

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΜΑΘΗΜΑ : ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Α.ΛΟΪΖΟΣ

ΔΟΜΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ ΔΥΣΚΑΜΠΤΩΝ

ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κατσούλας Πέτρος

ΑΘΗΝΑ ΙΟΥΛΙΟΣ 2003

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>Περίληψη</u>	5
<u>(Abstract)</u>	6
<u>Κεφάλαιο 1^ο :Εισαγωγή</u>	7
<u>Κεφάλαιο 2^ο :Παρουσίαση μεθόδων κατάταξης οδοστρωμάτων</u>	
2.1 Εισαγωγή.....	9
2.2 Γενικά στοιχεία μεθόδου LCN.....	10
2.3 Έλεγχος δομικής επάρκειας οδοστρώματος με τη μέθοδο LCN.....	13
2.4 Αξιολόγηση μεθόδου LCN.....	13
2.5 Γενικά στοιχεία μεθόδου ACN-PCN.....	14
<u>Κεφάλαιο 3^ο :Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων της FAA (Federal Aviation Administration)</u>	
3.1 Ιστορικό δημιουργίας.....	18
3.2 Παραδοχές.....	18
3.3 Διαδικασία υπολογισμού.....	21
3.4 Σχολιασμός.....	24
<u>Κεφάλαιο 4^ο :Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων της Διεύθυνσης Υπηρεσιών Πολιτικού Μηχανικού της Μ. Βρετανίας (Directorate of Civil Engineering Services)</u>	
4.1 Ιστορικό δημιουργίας.....	28
4.2 Παραδοχές.....	28
4.3 Διαδικασία υπολογισμού.....	32
4.3.1 Αξιολόγηση με αναστροφή της διαδικασίας σχεδιασμού.....	32
4.3.2 Αξιολόγηση με επί τόπου δοκιμές.....	35
4.3.3 Αξιολόγηση με εμπειρικό υπολογισμό.....	35
4.4 Παραδείγματα.....	36
4.5 Σχολιασμός.....	36

Κεφάλαιο 5° :Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων Γαλλικού Υπουργείου Συγκοινωνιών (Service Technique des Bases Aeriennes, Ministry of Transportation)

5.1 Ιστορικό δημιουργίας.....	40
5.2 Παραδοχές.....	40
5.3 Διαδικασία υπολογισμού.....	42
5.3.1 Αντιστροφή σχεδιασμού.....	42
5.3.2 Αξιολόγηση με μη καταστρεπτικές δοκιμές.....	45
5.4 Παραδείγματα.....	45
5.5 Σχολιασμός.....	46

Κεφάλαιο 6° :Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων UFC (ERDC)

6.1 Ιστορικό δημιουργίας.....	48
6.2 Παραδοχές.....	48
6.3 Διαδικασία υπολογισμού.....	51
6.3.1 Αξιολόγηση με αναλυτικό τρόπο.....	51
6.3.2 Αξιολόγηση με μη καταστρεπτικές δοκιμές.....	54
6.4 Παραδείγματα.....	54
6.5 Σχολιασμός.....	55

Κεφάλαιο 7° :Ανάλυση ευαισθησίας μεθόδων

7.1 Εισαγωγή.....	58
7.2 Γενικά θέματα.....	58
7.3 Επίλυση-Συμπεράσματα.....	61
7.3.1 Ανάλυση διατομών μεταβαλλόμενου πάχους σκυροδέματος.....	63
7.3.2 Ανάλυση διατομών μεταβαλλόμενης εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος.....	65
7.3.3 Ανάλυση διατομών με μεταβαλλόμενο συντελεστή αντίδρασης εδάφους.....	67
7.3.4 Ανάλυση διατομών με μεταβαλλόμενο πάχος υπόβασης.....	70
7.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων λογισμικού προσδιορισμού του PCN από την ERDC και αποτελεσμάτων από τα διαγράμματα της αντίστοιχης μεθόδου.....	72

7.5 Σχολιασμός.....	78
<u>Κεφάλαιο 8° :Διερεύνηση της μεθόδου ACN/PCN</u>	
8.1 Γενικά.....	79
8.2 Σχέση πραγματικού συστήματος φορείου τροχών α/φ και ισοδύναμου μονού τροχού (DSWL).....	79
8.3 Έλεγχος πάχους αναφοράς.....	82
8.4 Έλεγχος εφαρμογής μεθόδου ACN/PCN σε σχέση με αναλυτικές μεθόδους.....	85
8.5 Σχολιασμός.....	88
<u>Κεφάλαιο 9° :Διερεύνηση δυνατότητας χρήσης του ALI στα δύσκαμπτα οδοστρώματα</u>	
9.1 Γενικά.....	91
9.2 Έλεγχος δυνατότητας εφαρμογής ALI σε δύσκαμπτα οδοστρώματα.....	91
9.3 Δείκτης αντοχής οδοστρώματος (APCI).....	100
9.3.1 Σχεδιασμός διατομής οδοστρώματος.....	101
9.3.2 Αξιολόγηση φέρουσας ικανότητας υφιστάμενης διατομής.....	102
9.4 Παραδείγματα.....	102
9.5 Σχολιασμός.....	104
<u>Κεφάλαιο 10° :Ανακεφαλαίωση – συμπεράσματα.....</u>	105
<u>Βιβλιογραφία-Παραπομπές.....</u>	110
<u>Παράρτημα 1° :Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων της FAA (Federal Aviation Administration).....</u>	111
<u>Παράρτημα 2° :Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων της Διεύθυνσης Υπηρεσιών Πολιτικού Μηχανικού της Μ. Βρετανίας (Directorate of Civil Engineering Services).....</u>	115
<u>Παράρτημα 3° :Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων Γαλλικού Υπουργείου Συγκοινωνιών (Service Technique des Bases Aeriennes, Ministry of Transportation).....</u>	123
<u>Παράρτημα 4° :Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων UFC (ERDC).....</u>	125

<u>Παράρτημα 5°</u> :Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας μεθόδων.....	131
<u>Παράρτημα 6°</u> : Αποτελέσματα συγκριτικής ανάλυσης λογισμικού και διαγραμμάτων της UFC.....	142
<u>Παράρτημα 7°</u> : Αποτελέσματα αναλύσεων 8^{ου} και 9^{ου} κεφαλαίου.....	150
Π7.1 Σχέση μονού τροχού (DSWL) και πραγματικού συστήματος.....	151
Π7.2 Σχέση τάσεων και παραμορφώσεων μονού τροχού (DSWL) και πραγματικού συστήματος σε διατομές με πάχος σκυροδέματος ίσο με το πάχος αναφοράς.....	154
Π7.3 Σχέση τάσεων και παραμορφώσεων μονού τροχού (ALI) και πραγματικού συστήματος.....	155

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εντάσσεται στην περιοχή της δομικής αξιολόγησης δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων και ειδικότερα με την αναφορά αυτής. Αρχικά γίνεται μια παρουσίαση της μεθόδου ACN/PCN του ICAO που εφαρμόζεται παγκοσμίως για το σκοπό αυτό, καθώς και της παλαιότερης μεθόδου LCN η οποία χρησιμοποιείται ακόμη στην Ελλάδα. Αναλύονται εκτενώς τέσσερις από τις σημαντικότερες διεθνώς αποδεκτές διαδικασίες προσδιορισμού της τιμής του PCN και ακολούθως διερευνάται η ευαισθησία των αποτελεσμάτων τους στις μεταβολές βασικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τα οδοστρώματα. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίστηκαν οι κυριότερες παράμετροι που επηρεάζουν τις τιμές του PCN και εντοπίστηκαν σημεία με ενδεχόμενες αδυναμίες των μεθόδων. Οι αδυναμίες αυτές καθιστούν αναγκαία την εξέταση των βασικών παραδοχών της μεθόδου ACN/PCN, καθώς επίσης και τη σύγκριση του ελέγχου επάρκειας φέρουσας ικανότητας μέσω του PCN σε σχέση με αντίστοιχα αποτελέσματα αναλυτικών διαδικασιών. Από τη σχετική διερεύνηση προέκυψε ότι η μέθοδος ACN/PCN δεν είναι επαρκώς αξιόπιστη για τη δομική αναφορά και τον έλεγχο επάρκειας φέρουσας ικανότητας δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Συνεπώς, έγινε προσπάθεια προκαταρκτικής ανάπτυξης εναλλακτικής διαδικασίας κατά το πρότυπο αντίστοιχων διαδικασιών που έχουν αναπτυχθεί στα εύκαμπτα οδοστρώματα στον Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, με βάση το δείκτη ισοδύναμης φόρτισης αεροσκάφους (Aircraft Loading Index – ALI).

Λέξεις κλειδιά: ACN, PCN, LCN δύσκαμπτα οδοστρώματα, κατάταξη, αναφορά, φέρουσα ικανότητα

Abstract

This diploma thesis refers to the area of evaluating and reporting the bearing capacity of rigid airfield pavements. Firstly, there is a brief presentation of ACN/PCN method of ICAO that is used worldwide and the older LCN method that is still in practice in Greece. Secondly, four practices for determining the PCN value are presented, thoroughly examined and discussed. These methods are implemented in a variety of rigid pavement cross sections in terms of a sensitivity analysis which investigated the effect of the deviation of major pavement parameters on the reported PCN values. Furthermore, through this procedure we can identify the parameters on which each method is mostly depended as well as their potential drawbacks. In order to further investigate these potential weak points, the basic assumptions of the ACN/PCN method are tested in order to validate their applicability and compatibility with those of the four previously studied practices. This analysis revealed that there is a significant lack of reliability in reporting and checking the bearing capacity of rigid pavements with PCN. Thus, an alternative to ACN/PCN is preliminary presented and discussed. The proposed methodology is based on an idea developed in the Department of Transportation Planning and Engineering, which is extended for the classification of rigid pavements using the ALI (Aircraft Loading Index) that has already been introduced in flexible pavements.

Key words: ACN, PCN, LCN, rigid pavements, classification, reporting, bearing capacity

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα αεροδρόμια, τα οποία περιέχουν ένα σημαντικό αριθμό οδοστρωμάτων, αποτελούν μια μεγάλη επένδυση της κάθε χώρας. Ταυτόχρονα, αποτελούν το βασικό συστατικό μιας από τις σπουδαιότερες οικονομικές δραστηριότητες των σύγχρονων βιομηχανικών κοινωνιών: τη μεταφορά αγαθών και προσώπων. Η διατήρηση και η συντήρηση αυτής της επένδυσης σε μια ικανοποιητική κατάσταση προκειμένου να επιτελεί το σκοπό της, είναι ένας σημαντικός στόχος. Ο χρόνος και η χρήση από τα α/φ αφήνουν τα σημάδια τους πάνω στα οδοστρώματα, με αποτέλεσμα ολοένα και περισσότερα από αυτά να πλησιάζουν ακόμη και να φτάνουν στο τέλος της διάρκειας ζωής τους. Αυτή η προοδευτική φθορά των οδοστρωμάτων, οδήγησε τις αρχές των αεροδρομίων, που είναι υπεύθυνες για τη διαχείρισή τους, να στρέψουν την προσοχή τους από την κατασκευή νέων οδοστρωμάτων στη συντήρηση και βελτίωση των υφισταμένων. Η διαχείριση όμως ενός οδοστρώματος που "γερνάει" είναι μια δύσκολη διαδικασία, δεδομένης της εξαιρετικά περίπλοκης συμπεριφοράς τους. Αυτή η διαδικασία γίνεται ακόμα πιο δύσκολη εξαιτίας των αυξανόμενων μεγεθών και συχνοτήτων των φορτίων της κυκλοφορίας που έχουν να αντιμετωπίσουν τα αεροδρόμια, καθώς και λόγω του αυξανόμενου ανταγωνισμού σ' ένα καθεστώς απελευθέρωσης της αγοράς των αερομεταφορών που επικρατεί διεθνώς (προσέλκυση αεροπορικών εταιρειών και μετατροπή του αεροδρομίου σε κόμβο).

Όλη αυτή η κατάσταση δημιούργησε τα τελευταία 30 χρόνια ένα διαρκώς αυξανόμενο επιστημονικό ενδιαφέρον σχετικά με τη διαχείριση των οδοστρωμάτων και οδήγησε στη δημιουργία Συστημάτων Διαχείρισης των Οδοστρωμάτων (Pavement Management Systems PMS) από πολλούς οργανισμούς. Σκοπός τους είναι να βοηθήσουν προκειμένου να χαραχθούν οι κατάλληλες στρατηγικές για τη διατήρηση της λειτουργικότητας των αεροδρομίων για μια ορισμένη χρονική περίοδο και με κατά το δυνατόν μικρότερο κόστος.

Βασικό συστατικό των περισσότερων σύγχρονων μεθόδων διαχείρισης οδοστρωμάτων αποτελεί η διαδικασία κατάταξης τους. Στο πλαίσιο αυτό διεθνώς χρησιμοποιείται η μέθοδος ACN/PCN για τη δομική αξιολόγηση των οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

Η εργασία αυτή έχει ως σκοπό τη διερεύνηση και αξιολόγηση αυτής της μεθόδου στα δύσκαμπτα οδοστρώματα, καθώς και των κυριότερων διαδικασιών από διάφορους οργανισμούς για τον προσδιορισμό του PCN. Το κείμενο χωρίζεται ουσιαστικά σε τρεις ενότητες.

Η πρώτη ενότητα (κεφάλαια 2-7) ξεκινά με αναφορά στην πρώτη μέθοδο περιγραφής της αντοχής των οδοστρωμάτων με καθορισμένο σύστημα αναφοράς φορτίων, τη μέθοδο

LCN. Περιγράφεται η μέθοδος και αναφέρονται οι αδυναμίες της, οι οποίες οδήγησαν στην ελαχιστοποίηση της χρήσης της και στην αντικατάστασή της από τη μέθοδο ACN/PCN του ICAO. Η μέθοδος αυτή, η οποία όπως προαναφέρθηκε αποτελεί την κύρια διαδικασία κατάταξης οδοστρωμάτων που βρίσκεται σε εφαρμογή παγκοσμίως, περιγράφεται και αναλύεται διεξοδικά. Στη συνέχεια, αναλύονται τέσσερις από τις κυριότερες μεθοδολογίες προσδιορισμού της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων στο πλαίσιο της ACN/PCN. Εξετάζονται οι βασικές τους παραδοχές και ο τρόπος εφαρμογής τους και διερευνάται η ευαισθησία των αποτελεσμάτων τους κατά τη μεταβολή των τιμών των βασικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τα δύσκαμπτα οδοστρώματα.

Στη δεύτερη ενότητα της εργασίας (κεφάλαιο 8), έχοντας επισημάνει από την πρώτη ενότητα τις αδυναμίες και τα προβλήματα των τεσσάρων μεθόδων, προχωράμε στον έλεγχο των παραδοχών που έχουν γίνει στη μέθοδο ACN/PCN και στον προσδιορισμό πιθανών αποκλίσεων από αυτές, προκειμένου να διερευνήσουμε τα πιθανά αίτια στα οποία οφείλονται αυτές οι αδυναμίες που παρατηρήθηκαν. Η ανάλυση δείχνει ότι η εφαρμογή της μεθόδου ACN/PCN έχει βελτιωμένη ακρίβεια σε σχέση με τα εύκαμπτα αλλά εξακολουθεί να παρουσιάζει κάποια αδύνατα σημεία, τα οποία την καθιστούν αναποτελεσματική. Κρίνεται επομένως αναγκαίο να διερευνηθεί η δυνατότητα ανάπτυξης μιας εναλλακτικής διαδικασίας δομικού ελέγχου.

Για το σκοπό αυτό, στην τρίτη ενότητα (κεφάλαιο 9) γίνεται μια προσπάθεια επέκτασης της εναλλακτικής μεθοδολογίας αξιολόγησης και σχεδιασμού, που έχει αναπτυχθεί για τα εύκαμπτα οδοστρώματα από τον Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής του Ε.Μ.Π. με τον ορισμό του Δείκτη Ισοδύναμης Φόρτισης Αεροσκαφών (ΔΙΦΑ) ή Aircraft Loading Index (ALI), για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αν. καθηγητή ΕΜΠ κ. Ανδρέα Λοΐζο για την ευκαιρία που μου έδωσε να εργαστώ πάνω σ' ένα τόσο ενδιαφέρον ερευνητικό θέμα, καθώς και για την πολύτιμη συμβολή του στην πραγματοποίηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιστημονικό συνεργάτη στο ΕΜΠ Γιώργο Χαρωνίτη για την πολύτιμη βοήθεια, συμβολή και παρότρυνση στο εγχείρημα αυτό.

Αθήνα, Ιούλιος 2003

Πέτρος Κατσούλας

2. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ **ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ**

2.1 Εισαγωγή

Τα οδοστρώματα των αεροδρομίων παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφορές σε σχέση με τα οδοστρώματα των οδών ως προς το μέγεθος, την ποικιλία και τον τρόπο εφαρμογής των φορτίων [1]. Ως αποτέλεσμα αυτών των διαφορών προκύπτει η ανάγκη προσδιορισμού της φέρουσας ικανότητας αυτών των οδοστρωμάτων, η γνώση της οποίας αποτελεί ταυτόχρονα και ένα πολύτιμο εργαλείο διαχείρισής τους. Η σημασία της φέρουσας ικανότητας στη διαχείριση των οδοστρωμάτων, και κατ' επέκτασιν και του αεροδρομίου, έγκειται στο γεγονός ότι είτε λόγω εξέλιξης της τεχνολογίας των αεροσκαφών είτε λόγω μεταβολής της μεταφορικής ζήτησης, τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας του αεροδρομίου μεταβάλλονται. Είναι αναγκαίο επομένως, οι αρχές, οι οποίες είναι υπεύθυνες γι' αυτό, να βρίσκονται σε θέση να καθορίσουν το κατά πόσο η φέρουσα ικανότητα των οδοστρωμάτων είναι επαρκής για ν' αναλάβει τα νέα φορτία των αεροσκαφών.

Για τον προσδιορισμό και τον έλεγχο της επάρκειας της φέρουσας ικανότητας αναπτύχθηκαν διάφορες μέθοδοι, οι οποίες χαρακτηρίζουν τη φέρουσα ικανότητα μ' έναν από τους παρακάτω τρόπους:

- Με το μέγιστο βάρος α/φ που μπορεί να φέρει με ασφάλεια το οδόστρωμα
- Με το μέγιστο φορτίο φορείου τροχών που μπορεί να φέρει με ασφάλεια το οδόστρωμα
- Με τον αριθμό κατάταξής του σε καθορισμένο σύστημα αναφοράς φορτίων

Οι δύο πρώτες μέθοδοι είναι παλαιότερες και έχουν εγκαταλειφθεί. Η τρίτη προσέγγιση είναι αυτή η οποία πλέον χρησιμοποιείται και εισήχθη από τον ICAO αρχικά με τη μέθοδο LCN. Η μέθοδος αυτή παρουσιάστηκε τη δεκαετία 1940-1950 και καθιερώθηκε, αλλά εξαιτίας των προβλημάτων και των αδυναμιών που εμφάνισε [1], το 1981 αντικαταστάθηκε από μία νέα, τη μέθοδο ACN/PCN. Βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου αυτής είναι το γεγονός ότι, όπως και στην περίπτωση της LCN, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη δημιουργία ενός δείκτη ο οποίος να εκφράζει το φορτίο του α/φ. Η φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος σε μια τέτοια μέθοδο εκφράζεται έμμεσα μέσω του φορτίου του α/φ που μπορεί να φέρει το οδόστρωμα χωρίς περιορισμό του αριθμού των διελεύσεων.

2.2 Γενικά στοιχεία μεθόδου LCN

Η μέθοδος LCN εισήχθη από τον ICAO και στηρίζεται στη συσχέτιση του φορτίου που προκαλεί την αστοχία του οδοστρώματος και της επιφάνειας, μέσω της οποίας το φορτίο επιβάλλεται. Εκτεταμένες έρευνες απέδειξαν μια σοβαρή αξιοπιστία στη σχέση:

$$\frac{W_1}{W_2} = \left[\frac{A_1}{A_2} \right]^{0.44} \quad (2.1)$$

με W_1 : το φορτίο που προκαλεί την αστοχία ενός οδοστρώματος και εφαρμόζεται μέσω κυκλικής πλάκας επιφάνειας A_1

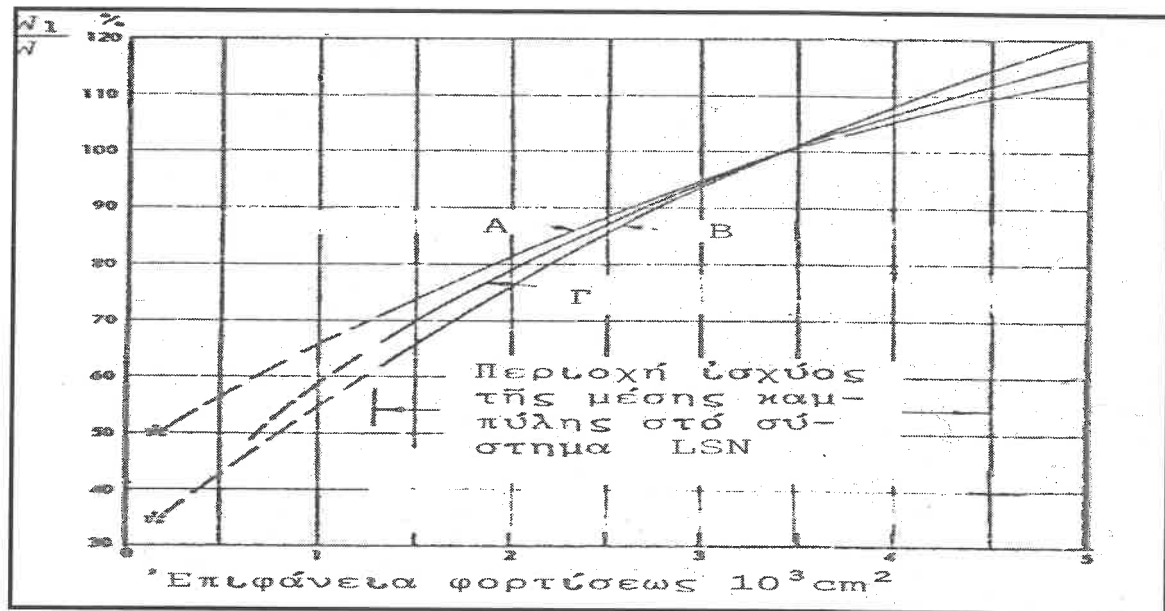
και W_2 : το φορτίο που προκαλεί την αστοχία του ίδιου οδοστρώματος, αλλά που εφαρμόζεται μέσω κυκλικής επιφάνειας A_2 .

Το εύρος των τιμών της επιφάνειας της πλάκας, για το οποίο ελέγχθηκε η σχέση, είναι από 1300cm^2 μέχρι 4500cm^2 .

Οι έρευνες αυτές επέτρεψαν την εισαγωγή μιας αυθαίρετης αλλά όχι εξωπραγματικής καμπύλης προτύπου κατατάξεως φορτίου. Τα σημεία καθορισμού της καμπύλης έχουν επιλεγεί ώστε η καμπύλη να εμφανίζει ομαλότητα σ'ένα διάγραμμα φορτίων/επιφάνειας. Οι τιμές που επιλέχθηκαν καθώς και η καμπύλη:

Φορτίο ελαστικών		Πίεση ελαστικών		Χαρακτηριστικός αριθμός LCN
Kp	lb	Kp/cm ²	Psi	
45400	100000	8.44	120	100
40800	90000	8.09	115	90
36300	80000	7.74	110	80
31800	70000	7.38	105	70
27200	60000	7.03	100	60
22700	50000	6.68	95	50
18100	40000	6.33	90	40
13600	30000	5.98	85	30
9100	20000	5.62	80	20
4500	10000	5.27	75	10

Πίνακας 2.1 Τιμές καμπύλης προτύπου κατατάξεως (Πηγή [1])



Διάγραμμα 2.1 Πρότυπη καμπύλη κατατάξεως φορτίου (Πηγή [1])

Η αντοχή ενός οδοστρώματος στο σύστημα αυτό μπορεί να καθοριστεί εύκολα: μέσω μιας σειράς δοκιμαστικών φορτίσεων με πλάκες διαφορετικής διαμέτρου, παίρνουμε μια καμπύλη επιφάνειας φόρτισης-φορτίου. Η τομή αυτής με την πρότυπη καμπύλη κατατάξεως δίνει τον αριθμό κατατάξεως LCN, που είναι το φορτίο σε 10^3 lb . Σε διαφορετική περίπτωση εκτελούμε μια σειρά από δοκιμαστικές φορτίσεις με την ίδια πλάκα, προσδιορίζουμε ένα στατιστικό μέσο όρο του συνδυασμού φορτίο-επιφάνεια και χαράσσουμε μια καμπύλη με τη σχέση (2.1).

Το επόμενο βήμα, για τον έλεγχο, είναι ο προσδιορισμός των συνθηκών φόρτισης που ασκεί ένα α/φ. Επειδή ένα α/φ χαρακτηρίζεται από το βάρος του, την πίεση των ελαστικών του και τη διάταξη των τροχών σε κάθε φορείο, θα πρέπει πρώτα να ανάγουμε τους πραγματικούς τροχούς σ' ένα μόνο φορτίο. Το φορτίο αυτό είναι το ισοδύναμο φορτίο μοναδιαίου τροχού και ορίζεται ως το φορτίο ενός μόνο τροχού (Equivalent Single Wheel Load) ESWL, το οποίο δρώντας με την ίδια πίεση, παράγει το ίδιο κρίσιμο αποτέλεσμα σ' ένα δοσμένο οδόστρωμα, με το πραγματικό σύστημα τροχών. Η πίεση παραμένει ίδια με το πραγματικό σύστημα τροχών του α/φ.

Το ESWL ενός α/φ μ' ένα μόνο τροχό σε κάθε φορείο του θεωρείται ίσο με το φορτίο του τροχού, υπό την παραδοχή ότι το σχήμα της επιφάνειας επαφής του τροχού μπορεί να εξομοιωθεί με κύκλο ίσης επιφάνειας. Το ESWL ενός α/φ το οποίο έχει δύο ή περισσότερους τροχούς είναι δυσκολότερο να προσδιοριστεί διότι η διάταξη μπορεί σε διαφορετικά οδοστρώματα να προκαλέσει διαφορετικό αποτέλεσμα.

Για το σκοπό αυτό σ' ένα άκαμπτο οδόστρωμα γίνεται χρήση της εργασίας του Westergaard και του σχετικού τύπου όπως διατυπώθηκε από τον Bradbury:

$$\sigma_c = 0.31625 \frac{W}{h^2} \left\{ 4 \log \left(\frac{\lambda}{b} \right) + 1.0693 \right\} \quad (2.2)$$

με σ_c : τάση από κάμψη στο κάτω πέλμα της πλάκας στο κέντρο της πλάκας (Kp/cm² ή psi)

W: το φορτίο (Kp ή lb)

h: το πάχος της πλάκας (cm ή in)

λ : η ακτίνα σχετικής ακαμψίας $\lambda = \left\{ \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)k} \right\}^{1/4}$ (cm ή in)

E: μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος (Kp/cm² ή lb/in²)

μ : λόγος του Poisson

K: μέτρο αντίδρασης της σκάφης (της υποκείμενης της πλάκας στρώσεως) (Kp/cm³ ή psi/in³)

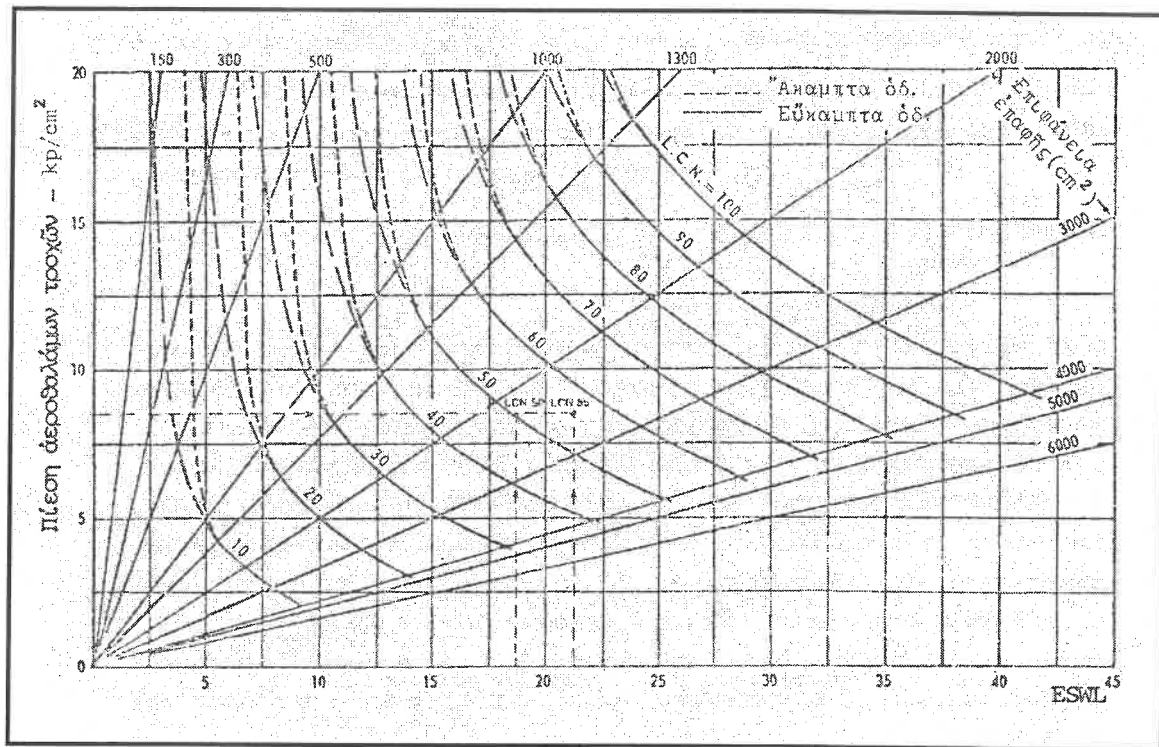
r: η ακτίνα της επιφάνειας φορτίσεως

b=r όταν $r < 1.724h$

$b = \{1.6r^2 + h^2\}^{1/2} - 0.675h$ όταν $r > 1.724h$

Το ESWL είναι εκείνο που προκαλεί την ίδια εφελκυστική τάση σ_c με την σ_c που προκαλεί το σύστημα τροχών κάτω από το κεντρικό σημείο επαφής του ενός τροχού της ομάδας. Ο προσδιορισμός της επιρροής των γειτονικών τροχών γίνεται με τη βοήθεια του σχετικού διαγράμματος του Westergaard.

Έχοντας προσδιορίσει το ESWL και την πίεση των αεροθαλάμων των τροχών είναι εύκολο να γίνει συσχέτιση του τυχόντος α/φ με το LCN του τυχόντος οδοστρώματος. Αρκεί σ' ένα διάγραμμα ESWL-πίεσεως αεροθαλάμων ή ESWL-τάσεως φορτίζουσας επιφάνειας να χαραχθούν καμπύλες που ν' αντιστοιχούν σε οδοστρώματα με το ίδιο LCN, δηλαδή να παριστάνουν ένα άπειρο πλήθος συνδυασμών φορτίου και πίεσης αεροθαλάμων τροχών που θα επιπονήσουν το οδόστρωμα στον ίδιο βαθμό. Οι καμπύλες φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Διάγραμμα 2.2 Προσδιορισμός LCN ενός α/φ (Πηγή [1])

2.3 Έλεγχος δομικής επάρκειας οδοστρώματος με τη μέθοδο LCN

Ο έλεγχος δομικής επάρκειας μπορεί να γίνει μέσω της ανισότητας :

$$LCN_{οδο/τος} \geq LCN_{α/φους} \quad (2.3)$$

Αν η ανισότητα ισχύει τότε το α/φ μπορεί να προσγειωθεί στο αεροδρόμιο. Σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να προκαλέσει εκτεταμένη φθορά σε μικρό χρόνο.

