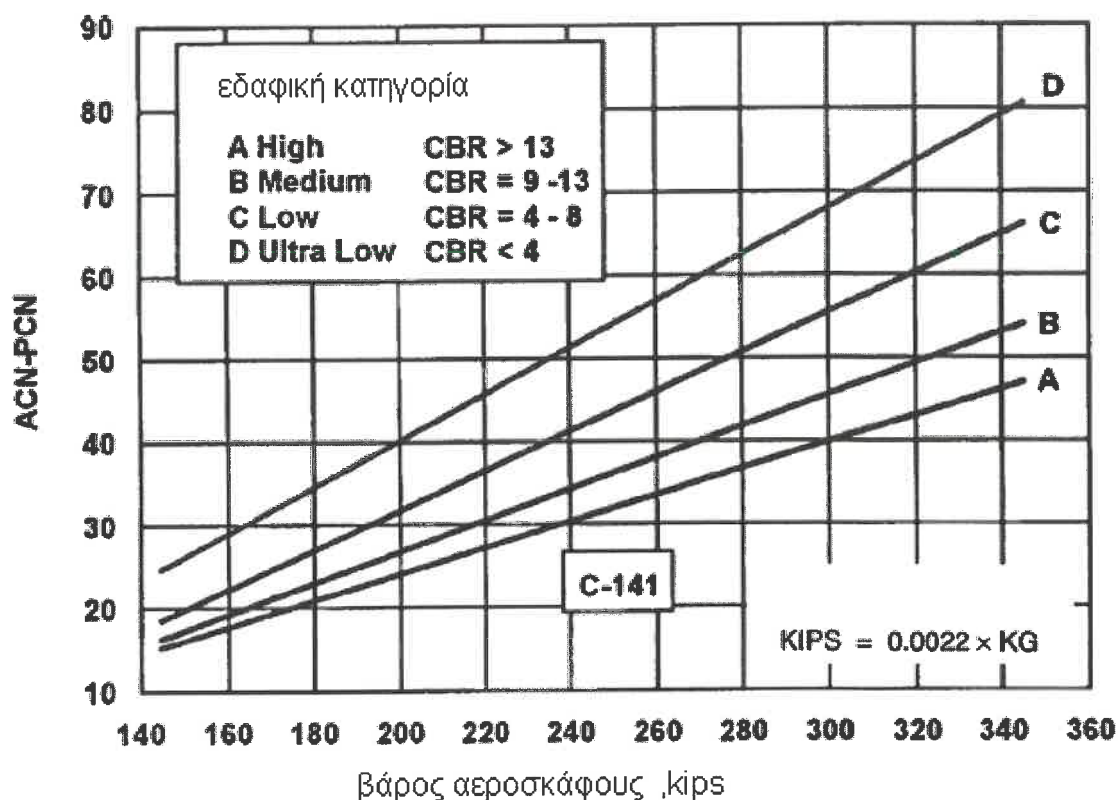
Διάγραμμα 1: Καμπύλες σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων, για σύστημα προσγείωσης α/φ διπλού δίδυμου τροχού [3].



Διάγραμμα 2: Διάγραμμα προσδιορισμού του PCN σε εύκαμπτο οδόστρωμα για σύστημα προσγείωσης διπλού δίδυμου τροχού του α/φ σχεδιασμού [4]



Διάγραμμα 3: Καμπύλες σχεδιασμού για το C-141, μέθοδος UFC για το ναυτικό [5]



Διάγραμμα 4: Διάγραμμα υπολογισμού PCN, μέθοδος UFC για το ναυτικό[5]