2.4 Αξιολόγηση μεθόδου LCN

Η μέθοδος LCN, παρόλο που είναι μια ολοκληρωμένη μέθοδος για την αξιολόγηση των οδοστρωμάτων, παρουσίασε αδυναμίες οι οποίες οδήγησαν τον ICAO στην αντικατάσταση αυτής με τη μέθοδο ACN-PCN. Οι κυριότερες αδυναμίες της μεθόδου είναι:

Πρώτη σημαντική αδυναμία είναι η εξάρτηση των αποτελεσμάτων από το πάχος του κάθε συγκεκριμένου οδοστρώματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να είναι δύσκολος ο προσδιορισμός του δυσμενέστερου α/φ. Αυτό οδηγεί σε εμπειρικές εκτιμήσεις του φορτίου με το οποίο θα γίνει ο έλεγχος και η αξιολόγηση της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος. Μειονέκτημα, επίσης, της μεθόδου είναι ο απεριόριστος αριθμός διελεύσεων του φορτίου σχεδιασμού για τον οποίο γίνεται ο έλεγχος. Το γεγονός αυτό μας στερεί τη δυνατότητα να ελέγξουμε το οδόστρωμα στις πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας, αφού ένα

αεροδρόμιο δέχεται περισσότερα του ενός α/φ και σίγουρα όχι απεριόριστες διελεύσεις του δυσμενέστερου φορτίου. Σχετική με αυτό το θέμα είναι και η αδυναμία της μεθόδου ν' ασχοληθεί με τις περιπτώσεις όπου ένα α/φ με LCN μεγαλύτερο αυτού του αεροδρομίου πρέπει να προσγειωθεί στο συγκεκριμένο αεροδρόμιο (overloading).

Πρόσθετη αδυναμία αποτελεί ο προσδιορισμός του LCN σε υφιστάμενο οδόστρωμα ο οποίος γίνεται μόνο μέσω φόρτισης με πλάκα. Η δοκιμή αυτή έχει μεγάλο κόστος, ενώ ταυτόχρονα είναι χρονοβόρα και απαιτεί κλείσιμο του αεροδρομίου και διακοπή της κυκλοφορίας για αρκετή ώρα. Όλα αυτά τα αρνητικά μας οδηγούν στο να πραγματοποιούμε μικρό αριθμό μετρήσεων και επομένως σε μείωση της ακρίβειας της αξιολόγησης.

Ένα επιπλέον πρόβλημα αποτελεί ο προσδιορισμός του ESWL, καθώς η διαδικασία, σε περιπτώσεις συστημάτων τροχών διαφορετικών του ενός ανά φορείο, είναι περίπλοκη και απαιτείται να γίνεται για κάθε οδόστρωμα ξεχωριστά.

Συνυπολογίζοντας όλα τα παραπάνω, προκύπτει ότι η μέθοδος παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες στην εφαρμογή της, γεγονός που δικαιολογεί και την αντικατάστασή της από τη μέθοδο ACN-PCN.

Με δεδομένο ότι η μέθοδος LCN εξακολουθεί να εφαρμόζεται στη χώρα μας ως το επίσημο σύστημα κατάταξης των οδοστρωμάτων, κρίθηκε σκόπιμο να διερευνηθεί η δυνατότητα προσδιορισμού της τιμής του PCN με δεδομένη την τιμή του LCN. Η διαδικασία που μελετήθηκε στηρίχθηκε στην πρότυπη καμπύλη κατάταξης. Συνδυασμοί φορτίου μονού τροχού και αντίστοιχης πίεσης ελαστικού από αυτή την καμπύλη χρησιμοποιήθηκαν ως φορτίο και πίεση ενός αεροσκάφους μονού τροχού. Προσδιορίσαμε το ACN αυτού του α/φ για κάθε μία από τις κατηγορίες αντοχής του εδάφους και έτσι για κάθε τιμή LCN βρήκαμε μία αντίστοιχη τιμή ACN (και επομένως και PCN). Προέκυψαν τέσσερις καμπύλες, μία για κάθε κατηγορία εδάφους, για τη μετατροπή του LCN σε PCN. Ο έλεγχος όμως αυτού του μοντέλου, μέσω πραγματικών α/φ, δεν έδειξε καλή προσαρμογή, οπότε η διαδικασία εγκαταλείφθηκε.

2.5 Γενικά στοιχεία μεθόδου ACN-PCN

Ο ICAO προκειμένου να ξεπεράσει τις δυσκολίες και τις αδυναμίες του ESWL εισήγαγε το ACN. Το ACN είναι ένας αριθμός ο οποίος εκφράζει τη σχετική επίδραση ενός α/φ σ' ένα οδόστρωμα για μια προκαθορισμένη αντοχή του εδάφους. Αριθμητικά προσδιορίζεται ως το διπλάσιο φορτίο (σε χιλιάδες Kgr) του μονού τροχού που έχει πίεση 1.25MPa και προκαλεί την ίδια ένταση με το πραγματικό σύστημα τροχών του α/φ σ' ένα οδόστρωμα πάχους ίσου με το πάχος αναφοράς.

Το πάχος αναφοράς για τα εύκαμπτα οδοστρώματα είναι ίσο με το συμβατικό πάχος του οδοστρώματος το οποίο επιτρέπει 10000 διελεύσεις του πραγματικού συστήματος τροχών του α/φ για μια συγκεκριμένη κατηγορία εδαφικής αντοχής. Η επιλογή του αριθμού των 10000 διελεύσεων έγινε από τον ICAO για να εξασφαλιστεί μια ρεαλιστική εκτίμηση της βαριάς φόρτισης από τα διαφορετικά α/φ που πρέπει να εξυπηρετεί το οδόστρωμα ενός αεροδρομίου.

Για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα το πάχος αναφοράς είναι ίσο με το συμβατικό πάχος πλάκας σκυροδέματος, η οποία φορτιζόμενη στο κέντρο της από το πραγματικό σύστημα τροχών του α/φ αναπτύσσει στη βάση της εφελκυστική τάση ίση με 2.75MPa.

Με την εισαγωγή της έννοιας του πάχους αναφοράς απεξαρτητοποιούμε το ACN από το πάχος του εκάστοτε οδοστρώματος το οποίο μελετάμε. Ο υπολογισμός γίνεται για κάθε μία από τις τέσσερις καθορισμένες κατηγορίες εδαφικής αντοχής [2]:

- Υψηλή αντοχή (A): αντιπροσωπεύει τιμές CBR πάνω από 13% ($K > 120 \text{ MN/m}^3$) με χαρακτηριστική τιμή το 15% ($K = 150 \text{ MN/m}^3$)
- Μέτρια αντοχή (B): αντιπροσωπεύει τιμές CBR από 8% έως 13% (K από 60 MN/m^3 έως 120 MN/m^3) με χαρακτηριστική τιμή το 10% ($K = 80 \text{ MN/m}^3$)
- Χαμηλή αντοχή (C) : αντιπροσωπεύει τιμές CBR από 4% έως 8% (K από 25 MN/m^3 έως 60 MN/m^3) με χαρακτηριστική τιμή το 6% ($K = 40 \text{ MN/m}^3$)
- Πολύ χαμηλή αντοχή (D): αντιπροσωπεύει τιμές CBR κάτω από 4% ($K = 25 \text{ MN/m}^3$) με χαρακτηριστική τιμή 3% ($K = 20 \text{ MN/m}^3$)

Το ACN ενός α/φ προσδιορίζεται είτε αναλυτικά είτε γραφικά. Αναλυτικά, στα δύσκαμπτα οδοστρώματα, προσδιορίζεται με τη χρήση των εξισώσεων του Westergaard για πλάκα σκυροδέματος εδραζόμενη σε έδαφος Winkler (έδαφος προσομοιούμενο με ελατήρια όπου η αντίδραση είναι ανάλογη της υποχώρησης με συντελεστή αναλογίας το συντελεστή αντίδρασης του εδάφους, στο οποίο δε μεταφέρονται διατμητικές τάσεις) και με τη μέθοδο υπολογισμού της Portland Cement Association. Γραφικά προσδιορίζεται αν από τον κατασκευαστή παρέχονται διαγράμματα απαιτήσεων πάχους οδοστρώματος, από τα οποία προκύπτει το πάχος αναφοράς και στη συνέχεια με τη βοήθεια διαγραμμάτων και ανάλογα με την κατηγορία αντοχής προκύπτει το ACN. Η τιμή αυτή διορθώνεται ανάλογα με την πραγματική πίεση των ελαστικών του α/φ προκειμένου να αναχθούμε στην πίεση ορισμού των 1.25MPa.

Έχοντας εκφράσει το φορτίο του α/φ, ακολουθεί η έκφραση της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος. Για το σκοπό αυτό εισάγεται ο αριθμός PCN, ο οποίος

ορίζεται ως το ACN του α/φ που προκαλεί τη μέγιστη ένταση την οποία μπορεί να δεχτεί το οδόστρωμα, χωρίς περιορισμό του αριθμού των διελεύσεων του α/φ.

Ο ICAO δεν καθορίζει συγκεκριμένο τρόπο με τον οποίο πρέπει να προσδιορίζεται το PCN, αλλά αφήνει τις αρχές του αεροδρομίου να επιλέξουν τη μέθοδο που θεωρούν αυτές ως καλύτερη.

Η αναφορά του PCN γίνεται μ' ένα κωδικό αποτελούμενο από έναν αριθμό και τέσσερις χαρακτήρες. Ο αριθμός αποτελεί την αριθμητική τιμή του PCN ενώ οι τέσσερις επόμενοι χαρακτήρες είναι:

- Τύπος οδοστρώματος: για τα εύκαμπτα οδοστρώματα ο κωδικός είναι F (flexible) και για τα δύσκαμπτα είναι R (rigid)
- Κατηγορία εδαφικής αντοχής: ανάλογα με την κατηγορία αντοχής στην οποία ανήκει το έδαφος χρησιμοποιούμε το αντίστοιχο γράμμα A,B,C,D για υψηλή, μέτρια, χαμηλή και πολύ χαμηλή αντοχή
- Μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση ελαστικών: Καθορίζει τη μέγιστη πίεση ελαστικών που μπορεί ν' αντέξει το οδόστρωμα:
 1. Κατηγορία W: υψηλή, χωρίς περιορισμό πίεσης
 2. Κατηγορία X: μέση, με μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση έως 1.5MPa
 3. Κατηγορία Y: χαμηλή, με μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση 1MPa
 4. Κατηγορία Z: πολύ χαμηλή, με μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση 0.5MPa
- Μεθοδολογία υπολογισμού: Αν το PCN προσδιορίζεται εμπειρικά χρησιμοποιούμε τον κωδικό U, ενώ αν ο υπολογισμός γίνεται αναλυτικά χρησιμοποιούμε τον κωδικό T

Οπότε η τελική μορφή του PCN είναι:

Αριθμητική τιμή / τύπος οδοστρώματος / κατηγορία εδαφικής αντοχής / μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση / μέθοδος υπολογισμού

Σχηματικά οι πληροφορίες που παρέχονται φαίνονται στο σχήμα:

PCN	Pavement Classification Number	Κωδικός	Είδος οδοστρώματος	Κωδικός	Κατηγορία στρώσης έδρασης	Κωδικός	Κατηγορία πίεσης ελαστικού	Κωδικός	Μέθοδος αξιολόγησης
Αριθμητική τιμή	Θέρουσα ικανότητα για ανεπείριστο αριθμό διελεύσεων	F R	εύκαμπτο δύσκαμπτο	A B C D	Υψηλή ($K=150\text{MN/m}^3$ ή $\text{CBR}=15\%$) Μέση ($K=80\text{MN/m}^3$ ή $\text{CBR}=10\%$) Χαμηλή ($K=40\text{MN/m}^3$ ή $\text{CBR}=6\%$) Πολύ χαμηλή ($K=20\text{MN/m}^3$ ή $\text{CBR}=3\%$)	W X Y Z	Υψηλή (χωρίς περιορισμό) Μέση (μέχρι 1.5MPa) Χαμηλή (μέχρι 1MPa) Πολύ χαμηλή (μέχρι 0.5MPa)	U T	εμπειρική αναλυτική

Διάγραμμα 2.3 Βασικά στοιχεία PCN (Πηγή [3])

Έχοντας προσδιορίσει το ACN του α/φ και το PCN του αεροδρομίου, ο έλεγχος γίνεται με το να ελέγξουμε αν ισχύει η ανισότητα:

$$PCN_{οδο/τος} \geq ACN_{α/φους} \quad (2.4)$$

Αν η ανισότητα ισχύει τότε οι αρχές του αεροδρομίου μπορούν να επιτρέψουν τη χρήση του από το συγκεκριμένο α/φ, καθώς η αντοχή του είναι επαρκής. Σε αντίθετη περίπτωση, η ενδεχόμενη χρήση είναι δυνατό να προκαλέσει σημαντική φθορά στο οδόστρωμα σε μικρό χρόνο.

Οι τιμές του ACN παρέχονται από τους κατασκευαστές των α/φ. Αντίθετα, η τιμή του PCN προσδιορίζεται, όπως προαναφέρθηκε, με όποια μέθοδο επιθυμούν οι αρχές του κάθε αεροδρομίου. Είναι σημαντικό επομένως να εξεταστούν ορισμένες μέθοδοι προσδιορισμού του PCN που εφαρμόζονται παγκοσμίως αυτή τη στιγμή, προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσο η κατάταξη των οδοστρωμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί με οποιαδήποτε μέθοδο υπολογισμού του PCN χωρίς να δώσει σημαντικές διαφορές στ' αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό στα επόμενα τέσσερα κεφάλαια παρουσιάζονται αναλυτικά τέσσερις από τις πιο διαδεδομένες διαδικασίες προσδιορισμού του PCN και στη συνέχεια γίνεται εφαρμογή και ανάλυση ευαισθησίας αυτών σ' έναν αριθμό διατομών.

3.ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ **ΤΗΣ FAA** **(FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION)**

3.1 Ιστορικό δημιουργίας

Αρχικός σκοπός της μεθόδου αυτής ήταν ο σχεδιασμός και η αξιολόγηση των οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Το 1958, η FAA υιοθέτησε ως πολιτική το σχεδιασμό των αεροδρομίων με α/φ σχεδιασμού μέγιστου βάρους 350000pounds (159000Kg) και με το σύστημα τροχών του DC-S-50. Προσπάθησε, επίσης, να διασφαλίσει ότι τα μελλοντικά α/φ δε θα καταπονούν τα οδοστρώματα περισσότερο από το α/φ αναφοράς των 350000pounds (159000Kg). Ως ένα βαθμό, οι κατασκευαστές α/φ ακολούθησαν και εφάρμοσαν αυτή την οδηγία, για τη μη κατασκευή δηλαδή α/φ τα οποία να προκαλούν ένταση μεγαλύτερη από αυτό το α/φ σχεδιασμού. Και αυτό το πέτυχαν, παρόλο που τα α/φ πλέον έχουν βάρος πολύ μεγαλύτερο από 159000Kg, με την αύξηση του αριθμού και της απόστασης των τροχών.

Η τωρινή μορφή του εγχειριδίου αυτού [4] εκδόθηκε το 1995 και συμπληρώθηκε με διορθώσεις στα επόμενα χρόνια. Η μέθοδος παρέχει αναλυτικές οδηγίες για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση των αεροδρομίων κάνοντας μια βασική διάκριση αυτών σε αεροδρόμια βαρέων φορτίων (για α/φ με φορτίο άνω των 13000Kg) και σε αεροδρόμια ελαφρών φορτίων (για α/φ με φορτίο μεταξύ 5700 και 13000Kg). Η διαδικασία της αξιολόγησης είναι ουσιαστικά η ανάστροφη πορεία από αυτή του σχεδιασμού και καταλήγει στον προσδιορισμό του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου του α/φ σχεδιασμού το οποίο μπορεί να δεχτεί το αεροδρόμιο. Στη συνέχεια, και με τη βοήθεια πρόσθετης οδηγίας του οργανισμού,[5] , η οποία εκδόθηκε τον Ιούνιο του 1983, καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός του PCN του αεροδρομίου, στοιχείο αναγκαίο για τη διαχείρισή του με βάση τις σύγχρονες απαιτήσεις.

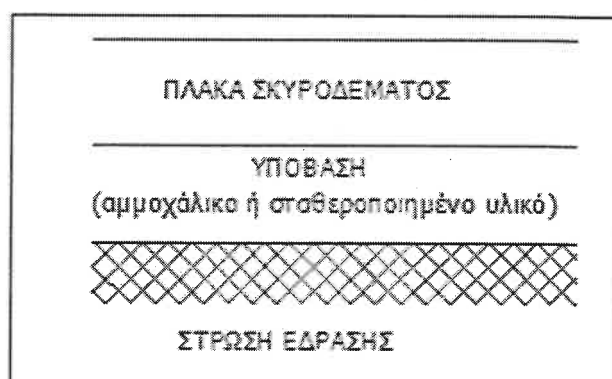
3.2 Παραδοχές

Η μέθοδος αξιολόγησης της FAA έχει ως σκοπό τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων ενός αεροδρομίου και την αναφορά αυτής μέσω του συστήματος ACN/PCN. Όπως ήδη αναφέρθηκε, η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ανάστροφη αυτής του σχεδιασμού.

Για το σχεδιασμό, και επομένως και για την αξιολόγηση, η μέθοδος παρέχει μια σειρά από διαγράμματα, τα οποία αποτελούν μια γραφική λύση των εξισώσεων του Westergaard για φόρτιση πλάκας σκυροδέματος στην ακμή της, εδραζόμενης σε έδαφος Winkler

(ελατηριωτό έδαφος όπου η αντίδραση είναι ανάλογη της βύθισης του εδάφους). Οι τάσεις στην ακμή μειώνονται κατά 25% για να ληφθεί υπόψιν και η μεταφορά φορτίου λόγω των αρμών. Τα διαγράμματα που παρέχονται αφορούν δύο περιπτώσεις φόρτισης. Η μία περίπτωση είναι τα διαγράμματα για σύστημα τροχών το οποίο βρίσκεται είτε κάθετα είτε εφαπτόμενα σε εγκάρσιο αρμό, όποια από τις δύο διατάξεις δίνει τη μεγαλύτερη ένταση. Αυτή η περίπτωση αφορά κυρίως α/φ με μονό ή διπλό τροχό (single ή dual), τα οποία προκαλούν τη μέγιστη ένταση όταν το σύστημα τροχών τους είναι ή κάθετο ή εφαπτόμενο του εγκάρσιου αρμού. Η άλλη περίπτωση διαγραμμάτων αφορά κυρίως τα α/φ με dual tandem σύστημα τροχών και στην περίπτωση αυτή η μέγιστη φόρτιση της πλάκας προκύπτει από την επαφή των τροχών υπό γωνία με τον αρμό. Η γωνία στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη ένταση διερευνήθηκε για διάφορα α/φ με βήμα ελέγχου τη 1°. Στην περίπτωση, βέβαια, που είναι σίγουρο ότι το α/φ θα διασχίσει τον εγκάρσιο αρμό κάθετα και όχι υπό γωνία υπάρχουν αντίστοιχα διαγράμματα για τα α/φ με dual tandem σύστημα. Η ανάλυση έγινε θεωρώντας κατανομή φορτίου 95%-5%, δηλαδή ότι το 95% μεταβιβάζεται στους πίσω κύριους τροχούς, ενώ το 5% παραλαμβάνεται από το ρινιαίο τροχό. Τα φορτία λαμβάνονται στατικά και ότι κατά την επαφή στην προσγείωση είναι μικρότερα.

Η μορφή ενός τυπικού οδοστρώματος είναι σύμφωνα με τη μέθοδο μια πλάκα σκυροδέματος, η οποία εδράζεται σε μια υπόβαση είτε από αμμοχάλικο είτε από κάποιο σταθεροποιημένο υλικό:



Διάγραμμα 3.1 Τυπική διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος κατά FAA

Οι προδιαγραφές σχεδιασμού παρέχουν τις ελάχιστες τιμές που πρέπει να έχει η υπόβαση (4in ή 100mm), καθώς επίσης και τις προδιαγραφές των υλικών που προτείνονται προς χρήση. Για τα εδαφικά υλικά υπάρχουν 2 συστήματα κατάταξης: το ένα είναι της FAA και το άλλο είναι το Unified Soil Classification System, στο οποίο έχει γίνει ένας πρώτος διαχωρισμός με βάση το μέγεθος του κόκκου και μετά με βάση τις σταθερές πλαστικότητας του υλικού. Για λόγους όμως συμβατότητας με τη μέθοδο ACN/PCN δίνεται και η αντιστοιχία των 2 συστημάτων:

Κατηγορία αντοχής	Κωδικός	Soil Classification	
		Unified	FAA
Υψηλή	A	GW, GP, GM,	Fa, F1, F2
Μέση	B	GC, SW, SM, SP	F3, F4, F5
Χαμηλή	C	SC, ML, CL, OL	F6, F7, F8, F9
Πολύ χαμηλή	D	OM, CH, MH	F10

Πίνακας 3.1 Κατάταξη εδαφών και αντιστοιχία με τις κατηγορίες αντοχής της ACN/PCN (Πηγή: [5])

Η μέθοδος θεωρεί ότι η κυκλοφορία σε μια διατομή κατανέμεται εγκάρσια ακολουθώντας κανονική κατανομή. Τόσο για τις αναχωρήσεις όσο και για τις αφίξεις α/φ γίνεται η θεώρηση ότι ακολουθούν κανονική κατανομή. Οι διελεύσεις των α/φ λαμβάνονται υπ' όψιν στα διαγράμματα με τον αριθμό των ισοδύναμων διελεύσεων (coverages). Μια ισοδύναμη διέλευση προκύπτει από έναν ορισμένο αριθμό διελεύσεων και αντιστοιχεί με μία μέγιστη φόρτιση του οδοστρώματος. Στον προσδιορισμό των διαγραμμάτων έχει συμπεριληφθεί ο αριθμός των ισοδύναμων διελεύσεων (coverages) για μια 20ετή διάρκεια ζωής με τη χρήση των εξής λόγων διελεύσεων προς τις ισοδύναμες διελεύσεις:

Διάγραμμα σχεδιασμού	Λόγος Διελεύσεων προς ισοδύναμες διελεύσεις	Διάγραμμα σχεδιασμού	Λόγος Διελεύσεων προς ισοδύναμες διελεύσεις
Μονού τροχού	5.18	B-757	3.88
Διπλού τροχού	3.48	B-767	3.90
Dual tandem	3.68	C-130	4.15
A-300 model B2	3.50	DC10-10	3.64
A-300 model B4	3.45	DC10-30	3.38
B-747	3.70	L-101 I	3.62

Πίνακας 3.2 Τιμές λόγων διελεύσεων προς ισοδύναμες διελεύσεις (Πηγή: [4])

Οι λόγοι αυτοί προκύπτουν με τη χρήση της κανονικής κατανομής και την εφαρμογή γνωστών στατιστικών μεθόδων.

Η μέθοδος μέσω των διαγραμμάτων υπολογίζει το βασικό πάχος το οποίο αντιστοιχεί σε 5000 ισοδύναμες διελεύσεις (coverages) για την επιτρεπόμενη τάση σκυροδέματος και για την αντοχή της σκάφης. Αυτό το πάχος μετά διορθώνεται με τη βοήθεια διαγράμματος για οποιοδήποτε άλλο αριθμό ισοδύναμων διελεύσεων (coverages) διαφορετικό των 5000. Η επιτρεπόμενη τάση του σκυροδέματος προκύπτει από τη διαίρεση της εφελκυστικής αντοχής του με το 1.3. Σημειώνεται ότι όλα τα παραπάνω έχουν ενσωματωθεί απευθείας στα διαγράμματα υπολογισμού, και από το χρήστη απαιτείται μόνο ο αριθμός ετήσιων διελεύσεων και η αντοχή σε εφελκυσμό του σκυροδέματος.

Η μέθοδος παρέχει ακόμη οδηγίες σχετικά με τη συμπύκνωση της σκάφης, η οποία πρέπει να επιτευχθεί, καθώς και αναλυτικές πληροφορίες σχετικά με τα είδη των αρμών, τον

τρόπο κατασκευής τους και την όπλισή τους. Δίνονται στοιχεία για οδοστρώματα οπλισμένα ή για οδοστρώματα με συνεχή όπλισμό. Τέλος, παρέχονται αναλυτικές πληροφορίες για τον τρόπο κατασκευής επιστρώσεων και βελτιώσεων σε ήδη υπάρχοντα οδοστρώματα.

3.3 Διαδικασία υπολογισμού

Το πρώτο στοιχείο το οποίο απαιτεί η μέθοδος για τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος είναι στοιχεία για τη μικτή κυκλοφορία που θα εξυπηρετήσει το οδόστρωμα στο υπόλοιπο της ζωής του. Η κυκλοφορία σ' ένα αεροδρόμιο δεν αποτελείται σχεδόν ποτέ από ένα μόνο α/φ (εκτός από ειδικές περιπτώσεις πολύ μικρών αεροδρομίων), γι' αυτό η μέθοδος παρουσιάζει μια διαδικασία μετατροπής της μικτής κυκλοφορίας σε διελεύσεις ενός μόνο α/φ σχεδιασμού. Κατ'αρχάς, για τον αριθμό των διελεύσεων του κάθε α/φ, την αντοχή της σκάφης (αφού την διορθώσουμε, όπως θα υποδείξουμε παρακάτω, λόγω της παρουσίας της υπόβασης) και την αντοχή του σκυροδέματος, προσδιορίζουμε από το αντίστοιχο διάγραμμα (είτε του συγκεκριμένου α/φ είτε του διαγράμματος για το αντίστοιχο σύστημα τροχών) το απαιτούμενο πάχος πλάκας σκυροδέματος. Το α/φ, το οποίο απαιτεί το μεγαλύτερο πάχος πλάκας σκυροδέματος καθορίζεται ως α/φ σχεδιασμού. Στη συνέχεια ανάλογα με το σύστημα τροχών του α/φ σχεδιασμού, προσδιορίζουμε τους συντελεστές ισοδυναμίας των υπόλοιπων α/φ:

Για μετατροπή από	Σε	Πολ/σε με
μονού τροχού	διπλού τροχού	0.8
μονού τροχού	dual tandem	0.5
διπλού τροχού	dual tandem	0.6
double dual tandem	dual tandem	1.0
dual tandem	Μονού τροχού	2.0
dual tandem	διπλού τροχού	1.7
διπλού τροχού	Μονού τροχού	1.3
double dual tandem	διπλού τροχού	1.7

Πίνακας 3.3 Συντελεστές ισοδυναμίας συστημάτων τροχών (Πηγή: [4])

Με τους συντελεστές αυτούς πολλαπλασιάζουμε τις ετήσιες διελεύσεις των υπόλοιπων α/φ ώστε να μετατραπούν σε διελεύσεις του ίδιου συστήματος τροχών με το α/φ σχεδιασμού (όχι ακόμη σε διελεύσεις του α/φ σχεδιασμού). Στη συνέχεια προσδιορίζουμε το φορτίο τροχού όλων των α/φ πολλαπλασιάζοντας το συνολικό βάρος του α/φ με 0.95 (κατανομή 95% στα κύρια φορεία τροχών) και διαιρούμε με τον αριθμό των τροχών του κύριου συστήματος. Για τα α/φ ευρείας ατράκτου, θεωρούμε ότι έχουν συνολικό φορτίο ίσο με 300000pounds (136100Kg) και κάνουμε την ίδια κατανομή φορτίου στους τροχούς. Έχοντας καθορίσει και το φορτίο τροχού, μετατρέπουμε τις διελεύσεις των α/φ σε διελεύσεις του α/φ αναφοράς μέσω της σχέσης:

$$\log R_1 = \log R_2 \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

- με W_1 : φορτίο τροχού του α/φ σχεδιασμού
 W_2 : φορτίο τροχού του α/φ του οποίου μετατρέπουμε τις διελεύσεις
 R_1 : ισοδύναμες ετήσιες διελεύσεις α/φ σχεδιασμού
 R_2 : διελεύσεις του ίδιου συστήματος τροχών

Αθροίζοντας τις διελεύσεις που προκύπτουν από την προηγούμενη διαδικασία έχουμε το συνολικό αριθμό ετήσιων διελεύσεων του α/φ σχεδιασμού, ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί ως στοιχείο εισόδου στα διαγράμματα.

Το επόμενο αναγκαίο στοιχείο για τη χρήση του διαγράμματος αξιολόγησης είναι ο συντελεστής αντίδρασης του εδάφους K , ο οποίος εκφράζει την αντοχή του εδάφους. Λόγω της παρουσίας της υπόβασης, ο συντελεστής αυτός τροποποιείται ώστε να λάβει υπόψη τη βελτίωση που υφίσταται η στήριξη της πλάκας του σκυροδέματος. Αν η βάση είναι από αμμοχάλικο τότε γίνεται χρήση του διαγράμματος 1 που βρίσκεται στο πρώτο παράρτημα. Αν η υπόβαση είναι σταθεροποιημένη, χρησιμοποιείται το διάγραμμα 2 στο παράρτημα ανάλογα με το πάχος της υπόβασης. Πρέπει να σημειωθεί ότι, αφού γίνει η τροποποίηση του συντελεστή αντίδρασης K λόγω της υπόβασης, δεν ασχολούμαστε πλέον με την αντοχή της στρώσης έδρασης αλλά με την τροποποιημένη αντοχή, ενώ στο σύστημα κατάταξης του ACN/PCN χρησιμοποιούμε αυτή την αντοχή για κατάταξη.

Έχοντας το συντελεστή αντίδρασης του εδάφους και τον ετήσιο αριθμό διελεύσεων, χρειαζόμαστε την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος και το πάχος της πλάκας αυτού για να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο. Η εφελκυστική αντοχή μπορεί να προσδιοριστεί είτε από κατασκευαστικά αρχεία είτε από δοκιμές (Brazilian test, δοκιμή κάμψης δοκού) ή να κάνουμε την εμπειρική παραδοχή του 1/10 της θλιπτικής αντοχής (με μείωση στην ακρίβεια λόγω της σημασίας της εφελκυστικής αντοχής για τη μέθοδο). Για το πάχος χρησιμοποιούνται επίσης κατασκευαστικά στοιχεία ή άλλα πιο πρόσφατα στοιχεία που μπορεί να διαθέτουμε (π.χ. πυρηνοληψία).

Χρησιμοποιώντας όλα τα παραπάνω στοιχεία και με τη βοήθεια των διαγραμμάτων που παρέχονται (στο πρώτο παράρτημα δίνεται ενδεικτικά ένα διάγραμμα για τα α/φ μονού τροχού), μπορούμε να προσδιορίσουμε το μέγιστο φορτίο που μπορεί να δεχτεί το οδόστρωμα. Στη συνέχεια με τα αντίστοιχα διαγράμματα που δίνονται από τη συμπληρωματική οδηγία [5], προσδιορίζουμε το PCN του αεροδρομίου (στο πρώτο παράρτημα δίνεται ένα τέτοιο διάγραμμα ενδεικτικά). Προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός

ότι κατά τη χρήση αυτών των τελευταίων διαγραμμάτων (για το PCN) η αντοχή του εδάφους είναι αυτή που προκύπτει μετά τη διόρθωση λόγω της υπόβασης και όχι η αρχική.

Η μέθοδος της FAA αν και παρέχει αναλυτικές οδηγίες για το σχεδιασμό επιστρώσεων με σκοπό τη βελτίωση υπαρχόντων οδοστρώματων, δεν αναφέρεται στον τρόπο αξιολόγησης αυτών. Κάνοντας όμως χρήση της λογικής της αντιστροφής του σχεδιασμού, η οποία διέπει ολόκληρη τη διαδικασία της αξιολόγησης, μπορούμε να αξιολογήσουμε τέτοιες επιστρώσεις αντιστρέφοντας τη διαδικασία σχεδιασμού τους. Έτσι:

- Εύκαμπτη επίστρωση σε δύσκαμπτο οδόστρωμα : επιλύουμε τη σχέση προσδιορισμού του πάχους της επίστρωσης ως προς το πάχος που θα έπρεπε να έχει ένα νέο δύσκαμπτο οδόστρωμα και με αυτό προσδιορίζουμε το μέγιστο φορτίο:

$$h_d = \frac{\frac{t}{2.5} + C_b h_e}{F} \quad (3.2)$$

με t: πάχος της εύκαμπτης επίστρωσης

F: συντελεστής που καθορίζει τη ρηγμάτωση της επιφάνειας του υπάρχοντος δύσκαμπτου οδοστρώματος (πίνακας 5 του πρώτου παραρτήματος)

C_b: συντελεστής με τιμή μεταξύ 0.75 και 1 που καθορίζεται από τη δομική ακεραιότητα του υπάρχοντος δύσκαμπτου οδοστρώματος

h_d: πάχος νέου δύσκαμπτου οδοστρώματος που θ' απαιτούνταν για ν' αντέξει τα φορτία της κυκλοφορίας

h_e: πάχος υπάρχοντος οδοστρώματος

- Δύσκαμπτη επίστρωση σε εύκαμπτο οδόστρωμα: χρησιμοποιούμε το πάχος της επίστρωσης ως το πάχος ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος με υπόβαση ολόκληρο το υπάρχον εύκαμπτο και προσδιορίζουμε το συντελεστή αντίδρασης K πάνω στην επιφάνεια του υπάρχοντος εύκαμπτου οδοστρώματος. Με την τιμή αυτή του K και με το πάχος της πλάκας προσδιορίζουμε το μέγιστο φορτίο που μπορεί να φέρει το οδόστρωμα
- Δύσκαμπτη επίστρωση σε δύσκαμπτο οδόστρωμα: επιλύουμε και πάλι τη σχέση προσδιορισμού του απαιτούμενου πάχους επίστρωσης ως προς το πάχος που θα είχε ένα νέο δύσκαμπτο οδόστρωμα και με αυτό προσδιορίζουμε το μέγιστο φορτίο που μπορεί να δεχτεί το οδόστρωμα. Υπάρχουν δύο περιπτώσεις:

1. επίστρωση χωρίς την παρουσία ενδιάμεσης ισοπεδωτικής στρώσης, οπότε το

πάχος είναι : $h = \sqrt[1.4]{h_c^{1.4} + C_r h_e^{1.4}}$ ή αν η διαφορά των εφελκυστικών αντοχών

των 2 σκυροδεμάτων είναι πάνω από 0.7MPa τότε:

$$h = h_c \sqrt[1.4]{\frac{1}{1 + C_r \left(\frac{h_e}{h_b} \right)^{1.4}}} \quad (3.3)$$

με h : πάχος νέου οδοστρώματος που θα απαιτούνταν

h_c : πάχος επίστρωσης

h_e : πάχος υπάρχοντος οδοστρώματος

C_r : συντελεστής εξαρτώμενος από τη ρηγμάτωση του υπάρχοντος οδοστρώματος και της μετάδοσης του φορτίου στους αρμούς

h_b : πάχος πλάκας σκυροδέματος για την εφελκυστική αντοχή του υπάρχοντος σκυροδέματος

2. επίστρωση με την παρουσία ενδιάμεσης ισοπεδωτικής στρώσης: οπότε το πάχος μιας πλάκας θα ήταν: $h = \sqrt{h_c^2 + C_r h_e^2}$, και αν η διαφορά της εφελκυστικής αντοχής των 2 σκυροδεμάτων είναι μεγαλύτερη των 0.7 MPa τότε:

$$h = h_c \sqrt{1 + C_r \left(\frac{h_e}{h_b} \right)^2} \quad (3.4)$$

με τις παραμέτρους όπως ορίστηκαν πριν.

Υπάρχει επίσης η περίπτωση οι δύο πλάκες να συνεργαστούν πλήρως και να δουλέψουν ως μία. Σ' αυτήν την περίπτωση το πάχος ενός νέου απαιτούμενου οδοστρώματος θα είναι : $h = h_e + h_c$ με τις παραμέτρους όπως ορίστηκαν πριν.

3.4 Σχολιασμός

Για τον καθορισμό του PCN τα απαραίτητα στοιχεία είναι λίγα και είναι σχετικά εύκολο να προσδιοριστούν. Σημαντικό, επίσης, είναι το γεγονός ότι η αντοχή του σκυροδέματος χρησιμοποιείται αφού πρώτα γίνει σ'αυτήν εφαρμογή του συντελεστή ασφαλείας 1.3 (τιμή η οποία μάλιστα είναι ανάλογη με αυτή που χρησιμοποιείται από τον Ε.Κ.Ω.Σ. δηλαδή 1.5). Με αυτό τον τρόπο μειώνονται τα σφάλματα από τον ενδεχόμενο προσεγγιστικό προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής του υλικού.

Ο προσδιορισμός του PCN γίνεται με διαγράμματα ανάλογα με το σύστημα τροχών του α/φ σχεδιασμού. Αυτό παρέχει μια ευκολία όσον αφορά τους υπολογισμούς, αλλά ταυτόχρονα εισάγει και μια σχετική ανακρίβεια η οποία σχετίζεται με το γεγονός ότι μ' αυτό

τον τρόπο δε λαμβάνονται υπ' όψιν οι διαφορές που υπάρχουν στο ίδιο σύστημα τροχών ανάμεσα στα διάφορα α/φ (π.χ. 2 α/φ με dual tandem σύστημα έχουν διαφορετικές αποστάσεις στα φορεία τους ενώ και η κατανομή βάρους στα φορεία δεν είναι ίδια). Επομένως ο υπολογισμός γίνεται απλός και εύκολος, με μικρή μείωση της ακρίβειας όσον αφορά τις μικροδιαφορές μεταξύ των α/φ.

Η μικτή κυκλοφορία χρησιμοποιείται με τη μετατροπή όλων των διελεύσεων σε διελεύσεις του α/φ σχεδιασμού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μεγάλη απλοποίηση του προβλήματος γιατί ασχολούμαστε μ' ένα μόνο α/φ και όχι με ολόκληρο τον στόλο των α/φ, κάτι το οποίο θα περιέπλεκε και θα δυσκόλευε πολύ τη διαδικασία. Στον αλγόριθμο μετατροπής υπεισέρχονται δύο στοιχεία: ο συντελεστής ισοδυναμίας μεταξύ των συστημάτων των κύριων φορείων των α/φ και η κατανομή των φορτίων στους τροχούς. Ο συντελεστής ισοδυναμίας αυτός παρουσιάζει το ίδιο πρόβλημα που αναφέρθηκε πιο πριν, ότι δηλαδή αποτελεί ένα στατιστικό μέσο όρο της επίδρασης των συστημάτων των τροχών αλλά δε μπορεί να συμπεριλάβει τυχόν μικροδιαφορές από α/φ σε α/φ. Επίσης, η κατανομή των φορτίων στους τροχούς δε γίνεται με βάση τις τιμές που παρέχονται από τους κατασκευαστές, αλλά με βάση την παραδοχή για 95% και 5% στα κύρια φορεία και το ρινιαίο τροχό αντίστοιχα.

Η μέθοδος αναφέρει αναλυτικά τις προδιαγραφές για την πλάκα σκυροδέματος και την υπόβαση, το ελάχιστο πάχος της οποίας ορίζεται στις 4in (10.2cm). Για τη στρώση έδρασης ορίζεται ως μέγιστη τιμή του συντελεστή αντίδρασης τα 136MN/m^3 , τιμή μικρότερη από τη χαρακτηριστική τιμή για την υψηλή κατηγορία αντοχής της μεθόδου ACN/PCN. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μέθοδος να μην ασχολείται καθόλου μ' εδάφη που ανήκουν στην κατηγορία υψηλής εδαφικής αντοχής, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι δεν εφαρμόζεται για όλο το φάσμα των τιμών του συντελεστή αντίδρασης που ορίζει ο ICAO. Αυτό το γεγονός πιθανόν να οφείλεται στη φέρουσα ικανότητα των εδαφών των περιοχών στις οποίες στηρίχθηκε η διαμόρφωση της μεθόδου, όπου μπορεί να μην απαντώνται εδάφη με τόσο υψηλό συντελεστή αντίδρασης.

Τα διαγράμματα για τον υπολογισμό του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου που παρέχει η μέθοδος, αφορούν ορισμένους τύπους α/φ ενώ για τα υπόλοιπα είτε χρησιμοποιούμε κάποιο από τα διαγράμματα που δίνονται, συγκρίνοντας τις προδιαγραφές των α/φ, είτε χρησιμοποιούμε τα γενικά διαγράμματα για το σύστημα τροχών. Αυτή η διαδικασία έχει το πλεονέκτημα της ταχύτητας και της ευκολίας χρήσης και εργασίας, όμως παρουσιάζει τη δυσκολία ότι για κάθε νέο α/φ πρέπει να εκδίδεται και νέο διάγραμμα καθώς και ότι πρέπει να συμπληρωθούν οι πίνακες για όλα τα α/φ, ώστε να μη χρησιμοποιείται κάποιος πίνακας προσεγγιστικά.

Τα διαγράμματα που παρέχονται για τη διόρθωση της τιμής του συντελεστή αντίδρασης του εδάφους δέχονται ως μέγιστη τιμή του συντελεστή τα 81 MN/m^3 και ως μέγιστο πάχος υπόβασης τα 35cm. Η υπόβαση συμπεριλαμβάνεται έμμεσα μέσω της τροποποίησης της τιμής του K και της δημιουργίας ενός ενιαίου υλικού υπόβασης και σκάφης.

Αναλύοντας κάποια παραδείγματα με τη μέθοδο αυτή προέκυψε ότι για αύξηση της τιμής του K, δηλαδή για βελτίωση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους, η τιμή του PCN αυξάνει, κάτι το οποίο μοιάζει να είναι λάθος αφού το PCN είναι, όπως αναφέραμε, το ACN του α/φ που μπορεί να δεχτεί χωρίς περιορισμούς το οδόστρωμα. Με τη βελτίωση όμως της ποιότητας του εδάφους η τιμή του ACN μειώνεται, οπότε θα περιμέναμε αντίστοιχη μείωση και για το PCN [6].

Στη διαδικασία με την οποία προέκυψαν τα διαγράμματα της μεθόδου, και για τα οποία χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση Westergaard, δεν γίνεται λόγος για το αν έχουν συμπεριληφθεί οι τάσεις λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών και αν ναι με ποια μέθοδο. Είναι γνωστό ότι οι θερμοκρασιακές τάσεις στο σκυρόδεμα παίζουν σημαντικό ρόλο και από αναλύσεις που έχουν γίνει [7], έχει αποδειχθεί ότι η θεωρία Westergaard για τις θερμοκρασιακές τάσεις δεν είναι αρκετά ακριβής λόγω των παραδοχών τις οποίες κάνει.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι με τον τρόπο που προσδιορίζεται το PCN από τη μέθοδο, η τιμή που προκύπτει παρουσιάζει μια εξάρτηση από την κυκλοφορία. Αυτό συνεπάγεται ότι οποιαδήποτε αλλαγή συμβεί σε αυτή θα προκαλέσει και τη μεταβολή της αριθμητικής τιμής του PCN. Το γεγονός αυτό όμως μοιάζει ν' αντιβαίνει στον ορισμό του ICAO, στον οποίο φαίνεται ότι αν ένα α/φ έχει τιμή ACN μικρότερη αυτής του PCN μπορεί να πραγματοποιήσει απεριόριστες διελεύσεις στο οδόστρωμα. Αντίθετα, η μέθοδος της FAA δείχνει ότι όσο θα αυξάνει ο αριθμός των διελεύσεων τόσο θα μειώνεται η τιμή του PCN. Επομένως, υπάρχει ο κίνδυνος να προσδιοριστεί μια τιμή PCN, να θεωρηθεί σταθερή και ανεξάρτητη των μεταβολών της κυκλοφορίας όπως ορίζει ο ICAO και τελικά το οδόστρωμα να αστοχήσει λόγω αλλαγής του φόρτου, ενώ ο δομικός έλεγχος μέσω των τιμών ACN και του PCN να υποδεικνύει ότι δεν υπάρχει τέτοιο ενδεχόμενο. Λόγω της μεγάλης σημασίας, λοιπόν, που φαίνεται να έχει η συγκεκριμένη αδυναμία, εξετάζεται και στο όγδοο κεφάλαιο με αναλυτικό υπολογισμό διατομών και ελέγχου της κόπωσης του σκυροδέματος. Πρέπει πάντως ν' αναφερθεί ότι η αδυναμία αυτή οφείλεται τόσο στον ορισμό του ICAO, ο οποίος εισάγει το απεριόριστο των διελεύσεων, όσο και στη μέθοδο της FAA.

Συνοψίζοντας όσα προηγουμένως αναφέρθηκαν, έχουμε:

Πλεονεκτήματα:

- Το PCN και το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο υπολογίζεται για όλα τα συνήθη α/φ μέσω των αντίστοιχων διαγραμμάτων, το οποίο συνεπάγεται εύκολο υπολογισμό

- Τα δεδομένα που απαιτούνται για την αξιολόγηση είναι λίγα και προσδιορίζονται σχετικά εύκολα
- Η μικτή κυκλοφορία μετατρέπεται σε κυκλοφορία του α/φ σχεδιασμού και είναι πιο εύκολο να τη διαχειριστούμε

Μειονεκτήματα:

- Για τον προσδιορισμό του PCN και του επιτρεπόμενου φορτίου δεν υπάρχουν πάντοτε τα απαιτούμενα διαγράμματα για όλα τα α/φ με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται είτε τα γενικά διαγράμματα είτε διαγράμματα άλλων παρόμοιων α/φ. Απαιτείται, επίσης, διαρκής ενημέρωση της μεθόδου με όλα τα νέα α/φ
- Ενδεχόμενη ασυμβατότητα με τις παραδοχές ACN-PCN για την επιρροή της φέρουσας ικανότητας έδρασης (αύξηση της τιμής του συντελεστή αντίδρασης του εδάφους προκαλεί αύξηση του PCN)
- Ο συντελεστή αντίδρασης K θεωρείται ότι έχει ανώτατη τιμή μικρότερη από τη χαρακτηριστική τιμή που έχει ορίσει ο ICAO για την Α κατηγορία αντοχής εδάφους
- Για τη μετατροπή της μικτής κυκλοφορίας χρησιμοποιούνται συντελεστές οι οποίοι δεν επιτρέπουν να ληφθεί υπόψιν η διαφορετική επίδραση του κάθε α/φ, ενώ και η κατανομή φορτίου δεν είναι η πραγματική
- Η τιμή του PCN εξαρτάται από την κυκλοφορία και μεταβάλλεται όταν μεταβάλλεται και αυτή

4.ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ **ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ** **ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ** **M. ΒΡΕΤΑΝΙΑΣ [DIRECTORATE OF** **CIVIL ENGINEERING SERVICES]**

4.1 Ιστορικό δημιουργίας

Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί μετεξέλιξη προηγούμενων εκδόσεων που έχουν δημιουργηθεί από το συγκεκριμένο οργανισμό. Το 1948 εμφανίστηκε η πρώτη μορφή με τη χρήση των εξισώσεων του Westergaard για τάσεις από α/φ και των εξισώσεων Bradbury για τη θερμοκρασία. Το 1951 γίνεται αναθεώρηση της αρχικής μορφής ώστε να λάβει υπόψη το σύστημα ταξινόμησης LCN. Το 1959 εκδίδεται το πρώτο εγχειρίδιο του οργανισμού, όπου για πρώτη φορά εμφανίζεται η αξιολόγηση υφιστάμενων οδοστρωμάτων με τη διαδικασία της αναστροφής του σχεδιασμού. Η σημερινή μορφή του εγχειριδίου εκδίδεται το 1985, όπου πλέον έχει γίνει τροποποίηση του ώστε να συμπεριληφθεί και η μέθοδος ACN/PCN.

4.2 Παραδοχές

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται και για εύκαμπτα και για δύσκαμπτα οδοστρώματα. Στα δύσκαμπτα οδοστρώματα κύριο δομικό στοιχείο είναι το σκυρόδεμα. Η μεγάλη δυσκαμψία του σκυροδέματος έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη υψηλών τάσεων. Η αρχή σχεδιασμού, λοιπόν, αυτής της μεθόδου, όσον αφορά τα δύσκαμπτα οδοστρώματα, είναι ότι μπορούμε να ελέγξουμε τη ρηγμάτωση της πλάκας του σκυροδέματος ελέγχοντας τις εφελκυστικές τάσεις σε αυτό.

Το πρώτο σημάδι αστοχίας είναι η εμφάνιση ρωγμής είτε σε γωνία είτε ρωγμή διαχωρισμού (halving crack). Παράγωγες μορφές ρηγμάτωσης θεωρούνται ο τετραμερισμός (quartering crack) και η ρωγμή μορφής δέλτα (delta crack). Μετά την πρώτη ρωγμή, ο ρυθμός με τον οποίο φτάνουμε στην αστοχία εξαρτάται από την υποστήριξη που παρέχει η υπόβαση, τη μορφή της αστοχίας (οι ρωγμές στη γωνία προκαλούν ταχύτερα την αστοχία από ότι οι ρωγμές διαχωρισμού), τη συχνότητα της κυκλοφορίας και της υπερφόρτισης (overload), τη σφράγιση των ρωγμών και την παγετοπληξία. Με βάση όλες αυτές τις παρατηρήσεις, η μέθοδος καθορίζει ως κριτήριο αστοχίας την εμφάνιση ρωγμών σε ποσοστό 1/3 και 50% των πλακών. Η μορφή της αστοχίας εξαρτάται από την κυκλοφορία και το πως

διέρχεται αυτή από τους αρμούς (εγκιβωτισμένη κυκλοφορία από το κέντρο των πλακών οδηγεί στην εμφάνιση επιμηκών ρωγμών), από τις διαστάσεις της πλάκας σε σχέση με το πάχος αυτής και από το γεγονός ότι το κρίσιμο α/φ που διέρχεται από πλάκα με μεγάλο πάχος είναι πιο πιθανό να προκαλέσει ρωγμή μακριά από τις γωνίες.

Η θεωρία στην οποία στηρίζεται η κατάρτιση των διαγραμμάτων σχεδιασμού είναι αυτή του Westergaard για φόρτιση ελαστικής πλάκας πάνω σε ελατηριωτό έδαφος Winkler με συντελεστή αντίδρασης εδάφους (ελατηρίου) K . Η επίλυση στο εσωτερικό των πλακών έγινε με τις εξισώσεις των Pickett, Raville, Jones και McCormack. Για φόρτιση στη γωνία χρησιμοποιήθηκε η τροποποίηση των εξισώσεων του Westergaard από τον Pickett για να συμπεριληφθεί και η ανύψωση της πλάκας λόγω διαφοράς θερμοκρασίας. Οι υπολογισμοί έγιναν για στατικό φορτίο τροχού αγνοώντας τα δυναμικά φαινόμενα. Στους αρμούς έγινε η ακόλουθη υπόθεση μεταφοράς φορτίου:

Σε ισχυρή σταθεροποιημένη βάση		Υπόβαση από αμμοχάλικο ή απευθείας στο έδαφος	
Πάχος πλάκας (mm)	% μεταβίβαση φορτίου	Πάχος πλάκας (mm)	% μεταβίβαση φορτίου
150-225	15-20	150-225	5-10
>250	33	250-300	25-33
		>300	33

Πίνακας 4.1 Ποσοστό μεταφερόμενου φορτίου δια μέσου των αρμών (Πηγή [8])

Η βασική διατομή την οποία προτείνει η μέθοδος είναι όμοια μ' αυτή της FAA (σχήμα 3.1), με τη διαφορά ότι στην υπόβαση αντί για σταθεροποιημένο ή θραυστό αμμοχάλικο συνιστά την τοποθέτηση DLC (dry lean concrete = σκυρόδεμα χαμηλής αντοχής με προκαθορισμένη περιεκτικότητα σε νερό και με προκαθορισμένη αντοχή).

Στην εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος έχει χρησιμοποιηθεί συντελεστής ασφαλείας ώστε να διασφαλιστεί ότι η κρίσιμη τάση θα είναι στο εσωτερικό της πλάκας και να συμπεριλάβει τα φαινόμενα κόπωσης. Για τον καθορισμό της επιτρεπόμενης τάσης λαμβάνονται υπόψιν η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, οι θερμοκρασιακά επιβαλλόμενες τάσεις, η μεταφορά φορτίου στους αρμούς, ο λόγος των τάσεων στη γωνία προς τις τάσεις στο κέντρο της πλάκας και οι ισοδύναμες φορτίσεις (coverages). Για τη θερμοκρασία έγινε η θεώρηση ημιτονοειδούς μεταβολής αυτής με μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας τους 15°C .

Για να επιταχυνθεί ο προσδιορισμός του PCN, η μέθοδος παρέχει τη δυνατότητα απευθείας προσδιορισμού αυτού, χωρίς την παρεμβολή άλλου ενδιάμεσου βήματος. Στη διαδικασία αυτή έγιναν οι εξής θεωρήσεις:

- Επειδή το ACN αντιστοιχεί σε φορτίο μονού τροχού που προκαλεί τάση 2.75MPa στο κέντρο της πλάκας, χρησιμοποιήθηκαν διορθωτικοί συντελεστές για διαφορετικά επιτρεπόμενα φορτία τροχού.
- Το ACN θεωρεί την πλάκα του σκυροδέματος απευθείας εδραζόμενη στο έδαφος. Επομένως, λόγω της μείωσης του πάχους της πλάκας που προκύπτει όταν υπάρχει και υπόβαση από DLC (dry lean concrete = σκυρόδεμα χαμηλής αντοχής με προκαθορισμένη περιεκτικότητα σε νερό και με προκαθορισμένη αντοχή) έχουν χρησιμοποιηθεί διορθωτικοί συντελεστές για dual και dual-tandem συστήματα τροχών.
- Για βαριά dual-tandem α/φ λαμβάνεται υπόψιν η αλληλεπίδραση τροχού – υπόβασης από DLC με τον περιορισμό της τιμής του συντελεστή αντίδρασης του εδάφους πάνω στην υπόβαση.
- Διόρθωση έγινε και στο μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος που χρησιμοποιεί η μέθοδος ACN/PCN και αυτού που χρησιμοποιεί η συγκεκριμένη μέθοδος.
- Ο υπολογισμός του ACN έγινε για ένα κύριο φορείο τροχών και συγκριτικές αναλύσεις έδειξαν ότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις λόγω αλληλεπίδρασης των φορείων δεν είναι μεγαλύτερες από τις τάσεις χωρίς την αλληλεπίδραση.

Στη μέθοδο αυτή η κυκλοφορία υπεισέρχεται μέσω του αριθμού των ισοδύναμων διελεύσεων (coverages), δηλαδή του αριθμού των μέγιστων φορτίσεων της πλάκας του σκυροδέματος στην κάτω επιφάνειά της. Ο προσδιορισμός του αριθμού των ισοδύναμων διελεύσεων (coverages) γίνεται αφού προσδιοριστεί ο λόγος διελεύσεις/ισοδύναμες διελεύσεις. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση της μεθόδου του U.S. Army Corps of Engineers, η οποία θεωρεί ότι για μεγάλο αριθμό διελεύσεων η κίνηση κατανέμεται εγκάρσια σε μια διατομή με βάση την κανονική κατανομή γύρω από τη μέση γραμμή κίνησης. Χωρίζουμε το οδόστρωμα σε λωρίδες με πλάτος ίσο με το πλάτος ενός τροχού του α/φ, σχεδιάζουμε την κανονική κατανομή και προσδιορίζουμε έτσι τον αριθμό των ισοδύναμων διελεύσεων (coverages) για κάθε λωρίδα. Ο σχεδιασμός του οδοστρώματος γίνεται για τη λωρίδα με το μέγιστο αριθμό ισοδύναμων διελεύσεων (coverages). Ο λόγος διελεύσεις προς ισοδύναμες διελεύσεις δίνεται από :

$$\frac{P}{C} = \frac{1}{\gamma W_t} \quad (4.1)$$

με το γ να είναι συνάρτηση της κανονικής κατανομής και το W_t είναι το πλάτος του τροχού σε μέτρα (m). Αν υπάρχουν περισσότεροι του ενός τροχοί, αθροίζονται οι καμπύλες του κάθε τροχού και ανάλογα με την απόστασή τους προκύπτει και η αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Οι

λόγοι που δίνονται για την περίπτωση εγκιβωτισμένης κυκλοφορίας πάνω στην κύρια γραμμή κίνησης (channelised traffic) είναι:

Κύριο σύστημα τροχών	διελεύσεις/ισοδύναμες διελεύσεις
dual	3.2
dual tandem	1.6

Πίνακας 4.2 Τιμές λόγων διελεύσεων προς ισοδύναμες διελεύσεις (Πηγή [8])

Πίεση ελαστικού Μρα	Για μονό τροχό			
	ACN α/φ			
	Μέχρι 10	11-20	21-40	Πάνω από 40
Μέχρι 1	8	6	5	4
1 έως 1.5	10	8	6	5
Πάνω από 1.5	12	10	7	6

Πίνακας 4.3 Τιμές λόγων διελεύσεων προς ισοδύναμες διελεύσεις (Πηγή [8])

Στο σχεδιασμό εισάγεται η έννοια του ACN σχεδιασμού, που είναι το ACN του α/φ με τη μέγιστη τιμή ACN από αυτά που χρησιμοποιούν το αεροδρόμιο. Δεν παίρνουμε το μέγιστο ACN ως ACN σχεδιασμού παρά μόνο σε περιπτώσεις όπου το μήκος του διαδρόμου δεν επιτρέπει απογείωση με το μέγιστο φορτίο, ο διάδρομος χρησιμοποιείται μόνο για προσγειώσεις ή το οδόστρωμα οδηγεί σε δάπεδα υποστέγων συντήρησης. Ακόμη γίνεται διόρθωση της τιμής που προκύπτει από τη χαρακτηριστική τιμή αντοχής του εδάφους στην πραγματική.

Η κατάταξη των εδαφών γίνεται με το σύστημα Casagrande. Η τιμή του συντελεστή αντίδρασης του εδάφους είναι αυτή που προκύπτει μετά την προετοιμασία του εδάφους για την κατασκευή. Η τιμή αυτή καθορίζεται με δοκιμαστική φόρτιση πλάκας, μια δοκιμή η οποία είναι ακριβής. Γι' αυτό παρέχεται καμπύλη από τη μέθοδο (πρώτη καμπύλη του δεύτερου παραρτήματος) για συσχέτιση της τιμής του K με το CBR. Η καμπύλη έχει προκύψει με βάση τα εδάφη της Μ. Βρετανίας και γι' αυτό συνιστάται προσοχή σε περίπτωση χρήσης της σε άλλες περιοχές. Μέγιστη τιμή του συντελεστή αντίδρασης του εδάφους είναι τα 150MN/m³.

Παρέχονται αναλυτικές προδιαγραφές για όλες τις στρώσεις, τα υλικά, τους αρμούς και τους πιθανούς οπλισμούς. Η μέθοδος προτείνει την κατασκευή των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων με τη μορφή πλάκας σκυροδέματος πάνω σε DLC εξηγώντας τα πλεονεκτήματα μιας τέτοιας κατασκευής και παρέχει τρία διαγράμματα για τη διαστασιολόγηση και αξιολόγηση τέτοιων οδοστρωμάτων (ενδεικτικά δίνεται το ένα διάγραμμα στο παράρτημα). Στα διαγράμματα αναφέρονται και τα ελάχιστα πάχη DLC οριοθετώντας έτσι τη μέθοδο. Σε περίπτωση χρήσης υπόβασης από άλλο υλικό παρέχονται

διαφορετικά διαγράμματα. Δίνονται ακόμη πληροφορίες σχετικά με τον απαιτούμενο βαθμό συμπύκνωσης της στρώσης έδρασης, τις ανάγκες στράγγισης, καθώς και την αντιμετώπιση πολύ αδύναμων και διογκούμενων εδαφών.

Η μικτή κυκλοφορία μετατρέπεται σε αριθμό ισοδύναμων διελεύσεων (coverages) και αθροιζόμενοι αυτοί οι αριθμοί παρέχουν το συνολικό αριθμό. Η μέθοδος θεωρεί 3 επίπεδα κυκλοφορίας: χαμηλό (10000 ισοδύναμες διελεύσεις), μέσο (100000 ισοδύναμες διελεύσεις) και υψηλό (250000 ισοδύναμες διελεύσεις). Για το υψηλό επίπεδο συνιστάται η προσαύξηση των αποτελεσμάτων για το μέσο κατά 10%.

Η διάρκεια ζωής του οδοστρώματος καθορίζεται από το μηχανικό και υπεισέρχεται στους υπολογισμούς μέσω της κυκλοφορίας, θεωρώντας ότι οι ισοδύναμες διελεύσεις ισοκατανέμονται σ' όλη τη διάρκεια της ζωής του οδοστρώματος.

Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος που χρησιμοποιείται στα διαγράμματα είναι αυτή των 28 ημερών. Η μέθοδος παρέχει και διάγραμμα συσχέτισης της αντοχής των 28 ημερών μ' αυτή των 7 ημερών. (διάγραμμα 5 δεύτερου παραρτήματος)

4.3 Διαδικασία υπολογισμού

4.3.1 Αξιολόγηση με αναστροφή της διαδικασίας σχεδιασμού

Πρώτο αναγκαίο στοιχείο για την αξιολόγηση ενός οδοστρώματος είναι η κυκλοφορία. Η μικτή κυκλοφορία στην περίπτωση της μεθόδου αυτής εισέρχεται μέσω του αριθμού των ισοδύναμων διελεύσεων (coverages) κάθε α/φ σ' όλη τη διάρκεια της ζωής του οδοστρώματος. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

- Κάνουμε μια λίστα μ' όλα τα α/φ που πρόκειται να χρησιμοποιήσουν το αεροδρόμιο και με τον αριθμό των διελεύσεων του κάθε α/φ.
- Προσδιορίζουμε το ACN για κάθε α/φ για το συντελεστή αντίδρασης του εδάφους.
- Θεωρούμε α/φ σχεδιασμού εκείνο το οποίο έχει το μεγαλύτερο ACN.
- Από τους πίνακες που δόθηκαν προηγουμένως προσδιορίζουμε το λόγο των διελεύσεων προς τις ισοδύναμες διελεύσεις (coverages).
- Πολλαπλασιάζουμε τον αριθμό των διελεύσεων του κάθε α/φ με τη χρονική διάρκεια ζωής που έχει επιλεγεί και διαιρούμε με το λόγο διελεύσεις προς ισοδύναμες διελεύσεις και προκύπτει ο συνολικός αριθμός ισοδύναμων διελεύσεων (coverages) για κάθε α/φ καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος.
- Διαιρούμε το ACN του κάθε α/φ με το ACN του α/φ σχεδιασμού και μ' αυτό το λόγο και το διάγραμμα 6 του δεύτερου παραρτήματος προσδιορίζουμε το συντελεστή μικτής κυκλοφορίας δύσκαμπτων οδοστρώματων (RMTF).

- Με το συντελεστή αυτόν διαιρούμε το συνολικό αριθμό ισοδύναμων διελεύσεων (coverages) και έχουμε τον αριθμό των ισοδύναμων διελεύσεων (coverages) του α/φ.
- Αθροίζουμε όλους τους αριθμούς ισοδύναμων διελεύσεων (coverages) και έχουμε το συνολικό επίπεδο κυκλοφορίας.

Έχοντας προσδιορίσει το επίπεδο κυκλοφορίας με την προηγούμενη διαδικασία, το επόμενο απαραίτητο στοιχείο είναι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Η αντοχή αυτή πρέπει να είναι αντοχή 28 ημερών και η επιλογή σχετίζεται με το κριτήριο αστοχίας της ρηγμάτωσης του 50% των πλακών.

Ο συντελεστής αντίδρασης του εδάφους K είναι άλλο ένα αναγκαίο δεδομένο για τη διαδικασία της αξιολόγησης. Αν η υπόβαση του οδοστρώματος είναι από DLC τότε χρησιμοποιείται απευθείας η τιμή του συντελεστή αντίδρασης του εδάφους. Αν η υπόβαση είναι από υλικό σταθεροποιημένο με τσιμέντο, τότε και πάλι χρησιμοποιούμε απευθείας την τιμή του συντελεστή αντίδρασης του εδάφους και με τη χρήση του διαγράμματος 3 του δεύτερου παραρτήματος μετατρέπουμε το πάχος της υπόβασης σε ισοδύναμο πάχος DLC. Αν η υπόβαση είναι από αμμοχάλικο τότε χρησιμοποιούμε το διάγραμμα 4 του δεύτερου παραρτήματος και διορθώνουμε το συντελεστή αντίδρασης του εδάφους λόγω της υπόβασης.

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία και με το πάχος της πλάκας σκυροδέματος καταφεύγουμε στο κατάλληλο διάγραμμα και προσδιορίζουμε το ACN σχεδιασμού. Αν η υπόβαση είναι από DLC επιλέγουμε το κατάλληλο διάγραμμα ανάλογα με το σύστημα των τροχών του α/φ. Αν το απαιτούμενο πάχος του DLC δεν είναι όσο καθορίζει το διάγραμμα, τότε είτε μετατρέπουμε μέρος της πλάκας σε DLC πολλαπλασιάζοντας το πάχος με 3 (μέχρι 33mm πλάκας μπορούν να γίνουν 100mm DLC) είτε, αν υπάρχει περίσσεια, μετατρέπουμε DLC σε ισοδύναμη πλάκα διαιρώντας με 3 (μέχρι 50 mm μπορούν να μετατραπούν). Αν η υπόβαση είναι από αμμοχάλικο χρησιμοποιούμε το αντίστοιχο διάγραμμα. Το ACN που προκύπτει διορθώνεται, χρησιμοποιώντας αρκετά α/φ με παρόμοια τιμή του ACN, από την πραγματική τιμή του K στην χαρακτηριστική τιμή που αντιστοιχεί στην κατηγορία στην οποία ανήκει το έδαφος.

Αν η πλάκα σκυροδέματος έχει οπλισμό ή βλήτρα ακολουθείται η ίδια διαδικασία με την οποία σχεδιάστηκαν.