	Α/Φ	ACN			Pass-to-covera ge ratio	Ετήσιες διελεύσεις 03R- 21L	covera ges στη διάρκει α ζωής	Λόγος ACN	Συντελεσ τής FMTF	Τροποπο ιημένος συντελεσ τής FMTF	Ισοδύναμ ες διελεύσει ς
		10	6	9							
1	AIRBUS A320 D	40	44	41	3,2	11209	70056	0,554	1,3	0,72	1500
2	AIRBUS A300-600 DT	56	68	59	1,6	4579	57238	0,797	1,26	1,00	10000
3	DC-10-30/40 DT	61	74	64	1,6	1051	13138	0,865	1,01	0,87	6786
4	antover D	10	12	11	3,2	12185	76156	0,149	1,26	0,19	
5	BOEING 727-200 D	55	62	57	3,2	333	2081	0,770	0,71	0,55	643
6	BOEING 737-400 D	37	41	38	3,2	33377	208606	0,514	1,41	0,72	2286
7	BOEING 747-400 DT	64	79	68	1,6	267	3338	0,919	0,79	0,73	2857
8	BOEING 757-200 DT	32	39	34	1,6	1151	14388	0,459	1,05	0,48	443
9	MD 11 DT	70	85	74	1,6	658	8225				8225
10	FOKKER F-100 D	27	30	28	3,2	593	3706	0,378	0,7	0,26	
11	BAE 146-200 D	21	23	22	3,2	530	3313	0,297	0,79	0,23	
12	FOKER F50 D	10	12	11	3,2	5328	33300	0,149	1,09	0,16	
											32740

Πίνακας 6: Υπολογισμός ισοδύναμων διελεύσεων για τον ανατολικό διάδρομο ,μέθοδος Διεύθυνσης Υπηρεσιών Πολιτικού μηχανικού Μ. Βρετανίας

Κεφάλαιο 3°

Τύπος α/φ	Ετήσιες διελεύσεις	Απαιτούμενο πάχος (inches)	R ₂	W ₁	W ₂	R ₁
B747-200	300	16	300	43197	49460	447
A300-600	3000	17,5	3000	43197	43197	3000
B737-400	15000	15	9000	43197	35625	3899
Ισοδύναμες διελεύσεις						7346

Πίνακας 7: Υπολογισμός ισοδύναμων ετήσιων διελεύσεων α/φ σχεδιασμού, μέθοδος FAA(ανάλυση ευαισθησίας μεθόδων)

A/φ	ACN			Pass-to-coverage	Διελεύσεις/έτος 03L-21R	coverages στη διάρκεια ζωής	Λόγος ACN	συντελεστής FMTF	τροποποιημένος συντελεστής FMTF	Ισοδύναμες διελεύσεις
	10	6	9							
AIRBUS A300-600 DT	56	68	59	1,6	3000	37500	0,94	1,20	1,12	22000
BOEING 737-400 D	37	41	38	3,2	15000	83333	0,60	1,34	0,81	2800
BOEING 747-200 DDT	59	73	63	1,6	300	3750	1,00	1,00	1,00	3750
										28550

Πίνακας 8: Υπολογισμός ισοδύναμων διελεύσεων α/φ σχεδιασμού, αγγλική μέθοδος, (ανάλυση ευαισθησίας μεθόδων)

Κεφάλαιο 4°

Στοιχεία αεροσκαφών

1) B 747-400 (DDT)