Σε περίπτωση ύπαρξης επίστρωσης:

- Δύσκαμπτη επίστρωση σε εύκαμπτο οδόστρωμα: το προϋπάρχον εύκαμπτο θεωρείται ως βάση σταθεροποιημένη ή ως βελτιωμένο έδαφος. Αν είναι πολύ καλής ποιότητας το επιφανειακό ασφαλτικό στρώμα και πολύ ανθεκτικές η βάση και η

υπόβαση, τότε μπορεί να θεωρηθεί ως DLC. Από εκεί και πέρα η διαδικασία είναι ίδια όπως προηγουμένως, θεωρώντας ως πλάκα σκυροδέματος την επίστρωση.

- Εύκαμπτη επίστρωση σε δύσκαμπτο οδόστρωμα: θεωρείται ως σύνθετο οδόστρωμα και υπάρχουν τρεις περιπτώσεις για την αντιμετώπιση:

1. Εάν $\beta \leq 0.5$ όπου β ο λόγος του πάχους της ασφαλικής επίστρωσης προς το πάχος της πλάκας, τότε το οδόστρωμα θεωρείται δύσκαμπτο και το πάχος λαμβάνεται: $h_e = C_t h_e + \frac{t}{1.8}$ με h_e : ισοδύναμο πάχος πλάκας σκυροδέματος

και C_t : δείκτης κατάστασης ο οποίος δίνεται πιο κάτω (πίνακας 4.4), h_e : πάχος υφισταμένης πλάκας σκυροδέματος και t : πάχος επίστρωσης. Με το πάχος αυτό χρησιμοποιείται το κατάλληλο διάγραμμα των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων και προσδιορίζεται το PCN.

2. Εάν $\beta \geq 1$ τότε το οδόστρωμα θεωρείται εύκαμπτο και το ισοδύναμο πάχος σκυροδέματος είναι: $h_f = t + 1.8 C_t h_e + b_e$ με b_e : πάχος υπόβασης. Με την τιμή αυτή και χρησιμοποιώντας το διάγραμμα των εύκαμπτων οδοστρωμάτων προσδιορίζουμε το PCN.

3. Εάν $0.5 \leq \beta \leq 1$ τότε το PCN προκύπτει ως:

$$PCN = PCN_R + (PCN_F - PCN_R)(2\beta - 1) \text{ με } PCN_F \text{ και } PCN_R \text{ να είναι οι τιμές του PCN για } \beta=1 \text{ και } \beta=0.5 \text{ αντίστοιχα.}$$

- Δύσκαμπτη επίστρωση σε δύσκαμπτο οδόστρωμα: προσδιορίζουμε ένα ισοδύναμο πάχος μίας μόνο πλάκας μέσω της σχέσης:

$$h_r = \sqrt[n]{C_1 h_1 + C_2 h_2} \quad (4.2)$$

με $h_{1,2}$: πάχος της πάνω και της κάτω πλάκας αντίστοιχα, $C_{1,2}$: συντελεστές κατάστασης και το n παίρνει τις τιμές 1 (για πλήρη συνεργασία μεταξύ των 2 πλακών, που δουλεύουν ως μία), 1.6 (για πλάκες με μερική συνεργασία, όπου η 2^η πλάκα διαστρώθηκε απευθείας πάνω στην υπάρχουσα χωρίς καμία προετοιμασία) και 2 (για πλάκες χωρίς καμία συνεργασία με χρήση ενδιάμεσης ισοπεδωτικής στρώσης μέχρι 150mm). Η στρώση μπορεί να μετατραπεί σε ισοδύναμη στρώση σκυροδέματος και να προστεθεί στην κάτω πλάκα μέσω των σχέσεων για σύνθετα οδοστρώματα όπως προαναφέρθηκε. Όσο αυξάνει το πάχος της ενδιάμεσης στρώσης από ασφατικό, τόσο η πάνω πλάκα υπόκειται στις ελαστικές παραμορφώσεις της ασφάλτου)

Αν η ενδιάμεση στρώση είναι DLC πάχους πάνω από 150mm, τότε η ισοδύναμη πλάκα

$$\text{έχει πάχος: } h_r = \sqrt[1.6]{C_1 h_1^{1.6} + \left(\frac{h_d}{1.8}\right)^{1.6}} + C_2 h_2^{1.6} \text{ με } h_d: \text{πάχος του DLC.}$$

Οι συντελεστές κατάστασης που χρησιμοποιούνται είναι:

Κατάσταση πλακών σκυροδέματος στην περιοχή κυκλοφορίας	Συντελεστές κατάστασης	
	Ct	Ci
λίγες ρωγμές	1.0	1.0
30-50% των πλακών έχουν ρωγμές (halving, quartering, delta cracks)	0.85	0.75
Επί της ουσίας όλες σπασμένες με το 30%- 50% να έχουν ρωγμές γωνίας ή διαχωρισμού σε 5 ή περισσότερα κομμάτια	Θεωρείται DLC και δεν εφαρμόζονται οι σχέσεις για σύνθετα	Θεωρείται DLC και δεν εφαρμόζονται οι σχέσεις για σύνθετα
Πολλαπλές ρωγμές με ταυτόχρονη μετατόπιση	θεωρείται ως βάση από αμμοχάλικο	θεωρείται ως βάση από αμμοχάλικο

Πίνακας 4.4 Συντελεστές κατάστασης (Πηγή [8])

4.3.2 Αξιολόγηση με επί τόπου δοκιμές:

Σε περίπτωση έλλειψης των παραπάνω στοιχείων η μέθοδος δίνει τη δυνατότητα γι' αξιολόγηση με επιτόπου δοκιμές. Οι συνηθέστερες είναι:

- Το παραμορφοσίμετρο πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer)
- Δονητικές δοκιμές
- Δοκιμές βασιζόμενες στη δοκό Benkelman

Με χρήση της ελαστικής θεωρίας για πολυστρωματικές κατασκευές, κατασκευάζουμε ένα μοντέλο με το οποίο επεξεργαζόμαστε τα αποτελέσματα των δοκιμών και εφαρμόζουμε κριτήρια αστοχίας τάσεων ή παραμορφώσεων. Υπάρχουν δυσκολίες προσομοίωσης των αρμών και της μετάδοσης φορτίου, ενώ πρόβλημα αποτελεί και η μη ελαστική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων στρώσεων.

4.3.3 Αξιολόγηση με εμπειρικό υπολογισμό:

Η μέθοδος στηρίζεται στην εμπειρία χρήσης ενός αεροδρομίου από ένα α/φ. Είναι μέθοδος μη ακριβής. Η εκτίμηση του PCN γίνεται μέσω του έβδομου διαγράμματος του δεύτερου παραρτήματος. Χρησιμοποιούμε τον αριθμό των διελεύσεων και το ACN ενός α/φ που χρησιμοποιεί το αεροδρόμιο και βγάζουμε το λόγο του PCN προς το ACN του α/φ.

4.4 Παραδείγματα

Παράδειγμα 1°

Έστω οδόστρωμα αποτελούμενο από 275mm πλάκα σκυροδέματος και 150mm DLC. Το οδόστρωμα χρησιμοποιείται από α/φ με ACN 16, μονό τροχό, πίεση ελαστικών 1.3 MPa και λόγο διελεύσεων/ισοδύναμες διελεύσεις=8. Θεωρώντας 75 αναχωρήσεις ανά ημέρα για 350 μέρες και για διάρκεια ζωής 30 χρόνια προκύπτει: $\frac{75 \times 30 \times 350}{8} = 98438$ διελεύσεις (coverages) που αντιστοιχεί σε μέσο επίπεδο κίνησης. Ο συντελεστής αντίδρασης του εδάφους είναι $K=30\text{MN/m}^3$ και η αντοχή του σκυροδέματος είναι 4.5MPa σε 28 μέρες. Με τα παραπάνω στοιχεία προκύπτει ότι το PCN είναι 33/R/C/W/T. Δεν έγινε διόρθωση του PCN για την τυπική τιμή της αντοχής του εδάφους διότι για μονό τροχό δεν αλλάζει.

Παράδειγμα 2°

Έστω οδόστρωμα αποτελούμενο από 2 πλάκες σκυροδέματος με πάχος 200mm η κάθε μία, πάνω σε 150mm DLC, 150mm σκυροδέματος και 300mm αμμοχάλικο. Θεωρούμε 50000 διελεύσεις και επομένως μέσο επίπεδο κυκλοφορίας. Ο συντελεστής αντίδρασης του εδάφους $K=30\text{MN/m}^3$ και η αντοχή του σκυροδέματος είναι 4.7MPa. Οι 2 πλάκες μετατρέπονται σε μια ισοδύναμη: $h_r = \sqrt[1.6]{h_1^{1.6} + C_2 h_2^{1.6}} = \sqrt[1.6]{200^{1.6} + 1 \times 200^{1.6}} = 308\text{mm}$ με $n=1.6$, θεωρώντας μερικό δεσμό των δύο πλακών (υπάρχει μεμβράνη) και $C_2=1$ λόγω καλής κατάστασης της πλάκας. Τώρα πλέον έχουμε ένα σύνθετο οδόστρωμα με μία ισοδύναμη πλάκα πάνω, μια ενδιάμεση στρώση DLC και άλλη μια πλάκα σκυροδέματος κάτω. Το

μετατρέπουμε σε μια ισοδύναμη πλάκα: $h_r = \sqrt[1.6]{308^{1.6} + 0.75 \times 150^{1.6} + \left(\frac{150}{1.8}\right)^{1.6}} = 373\text{mm}$.

Λόγω της υπόβασης από αμμοχάλικο, η τιμή του K τροποποιείται και γίνεται 45MN/m^3 . Άρα πλέον έχουμε μια πλάκα σκυροδέματος 375mm σε υπόβαση από αμμοχάλικο με $K=45\text{MN/m}^3$. Οπότε PCN 40. Εξετάζοντας τα B707-120B, B757-200, B767-200 προκύπτει ότι κατά τη μετάβαση από $K=45$ σε $K=40$ η διαφορά στο ACN είναι αμελητέα. Άρα PCN 40/R/C/W/T.

4.5 Σχολιασμός

Η μέθοδος αυτή παρέχει τη δυνατότητα απευθείας υπολογισμού του PCN, χωρίς την ενδιάμεση παρεμβολή άλλων βημάτων, από ένα διάγραμμα και μόνο. Τα διαγράμματα που

υπάρχουν αφορούν τη συνήθη δομή οδοστρώματος που προτείνει ο οργανισμός (δηλαδή πλάκα σκυροδέματος με υπόβαση από DLC) και τρία συστήματα τροχών, καθώς κι ένα διάγραμμα για την περίπτωση πλάκας σκυροδέματος πάνω σε υπόβαση από αμμοχάλικο. Παρόλο που μ' αυτό τον τρόπο η ευκολία και η ταχύτητα των υπολογισμών είναι μεγάλη, η μη ύπαρξη διαγραμμάτων για κάθε α/φ δε μας επιτρέπει να συμπεριλάβουμε τις διαφορές μεταξύ των α/φ του ιδίου συστήματος τροχών, όσον αφορά τις αποστάσεις, την πίεση και την κατανομή του φορτίου. Τα απαραίτητα στοιχεία για τη χρήση των διαγραμμάτων και τον προσδιορισμό του PCN είναι ο συντελεστής αντίδρασης του εδάφους, η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, το πάχος της πλάκας του σκυροδέματος και ο αριθμός των ισοδύναμων διελεύσεων (coverages). Τα στοιχεία αυτά προσδιορίζονται σχετικά εύκολα. Στο σκυρόδεμα η μέθοδος εφαρμόζει συντελεστή ασφαλείας ώστε να διασφαλιστούμε από φαινόμενα κόπωσης.

Η μέθοδος αναφέρεται διεξοδικά σε προδιαγραφές για την κατασκευή, σε απαιτήσεις για τα υλικά και πάχη, καθώς και σε τρόπους αντιμετώπισης μη συμβατικών καταστάσεων. Με τον τρόπο αυτό οριοθετείται πλήρως το πλαίσιο εφαρμογής της. Μέγιστη τιμή του συντελεστή αντίδρασης του εδάφους είναι τα 150MN/m^3 , ενώ μέγιστη τιμή του πάχους της υπόβασης είναι τα 50cm. Στα διαγράμματα που αναφέρονται στη δομή οδοστρώματος με υπόβαση από DLC, η τιμή του πάχους που δίνεται είναι και η απαιτούμενη με βάση τη μέθοδο. Σε περίπτωση μη ύπαρξης του πάχους αυτού, δίνονται οι συντελεστές μετατροπής πλάκας σε DLC ή αντίστροφα. Ακόμη, σε περίπτωση χρήσης της βάσης από σταθεροποιημένα με τσιμέντο υλικά, παρέχεται διάγραμμα μετατροπής της σε ισοδύναμο πάχος DLC. Αν η βάση είναι από αμμοχάλικο δίνεται διάγραμμα για τροποποίηση της τιμής του K ανάλογα με το πάχος αυτής.

Η μέθοδος έχει συμπεριλάβει στην κατάρτιση των διαγραμμάτων τη φυσιολογική εξέλιξη φθοράς του σκυροδέματος λόγω των επαναλήψεων της φόρτισης. Ορίζονται επακριβώς κριτήρια αστοχίας λόγω ρηγμάτων, δίνοντας έτσι μια ρεαλιστική εκτίμηση της συμπεριφοράς του σκυροδέματος και του τρόπου με τον οποίο παύει να είναι διαθέσιμο για επιχειρησιακούς σκοπούς. Η ρηγμάτωση είναι το στοιχείο που καθορίζει ουσιαστικά όλη τη συμπεριφορά του υλικού, αφού όσο προχωράει τόσο το οδόστρωμα χάνει μέρος από την αντοχή του και απαιτεί συντήρηση για τη διατήρηση της δυνατότητας χρήσης του.

Η μέθοδος αντιμετωπίζει τη μικτή κυκλοφορία με τη μετατροπή της σε αριθμό ισοδύναμων διελεύσεων (coverages) του α/φ με το μεγαλύτερο ACN για τη συγκεκριμένη εδαφική αντοχή. Το επίπεδο της συχνότητας κυκλοφορίας μ' αυτό τον τρόπο εξαρτάται από την ποιότητα του εδάφους, τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος καθώς και από τα α/φ που χρησιμοποιούν το αεροδρόμιο. Στον υπολογισμό υπεισέρχονται συντελεστές ισοδυναμίας των ισοδύναμων διελεύσεων (coverages) μεταξύ α/φ, οι οποίοι έχουν προκύψει με στατιστική

επεξεργασία. Το ενδεχόμενο μειονέκτημα σ' αυτή τη διαδικασία προσδιορισμού είναι ότι δεν έχουν ληφθεί υπόψη διαφορές από α/φ σε α/φ, αλλά έχουν προτιμηθεί στατιστικοί μέσοι όροι για κάθε σύστημα τροχών.

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι στον υπολογισμό έχουν προστεθεί πέρα από τις τάσεις λόγω κυκλοφορίας και τάσεις λόγω θερμοκρασίας, δίνοντας ενδεχομένως μια πιο ρεαλιστική εικόνα της συμπεριφοράς του οδοστρώματος.

Η μέθοδος δίνει τη δυνατότητα αξιολόγησης ακόμη και χωρίς αναλυτικά στοιχεία, που μπορεί να μην υπάρχουν, μέσω των μη καταστρεπτικών δοκιμών και των μοντέλων προσομοίωσης ελαστικών πολυστρωματικών κατασκευών. Παρέχει επίσης και διάγραμμα προσδιορισμού του PCN μέσω εμπειρικού υπολογισμού, ο οποίος στηρίζεται στη χρήση του αεροδρομίου από συγκεκριμένους τύπους α/φ. Το γεγονός αυτό πρέπει να θεωρηθεί θετικό αφού παρέχονται και εναλλακτικές λύσεις.

Παρατηρούμε πάντως ότι αυξάνοντας το συντελεστή αντίδρασης του εδάφους το ACN και επομένως και το PCN αυξάνει γεγονός το οποίο δεν είναι λογικό αφού με τη βελτίωση του εδάφους μειώνεται η τιμή του ACN.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η μέθοδος παρέχει συσχέτιση του LCN με το PCN μ' αποτέλεσμα να είναι εφικτή η μετάβαση από το ένα σύστημα στο άλλο. Τονίζεται όμως ότι η μετατροπή είναι προσεγγιστική και γι' αυτό απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή.

Τέλος, παρουσιάζεται η ίδια αδυναμία, την οποία επέδειξε και η μέθοδος της FAA, με την εξάρτηση της τιμής του PCN από το επίπεδο της κυκλοφορίας του οδοστρώματος. Όπως ήδη αναφέρθηκε, περαιτέρω διερεύνηση του συγκεκριμένου θέματος θα πραγματοποιηθεί στο όγδοο κεφάλαιο.

Συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι:

Πλεονεκτήματα:

- Το PCN προσδιορίζεται απευθείας από ένα και μόνο διάγραμμα χωρίς τον προσδιορισμό κάποιου ενδιάμεσου μεγέθους.
- Τα δεδομένα που απαιτούνται είναι λίγα.
- Καθορίζονται επακριβώς τυπικά κριτήρια αστοχίας λόγω ρηγμάτωσης.
- Με απλή διαδικασία μετατρέπεται η μικτή κυκλοφορία σε κυκλοφορία ενός α/φ με το δυσμενέστερο αποτέλεσμα.
- Παρέχει τη δυνατότητα για εναλλακτικούς τρόπους αξιολόγησης εκτός από την αντιστροφή της διαδικασίας του σχεδιασμού.
- Δίνεται συσχέτιση LCN-PCN.

Μειονεκτήματα:

- Τα διαγράμματα δεν είναι για κάθε α/φ αλλά για ίδια συστήματα τροχών με αποτέλεσμα την ενδεχόμενη αδυναμία προσομοίωσης της διαφορετικής επίδρασης του κάθε α/φ.
- Η αύξηση της τιμής του K προκαλεί αύξηση της τιμής του PCN.
- Οι συντελεστές ισοδυναμίας διελεύσεις/ισοδύναμες διελεύσεις είναι στατιστικοί μέσοι όροι και δεν εμπεριέχουν τις μικροδιαφορές του κάθε α/φ.
- Η τιμή του PCN μεταβάλλεται με την κυκλοφορία.

5.ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ
ΓΑΛΛΙΚΟΥ ΥΠΟΥΡΓΕΙΟΥ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
[SERVICE TECHNIQUE
DES BASES AERIENNES,
MINISTRY OF TRANSPORTATION]

5.1 Ιστορικό δημιουργίας

Η συγκεκριμένη μέθοδος δημιουργήθηκε από το Γαλλικό Υπουργείο Συγκοινωνιών για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Αποτελεί εξέλιξη προηγούμενης μεθόδου που υπήρχε πριν την καθιέρωση του ACN/PCN και η οποία στηριζόταν στον προσδιορισμό του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου τυπικού συστήματος φορείου τροχών. Με τη νέα μέθοδο δίνεται η δυνατότητα ν' ασχοληθούμε με την πραγματική κυκλοφορία μέσω των διαγραμμάτων που παρέχονται για το κάθε α/φ και τον προσδιορισμό του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου, το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του PCN του αεροδρομίου.

5.2 Παραδοχές

Η μέθοδος ασχολείται με το σχεδιασμό και την αξιολόγηση τόσο των εύκαμπτων, όσο και των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Ως δύσκαμπτο ορίζεται το οδόστρωμα το οποίο αποτελείται από μία πλάκα σκυροδέματος πάνω σε μια υπόβαση από αμμοχάλικο ή κάποιο σταθεροποιημένο υλικό, δηλαδή μια διατομή όμοια με αυτήν που προτείνει η FAA (σχήμα 3.1).

Στα δύσκαμπτα οδοστρώματα η μέθοδος περιλαμβάνει και ορισμένα σύνθετα οδοστρώματα τα οποία παρουσιάζουν συμπεριφορά δύσκαμπτου, όπως για παράδειγμα δύσκαμπτο οδόστρωμα στο οποίο έχει διαστρωθεί ασφαλική επίστρωση για λόγους συντήρησης. Για την κατάρτιση των διαγραμμάτων της μεθόδου γίνεται η παραδοχή ότι το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος είναι 30000MPa και ο λόγος του Poisson είναι 0.15. Η επίλυση στηρίχθηκε στις εξισώσεις του Westergaard για πλάκα σκυροδέματος εδραζόμενη σε ελαστικό (ελατηριωτό) έδαφος Winkler, όπου η αντίδραση του εδάφους θεωρείται ανάλογη της παραμόρφωσής του, με συντελεστή αναλογίας το συντελεστή αντίδρασης του εδάφους K. Το K αυτό προσδιορίζεται με επιτόπου δοκιμαστική φόρτιση με πλάκα στην επιφάνεια έδρασης του οδοστρώματος, η οποία έχει προετοιμαστεί για την κατασκευή και έχει συμπακνωθεί στο 95% της τροποποιημένης δοκιμής Proctor. Η εφελκυστική αντοχή του

σκυροδέματος είναι αυτή η οποία έχει προκύψει από δοκιμές σε πρισματικά δοκίμια 90 ημερών. Εάν δεν διαθέτουμε τιμές αντοχής 90 ημερών αλλά 28 (όπως συνήθως συμβαίνει), η μέθοδος κάνει την παραδοχή ότι η αντοχή των 90 ημερών είναι η αντοχή των 28 ημερών προσαυξημένη κατά 10%. Στην εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος εφαρμόζονται συντελεστές ασφαλείας ανάλογα με τη δυνατότητα μετάδοσης φορτίου στους αρμούς:

Μηχανισμός μετάδοσης φορτίου στους αρμούς	Άλλες συνθήκες	Συντελεστής ασφαλείας
Χωρίς μηχανισμό	σε όλες τις περιπτώσεις	2.6
Βλήτρα	--	1.8
Τόρμος και εντορμία	λιγότερες από 3 δυσμενείς συνθήκες	1.8
	τουλάχιστον 3 δυσμενείς συνθήκες	2.6

Πίνακας 5.1 Τιμές συντελεστή ασφαλείας εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος (Πηγή [9])

Με τις δυσμενείς συνθήκες να είναι: (πηγή [9])

- Κακής ποιότητας έδαφος έδρασης ($K < 20 \text{ MN/m}^3$) ή μη ομογενές ή με προβλήματα παγετοπληξίας
- Λεπτή υπόβαση (κάτω από 20cm πάχος)
- Βαριά κυκλοφορία αποτελούμενη από α/φ ευρείας ατράκτου
- Έντονες ημερήσιες θερμοκρασιακές μεταβολές
- Απουσία ράβδων αγκύρωσης στους αρμούς

Τα διαγράμματα που παρέχονται για τα τρία τυπικά συστήματα φορείων κάνουν τις εξής παραδοχές όσον αφορά τις αποστάσεις και την πίεση των ελαστικών:

Τυπικό φορείο	Ίχνος (cm)	Βάση (cm)	Πίεση ελαστικών (MPa)
Μονού τροχού	--	--	0.6
Διπλού τροχού	70	--	0.9
Dual tandem	75	140	1.2

Πίνακας 5.2 Τιμές απόστασης και πίεσης ελαστικών βασικών συστημάτων τροχών (Πηγή [9])

Η κατανομή του φορτίου είναι 95% στα κύρια φορεία και 5% στο ρινιαίο τροχό.

Η μέθοδος θεωρεί ότι αν γίνει σωστή κατασκευή των αρμών δεν απαιτείται να λάβουμε υπόψη τις τάσεις με θερμική ή υγροθερμική προέλευση. Πέρα από τις τάσεις λόγω των φορτίων του α/φ υπάρχουν και τάσεις λόγω διαφορετικής συστολής-διαστολής της άνω και κάτω επιφάνειας της πλάκας (διαφορετική θερμοκρασία και υγρασία), καθώς και τάσεις

λόγω τριβής της πλάκας με την υπόβαση. Η παρουσία των αρμών βοηθά στη μείωση αυτών, ενώ λόγω του ότι είναι φαινόμενα που συμβαίνουν αντίστροφα οι τάσεις αλληλοαναιρούνται.

Η τυπική περίοδος ζωής που θεωρεί η μέθοδος είναι τα 10 χρόνια. Δίνει πάντως τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί και κάποια άλλη διάρκεια ζωής με κατάλληλη τροποποίηση της διαδικασίας υπολογισμού.

Υπάρχουν 2 τρόποι σχεδιασμού: ο γενικός και ο βέλτιστος. Ο γενικός σχεδιασμός θεωρεί κανονική κυκλοφορία, δηλαδή 10 κινήσεις ανά ημέρα για 10 χρόνια ζωής του αεροδρομίου από το φορτίο σχεδιασμού. Δεν εφαρμόζει την πραγματική κυκλοφορία αλλά ένα φορτίο σχεδιασμού και όλη την κυκλοφορία τη μετατρέπει σε κανονική όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Ο βέλτιστος σχεδιασμός ασχολείται με τη μικτή κυκλοφορία μετατρέποντάς τη σε ισοδύναμες κινήσεις του α/φ αναφοράς (το οποίο είναι αυτό με το δυσμενέστερο αποτέλεσμα στο οδόστρωμα, δηλαδή αυτό που απαιτεί το μεγαλύτερο πάχος οδοστρώματος).

5.3 Διαδικασία υπολογισμού

Η αξιολόγηση και ο προσδιορισμός του PCN με τη μέθοδο αυτή μπορεί να γίνει με τους παρακάτω τρόπους:

5.3.1 Αντιστροφή σχεδιασμού

Η διαδικασία αυτή στηρίζεται στη μέθοδο με την οποία το οδόστρωμα σχεδιάστηκε, προκειμένου να προσδιορίσει το επιτρεπόμενο φορτίο και στη συνέχεια το PCN. Ανάλογα, λοιπόν, με τον τρόπο σχεδιασμού θα χρησιμοποιήσουμε είτε την ανάστροφη διαδικασία του βέλτιστου σχεδιασμού είτε την ανάστροφη διαδικασία του γενικού σχεδιασμού. Αν διαθέτουμε επαρκή στοιχεία σχετικά με την κυκλοφορία χρησιμοποιούμε το βέλτιστο, ενώ αν όχι χρησιμοποιούμε το γενικό, ο οποίος κάνει τη θεώρηση των 10 κινήσεων ανά ημέρα για 10 χρόνια του φορτίου σχεδιασμού.

Πρώτο απαραίτητο στοιχείο για τον προσδιορισμό του μέγιστου φορτίου είναι ο συντελεστής αντίδρασης εδάφους K. Αυτός πρέπει να μετρηθεί στη στρώση έδρασης όταν αυτή θα είναι έτοιμη για να ξεκινήσει η κατασκευή του οδοστρώματος. Σε περίπτωση που υπάρχει υπόβαση ανάμεσα στην πλάκα του σκυροδέματος και τη στρώση έδρασης, τότε είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε το υλικό αυτής. Ανάλογα με το είδος του υλικού προσδιορίζουμε από τον παρακάτω πίνακα το συντελεστή μετατροπής σε ισοδύναμο πάχος αμμοχάλικου :

Υλικά	Συντελεστής ισοδυναμίας
Πυκνό ασφαλτικό μείγμα	2
αμμοχάλικο σταθεροποιημένο με άσφαλτο	1.5
γαλακτώδες αμμοχάλικο	1.2
αμμοχάλικο επεξεργασμένο με υδραυλικές κονίες (τσιμέντο, ιπτάμενη τέφρα, σκωρία)	1.5
καλά διαβαθμισμένο αμμοχάλικο	1
άμμος επεξεργασμένη με υδραυλικές κονίες (τσιμέντο, σκωρία)	1
γαρμπίλι	0.75
άμμος	0.5

Πίνακας 5.3 Συντελεστές ισοδυναμίας υλικών (Πηγή [9])

Με το συντελεστή αυτό πολλαπλασιάζουμε το πάχος της υπόβασης και χρησιμοποιώντας το πρώτο διάγραμμα του τρίτου παραρτήματος, προκύπτει ο συντελεστής αντίδρασης πάνω στην επιφάνεια της υπόβασης.

Επόμενο απαραίτητο στοιχείο είναι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Η αντοχή αυτή προσδιορίζεται είτε με βάση κατασκευαστικά στοιχεία και τη θεώρηση κάποιου νόμου μείωσης της αντοχής, είτε, για μεγαλύτερη ακρίβεια, με δοκιμή. Η δοκιμή μπορεί να γίνει είτε σε δοκίμια από πυρηνοληψία είτε με κάποια μη καταστρεπτική διαδικασία (FWD). Η μέθοδος θέλει την εφελκυστική αντοχή των 90 ημερών πρισματικών δοκιμών ή την αντοχή των 28 ημερών προσαυξημένων κατά 10%, αν δεν υπάρχει η τιμή των 90 ημερών. Η αντοχή αυτή διαιρείται με τους συντελεστές ασφαλείας που προαναφέραμε ανάλογα με τη μετάδοση φορτίου στους αρμούς. Τέλος, πέρα από την αντοχή του σκυροδέματος είναι απαραίτητη η γνώση του πάχους της πλάκας αυτού.

Η κυκλοφορία είναι το τελευταίο δεδομένο που χρειαζόμαστε. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους, η Γαλλική, στο σκέλος της αξιολόγησης, χρειάζεται την κυκλοφορία μόνο για το είδος των α/φ και όχι για τον αριθμό των διελεύσεων. Και χρειάζεται μόνο το είδος για τον προσδιορισμό του διαγράμματος που θα χρησιμοποιηθεί.

Με τα παραπάνω στοιχεία επιλέγουμε το κατάλληλο διάγραμμα για κάθε α/φ και χρησιμοποιώντας το πάχος, την επιτρεπόμενη τάση του σκυροδέματος και το συντελεστή αντίδρασης του εδάφους πάνω στην επιφάνεια της υπόβασης προσδιορίζουμε το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο για το συγκεκριμένο α/φ. Από τα διαγράμματα αυτά προκύπτει το μέγιστο φορτίο του κυρίως φορείου και με βάση την κατανομή φορτίου, που αναφέρεται στον πίνακα των στοιχείων των α/φ, προσδιορίζουμε το μέγιστο φορτίο ολόκληρου του α/φ. Στη συνέχεια, με το φορτίο αυτό και με τη λίστα των α/φ και των τιμών του ACN γι' αυτά,

προσδιορίζουμε το ACN για το συγκεκριμένο μέγιστο φορτίο. Το PCN θα βρίσκεται μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής όλων των ACN. Σε περίπτωση που η αντοχή του εδάφους βρίσκεται στο όριο μεταξύ δύο κατηγοριών της μεθόδου ACN/PCN, τότε την προηγούμενη διαδικασία την πραγματοποιούμε και για τις δύο κατηγορίες. Προκύπτουν δύο τιμές του PCN. Με τις τιμές αυτές προσδιορίζουμε εκ νέου το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο μέσω της σχέσης: $P_o = m + (M - m) \frac{PCN - \min ACN}{\max ACN - \min ACN}$ με m και M ελάχιστη και μέγιστη μάζα αντίστοιχα. Επιλέγουμε ως PCN την τιμή που δίνει τη μικρότερη απόκλιση από τα επιτρεπόμενα φορτία που υπολογίζονται μέσω των διαγραμμάτων.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι προδιαγραφές της μεθόδου συνιστούν ιδιαίτερη προσοχή στον προσδιορισμό των απαραίτητων στοιχείων, αναφέροντας μάλιστα ότι η ακρίβεια της μεθόδου καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το σκέλος αυτό.

Όσον αφορά τις επιστρώσεις που έχουν πραγματοποιηθεί για την ενίσχυση των οδοστρωμάτων, ακολουθείται και πάλι η διαδικασία της αναστροφής της μεθόδου σχεδιασμού:

- Εύκαμπτη επίστρωση σε δύσκαμπτο οδόστρωμα: εάν το υπάρχον οδόστρωμα δεν είναι σε καλή κατάσταση, τότε το θεωρούμε ως βάση για την εύκαμπτη επίστρωση και το σύνολο του οδοστρώματος ως εύκαμπτο. Ακολουθείται η διαδικασία εύρεσης του μέγιστου φορτίου χρησιμοποιώντας τα διαγράμματα εύκαμπτων οδοστρωμάτων.
- Δύσκαμπτη επίστρωση σε εύκαμπτο οδόστρωμα: θεωρούμε το υπάρχον εύκαμπτο οδόστρωμα ως υπόβαση για την πλάκα του σκυροδέματος, προσδιορίζουμε το συντελεστή αντίδρασης K πάνω στην επιφάνεια του ασφαλτικού και χρησιμοποιούμε τα διαγράμματα για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα.
- Δύσκαμπτη επίστρωση σε δύσκαμπτο οδόστρωμα: προσδιορίζουμε το πάχος μιας ισοδύναμης πλάκας με τις δύο που υπάρχουν και με αυτή ακολουθούμε την ίδια διαδικασία με τα δύσκαμπτα. Το πάχος της ισοδύναμης πλάκας θα είναι:

$$h_t = \sqrt[1.4]{h_r^{1.4} + Ch^{1.4}} \quad (5.1)$$

$$h_t = \sqrt{h_r^2 + Ch^2}$$

με την πρώτη σχέση να ισχύει για την περίπτωση που δεν υπάρχει μεταξύ των δύο πλακών ισοπεδωτική στρώση και τη δεύτερη στην περίπτωση που υπάρχει ενδιάμεση ισοπεδωτική στρώση. Ο συντελεστής C παίρνει τιμές:

- 1 αν το αρχικό οδόστρωμα είναι σε καλή κατάσταση
- 0.75 αν το αρχικό οδόστρωμα έχει μερικές ρωγμές στις γωνίες αλλά όχι μεγάλη ζημιά
- 0.35 αν το αρχικό οδόστρωμα έχει εκτεταμένη ρηγμάτωση

5.3.2 Αξιολόγηση με μη καταστρεπτικές δοκιμές

Όταν δεν υπάρχουν τα απαραίτητα στοιχεία για την εφαρμογή της προηγούμενης διαδικασίας ή όταν δεν είμαστε σίγουροι για την ακρίβεια των στοιχείων που διαθέτουμε, προτείνεται η χρήση μη καταστρεπτικών δοκιμών για τον καθορισμό του μέγιστου φορτίου. Σύμφωνα με τη μέθοδο, η διαδικασία προσδιορίζει το μέγιστο φορτίο μόνο για α/φ με μονό τροχό. Θα πρέπει να αποφεύγεται επομένως σε περιπτώσεις άλλων συστημάτων τροχών, όπου θα πρέπει να χρησιμοποιείται η προηγούμενη μέθοδος. Μετά τον καθορισμό του επιτρεπόμενου φορτίου όλα τα υπόλοιπα ακολουθούν την ίδια διαδικασία.

5.4 Παραδείγματα

Έστω οδόστρωμα με πλάκα σκυροδέματος 30cm, επιτρεπόμενη τάση 3 MPa και συντελεστή αντίδρασης πάνω στην υπόβαση $K=60\text{MN/m}^3$. Το έδαφος λοιπόν μπορεί να θεωρηθεί είτε κατηγορίας B είτε κατηγορίας C. Έστω ότι διέρχονται από το οδόστρωμα κυρίως B747-100 και A300-B2. Με τη χρήση των αντίστοιχων διαγραμμάτων προκύπτει ότι :

α/φ	φορτίο στο κύριο φορείο (t)	% συνολικού φορτίου στο κύριο φορείο	μέγιστο φορτίο ολόκληρου α/φ (t)
A 300-B2	61.875	23.125	267.570
B747-100	58.180	47	123.787

Στη συνέχεια προσδιορίζουμε το ACN των α/φ για τα επιτρεπόμενα φορτία:

Κατηγορία B:

$$\text{B747-200: } ACN = 20 + (59 - 20) \frac{267570 - 173036}{334749 - 173036} = 43$$

$$\text{A300-B2: } ACN = 22 + (45 - 22) \frac{123787 - 85910}{142000 - 85910} = 37$$

Κατηγορία C:

$$\text{B747-200: } ACN = 24 + (59 - 24) \frac{267570 - 173036}{334749 - 173036} = 44$$

$$\text{A300-B2: } ACN = 26 + (53 - 26) \frac{123787 - 85910}{142000 - 85910} = 44$$

Άρα για κατηγορία B το PCN είναι 40 και για κατηγορία C είναι 44. Στη συνέχεια προσδιορίζουμε εκ νέου τα επιτρεπόμενα φορτία και προκύπτει:

	Επιτρεπόμενο φορτίο από PCN		Επιτρεπόμενο φορτίο από διάγραμμα	Διαφορά
Κατ. Β	B747-200	280845	267570	13275
PCN=40	A300-B2	129807	123787	6020
Κατ. C	B747-200	246962	267570	-20608
PCN=44	A300-B2	114994	123787	-8793

Επομένως το PCN είναι: 40/R/B/W/T

5.5 Σχολιασμός

Για τον προσδιορισμό του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου η μέθοδος παρέχει διαγράμματα για κάθε α/φ και αν για κάποιο δεν υπάρχει, παρέχει και 3 διαγράμματα για τα 3 συνήθη συστήματα τροχών με προδιαγραφές όπως αναφέρονται στις παραπάνω παραδοχές. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ταχύτητα και ακρίβεια στον υπολογισμό του επιτρεπόμενου φορτίου, αλλά απαιτείται μια διαρκής ανανέωση των διαγραμμάτων για κάθε νέο τύπο α/φ.

Η μέθοδος παρέχει κάποιες προδιαγραφές κατασκευής όχι όμως τόσο αναλυτικές όσο σ' άλλες μεθόδους. Το ελάχιστο πάχος υπόβασης ορίζεται 15cm, ενώ προτείνεται η χρήση κάποιου σταθεροποιημένου υλικού. Μέγιστη τιμή του πάχους δεν αναφέρεται. Όμως, το διάγραμμα με το οποίο τροποποιείται η τιμή του K, λόγω της υπόβασης, δέχεται τιμές πάχους μέχρι 60cm, μια τιμή η οποία είναι επομένως και η μέγιστη. Η ελάχιστη επιτρεπόμενη τάση σκυροδέματος είναι 1.5MPa, τιμή πολύ μικρότερη από τα 2.75MPa του ορισμού του ACN/PCN, ενώ είναι και η μόνη μέθοδος η οποία δέχεται τόσο χαμηλές τιμές της εφελκυστικής αντοχής. Ακόμη στα διαγράμματα η μέγιστη τιμή του K είναι τα 150MN/m³ και για τιμές μεγαλύτερης αυτής χρησιμοποιείται η τιμή των 150. Δίνονται επίσης πληροφορίες για την κατασκευή των αρμών, οι οποίες όμως είναι σαφώς λιγότερο αναλυτικές από άλλες μεθόδους.

Οι συντελεστές ασφαλείας που χρησιμοποιούνται από τη μέθοδο για την τιμή της εφελκυστικής αντοχής είναι γενικά μεγάλοι, μ' αποτέλεσμα από τη μια πλευρά την υψηλότερη ασφάλεια, αλλά ταυτόχρονα και τον συντηρητικό προσδιορισμό του επιτρεπόμενου φορτίου.

Μια αδυναμία της διαδικασίας αξιολόγησης, όσον αφορά το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο ενός α/φ και όχι της τιμής του PCN, είναι το γεγονός ότι στον προσδιορισμό του φορτίου δεν υπεισέρχεται ο αριθμός των διελεύσεων. Ο αριθμός επαναλήψεων δεν αποτελεί δεδομένο εισόδου στη διαδικασία προσδιορισμού μέγιστου φορτίου, μ' αποτέλεσμα το επιτρεπόμενο φορτίο για ένα α/φ να είναι το ίδιο για οποιοδήποτε αριθμό διελεύσεων αυτού. Είναι πάντως η μόνη μέθοδος από τις τέσσερις η οποία δε συσχετίζει το επίπεδο κυκλοφορίας

με την τιμή του PCN, περιορίζοντας την επίδραση της κυκλοφορίας μόνο στον τύπο των α/φ που χρησιμοποιούν το οδόστρωμα.

Πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η δυνατότητα που παρέχει για εναλλακτικό τρόπο αξιολόγησης μέσω των μη καταστρεπτικών μεθόδων. Με αυτό τον τρόπο ακόμη και χωρίς στοιχεία κατασκευής και συντήρησης μπορούμε, εκτελώντας δοκιμές, να προσδιορίσουμε το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο. Πρόβλημα αποτελεί το γεγονός ότι με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται το φορτίο μονού τροχού και δε μπορούμε να έχουμε αποτέλεσμα γι' άλλα συστήματα τροχών.

Τέλος, ενδεχόμενο σφάλμα της μεθόδου είναι το γεγονός ότι με την αύξηση του συντελεστή αντίδρασης του εδάφους αυξάνει και το PCN, το οποίο μάλλον αντιβαίνει στον ορισμό του PCN.

Συγκεντρωτικά:

Πλεονεκτήματα:

- Το επιτρεπόμενο φορτίο και κατ'επέκταση και το PCN υπολογίζεται εύκολα από τα διαγράμματα που δίνονται.
- Τα δεδομένα που απαιτούνται για τον υπολογισμό είναι λίγα.
- Στην αντοχή του σκυροδέματος εφαρμόζονται συντελεστές ασφαλείας.
- Παρέχεται και εναλλακτικός τρόπος αξιολόγησης.

Μειονεκτήματα:

- Αυξάνοντας το K αυξάνει και το PCN.
- Δε δίνονται αρκετές κατασκευαστικές λεπτομέρειες για τους αρμούς, γεγονός που δυσχεραίνει την επιλογή του κατάλληλου συντελεστή ασφαλείας στην αντοχή του σκυροδέματος (η τιμή του συντελεστή ασφαλείας συναρτάται με τη μεταφορά φορτίου στους αρμούς).
- Στην εναλλακτική διαδικασία αξιολόγησης δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί άλλο σύστημα τροχών εκτός του μονού.

6.ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

UNIFIED FACILITIES CRITERIA (ERDC)

6.1 Ιστορικό δημιουργίας

Η παρούσα μέθοδος εκδόθηκε τον Απρίλιο του 2001 και δίνει τη δυνατότητα αξιολόγησης των οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Αναφέρεται τόσο σε δύσκαμπτα όσο και σε εύκαμπτα οδοστρώματα, καθώς και σε συνδυασμούς και παραλλαγές αυτών. Γενικά προσανατολίζεται πιο πολύ στα στρατιωτικά αεροδρόμια και στα α/φ που χρησιμοποιούν τα αεροδρόμια αυτά.

6.2 Παραδοχές

Η τυπική μορφή δύσκαμπτου οδοστρώματος της μεθόδου είναι μια άοπλη πλάκα σκυροδέματος εδραζόμενη είτε απευθείας πάνω στο έδαφος είτε σε κάποια υπόβαση από αμμοχάλικο ή σταθεροποιημένο υλικό, όμοια με αυτή της FAA (σχήμα 3.1).

Το κάθε σώμα στρατού ακολουθεί τη δική του πορεία στην αξιολόγηση και κάνει τις δικές του παραδοχές:

Η αεροπορία χωρίζει τα αεροσκάφη που χρησιμοποιούν τα αεροδρόμια σε 14 κατηγορίες:

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

Πίνακας 6.1 Κατηγορίες α/φ αεροπορίας (Πηγή [10])

Το πρώτο α/φ κάθε κατηγορίας είναι και το α/φ σχεδιασμού της κατηγορίας. Για κάθε κατηγορία α/φ παρέχονται δύο διαγράμματα με τη βοήθεια των οποίων (μέσω μιας διαδικασίας που παρουσιάζεται πιο κάτω) προσδιορίζεται το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο. Τα διαγράμματα αυτά έχουν συνταχθεί με θεώρηση φόρτισης της πλάκας στο άκρο (exterior load). Ως κριτήρια αστοχίας του οδοστρώματος αναγνωρίζονται δύο καταστάσεις: η μία στην οποία το 50% των πλακών έχουν σπάσει σε 2 ή 3 κομμάτια και η δεύτερη στην οποία το 50% των πλακών έχουν σπάσει σε 6 κομμάτια. Για την αεροπορία το μέγιστο φορτίο προσδιορίζεται για την περίπτωση θραύσης των πλακών σε 6 κομμάτια.

Επίσης, τα οδοστρώματα ενός αεροδρομίου χωρίζονται σε περιοχές κυκλοφορίας, με την περιοχή Α να είναι τα πρώτα μέτρα του διαδρόμου, οι κύριοι τροχόδρομοι και τα δάπεδα αναμονής απογείωσης (όπου το α/φ έχει το πλήρες φορτίο απογείωσης), την περιοχή Β να είναι τα δάπεδα στάθμευσης και συντήρησης και τα επόμενα μέτρα των διαδρόμων μετά την περιοχή Α (όπου το φορτίο δεν είναι πάντα το μέγιστο) και την περιοχή Γ να είναι το μέσο του διαδρόμου (όπου το α/φ είτε κινείται με μεγάλη ταχύτητα είτε έχει ανασηκώσει τα πτερύγιά του και θεωρούμε το 75% του φορτίου της περιοχής Β).

Το ναυτικό χωρίζει τα α/φ που χρησιμοποιούν τα αεροδρόμιά του σε 5 κατηγορίες:

Single tricycle		Dual tricycle		Single-Tandem Tricycle	Dual-Tandem Tricycle	Twin Delta Tandem
F-14	A-5	P-3	B-737	C-130	C-141	C-5A
C-23	A-6E	C-119	T-43		KC-135	
F-4E	A-7K	C-124	C-7		DC-8	
F-8E	P-2	C-131	C-9B		DC-10-10	
F-15	RA-5	UH-46	C-118A		DC-10-10CF	
F/A-18	S-3A	DC-9	C-121		L1011	
F-111	E-2C	CH-53	C-140		B-707	
T-1	T-28D	CH-54	C-22		B-757	
T-2C	C-117	B-727			B-767	
T-39A	T-34				E-3A	
A-3B	T-45				E-6A	
A-4M						

Πίνακας 6.2 Κατηγορίες α/φ ναυτικού (Πηγή [10])

Το πρώτο α/φ κάθε κατηγορίας είναι το χαρακτηριστικό α/φ της κατηγορίας αυτής. Για τον προσδιορισμό του μέγιστου φορτίου για κάθε κατηγορία υπάρχει ένα διάγραμμα. Το μέγιστο φορτίο αφορά ολόκληρη τη διάρκεια ζωής του αεροδρομίου, την οποία η μέθοδος θεωρεί 20ετή. Τα διαγράμματα έχουν καταρτισθεί θεωρώντας ότι η φόρτιση γίνεται στο μέσο της πλάκας (interior load). Αναγνωρίζει δύο περιοχές κυκλοφορίας: την κύρια, όπου τα α/φ

κινούνται με πλήρες φορτίο απογείωσης και τη δευτερεύουσα, όπου τα α/φ κινούνται με μικρότερο φορτίο ή με υψηλή ταχύτητα. Ο προσδιορισμός του PCN γίνεται για την κύρια περιοχή γιατί σε αυτή έχουμε τη δυσμενέστερη περίπτωση.

Για το στρατό ξηράς η διαδικασία όσον αφορά το σκέλος του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου είναι η ίδια με την αεροπορία μόνο που χρησιμοποιεί και τα δύο κριτήρια αστοχίας, ενώ για το PCN η διαδικασία είναι ίδια με το ναυτικό.

Η μέτρηση της κυκλοφορίας γίνεται με τον αριθμό των διελεύσεων. Για τους διαδρόμους διέλευση θεωρείται το πέρασμα του α/φ από μια νοητή γραμμή στα 150m πριν από το τέλος του διαδρόμου. Για τους τροχόδρομους και τα δάπεδα στάθμευσης πέρασμα θεωρείται η διέλευση από μια νοητή γραμμή κάθετα στον κύριο τροχόδρομο.

Τα εδάφη ταξινομούνται με βάση το Unified Classification System κατά τη δειγματοληψία. Η συσχέτιση του συστήματος αυτού με το σύστημα της μεθόδου ACN/PCN φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Κατηγορία Αντοχής	Κωδικός	Κατάταξη εδαφών
		Unified
Υψηλή	A	GW, GP, GM,
Μέση	B	GC, SW, SM, SP
Χαμηλή	C	SC, ML, CL, OL
Πολύ χαμηλή	D	OM, CH, MH

Πίνακας 6.3 Κατάταξη εδαφών (Πηγή: [5])

Επίσης, δίνεται από τη μέθοδο η δυνατότητα συσχέτισης του συντελεστή αντίδρασης εδάφους K με το CBR μέσω του πρώτου διαγράμματος του τετάρτου παραρτήματος.

Για τη διαδικασία της αξιολόγησης μέσω μη καταστρεπτικών δοκιμών παρέχεται από τον οργανισμό ένα πρόγραμμα, το PCASE (και ειδικότερα η υπορουτίνα WESLEA). Οι παραδοχές με τις οποίες εκτελεί το πρόγραμμα τους αναγκαίους υπολογισμούς είναι:

- Το οδόστρωμα προσομοιώνεται με μοντέλο ελαστικών πολλαπλών στρώσεων, όπου κάθε στρώση χαρακτηρίζεται από το πάχος της, το μέτρο ελαστικότητάς της E και το λόγο του Poisson. Οι στρώσεις θεωρούνται ελαστικές, ισότροπες και ομογενείς και εκτείνονται απεριόριστα στην οριζόντια διεύθυνση.
- Οι στρώσεις βρίσκονται διαρκώς σ' επαφή, με ανάπτυξη πλήρους τριβής και χωρίς σχετική ολίσθηση.
- Το πάχος της στρώσης έδρασης θεωρείται άπειρο.
- Τα φορτία είναι στατικά και επαναλαμβανόμενα.

6.3 Διαδικασία υπολογισμού

6.3.1 Αξιολόγηση με αναλυτικό τρόπο

Κάθε σώμα στρατού ακολουθεί το δικό του τρόπο προσδιορισμού του PCN. Στις διαδικασίες αυτές υπάρχουν και κάποια κοινώς απαιτούμενα δεδομένα.

Το πάχος και η αντοχή του σκυροδέματος είναι τα δύο πρώτα απαραίτητα στοιχεία. Ο προσδιορισμός μπορεί να στηριχθεί είτε σε στοιχεία κατασκευής είτε σε δειγματοληψία είτε σε μη καταστρεπτικές δοκιμές. Η μέθοδος παρέχει πολλές εναλλακτικές δυνατότητες, καθώς και αναλυτικές οδηγίες για κάθε μία από αυτές.

Ο συντελεστής αντίδρασης του εδάφους είναι το τρίτο στοιχείο που απαιτούν όλες οι διαδικασίες για να πραγματοποιήσουν τους αναγκαίους υπολογισμούς. Ο υπολογισμός του προτείνεται να γίνει μέσω του ECP (Electric Cone Penetrometer) ή του DCP (Dynamic Cone Penetrometer). Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει είναι $500\text{pci}=136\text{MN/m}^3$. Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν τιμές από τέτοιες δοκιμές, δίνεται διάγραμμα συσχέτισης και προσδιορισμού του K μέσω του CBR. Αν υπάρχει υπόβαση από αμμοχάλικο, η τιμή του K τροποποιείται με βάση το διάγραμμα 2 του τέταρτου παραρτήματος.

Το τελευταίο στοιχείο που απαιτείται είναι η κυκλοφορία. Σε αυτό το σημείο κάθε μέθοδος ακολουθεί το δικό της τρόπο:

- Αεροπορία: Αν μας ενδιαφέρει να προσδιορίσουμε το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο και όχι το PCN, τότε για κάθε κατηγορία α/φ χρησιμοποιούμε τα δύο διαγράμματα που δίνει η μέθοδος και προσδιορίζουμε το φορτίο για τα εξής τέσσερα επίπεδα κίνησης:

Επίπεδο	Αριθμός διελεύσεων για κάθε group		
	1-3	4-11	12-14
I	300000	50000	15000
II	50000	15000	3000
III	15000	3000	500
IV	3000	500	100

Πίνακας 6.4 Επίπεδο κυκλοφορίας για τον προσδιορισμό του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου (Πηγή [10])

Αν όμως θέλουμε να προσδιορίσουμε το PCN χρησιμοποιούμε μόνο τα διαγράμματα για το C-17 (τρίτο και τέταρτο διάγραμμα στο τέταρτο παράρτημα). Για 50000 διελεύσεις προσδιορίζουμε τους δύο συντελεστές σχεδιασμού και φορτίου (design και load factor) και με διαίρεση αυτών παίρνουμε το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο. Να σημειωθεί ότι ο προσδιορισμός γίνεται για την περιοχή κυκλοφορίας A, η οποία είναι και η δυσμενέστερη. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας το πέμπτο διάγραμμα του

τέταρτου παραρτήματος για την τιμή του επιτρεπόμενου φορτίου προσδιορίζουμε το PCN

- Ναυτικό: Η κυκλοφορία μετατρέπεται σε ισοδύναμες κινήσεις του α/φ αναφοράς κάθε κατηγορίας. Η μετατροπή γίνεται είτε με τη διαδικασία που χρησιμοποιεί και η FAA είτε με χρήση κάποιου νόμου αστοχίας του οδοστρώματος. Στη δεύτερη περίπτωση, έχοντας κάποιο λογαριθμικό νόμο φορτίου-διελεύσεων, προσδιορίζουμε για το μέγιστο φορτίο του α/φ τον αριθμό των διελεύσεων μέχρι την αστοχία. Επιλέγοντας ως α/φ σχεδιασμού το πρώτο α/φ της κατηγορίας, στην οποία θέλουμε να μετατρέψουμε όλα τα άλλα και διαιρώντας τον αριθμό των διελεύσεων του κάθε α/φ αναφοράς της κάθε κατηγορίας με αυτόν του α/φ, στο οποίο θα μετατρέψουμε όλες τις διελεύσεις, προκύπτει ο συντελεστής ισοδυναμίας. Έτσι, μετατρέπουμε τη συνολική κυκλοφορία σε διελεύσεις του α/φ σχεδιασμού της κάθε κατηγορίας. Έχοντας καθορίσει και την κυκλοφορία, υπολογίζουμε από το αντίστοιχο διάγραμμα (ενδεικτικά δίνεται το διάγραμμα 6, ένα από τα πέντε διαγράμματα της μεθόδου, στο τέταρτο παράρτημα) της κάθε κατηγορίας το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο. Στη συνέχεια και με χρήση του κατάλληλου διαγράμματος (ενδεικτικά δίνεται το διάγραμμα 7, ένα από τα πέντε διαγράμματα της μεθόδου, στο τέταρτο παράρτημα) προσδιορίζουμε το PCN. Ως τελική τιμή του PCN κρατάμε τη μεγαλύτερη.
- Στρατός ξηράς: Για τον προσδιορισμό του μέγιστου φορτίου χρησιμοποιούμε τη διαδικασία της αεροπορίας και για το PCN του ναυτικού.

Μέχρι τώρα είδαμε τη γενική περίπτωση όπου το οδόστρωμα αποτελούνταν από μια πλάκα άοπλου σκυροδέματος και εδραζόταν σε υπόβαση από αμμοχάλικο. Η μέθοδος όμως παρέχει πληροφορίες και για πολλές άλλες περιπτώσεις :

- Υπόβαση από σταθεροποιημένο υλικό: Προσδιορίζουμε ένα συνδυασμένο πάχος πλάκας και υπόβασης :

$$h_E = \sqrt[1.4]{(h_e)^{1.4} + \left(\sqrt[3]{\frac{E_s}{E_c}} h_s \right)^{1.4}} \quad (6.1)$$

με h_E : να είναι το ισοδύναμο πάχος, h_e : το πάχος της πλάκας του σκυροδέματος, E_s : το μέτρο ελαστικότητας του σταθεροποιημένου υλικού, E_c : το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος και h_s : το πάχος της υπόβασης. Στη συνέχεια ακολουθείται η ίδια διαδικασία όπως προηγουμένως για πάχος της πλάκας το ισοδύναμο που υπολογίσαμε και συντελεστή αντίδρασης του εδάφους αυτόν που παρουσιάζει πραγματικά το έδαφος.

- Οπλισμένο σκυρόδεμα: με χρήση του διαγράμματος 8 του τετάρτου παραρτήματος και με το ποσοστό του οπλισμού που διαθέτει η πλάκα προσδιορίζουμε το ισοδύναμο πάχος άοπλης πλάκας και ακολουθούμε την ίδια διαδικασία. Αν το ποσοστό οπλισμού είναι διαφορετικό στην κατά μήκος διεύθυνση από την εγκάρσια, χρησιμοποιούμε το ελάχιστο των δύο. Αν το ποσοστό είναι λιγότερο από 0.05% κατ' όγκο, τότε αγνοείται και η πλάκα θεωρείται άοπλη. Αν το ποσοστό είναι μεγαλύτερο του 0.5% κατ' όγκο, το θεωρούμε ίσο με 0.5%. Αν η υπόβαση είναι από σταθεροποιημένο υλικό, τότε, αφού προσδιορίσουμε το ισοδύναμο πάχος χωρίς οπλισμό, προσδιορίζουμε με τον ίδιο τρόπο και τη συνδυασμένη πλάκα υπόβασης-σκυροδέματος.
- Δύσκαμπτη επίστρωση σε δύσκαμπτο οδόστρωμα: Υπάρχουν δύο περιπτώσεις:
 1. Η δεύτερη πλάκα να διαστρωθεί απευθείας χωρίς ενδιάμεση στρώση διαχωρισμού του δεσμού των δύο πλακών, οπότε το ισοδύναμο πάχος είναι :

$$h_E = \sqrt[1.4]{(h_o)^{1.4} + C(h_b)^{1.4}} \quad (6.3)$$

2. Μεταξύ των δύο πλακών διαστρώνεται ισοπεδωτική στρώση :

$$h_E = \sqrt{(h_o)^2 + C(h_b)^2} \quad (6.4)$$

με h_E : το ισοδύναμο πάχος μίας μόνο πλάκας, h_o : το πάχος της επίστρωσης, h_b : το πάχος της υπάρχουσας πλάκας και C συντελεστής κατάστασης οδοστρώματος με τιμές:

- 1 αν το αρχικό οδόστρωμα είναι σε καλή κατάσταση
- 0.75 αν το αρχικό οδόστρωμα έχει μερικές ρωγμές στις γωνίες αλλά όχι μεγάλη ζημιά
- 0.35 αν το αρχικό οδόστρωμα έχει εκτεταμένη ρηγμάτωση

Μετά τον υπολογισμό του ισοδύναμου πάχους η διαδικασία παραμένει η ίδια. Η αντοχή του σκυροδέματος της ισοδύναμης πλάκας είναι :

$$R = \frac{h_o \times R_o + h_b \times R_b}{h_o + h_b} \quad (6.5)$$

με R_o και R_b οι αντοχές της επίστρωσης και της αρχικής πλάκας αντίστοιχα.

- Εύκαμπτη επίστρωση σε δύσκαμπτο οδόστρωμα: υπάρχουν δύο μέθοδοι αξιολόγησης: η μία που θεωρεί το οδόστρωμα δύσκαμπτο και η άλλη που το θεωρεί εύκαμπτο. Χρησιμοποιούμε όποια τιμή επιτρεπόμενου φορτίου είναι η μεγαλύτερη. Συνήθως είναι αυτή της δύσκαμπτης μεθόδου εκτός αν ο συντελεστής αντίδρασης εδάφους είναι μεγαλύτερος από $200 \text{ pci} = 54 \text{ MN/m}^3$ ή η εφελκυστική αντοχή είναι μικρότερη των 2.76 MPa . Με τη δύσκαμπτη μέθοδο το ισοδύναμο πάχος είναι :

$$h_E = \frac{1}{F} (0.33t + h_b) \quad (6.6)$$

με F να είναι συντελεστής που ελέγχεται από τη ρηγμάτωση και δίνεται από πίνακες της μεθόδου (εξαρτάται και από τον αριθμό των διελεύσεων), t το πάχος της ασφαλικής επίστρωσης και h_b το πάχος της πλάκας. Στη μέθοδο, όπου το οδόστρωμα θεωρείται εύκαμπτο, η πλάκα του σκυροδέματος λαμβάνεται ως υπόβαση με $CBR=100\%$ και η διαδικασία της αξιολόγησης είναι αυτή των εύκαμπτων οδοστρωμάτων.

- Δύσκαμπτη επίστρωση σε εύκαμπτο οδόστρωμα: θεωρούμε όλο το εύκαμπτο ως υπόβαση του δύσκαμπτου και προσδιορίζουμε στην επιφάνεια αυτού την τιμή του K (αν η θερμοκρασία του ασφαλικού είναι κάτω από 24 βαθμούς Fahrenheit) ή στη βάση του εύκαμπτου (αν η θερμοκρασία του ασφαλικού είναι πάνω από 24 βαθμούς Fahrenheit). Στη συνέχεια ακολουθείται η ίδια διαδικασία με τα δύσκαμπτα.
- Σύνθετα οδοστρώματα: αποτελούνται από δύο πλάκες οδοστρώματος με μία ενδιάμεση ισοπεδωτική στρώση. Αν η στρώση αυτή είναι λεπτότερη από 102mm, τότε θεωρούμε το οδόστρωμα ως δύσκαμπτη επίστρωση σε εύκαμπτο οδόστρωμα με ενδιάμεση ισοπεδωτική στρώση. Αν η στρώση αυτή έχει πάχος μεγαλύτερο από 102mm τότε θεωρούμε όλο το οδόστρωμα κάτω από την πάνω πλάκα ως υπόβαση της πλάκας αυτής.

6.3.2 Αξιολόγηση με μη καταστρεπτικές δοκιμές:

Η μέθοδος, με το δωρεάν λογισμικό που τη συνοδεύει, παρέχει τη δυνατότητα προσδιορισμού του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου, του PCN, του απαιτούμενου πάχους για την ενίσχυση του οδοστρώματος και του επιτρεπόμενου αριθμού διελεύσεων. Με κάποια μη καταστρεπτική δοκιμή προσδιορίζουμε την απόκριση του οδοστρώματος για δεδομένη φόρτιση. Στη συνέχεια εισάγουμε αυτά τα αποτελέσματα στο πρόγραμμα και τη δεδομένη κυκλοφορία, και αυτό, εκτελώντας μια επαναληπτική διαδικασία, προσδιορίζει τις ελαστικές σταθερές των στρώσεων. Στη συνέχεια με κατάλληλες υπορουτίνες προσδιορίζει το επιτρεπόμενο φορτίο και το PCN του αεροδρομίου.

6.4 Παραδείγματα:

Παράδειγμα 1°

Έστω οδόστρωμα με πλάκα σκυροδέματος πάχους 30cm, εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος 3.8 MPa και συντελεστή αντίδρασης πάνω στην υπόβαση $K=81.3\text{MN/m}^3$. Να βρεθεί το PCN του οδοστρώματος αν πρόκειται για αεροδρόμιο αεροπορίας.

Για την περιοχή κυκλοφορίας A και για 50000 διελεύσεις του C-17 ο design factor είναι :1.42. Ο load factor είναι: 490KIPS=222.7ton. Με την τιμή και για κατηγορία αντοχής εδάφους B προκύπτει ότι το PCN είναι: 41/R/B/W/T

Παράδειγμα 2°

Έστω διάδρομος αεροδρομίου ο οποίος δέχεται 100000 ισοδύναμες διελεύσεις της πρώτης κατηγορίας α/φ του ναυτικού. Το πάχος της πλάκας του σκυροδέματος είναι 229mm (9inches) και η εφελκυστική αντοχή του είναι 4.8MPa. Ο συντελεστής αντίδρασης στην επιφάνεια της υπόβασης είναι $K=81.3\text{MN/m}^3$. Χρησιμοποιώντας το διάγραμμα της πρώτης κατηγορίας (F-14) προκύπτει για την κύρια περιοχή κυκλοφορίας επιτρεπόμενο φορτίο 27.7ton. Με την τιμή αυτή και το αντίστοιχο διάγραμμα το PCN είναι 28/R/B/W/T.

Παράδειγμα 3°

Έστω οδόστρωμα αεροδρομίου αποτελούμενο από πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος με ράβδους διαμέτρου 9.5mm ανά 152mm και με αντοχή σκυροδέματος 3.5MPa. Το πάχος της πλάκας είναι 305mm και ο συντελεστής αντίδρασης του εδάφους είναι $K=40\text{MN/m}^3$. Η υπόβαση έχει πάχος 300mm και είναι από αμμοχάλικο. Ζητείται το PCN του αεροδρομίου με βάση τη μέθοδο της αεροπορίας.

Το ποσοστό οπλισμού της πλάκας είναι :

$$S = \frac{\frac{3.14 \times (9.5)^2 \times 2}{4} \text{mm}^2}{305 \times 305 \text{mm}^2} \times 100 = \frac{142 \text{mm}^2}{93025 \text{mm}^2} \times 100 = 0.153\%$$

Με το ποσοστό αυτό και το διάγραμμα 16 του τετάρτου παραρτήματος προκύπτει ότι το ισοδύναμο πάχος άοπλης πλάκας είναι 366mm. Λόγω της υπόβασης, ο συντελεστής αντίδρασης στην επιφάνειά της γίνεται $K=58\text{MN/m}^3$. Για 50000 διελεύσεις του C-17 ο design factor είναι: 1.48 ενώ ο load factor είναι :600KIPS=273ton. Επομένως για κατηγορία αντοχής C το PCN είναι: 51R/C/W/T.