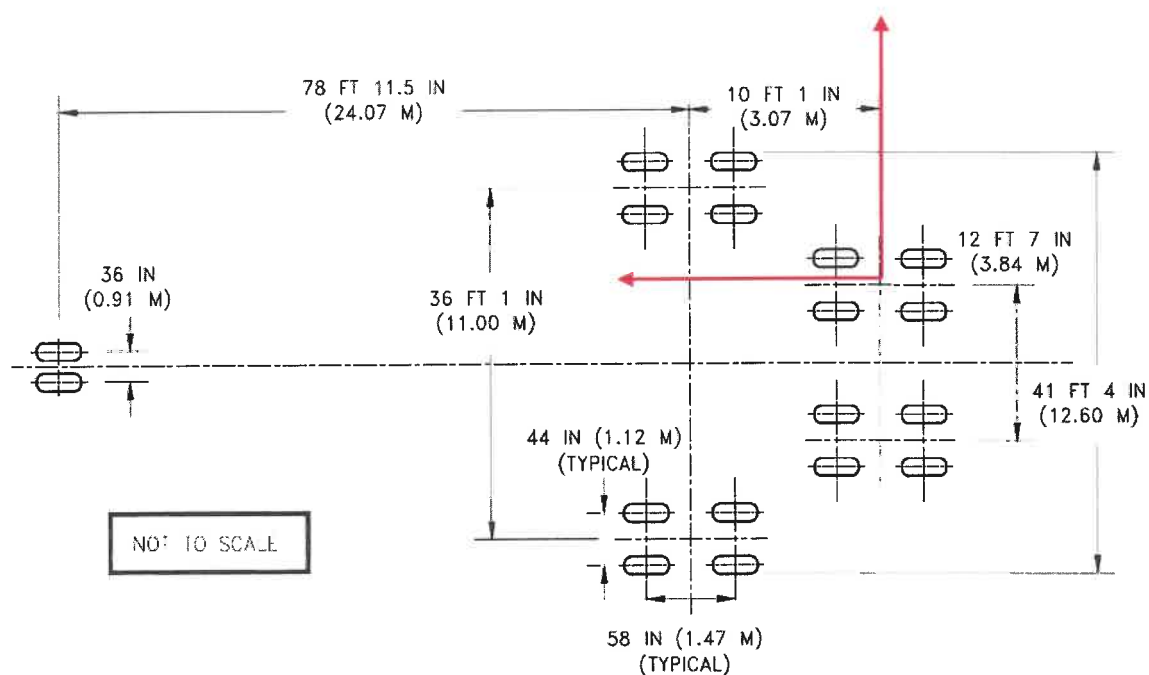
Αριθμός τροχών: 18

Πίεση ελαστικού: $P=1,38 \text{ Mpa}$

Ακτίνα $R=220 \text{ mm}$

Συντεταγμένες τροχών:

	X	Y
1	1359	763
2	2477	763
3	2477	2237
4	1359	2237
5	4940	3837
6	6058	3837
7	6058	5310
8	4940	5310



Σχήμα 1

2) B 777-300- TRIDEM

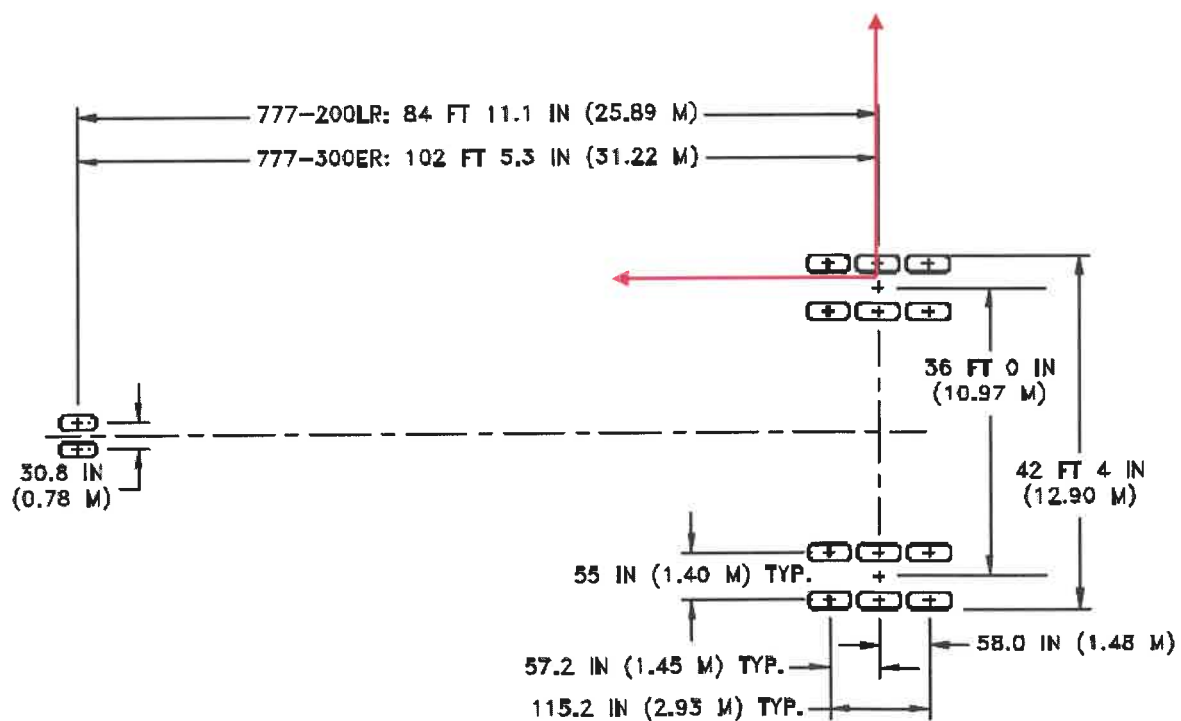
Αριθμός τροχών =14

Πίεση ελαστικού:P=1,53Μpa

Ακτίνα R=245 mm

Συντεταγμένες τροχών:

	X	Y
1	6185	0
2	4785	0
3	6185	1480
4	4785	1480
5	6185	2930
6	4785	2930



Σχήμα 2

3) B 737-400 (D)

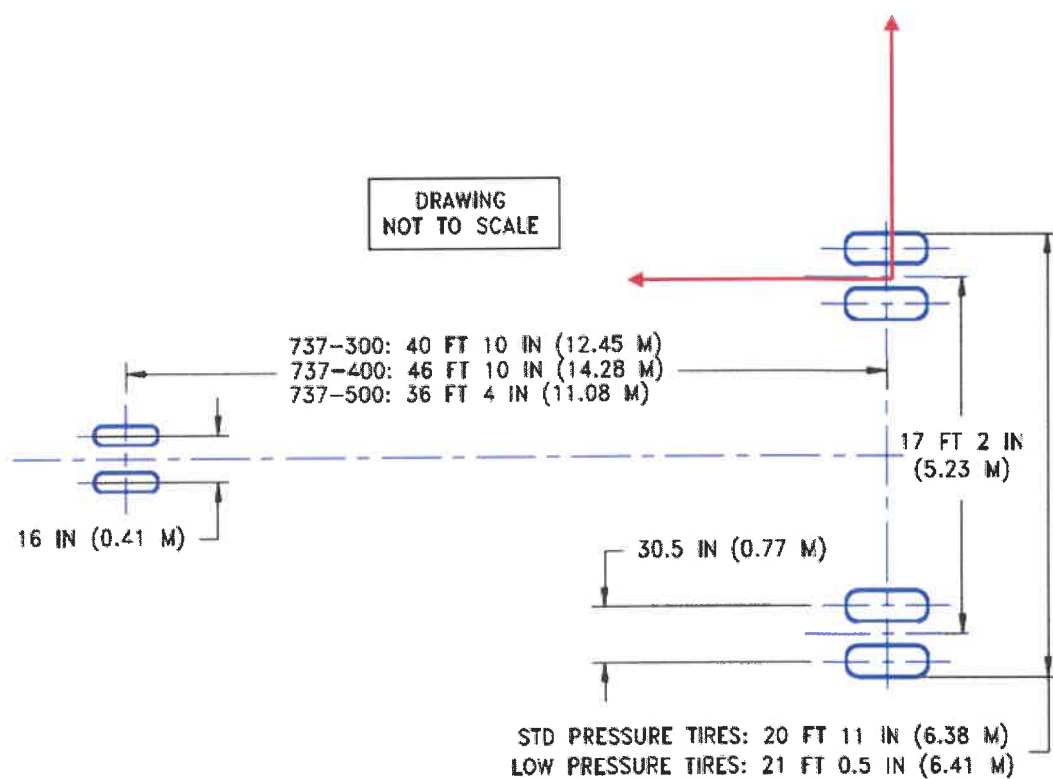
Αριθμός τροχών =6

Πίεση ελαστικού: P=1,3Mpa

Ακτίνα R=198 mm

Συντεταγμένες τροχών:

	X	Y
1	2229	1000
2	3004	1000



Σχήμα 3

4) A 300-C4 (DT)