6.5 Σχολιασμός

Με τη μέθοδο αυτή παρέχεται η δυνατότητα προσδιορισμού του αριθμού κατάταξης PCN ενός οδοστρώματος. Ο προσδιορισμός γίνεται σχετικά εύκολα σε δύο βήματα με τη βοήθεια διαγραμμάτων. Στο πρώτο βήμα προσδιορίζεται το μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος του

α/φ σχεδιασμού και στο δεύτερο βήμα προσδιορίζεται το PCN. Τα διαγράμματα που παρέχονται αντιστοιχούν στα α/φ που συνήθως επιχειρούν σε στρατιωτικά αεροδρόμια, με αποτέλεσμα κάποια πολιτικά α/φ να μην εμπεριέχονται στη μέθοδο. Επειδή όμως αναφέρει αναλυτικά τα όρια στα οποία κυμαίνονται τα α/φ κάθε κατηγορίας, από πλευράς τεχνικών χαρακτηριστικών, μπορούμε έστω και προσεγγιστικά να κατατάξουμε ένα α/φ που δεν υπάρχει σε κάποια κατηγορία, ώστε να το συμπεριλάβουμε στην αξιολόγηση.

Τα δεδομένα που απαιτούν οι μέθοδοι είναι λίγα και ο προσδιορισμός τους είναι σχετικά εύκολος. Μάλιστα για το συντελεστή αντίδρασης του εδάφους παρέχεται και η συσχέτισή του με το CBR. Όσον αφορά τη μικτή κυκλοφορία, η μέθοδος της αεροπορίας δεν τη χρησιμοποιεί καθόλου, αλλά επιλέγει το C-17 και 50000 διελεύσεις αυτού. Το ναυτικό, ναι μεν τη χρησιμοποιεί μετατρέποντάς τη σε ισοδύναμη κυκλοφορία, αλλά δε διευκρινίζει με ποιο ακριβώς τρόπο από τους δύο, που διαθέτει το εγχειρίδιο του ICAO, θέλει να γίνει αυτή η διαδικασία. Αυτό αποτελεί αρνητικό στοιχείο γιατί έτσι θα υπάρχουν διαφοροποιήσεις στ' αποτελέσματα της ίδιας μεθόδου.

Θετικό στοιχείο αποτελεί και το γεγονός ότι δίνεται λογισμικό το οποίο αντικαθιστά όλα τα διαγράμματα και με το οποίο πολύ γρήγορα προσδιορίζουμε το PCN του αεροδρομίου. Ακόμη, μέσω αυτού του λογισμικού μπορούμε μέσω μη καταστρεπτικών δοκιμών να πραγματοποιήσουμε την αξιολόγηση. Μια τέτοια εναλλακτική μέθοδος είναι πολύ σημαντική γιατί μέσω των μη καταστρεπτικών μεθόδων, οι οποίες είναι και γρήγορες και προκαλούν πολύ μικρότερη όχληση στην κυκλοφορία, μπορούμε να συλλέξουμε στοιχεία και να κάνουμε την αξιολόγηση σε περιπτώσεις όπου δεν έχουμε κανένα άλλο διαθέσιμο στοιχείο.

Στοιχείο αμφισβήτησης της ακριβείας της μεθόδου αποτελεί το ότι με την αύξηση της τιμής του K αυξάνει και η τιμή του PCN. Αυτό όμως είναι αντίθετο στον ορισμό του PCN, διότι το PCN ουσιαστικά είναι η τιμή του ACN του δυσμενέστερου α/φ και το ACN μειώνεται με την αύξηση του K.

Στα μειονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγεται το γεγονός ότι για τον προσδιορισμό του PCN, στην περίπτωση της αεροπορίας, παρέχεται μία καμπύλη για τις τρεις κατηγορίες εδαφικής αντοχής A,B,C με αποτέλεσμα μια τιμή μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου ν' αντιστοιχεί στην ίδια τιμή του PCN για οποιαδήποτε από τις τρεις κατηγορίες αντοχής.

Τέλος, και αυτή η μέθοδος παρουσίασε, όσον αφορά τη διαδικασία προσδιορισμού του PCN από το ναυτικό, το πρόβλημα της εξάρτησης της τιμής του PCN από την κυκλοφορία. Αντίθετα, η αεροπορία με την επιλογή του σταθερού αριθμού διελεύσεων (50000 του C-17) απαλλάσσεται από την αδυναμία αυτή (χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η επιλογή του επιπέδου διελεύσεων και του συγκεκριμένου α/φ την καθιστά σίγουρα καλύτερη).

Συγκεντρωτικά:

Πλεονεκτήματα:

- Ο προσδιορισμός του PCN είναι γρήγορος και εύκολος.
- Είναι μικρός ο όγκος των απαιτούμενων δεδομένων και γι' αυτό είναι εύκολο να συγκεντρωθούν. Παρέχεται συσχέτιση CBR-K.
- Υπάρχει εναλλακτικός τρόπος αξιολόγησης μέσω μη καταστρεπτικών δοκιμών.
- Παρέχεται λογισμικό για την αξιολόγηση.

Μειονεκτήματα:

- Στη μέθοδο του ναυτικού δε διευκρινίζεται ο τρόπος μετατροπής της μικτής κυκλοφορίας σε διελεύσεις του α/φ σχεδιασμού.
- Δεν υπάρχουν όλα τα πολιτικά α/φ.
- Υπάρχει ανάγκη για συνεχή ανανέωση των διαγραμμάτων.
- Η αύξηση της τιμής του K προκαλεί αύξηση της τιμής του PCN.
- Μία καμπύλη για το PCN για τις τρεις κατηγορίες εδαφικής αντοχής στην περίπτωση της αεροπορίας.
- Η τιμή του PCN εξαρτάται από την κυκλοφορία και τον αριθμό των διελεύσεων για το ναυτικό.

7. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΜΕΘΟΔΩΝ

7.1 Εισαγωγή

Μέχρι τώρα, στην παρούσα διπλωματική εργασία, αυτό το οποίο εξετάστηκε ήταν οι παραδοχές και το γενικότερο επιστημονικό υπόβαθρο της κάθε μεθόδου αξιολόγησης και κατάταξης των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει χρήση των διαδικασιών των μεθόδων σ' ένα αριθμό διατομών προκειμένου να εντοπίσουμε πιθανές δυσκολίες στην εφαρμογή τους, να καθορίσουμε την ευαισθησία των αποτελεσμάτων τους στην μεταβολή βασικών παραμέτρων, να αξιολογήσουμε και να συγκρίνουμε τα μεταξύ τους διαφορετικά αποτελέσματα και να διερευνήσουμε την αξιοπιστία των μεθόδων.

7.2 Γενικά θέματα

Από τη μέχρι τώρα μελέτη των τεσσάρων μεθόδων, αυτό το οποίο προκύπτει είναι ότι τα κύρια στοιχεία που απαιτούνται για την εφαρμογή τους είναι:

- Διατομή (πάχη στρώσεων, υλικά στρώσεων και μηχανικά χαρακτηριστικά αυτών, συντελεστής αντίδρασης εδάφους)
- Κυκλοφορία (είδος α/φ, αριθμός διελεύσεων)

Επομένως, για να προχωρήσουμε σ' εφαρμογή των μεθόδων πρέπει πρώτα να καθορίσουμε τα στοιχεία αυτά. Η επιλογή των διατομών, που θ' αναλυθούν, θα γίνει με γνώμονα την ανάγκη να διερευνηθεί η επίδραση στην τιμή του PCN από τη μεταβολή καθεμιάς από τις τέσσερις παραμέτρους που μέχρι τώρα είδαμε ότι επηρεάζουν κυρίως αυτήν την τιμή:

- Πάχος πλάκας σκυροδέματος
- Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος
- Συντελεστής αντίδρασης εδάφους
- Πάχος υπόβασης

Με αυτή τη λογική επιλέγουμε τέσσερις βασικές διατομές :

1. Διατομή μεταβαλλόμενου πάχους σκυροδέματος (με τιμές $20 \div 40\text{cm}$ και βήμα 5cm) με πάχος υπόβασης 30cm , συντελεστή αντίδρασης εδάφους $K=50\text{MN/m}^3$ και εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος $f_{ct}=4\text{MPa}$

2. Διατομή μεταβαλλόμενου πάχους υπόβασης (με τιμές 20÷40cm και βήμα 5cm) με πάχος πλάκας σκυροδέματος 30cm, συντελεστή αντίδρασης εδάφους $K=50\text{MN/m}^3$ και εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος $f_{ct}=4\text{MPa}$
3. Διατομή μεταβαλλόμενης εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος (με τιμές 3÷5 MPa και βήμα 0.5MPa) με πάχος υπόβασης 30cm, συντελεστή αντίδρασης εδάφους $K=50\text{MN/m}^3$ και πάχος πλάκας σκυροδέματος 30cm
4. Διατομή μεταβαλλόμενου συντελεστή αντίδρασης εδάφους (με τιμές 30÷150 MN/m^3 και βήμα 20 MN/m^3) με πάχος υπόβασης 30cm, πάχος πλάκας σκυροδέματος 30cm και εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος 4MPa.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η γενικότητα των συμπερασμάτων και των αποτελεσμάτων, που προκύπτουν στις προηγούμενες διατομές, γίνεται επέκταση με διατομές, όπως αυτές που φαίνονται στο πέμπτο και έκτο παράρτημα και αφορούν όλο το εύρος τιμών. Οι τιμές των παραμέτρων στις διατομές που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο είναι ενδεικτικές και τα αποτελέσματα είναι ανεξάρτητα αυτών, δηλαδή για οποιοσδήποτε άλλες τιμές θα είχαμε το ίδιο ποιοτικό αποτέλεσμα.

Έχοντας πλέον καθορίσει τις προς μελέτη διατομές, απομένει να επιλέξουμε και την κυκλοφορία σχεδιασμού. Επιλέγουμε τα παρακάτω α/φ με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά τους:

Τύπος α/φ	Μάζα (kg) (μέγιστη/ ελάχιστη)	Τιμή ACN για A κατηγορία εδαφικής αντοχής		Τιμή ACN για B κατηγορία εδαφικής αντοχής		Τιμή ACN για C κατηγορία εδαφικής αντοχής		Τιμή ACN για D κατηγορία εδαφικής αντοχής	
B727-200 standard	78171/44293	48	24	50	26	53	27	56	29
B737-200 advanced	58332/29620	34	15	36	16	38	17	39	18
B747-100	323410/162385	41	17	48	19	57	22	65	25

Πίνακας 7.1 Χαρακτηριστικά α/φ (Πηγή [9])

με αριθμό ετήσιων διελεύσεων:

- 400 διελεύσεις του B747-100
- 2500 διελεύσεις του B737-200
- 3000 διελεύσεις του B727-200 standard

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο στόλος των α/φ που επιλέχθηκε είναι σχετικά παλιός και η επιλογή του έγινε με κριτήρια:

1. να είναι α/φ τα οποία να έχουν χρησιμοποιηθεί ευρύτατα
2. τα διαγράμματα όλων των μεθόδων να περιλαμβάνουν τα συγκεκριμένα α/φ

Από τη γενικότερη διερεύνηση προκύπτει ότι το ποιοτικό αποτέλεσμα της ανάλυσης θα ήταν το ίδιο αν χρησιμοποιούνταν ένας στόλος με νεότερα και πιο σύγχρονα α/φ.

Αυτήν την κυκλοφορία κάθε μέθοδος τη χρησιμοποιεί με διαφορετικό τρόπο. Οπότε, θα πρέπει να γίνει η κατάλληλη τροποποίηση ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε μεθόδου:

UFC:

- **Αεροπορία:** τα α/φ ανήκουν: το B747 στο group 13, το B737 στο group 6 και το B727 στο group 7 (λεπτομέρειες για τη διάταξη του φορείου και τις αποστάσεις των τροχών σελ. 2-6 **[10]**). Εν τούτοις, για το PCN μας χρειάζεται μόνο το C-17 και 50000 διελεύσεις αυτού
- **Ναυτικό:** το B727 και το B737 ανήκουν στο group2 και το B747 στο group4 (δεν αναφέρεται στο εγχειρίδιο το B747 αλλά από την κατανομή των τροχών επιλέγεται αυτό το group). Όλες οι διελεύσεις πρέπει να μετατραπούν σε διελεύσεις της κάθε κατηγορίας από τις δύο, να βγει ένα PCN και να κρατήσουμε το μέγιστο. Για τη μετατροπή ακολουθείται η διαδικασία της FAA, μόνο που δεν επιλέγουμε κρίσιμο α/φ αλλά κάνουμε τη μετατροπή και στις 2 κατηγορίες (σημείωση σημαντική: για τα α/φ ευρείας ατράκτου, όπως το B747, το φορτίο τροχού στη διαδικασία μετατροπής θεωρείται ίσο με το φορτίο α/φ 136100Kg με κατανομή 95% στα 2 κύρια φορεία, που το καθένα είναι dual tandem):

Μετατροπή σε διελεύσεις του group2:

	Ετήσιες αναχωρήσεις	Μαχ φορτίο απογείωσης (Kg)	Συν/της ισοδ/μιας	Ισοδ/μες αναχ/σεις	Φορτίο τροχού (Kg)	Φορτίο τροχού α/φ σχεδιασμού (Kg)	Ισοδ/μες διελεύσεις του α/φ σχεδιασμού (Kg)
B727-200 standard	3000	78171	1	3000	18566	18566	3000
B737-200 advanced	2500	58332	1	2500	18566	13854	862
B747-100	400	323410	1,7	680	18566	16162	439
Σύνολο							4301

Πίνακας 7.2 Μετατροπή μικτής κυκλοφορίας σε ισοδύναμη του group 2

Μετατροπή σε διελεύσεις του group4:

	Ετήσιες αναχωρήσεις	Μαχ φορτίο απογείωσης (Kg)	Συν/της ισοδ/μιας	Ισοδ/μες αναχ/σεις	Φορτίο τροχού (Kg)	Φορτίο τροχού α/φ σχεδιασμού (Kg)	Ισοδ/μες διελεύσεις του α/φ σχεδιασμού (Kg)
B727-200 standard	3000	78171	0,6	1800	18566	16162	1800
B737-200 advanced	2500	58332	0,6	1500	13854	16162	554
B747-100	400	323410	1	400	16162	16162	268
Σύνολο							2622

Πίνακας 7.3 Μετατροπή μικτής κυκλοφορίας σε ισοδύναμη του group4

Η διάρκεια ζωής είναι 20 χρόνια οπότε για το group 2 οι διελεύσεις είναι 86000 και για το group 4 είναι 52440.

FAA: Κάναμε πριν τη μετατροπή της μικτής κυκλοφορίας σε ισοδύναμες διελεύσεις του α/φ σχεδιασμού για τα 2 α/φ. Μένει η μετατροπή σε ισοδύναμες διελεύσεις του B737:

	Ετήσιες αναχωρήσεις	Max φορτίο απογείωσης (Kg)	Συν/της ισοδ/μιας	Ισοδ/μες αναχ/σεις	Φορτίο τροχού (Kg)	Φορτίο τροχού α/φ σχεδιασμού (Kg)	Ισοδ/μες διελεύσεις του α/φ σχεδιασμού (Kg)
B727-200 standard	3000	78171	1	3000	18566	13854	3000
B737-200 advanced	2500	58332	1	2500	13854	13854	862
B747-100	400	323410	1,7	680	16162	13854	439
						Σύνολο	4301

Πίνακας 7.4 Μετατροπή μικτής κυκλοφορίας σε ισοδύναμη

Παρατηρούμε ότι ο συνολικός αριθμός διελεύσεων είναι ίδιος με αυτόν του group2, με τη μετατροπή της μικτής κυκλοφορίας σε διελεύσεις του B727, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο λόγω του ίδιου συστήματος τροχών (του group2 και του B727). Οπότε το κρίσιμο α/φ θα επιλεγεί ανάμεσα στο B727 και στο B747 και θα είναι αυτό που απαιτεί το μέγιστο πάχος οδοστρώματος. Προκύπτει ότι μεγαλύτερο πάχος απαιτεί το B727. Οπότε οι διελεύσεις με τις οποίες θα εργαστούμε είναι 4300 (η μέθοδος χρειάζεται τις ετήσιες διελεύσεις).

Directorate of Civil Engineering Services: η μικτή κυκλοφορία μετατρέπεται σε κυκλοφορία του α/φ σχεδιασμού με διαδικασία η οποία εξαρτάται από το συντελεστή αντίδρασης του εδάφους K. Οπότε, θα προσδιορίζεται η ισοδύναμη κυκλοφορία σε κάθε διατομή χωριστά.

Γαλλικό Υπουργείο Συγκοινωνιών: η μέθοδος χρησιμοποιεί μόνο τον τύπο των α/φ και όχι τις διελεύσεις αυτών.

7.3 Επίλυση-Συμπεράσματα

Μετά τον προσδιορισμό των αναγκαίων δεδομένων προχωράμε στην ανάλυση των διατομών με τη χρήση των τεσσάρων μεθόδων, όπως αυτές περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής είναι (στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τεσσάρων "βασικών" διατομών και στο παράρτημα παρουσιάζονται τα υπόλοιπα):

1. Διατομές μεταβαλλόμενου πάχους σκυροδέματος:

Διατομή Υπόβασης 30cm, $K=50\text{MN/m}^3$, $f_{ct}=4\text{MPa}$ και σκυρόδεμα πάχους $20\div 40\text{cm}$(ανά 5cm) ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΠΑΧΟΥΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ					
$h_{\text{σκυροδ}}(\text{cm})$	FAA	UFCαεροπορία E.L.E.	UFCναυτικό	French	British
20	13 B	44 B	21 B	25 B	7 B
25	19 B	48 B	31 B	25 B	13 B
30	26 B	48 B	41 B	27 B	18 B
35	38 B	48 B	55 B	30 B	28 B
40	52 B	48 B	56 B	33 B	39 B

Πίνακας 7.5 Αποτελέσματα ανάλυσης σε διατομή μεταβαλλόμενου πάχους σκυροδέματος

2. Διατομές μεταβαλλόμενου πάχους υπόβασης:

Διατομή Πλάκας σκυροδέματος 30cm, $K=50\text{MN/m}^3$, $f_{ct}=4\text{MPa}$ και υπόβασης πάχους $20\div 40\text{cm}$(ανά 5cm) ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΠΑΧΟΥΣ ΥΠΟΒΑΣΗΣ					
$h_{\text{υποβ}}(\text{cm})$	FAA	UFCαεροπορία E.L.E.	UFCναυτικό	French	British
20	23 B	44 B	40 B	27 B	18 B
25	24 B	46 B	42 B	27 B	18 B
30	25 B	47 B	43 B	27 B	19 B
35	26 B	48 B	44 B	28 B	20 B
40		51 A	42 A	28 B	20 B

Πίνακας 7.6 Αποτελέσματα ανάλυσης σε διατομή μεταβαλλόμενου πάχους υπόβασης

3. Διατομές μεταβαλλόμενης εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος:

Διατομή Πλάκας σκυροδέματος 30cm, $K=50\text{MN/m}^3$, υπόβασης πάχους 30cm και αντοχή σκυροδέματος $f_{ct}=3\div 5\text{MPa}$ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ					
$f_{ct}(\text{Mpa})$	FAA	UFCαεροπορία E.L.E.	UFCναυτικό	French	British
3		48 B	30 B	18 B	
3,5	23 B	48 B	36 B	18 B	
4	27 B	48 B	44 B	27 B	18 B
4,5	34 B	48 B	47 B	30 B	24 B
5	38 B	48 B	56 B	35 B	29 B

Πίνακας 7.7 Αποτελέσματα ανάλυσης σε διατομή μεταβαλλόμενης εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος

4. Διατομές μεταβαλλόμενου συντελεστή αντίδρασης εδάφους:

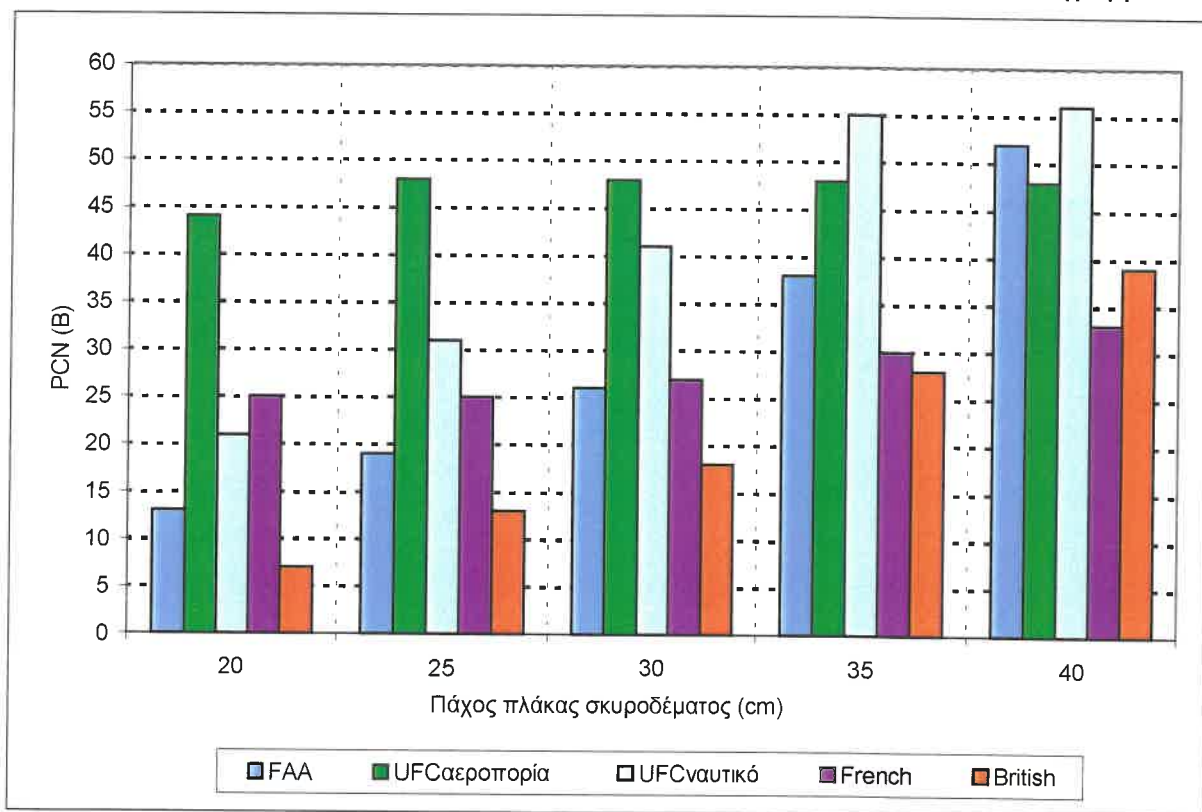
Διατομή Πλάκας σκυροδέματος 30cm, υπόβασης πάχους 30cm, αντοχή σκυροδέματος $f_{ct}=4\text{MPa}$ και $K=30\div 150\text{MN/m}^3$, ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ K					
$K_o(\text{MN/m}^3)$	FAA	UFCαεροπορία E.L.E.	UFCναυτικό	French	British
30	25 C	45 B	42 B	28 C	23 C
50	25 B	47 B	43 B	28 B	18 B
70	26 B	48 A	40 A	29 B	20 B
90	27 B			29 B	22 B
110	28 B			29 A	21 A
130					
150					

Πίνακας 7.8 Αποτελέσματα ανάλυσης σε διατομή μεταβαλλόμενου συντελεστή αντίδρασης εδάφους

Όσες τιμές σημειώνονται με κόκκινο χρώμα έχουν προκύψει από τη χρήση οριακής τιμής του διαγράμματος (το διάγραμμα δεν επαρκεί, οπότε χρησιμοποιούμε κάποιο όριο, το ανώτερο ή το χαμηλότερο για το επιτρεπόμενο φορτίο).

7.3.1 Ανάλυση διατομών μεταβαλλόμενου πάχους σκυροδέματος

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των μεθόδων σε διατομές, στις οποίες μεταβάλλονταν το πάχος του σκυροδέματος, φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 7.1. Επιρροή μεταβολής του πάχους σκυροδέματος στον υπολογισμό του PCN με διάφορες μεθόδους (το γράμμα δίπλα στο PCN δείχνει την κατηγορία του εδάφους)

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα (και τα διαγράμματα 1÷4 του πέμπτου παραρτήματος) μπορούμε να εξαγάγουμε τα εξής συμπεράσματα σχετικά με τις μεθόδους:

- Κατ'αρχάς, όλες οι μέθοδοι (λιγότερο ή περισσότερο η κάθε μέθοδος) παρουσίασαν μια αύξηση της αριθμητικής τιμής του PCN με την αύξηση του πάχους της πλάκας του σκυροδέματος. Αυτό οφείλεται στον κυρίαρχο ρόλο του σκυροδέματος στα δύσκαμπτα οδοστρώματα, όπου η ανάληψη του φορτίου γίνεται κυρίως μέσω του υλικού αυτού. Με δεδομένο ότι οι τάσεις που αναπτύσσονται στη βάση του σκυροδέματος είναι αντιστρόφως ανάλογες του τετραγώνου του πάχους της πλάκας [7], η αύξηση του πάχους αυτής προκαλεί υπερδιπλάσια μείωση των τάσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμού των επιτρεπόμενων διελεύσεων που

μπορεί να πραγματοποιήσει ένα φορτίο και επομένως τον περιορισμό της κόπωσης του σκυροδέματος από το φορτίο αυτό.

- Η χρήση σκυροδέματος με μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή ($f_{ct}=5\text{MPa}$ αντί για $f_{ct}=4\text{MPa}$) σε συνδυασμό με την αύξηση του πάχους της πλάκας, προκαλεί ακόμη μεγαλύτερη βελτίωση της φέρουσας ικανότητας και περαιτέρω αύξηση της τιμής του PCN.
- Για τις διάφορες τιμές του συντελεστή αντίδρασης του εδάφους τα αποτελέσματα είναι παρόμοια. Παραμένει η τάση αύξησης της αριθμητικής τιμής του PCN για τους λόγους που δόθηκαν προηγουμένως, αλλά τα αποτελέσματα δε μεταβάλλονται πολύ για τις τρεις τιμές του K. Αυτό δείχνει ότι μάλλον το σημαντικότερο ρόλο στην ανάληψη του φορτίου τον έχει το σκυρόδεμα. Η επιρροή του συντελεστή αντίδρασης του εδάφους θα διερευνηθεί διεξοδικότερα παρακάτω.

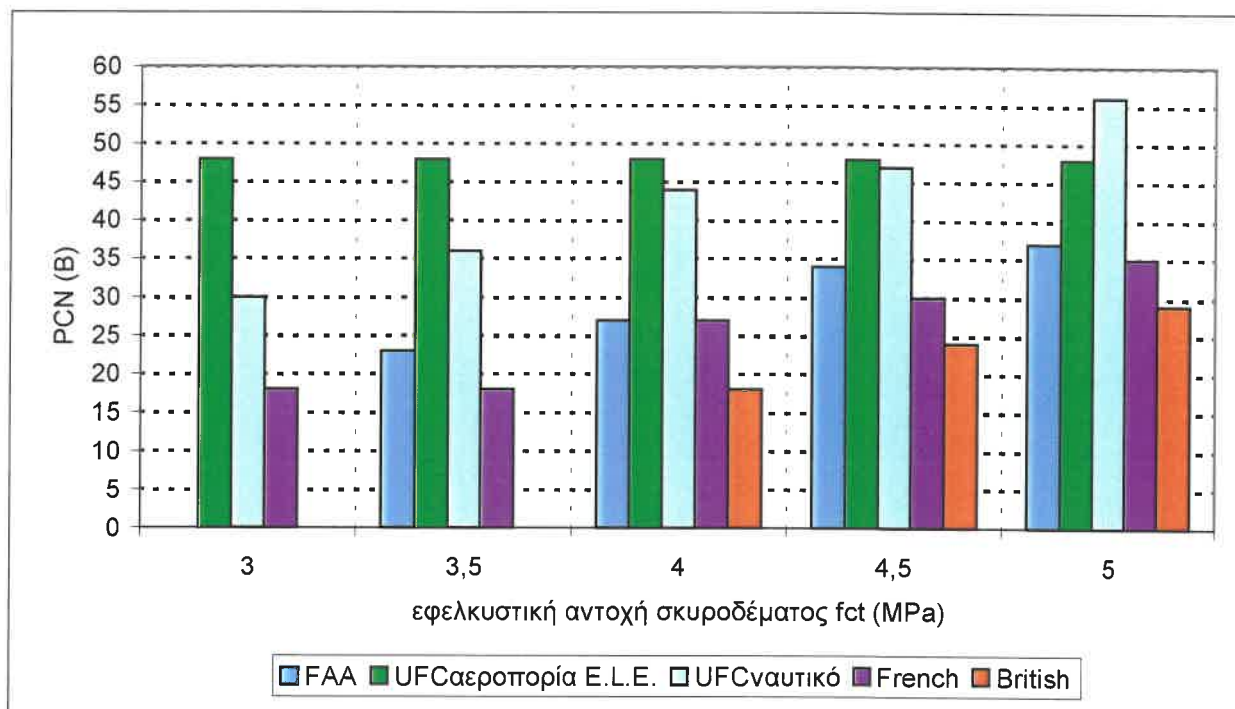
Πέρα όμως από τα προηγούμενα γενικά συμπεράσματα προκύπτουν και ορισμένα πιο εξειδικευμένα για κάθε μέθοδο χωριστά:

- Η μέθοδος της UFC για την αεροπορία παρουσίασε σημαντικά προβλήματα λόγω του διαγράμματος που χρησιμοποιεί για τον προσδιορισμό του επιτρεπόμενου φορτίου. Το πρόβλημα το οποίο προέκυψε έχει να κάνει με την αδυναμία του διαγράμματος να δώσει τιμές επιτρεπόμενου φορτίου για ορισμένους συνδυασμούς συντελεστή αντίδρασης εδάφους και εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος. Για υψηλές τιμές είτε της μίας είτε της άλλης παραμέτρου (κυρίως για τιμές αντοχής σκυροδέματος πάνω από 3.5MPa) το διάγραμμα φτάνει στην ανώτατη τιμή φορτίου που μπορεί να δώσει και έτσι φαίνεται η τιμή του PCN να είναι σταθερή για οποιαδήποτε τιμή του πάχους της πλάκας του σκυροδέματος. Αυτό το γεγονός δείχνει ότι μάλλον η μέθοδος δε λειτουργεί σε αυτές τις περιπτώσεις.
- Η μέθοδος UFC για το ναυτικό, σε αντίθεση με αυτή για την αεροπορία, δεν παρουσίασε προβλήματα κατά την εφαρμογή της και έδειξε να επαληθεύει τις γενικές παρατηρήσεις που αναφέρθηκαν νωρίτερα. Μικρό πρόβλημα παρουσιάστηκε μόνο εξαιτίας της ασυμβατότητας μεταξύ του διαγράμματος υπολογισμού του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου και αυτού για τον προσδιορισμό του PCN. Η ανακολουθία έχει να κάνει με το γεγονός ότι το διάγραμμα του PCN έχει μικρότερο εύρος τιμών φορτίου σε σχέση με τα αποτελέσματα που δίνει το άλλο διάγραμμα, με αποτέλεσμα να υπάρχουν τιμές μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου, που δίνει το ένα διάγραμμα, οι οποίες να μην εμφανίζονται στο άλλο. Γι' αυτό και σε υψηλές τιμές επιτρεπόμενου φορτίου η τιμή του PCN σταθεροποιείται στη μέγιστη τιμή που μπορεί να δώσει το αντίστοιχο διάγραμμα.

- Η μέθοδος της FAA και η βρετανική μέθοδος είναι αυτές οι οποίες επηρεάζονται περισσότερο από τη μεταβολή του πάχους της πλάκας του σκυροδέματος, καθώς οι τιμές του PCN και για τις 2 είναι χαμηλές για πάχος 20cm, ενώ για 40cm τριπλασιάζονται ή και τετραπλασιάζονται, με την αντίστοιχη μεταβολή για τις άλλες δύο μεθόδους να είναι λίγο μεγαλύτερη από το διπλάσιο. Συνέπεια αυτής της παρατήρησης είναι το γεγονός ότι θεωρητικά με μικρή μεταβολή του πάχους της πλάκας είναι εφικτή η δραστική βελτίωση της φέρουσας ικανότητας της διατομής.
- Πρόβλημα αντίστοιχο με αυτό της UFC, όσον αφορά τα διαγράμματα, παρουσίασε και η γαλλική μέθοδος. Η τιμή του PCN φαίνεται να μεταβάλλεται πολύ λίγο με την αύξηση του πάχους της πλάκας. Το γεγονός αυτό οφείλεται σ' έναν κυρίως λόγο: τα διαγράμματα που παρέχονται από τη μέθοδο είναι μάλλον ανεπαρκή καθώς δε δίνουν τιμή μέγιστου φορτίου για ορισμένους συνδυασμούς συντελεστή αντίδρασης εδάφους και εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος (σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η εφελκυστική αντοχή μειώνεται λόγω του συντελεστή ασφαλείας που εφαρμόζεται). Αποτέλεσμα αυτού είναι να χρησιμοποιούμε μονίμως την ελάχιστη τιμή του διαγράμματος και έτσι η μεταβολή στο PCN να μη φαίνεται.

7.3.2 Ανάλυση διατομών μεταβαλλόμενης εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των μεθόδων σε διατομές, στις οποίες μεταβάλλονταν η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, φαίνονται στο διάγραμμα:



Διάγραμμα 7.2. Επирρφή μεταβολής της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος στον υπολογισμό του PCN με διάφορες μεθόδους (το γράμμα δίπλα στο PCN δείχνει την κατηγορία του εδάφους)

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα (και τα διαγράμματα 8 και 9 του πέμπτου παραρτήματος) μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα σχετικά με τις μεθόδους:

- Παρατηρούμε ότι η αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος προκαλεί μια αύξηση και στην τιμή του PCN. Αυτό ως ένα βαθμό ήταν αναμενόμενο, δεδομένου ότι η γενική μορφή ενός νόμου κόπωσης του σκυροδέματος είναι:

$$\log N = K_1 - K_2 \frac{\sigma}{f} \quad (7.1)$$

όπου σ είναι η εφελκυστική τάση που προκαλεί ένα φορτίο στη βάση της πλάκας του σκυροδέματος και f η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Από τη σχέση αυτή παρατηρούμε ότι αύξηση της εφελκυστικής αντοχής προκαλεί σημαντική αύξηση του αριθμού των επιτρεπόμενων διελεύσεων και επομένως, από την υπόθεση Miner [7], μείωση της κόπωσης που προκαλεί η διέλευση ενός φορτίου.

- Επιβεβαιώνεται η παρατήρηση που έγινε και προηγουμένως κατά τη μεταβολή του πάχους του σκυροδέματος ότι δηλαδή ο συνδυασμός μεγάλης τιμής πάχους πλάκας και αυξημένης τιμής της αντοχής του σκυροδέματος δίνει τα υψηλότερα αποτελέσματα στην τιμή του PCN, γεγονός επίσης αναμενόμενο λόγω της συνδυασμένης επίδρασης υψηλών τιμών και των δύο σημαντικών παραμέτρων (πάχους-αντοχής). Αντίθετα, η αύξηση του συντελεστή αντίδρασης του εδάφους δεν έδειξε να βοηθά ιδιαίτερα στη βελτίωση των τιμών, καθώς βλέπουμε ότι οι τιμές (πίνακας 3 στο πέμπτο παράρτημα) για $K=70\text{MN/m}^3$ είναι λίγο μεγαλύτερες από τις τιμές για $K=50\text{MN/m}^3$.

Πέρα από τα παραπάνω γενικά συμπεράσματα υπάρχουν και ορισμένες παρατηρήσεις για κάθε μέθοδο ξεχωριστά:

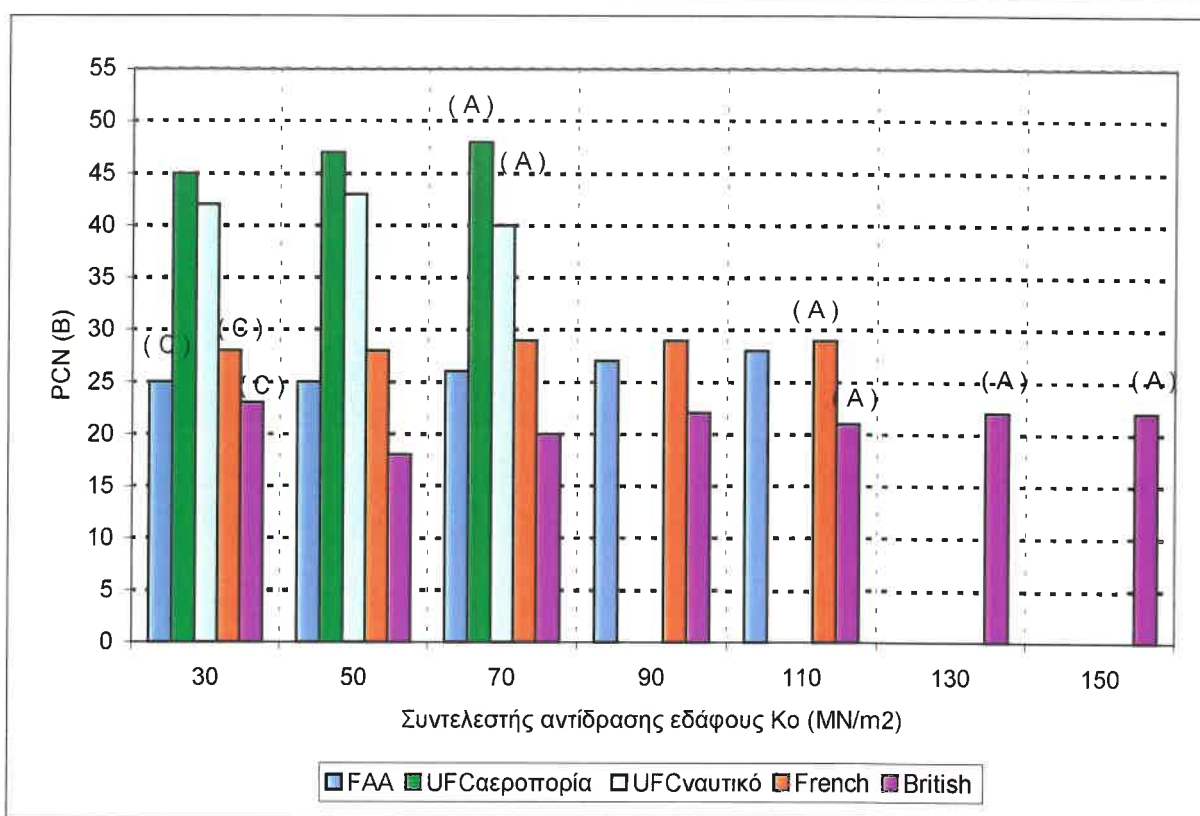
- Η UFC για την αεροπορία εμφάνισε το ίδιο πρόβλημα με τα διαγράμματά της, δηλαδή δεν έδωσε τιμή για κανένα συνδυασμό αντοχής και συντελεστή αντίδρασης εδάφους, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται πάντα το ανώτατο όριο και η τιμή του PCN να εμφανίζεται μονίμως σταθερή. Μια πιθανή εξήγηση αυτού του φαινομένου στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η υψηλή τιμή του συντελεστή αντίδρασης της ενοποιημένης στρώσης έδρασης, δηλαδή είναι πιθανό να αποτελεί μια ασυνήθιστα υψηλή τιμή για τα εδάφη στα οποία στηρίχθηκε ο προσδιορισμός της μεθόδου.
- Η UFC για το ναυτικό και πάλι δεν παρουσίασε προβλήματα όμοια με αυτά της αεροπορίας, επέτρεψε τη διερεύνηση της μεταβολής της αντοχής του σκυροδέματος και έδειξε να επιβεβαιώνει τα γενικά συμπεράσματα που αναφέραμε προηγουμένως.

Οι τιμές του PCN, για τις τρεις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, είναι παρόμοιες με τα μεγαλύτερα αποτελέσματα να εμφανίζονται σε τιμές αντοχής άνω των 4MPa και για τη διατομή με πάχος πλάκας 35cm.

- Η γαλλική μέθοδος παρουσίασε σαφώς λιγότερα προβλήματα με τα όρια των διαγραμμάτων της, γεγονός που πιθανότατα οφείλεται στις υψηλές τιμές της αντοχής του σκυροδέματος. Εξαιτίας των τιμών του συντελεστή ασφαλείας που εφαρμόζονται στην εφελκυστική αντοχή, η μέθοδος παρουσιάζεται πιο συντηρητική, όσον αφορά αυτή την παράμετρο. Χρειάζεται επομένως υψηλές τιμές αντοχής του σκυροδέματος και γι' αυτό στην ανάλυση αυτή, όπου εμφανίζονται και αρκετά υψηλές τιμές αντοχής, τα προβλήματα με τη χρήση των διαγραμμάτων περιορίστηκαν. Φαίνεται δηλαδή ότι η αντοχή του σκυροδέματος αποτελεί το σημαντικότερο παράγοντα για τη γαλλική διαδικασία αξιολόγησης. Η μέθοδος επιβεβαιώνει και αυτή τα γενικά συμπεράσματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως.
- Η μέθοδος της FAA και αυτή της M. Βρετανίας παρουσίασαν την ίδια συμπεριφορά με αυτή που έδειξαν στη διατομή μεταβαλλόμενου πάχους σκυροδέματος. Δηλαδή, μια παρόμοια μορφή μεταβολής, με την FAA να δίνει μεγαλύτερα αποτελέσματα από τη βρετανική και με τις δύο μεθόδους να ξεκινούν από χαμηλές τιμές και να καταλήγουν σε υψηλότερες. Και οι δύο μέθοδοι επαληθεύουν τις γενικές παρατηρήσεις. Πρέπει να σημειωθεί ότι η βρετανική μέθοδος δίδει τα πιο συντηρητικά αποτελέσματα απ' όλες τις μεθόδους εκτός της περίπτωσης όπου η εφελκυστική αντοχή ξεπερνά τα 4.5MPa.
- Τέλος, σημειώνεται ότι η FAA δε δίδει τιμές για σκυρόδεμα αντοχής 3MPa και η βρετανική για σκυρόδεμα με αντοχή κάτω από 4MPa, γεγονός που δείχνει ότι οι μέθοδοι θεωρούν πως το σκυρόδεμα πρέπει να 'χει μια ελάχιστη τιμή (3.5MPa η πρώτη και 4.1MPa η δεύτερη) προκειμένου να αντεπεξέλθει στην κυκλοφορία.

7.3.3 Ανάλυση διατομών με μεταβαλλόμενο συντελεστή αντίδρασης εδάφους

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των μεθόδων σε διατομές, στις οποίες μεταβάλλονταν ο συντελεστής αντίδρασης του εδάφους, φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 7.3. Επιρροή μεταβολής του συντελεστή αντίδρασης εδάφους στον υπολογισμό του PCN με διάφορες μεθόδους (το γράμμα δίπλα στο PCN δείχνει την κατηγορία του εδάφους, όμοια και οι τιμές σε παρένθεση στο διάγραμμα)

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα (και τα διαγράμματα 10÷13 του πέμπτου παραρτήματος) μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα σχετικά με τις μεθόδους:

- Επιβεβαιώνεται αυτό που είχαμε παρατηρήσει στις προηγούμενες αναλύσεις, ότι δηλαδή ο συντελεστής αντίδρασης του εδάφους είναι μια παράμετρος που επηρεάζει σχετικά λίγο την κατάταξη ενός οδοστρώματος. Αυτό είναι φανερό, καθώς και στις πέντε παραλλαγές διατομών που δοκιμάσαμε, η τιμή του PCN μεταβάλλεται σχετικά λίγο καθώς αυξάνει το K. Τον πρώτο λόγο στον καθορισμό της τιμής του PCN έχουν και πάλι το πάχος της πλάκας και η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος και από εκεί και πέρα το K προκαλεί μικρές μόνο μεταβολές της τιμής αυτής.
- Ενδιαφέρουσα παρατήρηση που αφορά όλες τις μεθόδους, εκτός αυτής της Μ. Βρετανίας (την UFC σε μεγαλύτερο βαθμό), είναι η αδυναμία τους να ενοποιήσουν τη στρώση έδρασης και την υπόβαση όταν ο συντελεστής αντίδρασης του εδάφους είναι σχετικά υψηλός. Όλες δηλαδή οι μέθοδοι (πλην της Βρετανικής) έχουν ως μέγιστη τιμή του συντελεστή αντίδρασης στην ενοποιημένη στρώση έδρασης, όπως αυτή προκύπτει από το διάγραμμα, μικρότερη αυτής των 150 MN/m², η οποία είναι και η χαρακτηριστική της υψηλής κατηγορίας του ICAO. Οι μέγιστες αυτές τιμές έχουν σαν αποτέλεσμα καμία μέθοδος (πλην της Βρετανικής) να μη μπορεί να δώσει

αποτελέσματα για όλο το εύρος των τιμών του K , το οποίο χρησιμοποιεί ο ICAO. Το πρόβλημα αυτό των μεθόδων είναι πιθανό να οφείλεται στα εδάφη, στα οποία στηρίχθηκαν οι μέθοδοι για να εξαχθούν.

- Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό στοιχείο όλων των μεθόδων είναι η αύξηση της τιμής του PCN με την αύξηση της τιμής του K , όσο βρισκόμαστε στην ίδια κατηγορία αντοχής εδάφους. Δηλαδή όσο το K του εδάφους είναι τέτοιο, ώστε να παραμένουμε σε μία κατηγορία εδαφικής αντοχής, τόσο η αύξηση του K προκαλεί αύξηση του PCN. Αυτό όμως πιθανότατα να έρχεται σε αντίθεση με τον ορισμό του PCN, διότι το PCN στην ουσία είναι μία τιμή ACN. Το ACN όμως, όσο αυξάνει το K , μειώνεται και επομένως αντίστοιχη μεταβολή θ' αναμέναμε και στο PCN [6].
- Πρέπει να παρατηρήσουμε ότι τα αποτελέσματα όλων των μεθόδων για τη διατομή με $f_{ct}=5\text{MPa}$ είναι σχεδόν ίδια με τα αποτελέσματα για πάχος πλάκας σκυροδέματος 35cm. Φαίνεται να υπάρχει μια ισοδυναμία ανάμεσα στην αύξηση του πάχους του σκυροδέματος και στη βελτίωση της εφελκυστικής αντοχής, όσον αφορά την αύξηση της φέρουσας ικανότητας που επιφέρουν και οι δύο μεταβολές.

Πέρα από τις γενικές παρατηρήσεις, υπάρχουν και πιο ειδικές επισημάνσεις για κάθε μέθοδο:

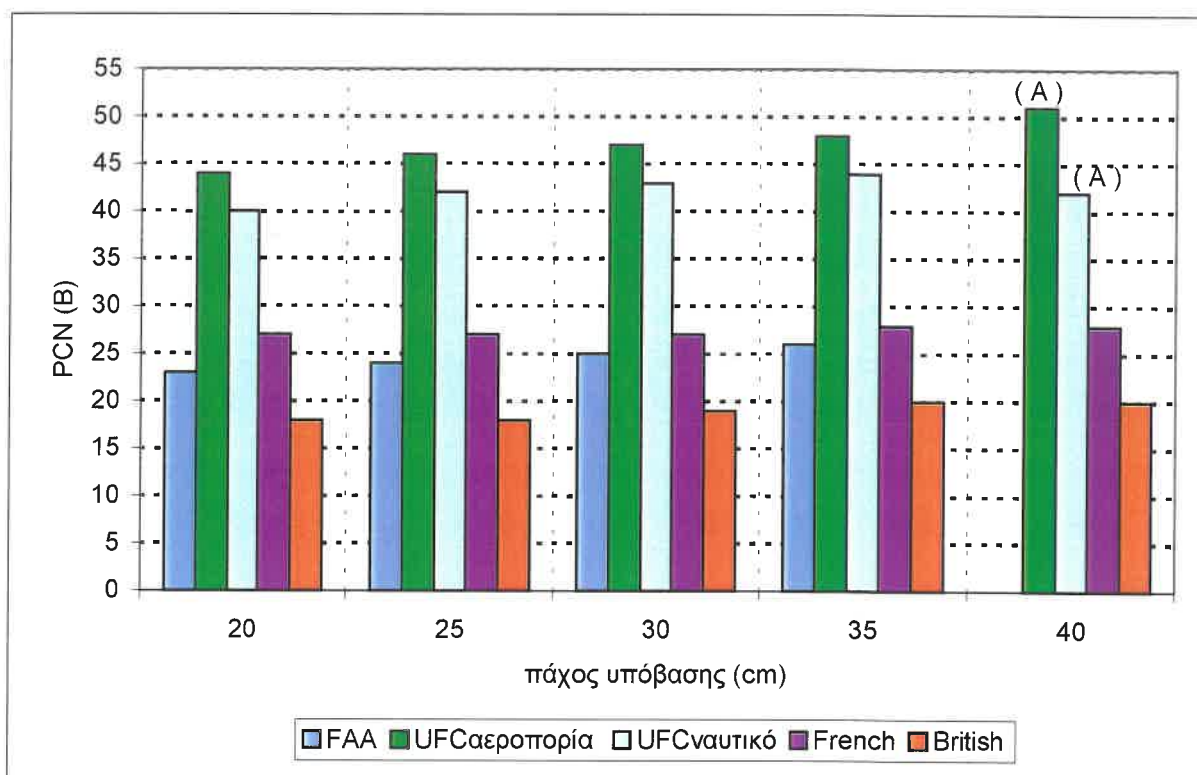
- Πρώτη φορά η UFC για την αεροπορία δεν έχει μια εντελώς σταθερή τιμή αλλά μεταβάλλεται με παρόμοιο τρόπο συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους και επαληθεύει τις προηγούμενες θέσεις. Εξαιρεση αποτελεί η περίπτωση όπου $f_{ct}=5\text{MPa}$ και όπου η μέθοδος έδωσε σταθερές τιμές. Επιπλέον εμφανίζεται και άλλη μια αδυναμία της μεθόδου: το διάγραμμα του α/φ C-17 που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της τιμής του PCN, έχει μία καμπύλη για τις κατηγορίες αντοχής εδάφους A, B και C, και άλλη μία για την κατηγορία D. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η μεταβολή της κατηγορίας του εδάφους να μην επηρεάζει την τιμή του PCN και ο μοναδικός παράγοντας ο οποίος παίζει ρόλο, να είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο που υπολογίσαμε προηγουμένως. Έτσι, στη μέθοδο αυτή, σε αντίθεση με τις άλλες, ακόμη και όταν η κατηγορία του εδάφους αλλάζει το PCN εξακολουθεί ν' αυξάνει όσο αυξάνει το K . Δηλαδή, ενώ για τις άλλες τρεις μεθόδους καθώς και για την UFC του ναυτικού όταν από την κατηγορία B μεταβαίνουμε στην A το PCN μειώνεται λίγο αριθμητικά, παρόλο που το K αυξάνει, στην UFC της αεροπορίας η αριθμητική τιμή του PCN εξακολουθεί ν' αυξάνει με την αύξηση του K .
- Η μέθοδος της UFC παρουσίασε το εντονότερο πρόβλημα όσον αφορά τον ενοποιημένο συντελεστή αντίδρασης του εδάφους, αφού μπορέσαμε να προσδιορίσουμε PCN μόνο για τις τρεις πρώτες τιμές του K . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μέθοδος αυτή προσαυξάνει πολύ το συντελεστή αντίδρασης του

εδάφους λόγω της υπόβασης και αυτό έχει ως συνέπεια να παίρνει πιο γρήγορα την οριακή τιμή του $K=136\text{MN/m}^3$. Κάτι ανάλογο παρατηρήθηκε και σε προηγούμενες αναλύσεις, όπως για παράδειγμα στις διατομές μεταβαλλόμενου πάχους πλάκας σκυροδέματος, όπου για τη διατομή με συντελεστή αντίδρασης στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης 70 MN/m^3 , ενώ όλες οι άλλες μέθοδοι δίνουν τιμή της ενοποιημένης στρώσης γύρω στα 95 MN/m^3 και μένουν σε κατηγορία αντοχής εδάφους B, η UFC δίνει 125 MN/m^3 με αποτέλεσμα να μεταβαίνει στην κατηγορία αντοχής A. Γενικά η μέθοδος αυτή προκαλεί πολύ μεγαλύτερη αύξηση του συντελεστή K, λόγω της υπόβασης, σε σχέση με τις άλλες τρεις μεθόδους.

- Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τρεις μέθοδοι (βρετανική, FAA, γαλλική) παρουσιάζουν σχεδόν ίδια τιμή του K για την ενοποιημένη στρώση, δηλαδή ενσωματώνουν με τον ίδιο τρόπο την υπόβαση.
- Η FAA έδωσε μεγαλύτερα αποτελέσματα και γενικά επιβεβαίωσε τα γενικά συμπεράσματα που αναφέραμε προηγουμένως
- Η βρετανική μέθοδος έδωσε και πάλι τα χαμηλότερα αποτελέσματα εκτός από την περίπτωση της πλάκας των 35cm. Αυτό δείχνει ότι η μέθοδος είναι μάλλον συντηρητική, και ότι υψηλά αποτελέσματα δίνει μόνο για πολύ μεγάλα πάχη πλάκας σκυροδέματος ή για μεγάλες τιμές εφελκυστικής αντοχής (5MPa και άνω).
- Η γαλλική μέθοδος παρουσίασε και πάλι την ίδια αδυναμία με το εύρος των διαγραμμάτων, με αποτέλεσμα να μη δώσει σχεδόν καμία μεταβολή στις τιμές του PCN καθώς αυξάνονταν ο συντελεστής αντίδρασης K. Εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση της διατομής μ' εφελκυστική αντοχή 5MPa, όπου τα διαγράμματα έδωσαν κάποιες τιμές και εμφανίστηκε μια μεταβολή στις τιμές του PCN ανάλογη με αυτή των υπολοίπων μεθόδων. Αυτό το γεγονός δείχνει να επιβεβαιώνει προηγούμενη παρατήρηση σχετικά με την έμμεση προϋπόθεση της γαλλικής μεθόδου για χρήση σκυροδεμάτων σχετικά πολύ υψηλής αντοχής.

7.3.4 Ανάλυση διατομών με μεταβαλλόμενο πάχος υπόβασης

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των μεθόδων σε διατομές, στις οποίες μεταβάλλονταν το πάχος τη υπόβασης, φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 7.4. Επιρροή μεταβολής του πάχους της υπόβασης στον υπολογισμό του PCN με διάφορες μεθόδους (το γράμμα δίπλα στο PCN δείχνει την κατηγορία του εδάφους, όμοια και οι τιμές σε παρένθεση στο διάγραμμα)

Το πάχος της υπόβασης, και επομένως και η μεταβολή του, υπεισέρχεται έμμεσα στους υπολογισμούς μέσω της τροποποίησης του συντελεστή αντίδρασης του εδάφους και στην εξαγωγή ενός νέου K που θα χαρακτηρίζει την ενοποιημένη στρώση έδρασης. Αυτό το γεγονός μας οδηγεί στο να περιμένουμε αποτελέσματα ανάλογα με αυτά που προέκυψαν κατά τη μεταβολή του συντελεστή αντίδρασης του εδάφους. Πράγματι, τα αποτελέσματα παρουσιάζουν μια μεγάλη ομοιότητα, όχι τόσο στην αριθμητική τιμή, όσο στον τρόπο μεταβολής με την περίπτωση της μεταβολής του K. Δηλαδή η αύξηση του πάχους της υπόβασης, η οποία συνεπάγεται αύξηση του συντελεστή αντίδρασης του εδάφους, προκαλεί μικρή μόνο μεταβολή στ' αποτελέσματα. Είναι χαρακτηριστικό ότι ο διπλασιασμός του πάχους της υπόβασης προκαλεί αύξηση του PCN κατά 4 με 5 μονάδες. Αντιλαμβανόμαστε, λοιπόν, ότι ο δομικός ρόλος της υπόβασης είναι περιορισμένος και τον κύριο ρόλο στον καθορισμό της τιμής του PCN τον έχουν το πάχος και η αντοχή της πλάκας του σκυροδέματος.

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα (και τα διαγράμματα 5÷7 του πέμπτου παραρτήματος) και την προηγούμενη παρατήρηση μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα σχετικά με τις μεθόδους:

- Όλες οι μέθοδοι παρουσίασαν την ίδια τάση μεταβολής, με τις τιμές του PCN ν' αυξάνουν καθώς το πάχος της υπόβασης αυξανόταν και αυτό. Το γεγονός αυτό είναι μάλλον αδυναμία των μεθόδων, διότι όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η αύξηση του συντελεστή αντίδρασης αναμένεται να προκαλέσει μείωση της αριθμητικής τιμής

του PCN. Εξαιρέση στον κανόνα αυτό φαίνεται ν' αποτελεί η μέθοδος UFC για το ναυτικό, η οποία όταν μεταβαίνει σε έδαφος υψηλότερης κατηγορίας αντοχής μειώνει την τιμή του PCN. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι κι αυτή η μέθοδος προκάλεσε αύξηση του PCN κατά την αύξηση του K, όταν δεν αλλάζαμε κατηγορία αντοχής.

- Αξίζει να τονιστεί ότι όπως και στην περίπτωση που ο συντελεστής αντίδρασης μεταβάλλεται, τα αποτελέσματα όλων των μεθόδων είναι ίδια για εφελκυστική αντοχή 5MPa και για πάχος πλάκας σκυροδέματος 35cm. Εμφανίζεται επομένως και πάλι μια πιθανή ισοδυναμία μεταξύ των 2 παραμέτρων, δηλαδή μια ισοδυναμία στη βελτίωση, που επιτυγχάνεται με την αύξηση του πάχους κατά 5cm και με την αύξηση της εφελκυστικής αντοχής κατά 1MPa.

Εκτός των παραπάνω γενικών συμπερασμάτων, υπάρχουν και μερικά ειδικά για κάθε μέθοδο:

- Είναι η μόνη περίπτωση όπου η μέθοδος UFC για την αεροπορία δίνει αποτελέσματα
- Η FAA επίσης ακολούθησε τη γενική τάση και έδειξε να επηρεάζεται πολύ λίγο από τη μεταβολή του πάχους της υπόβασης. Πρόβλημα παρουσιάστηκε στην περίπτωση υπόβασης πάχους 40cm, λόγω της αδυναμίας του διαγράμματος ενοποίησης της στρώσης έδρασης να δώσει αποτέλεσμα για τιμές πάνω από 35cm. Γι' αυτό στην τιμή αυτή δεν έχουμε αποτέλεσμα.
- Η γαλλική μέθοδος παρουσιάζει τη συνήθη συμπεριφορά (περιορισμένο εύρος διαγραμμάτων και χρήση ελάχιστης τιμής). Εξαιρέση και πάλι αποτελεί η περίπτωση όπου η εφελκυστική αντοχή είναι 5MPa.
- Τέλος, η βρετανική μέθοδος έδωσε και πάλι τα χαμηλότερα αποτελέσματα από όλες τις μεθόδους, ενώ στις μόνες περιπτώσεις που έδωσε κάπως πιο υψηλές τιμές είναι αυτές όπου το πάχος της πλάκας είναι 35cm και όπου η εφελκυστική αντοχή είναι 5MPa, γεγονός το οποίο υποδηλώνει μια ισχυρή εξάρτηση των αποτελεσμάτων της μεθόδου από τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος.

7.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων από το λογισμικό της UFC και αποτελεσμάτων από τα διαγράμματα της αντίστοιχης μεθόδου

Η ERDC παρέχει λογισμικό με το οποίο δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού του PCN χωρίς τη χρήση διαγραμμάτων. Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιήθηκε στις ίδιες διατομές που αναλύθηκαν με τη βοήθεια των διαγραμμάτων, προκειμένου να ελεγχθεί το κατά πόσο οι δύο διαδικασίες της ίδιας μεθόδου δίνουν και τα ίδια αποτελέσματα. Από την εφαρμογή του

Στα παραπάνω διαγράμματα, καθώς και στ' αντίστοιχα του έκτου παραρτήματος, δίνονται δύο τιμές για το ναυτικό από το λογισμικό: μία για την περίπτωση εφαρμογής του κριτηρίου αστοχίας της πλάκας με την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής (initial) και μία για την περίπτωση όπου κριτήριο αστοχίας θεωρείται η θραύση της πλάκας σε έξι κομμάτια (shattered). Αυτή η ιδιαιτερότητα οφείλεται στο ότι η μέθοδος δεν καθορίζει επακριβώς ποιο κριτήριο πρέπει να εφαρμόζεται.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούμε να διαπιστώσουμε τα ακόλουθα:

- Στη διαδικασία προσδιορισμού του PCN για την αεροπορία εισάγεται η μικτή κυκλοφορία του αεροδρομίου αναλυτικά, σε αντίθεση με τη διαδικασία με τα διαγράμματα, όπου γίνεται ο υπολογισμός για 50000 διελεύσεις του α/φ C-17. Με αυτό τον τρόπο η εκτίμηση του PCN, που φαίνεται να γίνεται για πραγματικά δεδομένα είναι πιθανόν να δώσει διαφορετικά αποτελέσματα
- Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ενοποίηση της στρώσης έδρασης και της υπόβασης γίνεται με διαφορετικό τρόπο από το πρόγραμμα από ότι με τη διαδικασία με τα διαγράμματα. Αυτό είναι φανερό στις αναλύσεις με μεταβαλλόμενο συντελεστή αντίδρασης εδάφους και μεταβαλλόμενο πάχος υπόβασης, όπου για $K=70\text{MN/m}^3$ στην πρώτη περίπτωση και για πάχος υπόβασης 40cm στη δεύτερη περίπτωση το μεν διάγραμμα δίνει ως κατηγορία εδαφικής αντοχής A, το δε πρόγραμμα δίνει B κατηγορία αντοχής. Άρα, ο συντελεστής αντίδρασης της ενοποιημένης στρώσης προσδιορίζεται διαφορετικά από το πρόγραμμα.
- Το πρόγραμμα δίνει αποτελέσματα για περιπτώσεις όπου το διάγραμμα δε δίνει. Αυτό είναι φανερό κυρίως στις αναλύσεις για μεταβλητό συντελεστή αντίδρασης εδάφους, όπου η διαδικασία του διαγράμματος δίνει αποτέλεσμα μόνο για τις τρεις πρώτες τιμές, ενώ το λογισμικό κάνει υπολογισμούς και για τις υπόλοιπες (βέβαια για τις δύο τελευταίες η τιμή του PCN φαίνεται να σταθεροποιείται, γεγονός το οποίο δείχνει πως η μέθοδος έχει κάποιο άνω όριο στο συντελεστή K, πιθανότατα τα 136MN/m^3). Αυτό το γεγονός έχει ως αποτέλεσμα να μπορούμε να μελετήσουμε σαφώς καλύτερα τη μεταβολή της τιμής του K με τη βοήθεια του λογισμικού για τη μέθοδο της UFC, αλλά ταυτόχρονα αποτελεί και μια βασική διαφοροποίηση των 2 διαδικασιών.
- Με τη χρήση του λογισμικού δεν παρουσιάστηκε σχεδόν καμία περίπτωση όπου η μέθοδος να φτάνει σε κάποιο όριο και να δίνει συνεχώς σταθερές τιμές, όπως συνέβη ως επί το πλείστον στην περίπτωση των διαγραμμάτων της αεροπορίας. Μοναδική εξαίρεση, όπου εμφανίστηκε σταθερή τιμή του PCN λόγω ορίου σε κάποιο διάγραμμα, είναι αυτή που αναφέρθηκε προηγουμένως, όταν κατά την αύξηση του συντελεστή αντίδρασης φτάνει την ανώτατη τιμή του.