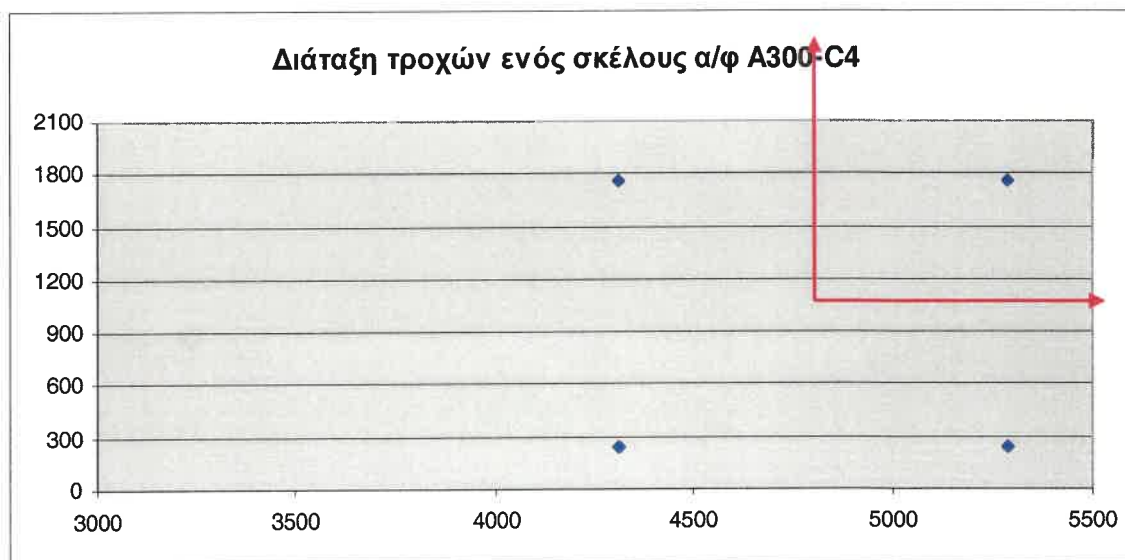
Αριθμός τροχών =10

Πίεση ελαστικού: P=1,241 Mpa

Ακτίνα R=228 mm

Συντεταγμένες τροχών:

	X	Y
1	4312	238
2	5290	238
3	5290	1762
4	4312	1762



Σχήμα 4

5) Bae 146-200 (D)

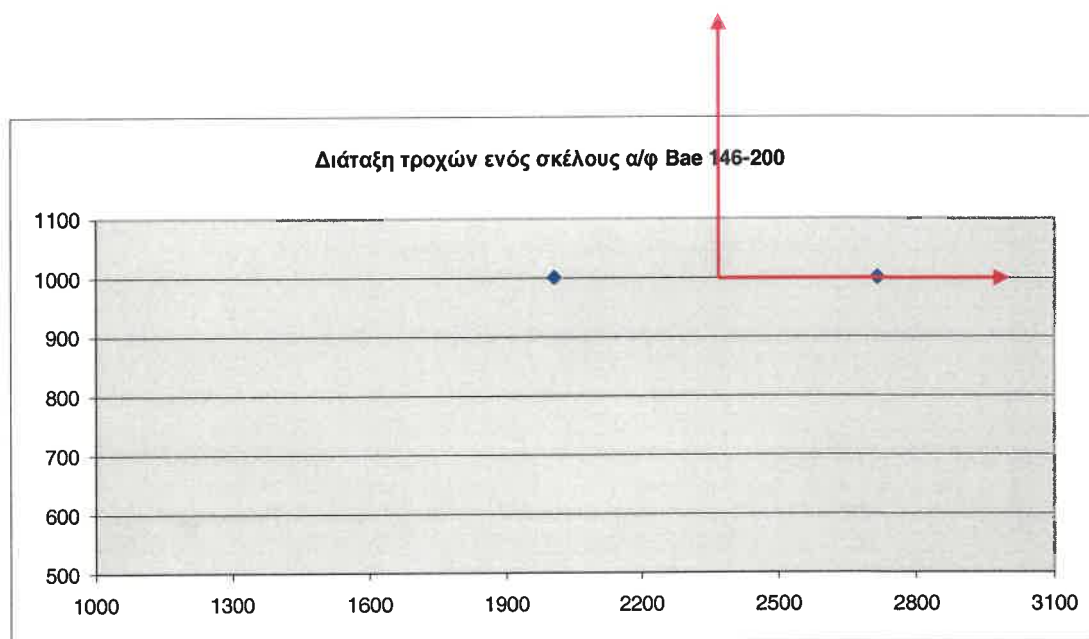
Αριθμός τροχών =6

Πίεση ελαστικού: $P=1,137 \text{ Mpa}$

Ακτίνα $R=167 \text{ mm}$

Συντεταγμένες τροχών:

	X	Y
1	2007	1000
2	2718	1000



Σχήμα 5

6) A 380 (TRIDEM)

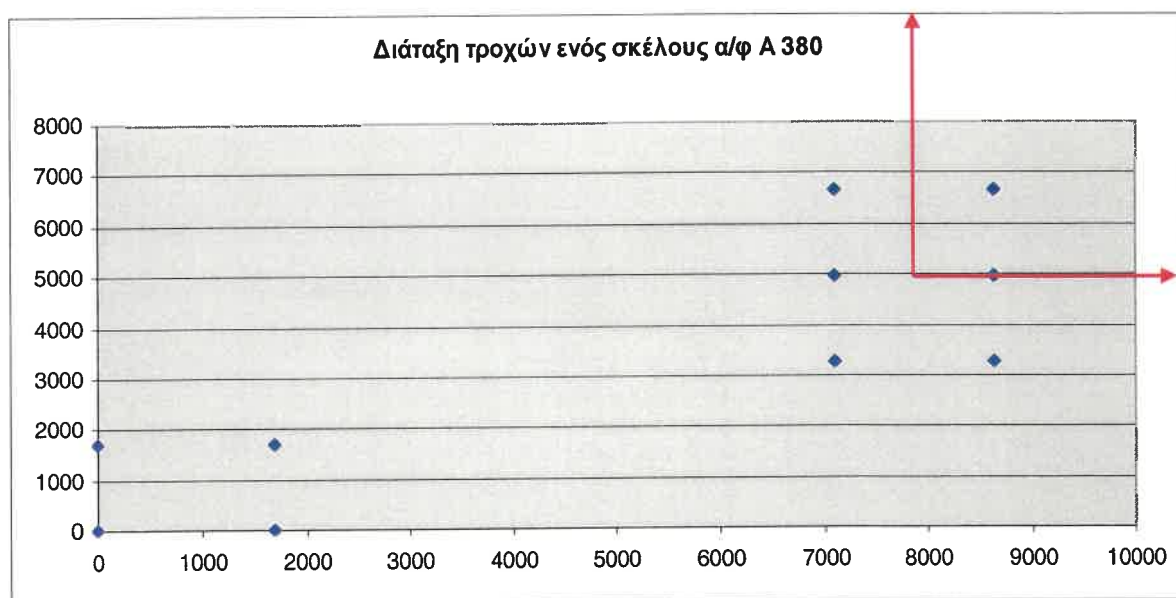
Αριθμός τροχών =22

Πίεση ελαστικού:P=1.5 Mpa

Ακτίνα R=216 mm

Συντεταγμένες τροχών:

	X	Y
1	0	0
2	0	1700
3	1700	1700
4	1700	0
5	7102	3276
6	7102	4976
7	7102	6676
8	8632	3276
9	8632	4976
10	8632	6676



Σχήμα 6

Κεφάλαιο 5°

Ομάδες α/φ	Αεροσκάφη	Μέση ετήσια κυκλοφορία ανά α/φ		Μέση ετήσια κυκλοφορία ανά ομάδα α/φ	
		03 L-21R	03R-21L	03 L-21R	03R-21L
1	A300-C4 DT 330,000 lbs	3225	4579	5283	6781
	A340-200 DT 566,575 lbs	1215	1051		
	B757-200 DT 255,000 lbs	843	1151		
2	B737-400 D 150,000 lbs	33442	33377	43834	44919
	MD-83 D 160,000 lbs	10044	11209		
	B727-200 D 216,000lbs	348	333		
3	B747-400 DDT 870000 lbs	251	267	251	267
4	B777-300 DTRIDEM 660,000 lbs	289	377	289	377
5	Bae146-200 D 88,250lbs	545	530	21033	18636
	FOKKER F-50 D 41865 lbs	5725	5328		
	ATR 72 D 53000 lbs	14125	12185		
	bae146-300 D104000 lbs	638	593		

Πίνακας 9 : Ομαδοποίηση αεροσκαφών και υπολογισμός μέσης ετήσιας κυκλοφορίας αντιπροσωπευτικού α/φ κάθε ομάδας