- Κατά τη διαμόρφωση της διατομής του προς αξιολόγηση οδοστρώματος εισάγεται και το είδος του υλικού που χρησιμοποιείται στην υπόβαση (αν είναι συνεκτικό ή μη, αν είναι σε όρυγμα ή σε επίχωμα), παράμετρος η οποία δεν υπάρχει στη διαδικασία των διαγραμμάτων.
- Το λογισμικό επιτρέπει στο χρήστη να καθορίσει το κριτήριο αστοχίας της πλάκας που αυτός επιθυμεί: είτε την πρώτη ρωγμή που θα εμφανιστεί είτε τη ρηγμάτωση μέχρι τη διάσπαση της πλάκας σε έξι κομμάτια. Στη συγκεκριμένη ανάλυση, για την αεροπορία χρησιμοποιήθηκε η κατακερματισμένη πλάκα (έξι κομμάτια), όπως ακριβώς ορίζει και η μέθοδος, ενώ για το ναυτικό έγιναν αναλύσεις και με τα δύο κριτήρια.
- Τέλος, κατά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι τόσο για την αεροπορία όσο και για το ναυτικό, τα αποτελέσματα ήταν εντελώς διαφορετικά, με τα διαγράμματα στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων να δίνουν πολύ υψηλότερες τιμές του PCN. Σχετικά πάντως με τα αποτελέσματα μπορούμε να παρατηρήσουμε και τα εξής:
 1. τα αποτελέσματα του λογισμικού, όσον αφορά το PCN, για την αεροπορία είναι πάντα μικρότερα από αυτά για το ναυτικό (με κριτήριο αστοχίας την κατακερματισμένη πλάκα), εκτός από την περίπτωση όπου ο συντελεστής αντίδρασης στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης είναι μεγαλύτερος από 70MN/m^3 , οπότε και η αεροπορία δίνει υψηλότερα αποτελέσματα. Αυτό δείχνει ότι πιθανότατα η βελτίωση του εδάφους είναι πολύ σημαντικότερη για τη μέθοδο της αεροπορίας σε σχέση με αυτή του ναυτικού.
 2. Γενικά οι τιμές του PCN που προκύπτουν από τα διαγράμματα για την αεροπορία είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του λογισμικού. Η μόνη περίπτωση όπου το PCN του λογισμικού για την αεροπορία γίνεται περίπου ίσο ή και ξεπερνάει την τιμή που δίνει το διάγραμμα είναι στις διατομές με πάχος της πλάκας του σκυροδέματος 40cm. Στις υπόλοιπες διατομές, λόγω του περιορισμένου εύρους του διαγράμματος, αναγκαζόμαστε να χρησιμοποιούμε τη μέγιστη τιμή φορτίου και γι' αυτό το διάγραμμα δίνει πολύ υψηλότερες τιμές από το λογισμικό.
 3. Στις αναλύσεις διατομών με μεταβαλλόμενο συντελεστή αντίδρασης του εδάφους και με μεταβαλλόμενο πάχος υπόβασης, τα αποτελέσματα ήταν σχεδόν ίδια και για τα δύο σώματα στρατού στις περιπτώσεις όπου $f_{ct}=5\text{MPa}$ και το πάχος της πλάκας του σκυροδέματος είναι 35cm. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και στις υπόλοιπες μεθόδους, όπως αναφέραμε παραπάνω, γεγονός που επιβεβαιώνει την ύπαρξη ισοδυναμίας ανάμεσα στο πάχος του σκυροδέματος και στην εφελκυστική αντοχή του.

4. Γενικά, το πρόγραμμα δίνει αποτελέσματα που επιβεβαιώνουν τις γενικές παρατηρήσεις και από τις υπόλοιπες μεθόδους που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Το PCN, δηλαδή, παρουσιάζει μικρή εξάρτηση από το συντελεστή αντίδρασης του εδάφους και από το πάχος της υπόβασης, ενώ αντίθετα αυξάνει πολύ όταν αυξάνεται το πάχος της πλάκας του σκυροδέματος και όταν αυξάνει η εφελκυστική αντοχή του. Επίσης, στην ίδια κατηγορία εδαφικής αντοχής, η αύξηση του K προκαλεί αύξηση του PCN.

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι το λογισμικό παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά από τα διαγράμματα, δεν εμφανίζει προβλήματα εφαρμογής και δείχνει ότι δουλεύει σε όλο το φάσμα των τιμών του ICAO, ενώ παρέχει στο χρήστη και περισσότερες δυνατότητες. Πολλές διαδικασίες, όπως για παράδειγμα η ενοποίηση της στρώσης έδρασης και της υπόβασης καθώς και η επίδραση της κυκλοφορίας, φαίνεται να πραγματοποιούνται από το λογισμικό με διαφορετικό τρόπο σε σχέση με τα διαγράμματα. Γενικότερα, το λογισμικό μοιάζει να μην ανταποκρίνεται πλήρως στις παραδοχές της μεθόδου, όπως αυτή εμφανίζεται στα διαγράμματα.

Προκειμένου να ολοκληρωθεί η διερεύνηση του παρεχόμενου από την ERDC λογισμικού σκόπιμο θα ήταν να εξεταστούν και τα αποτελέσματά του σε σχέση με τα αντίστοιχα των υπολοίπων μεθόδων. Στους πίνακες 1,2,3,4 του πέμπτου παραρτήματος αναφέρονται όλα τα αποτελέσματα του λογισμικού για τις διατομές στις οποίες έγινε εφαρμογή των μεθόδων. Αυτό το οποίο αντιλαμβανόμαστε από τους πίνακες είναι ότι το λογισμικό δίνει τιμές PCN αρκετά κοντά σε αυτές της FAA. Επίσης, φαίνεται ότι ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιεί την ενοποίηση της στρώσης έδρασης με την υπόβαση είναι πιο κοντά σε αυτόν που εφαρμόζουν οι άλλες τρεις μέθοδοι από ότι αυτός που εφαρμόζεται μέσω των διαγραμμάτων, διότι η κατηγορία εδαφικής αντοχής που προκύπτει είναι ίδια με αυτή που δίνουν οι μέθοδοι στις περισσότερες διατομές. Το λογισμικό επιβεβαίωσε τα συμπεράσματα των τριών μεθόδων και έδειξε παρόμοια εξάρτηση με αυτές από τα χαρακτηριστικά της διατομής. Παρουσίασε και αυτό κάποιες ενδεχόμενες αδυναμίες τους που διαπιστώσαμε προηγουμένως (αύξηση τιμής PCN με την αύξηση του K, εξάρτηση αριθμητικού αποτελέσματος PCN από την κυκλοφορία). Σε γενικές γραμμές, οι τιμές του λογισμικού είναι πιο κοντά σε αυτές των υπολοίπων μεθόδων περιορίζοντας με αυτό τον τρόπο τη διασπορά των τιμών του PCN σε μια διατομή.

7.5 Σχολιασμός

Έχοντας ολοκληρώσει την ανάλυση των τεσσάρων κυριότερων μεθόδων προσδιορισμού του PCN ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος μπορούμε να επισημάνουμε ορισμένα ενδιαφέροντα στοιχεία. Το σημαντικότερο μέχρι τώρα συμπέρασμα είναι ότι με τη μη καθιέρωση κάποιας συγκεκριμένης διαδικασίας προσδιορισμού του PCN από τον ICAO, η κατάταξη μιας διατομής μέσω της μεθόδου ACN/PCN δεν είναι μονοσήμαντη. Η κάθε μέθοδος ακολουθεί το δικό της τρόπο για την εύρεση της τιμής του PCN, με συνέπεια τη μεγάλη διασπορά των αποτελεσμάτων και την αδυναμία ασφαλούς δομικής κατάταξης ενός οδοστρώματος. Η επιλογή μιας μεθόδου οδηγεί σε διαφορετικό αποτέλεσμα από αυτό που θα έδινε μία άλλη, γεγονός το οποίο καθιστά δύσκολη την επιλογή, από τις αρχές του αεροδρομίου, μιας τελικής τιμής, την οποία και θα χρησιμοποιούν για την κατάταξη των οδοστρωμάτων τους.

Η μεγάλη διασπορά των αποτελεσμάτων δεν είναι όμως το μοναδικό πρόβλημα το οποίο παρατηρήθηκε. Διαπιστώθηκε, επίσης, συσχέτιση της τιμής του PCN με την κυκλοφορία, γεγονός το οποίο εγκυμονεί, όπως αναφέρθηκε, πιθανούς κινδύνους από την ενδεχόμενη χρήση της τιμής αυτής με βάση τον ορισμό που δίνει ο οργανισμός.

Επίσης, οι μέθοδοι παρουσίασαν προβλήματα εφαρμογής σε όλο το εύρος τιμών που απαιτεί ο ICAO. Δηλαδή κάποιες από τις μεθόδους δε μπορούν να πάρουν τιμές σε όλο το εύρος των τιμών που καθορίζει ο ICAO. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι οι μέθοδοι της FAA και της UFC δε μπορούν να δεχτούν τιμή στο συντελεστή αντίδρασης εδάφους μεγαλύτερη από τα 136MN/m^3 , γεγονός το οποίο σημαίνει ότι οι δύο μέθοδοι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την χαρακτηριστική τιμή της υψηλής κατηγορίας εδαφικής αντοχής, η οποία είναι στα 150MN/m^3 . Επίσης, οι τρεις μέθοδοι (πλην της Βρετανικής) αδυνατούν να ενοποιήσουν την στρώση έδρασης και την υπόβαση για υψηλές τιμές του συντελεστή αντίδρασης του εδάφους. Αυτές οι αδυναμίες περιορίζουν τη δυνατότητα χρήσης των μεθόδων σε ένα αριθμό διατομών που παρουσιάζουν αυτά τα χαρακτηριστικά, μειώνοντας έτσι το πεδίο εφαρμογής τους.

Όλες αυτές οι αδυναμίες που εντοπίστηκαν καθιστούν προβληματική την εφαρμογή της διαδικασίας κατάταξης ACN/PCN και επομένως κρίνεται αναγκαία η διερεύνηση των πιθανών αιτιών αυτών των προβλημάτων.

8.Διερεύνηση της μεθόδου ACN/PCN

8.1 Γενικά

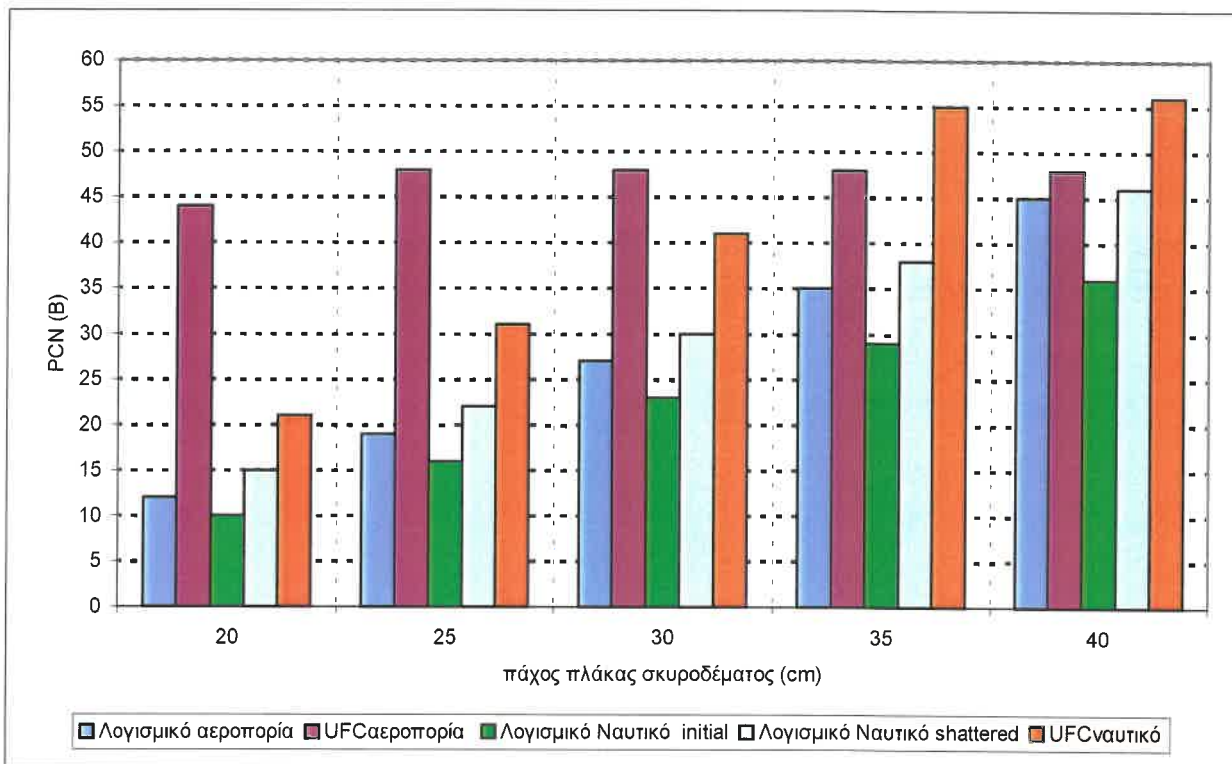
Η μέχρι τώρα διερεύνηση της μεθόδου ACN/PCN και των κυριότερων μεθόδων απέδειξε ότι υπάρχουν ορισμένες αδυναμίες και κάποια προβλήματα στην εφαρμογή. Οι τέσσερις μέθοδοι που μελετήθηκαν έχουν συμπεριλάβει τις παραδοχές που πραγματοποιεί ο ICAO στη μέθοδο ACN/PCN κατά τη διαμόρφωση του αλγορίθμου που χρησιμοποιούν για τον υπολογισμό του PCN. Είναι επομένως απαραίτητο να διερευνηθεί η ισχύς των παραδοχών αυτών στα δύσκαμπτα οδοστρώματα. Δύο είναι οι σημαντικότερες παραδοχές: η επιλογή του μονού τροχού σταθερής πίεσης 1.25MPa για την αντικατάσταση του πραγματικού συστήματος τροχών των α/φ και ο καθορισμός του οδοστρώματος αναφοράς. Στο κεφάλαιο αυτό θ' ασχοληθούμε με τα δύο αυτά θέματα, καθώς και με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της ACN/PCN και της αναλυτικής διαδικασίας προσδιορισμού τάσεων και κόπωσης του σκυροδέματος. Με την αναλυτική διαδικασία προσδιορισμού των τάσεων θα διερευνηθεί και η αδυναμία που προκύπτει από την εξάρτηση του PCN από την κυκλοφορία.

8.2 Σχέση πραγματικού συστήματος φορείου τροχών α/φ και ισοδύναμου μονού τροχού (DSWL)

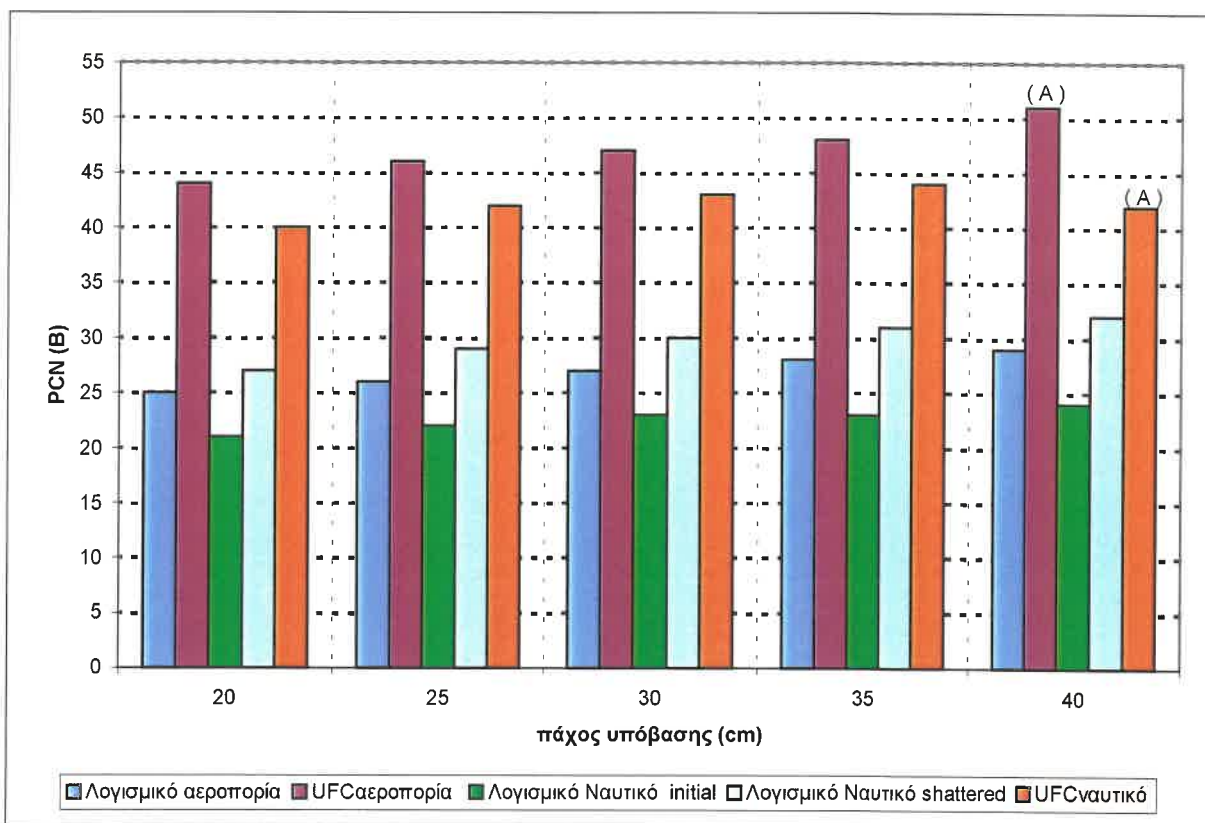
Η μέθοδος ACN/PCN στηρίζεται στη μετατροπή του πραγματικού φορείου τροχών σε ένα και μόνο ισοδύναμο τροχό, ο οποίος προκαλεί την ίδια τάση (2.75MPa) με το πραγματικό φορείο στο οδόστρωμα αναφοράς και ο οποίος έχει σταθερή πίεση 1.25MPa. Για να ελέγξουμε κατά πόσο η ισοδυναμία μεταξύ των δύο αυτών συστημάτων ισχύει, πραγματοποιούμε δοκιμές φορτίζοντας έναν αριθμό διατομών, πρώτα με το πραγματικό σύστημα και μετά με το φορτίο του μονού τροχού (DSWL).

Οι διατομές που επιλέγησαν αναφέρονται στο έβδομο παράρτημα (πίνακας 1). Τα α/φ που χρησιμοποιούνται είναι τα εξής πέντε: B737-400, B767-300, A300-600, B747-200C, A300B4. Χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα **Airfield Pavement Structural Analysis (APSA v1.) [11]** (το οποίο έχει αναπτυχθεί στον Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής του Ε.Μ.Π.) και με αυτό φορτίζουμε το σύνολο των διατομών με τα πέντε προηγούμενα α/φ (φορτίζουμε και με τα πέντε α/φ είκοσι διατομές με μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος 30000MPa και με λόγο Poisson 0,35, ενώ για τις υπόλοιπες παραλλαγές διατομών φορτίζουμε είτε με ορισμένα από τα α/φ είτε μόνο με ορισμένο αριθμό διατομών). Από την ανάλυση αυτή προκύπτουν οι οριζόντιες τάσεις και παραμορφώσεις στην κάτω επιφάνεια της πλάκας του σκυροδέματος. Στη συνέχεια, για την εύρεση του φορτίου του ισοδύναμου μονού

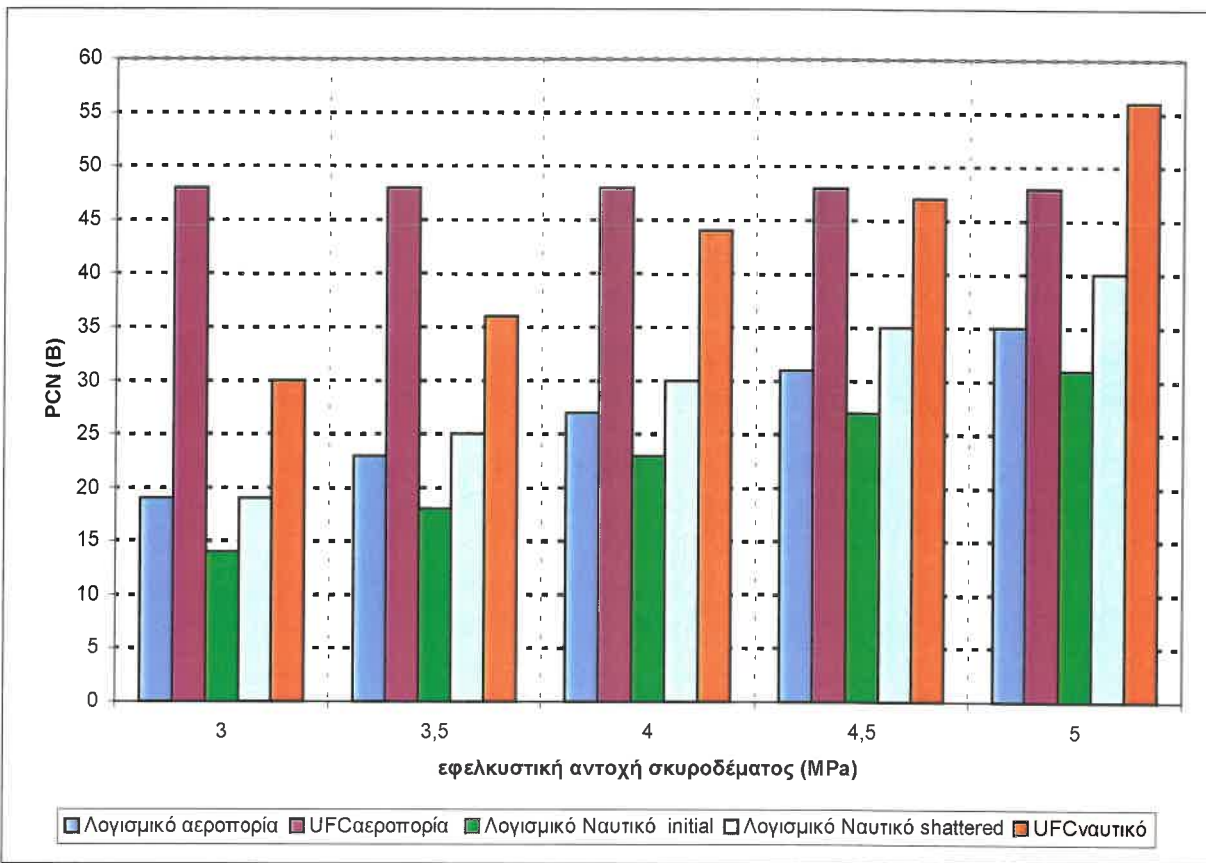
λογισμικού προέκυψαν τα αποτελέσματα, τα οποία δίνονται στα διαγράμματα μαζί με τα αντίστοιχα συμπεράσματα:



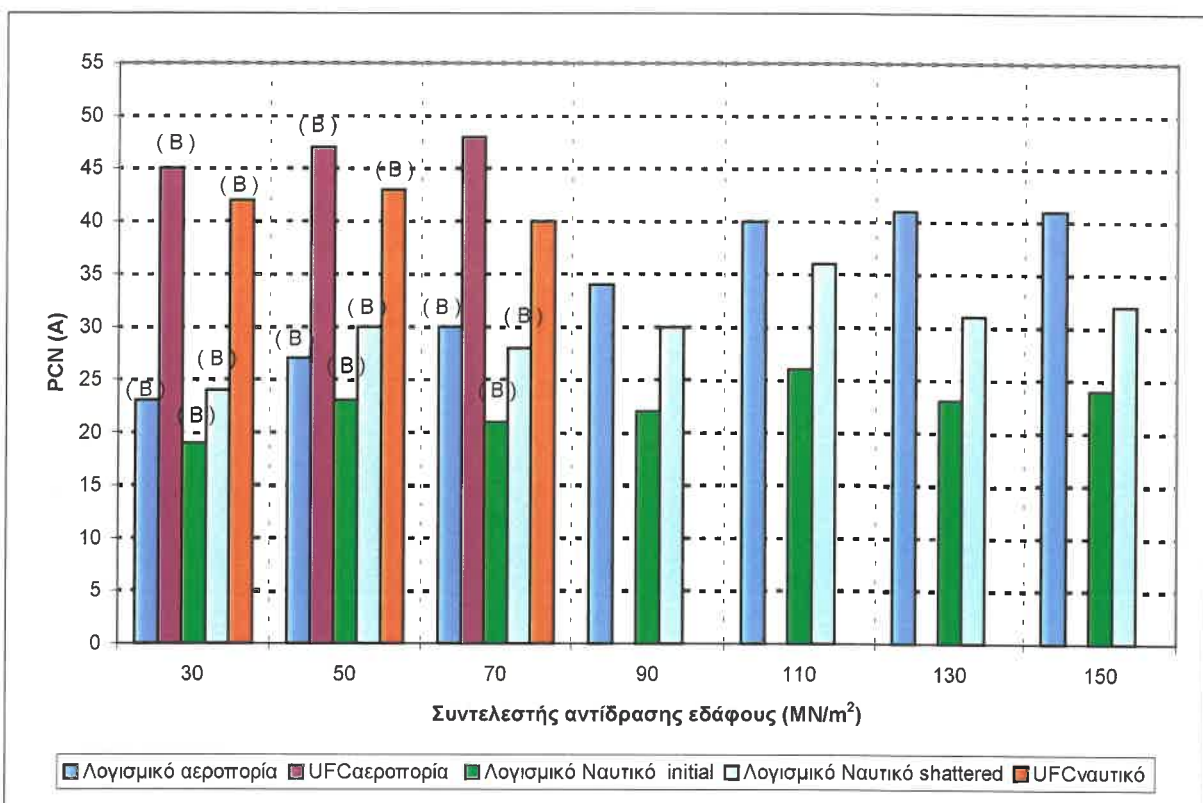
Διάγραμμα 7.5. Σύγκριση αποτελεσμάτων λογισμικού-διαγραμμάτων UFC κατά τη διερεύνηση της επιρροής της μεταβολής του πάχους σκυροδέματος (το γράμμα δίπλα στο PCN δείχνει την κατηγορία του εδάφους)



Διάγραμμα 7.6. Σύγκριση αποτελεσμάτων λογισμικού-διαγραμμάτων UFC κατά τη διερεύνηση της επιρροής της μεταβολής του πάχους υπόβασης (το γράμμα δίπλα στο PCN δείχνει την κατηγορία του εδάφους, όμοια και οι τιμές σε παρένθεση στο διάγραμμα)



Διάγραμμα 7.7. Σύγκριση αποτελεσμάτων λογισμικού-διαγραμμάτων UFC κατά τη διερεύνηση της επιρροής της μεταβολής της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος (το γράμμα δίπλα στο PCN δείχνει την κατηγορία του εδάφους)



Διάγραμμα 7.8. Σύγκριση αποτελεσμάτων λογισμικού-διαγραμμάτων UFC κατά τη διερεύνηση της επιρροής της μεταβολής του συντελεστή αντίδρασης εδάφους K (το γράμμα δίπλα στο PCN δείχνει την κατηγορία του εδάφους, όμοια και οι τιμές σε παρένθεση στο διάγραμμα)

τροχού χρησιμοποιούμε την τιμή του ACN του κάθε α/φ για τη συγκεκριμένη κατηγορία εδαφικής αντοχής και με βάση τον ορισμό προσδιορίζουμε από τη σχέση 8.1 το φορτίο του μονού τροχού και την ακτίνα της επιφάνειας επαφής με δεδομένο ότι η πίεση παραμένει σταθερή και ίση με 1.25MPa:

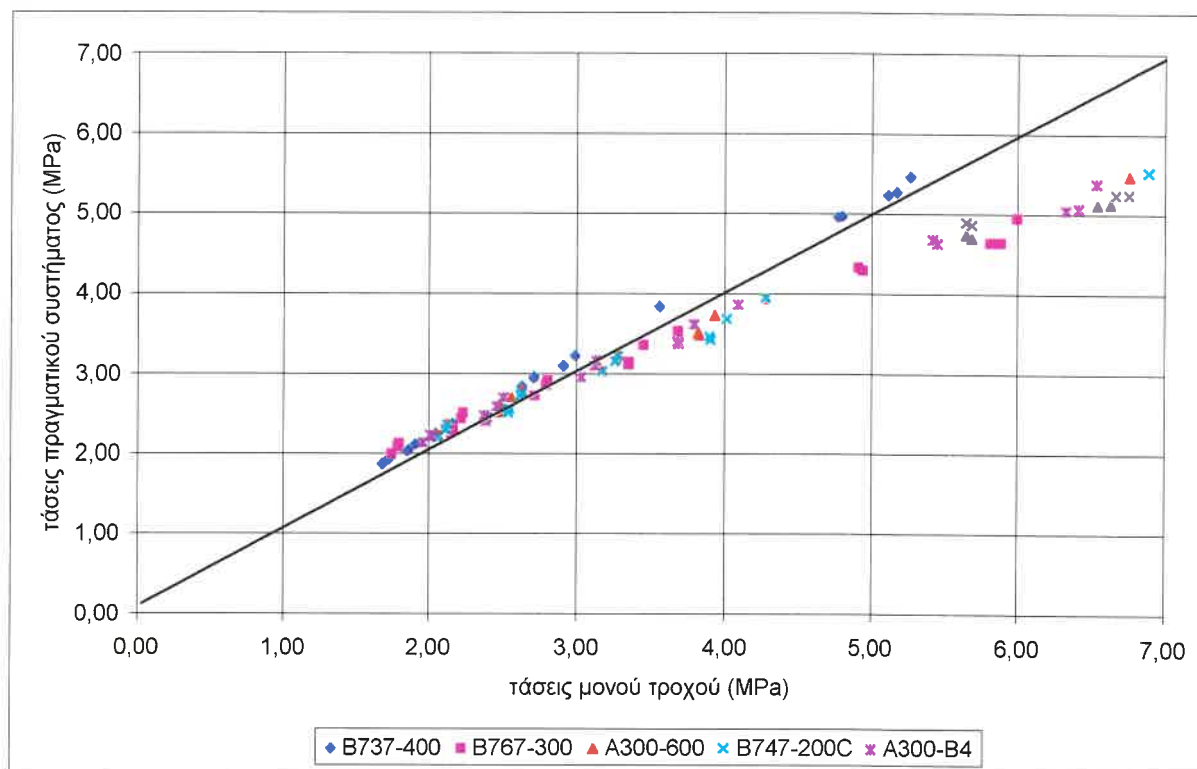
$$DSWL = \frac{ACN}{2} \Rightarrow r = \sqrt{\frac{DSWL}{\pi \times 1,25}} \quad (8.1)$$

Από τη διαδικασία αυτή προκύπτουν οι εξής τιμές για την ακτίνα:

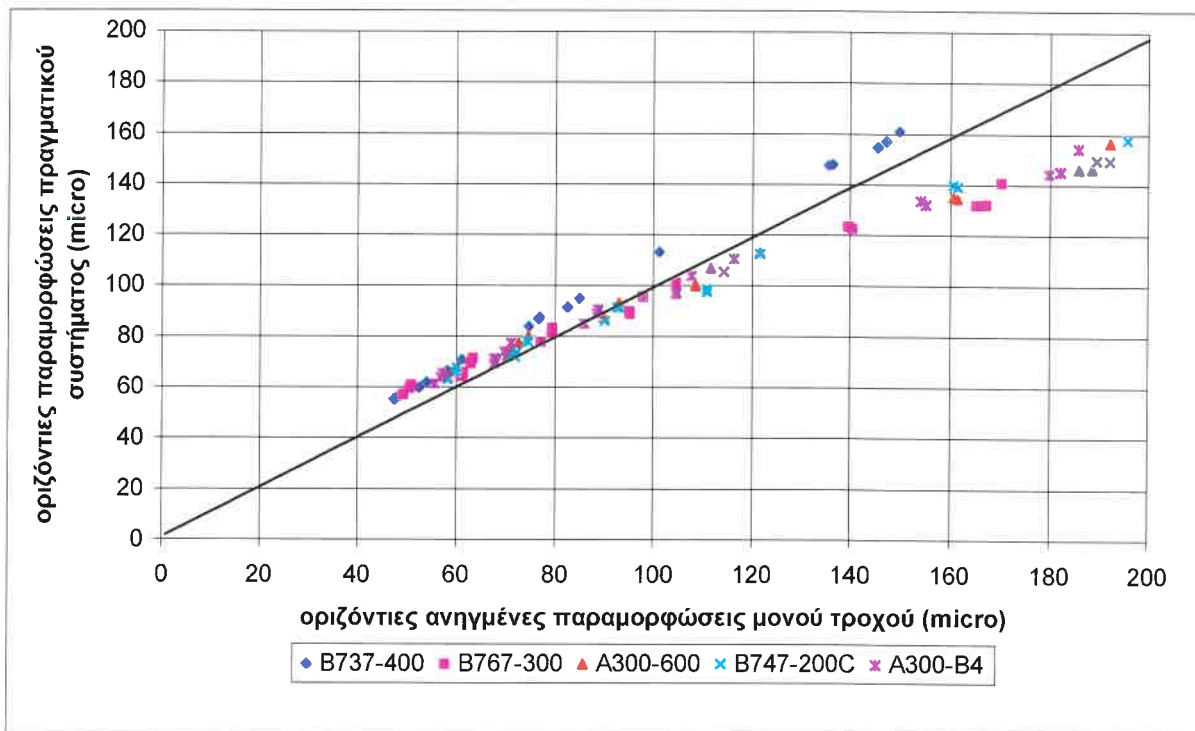
α/φ	Ακτίνα r (mm)			
	A	B	C	D
B737-400	229	234	239	245
B767-300	220	239	262	283
A300-600	242	265	286	305
B747-200C	245	265	290	311
A300-B4	237	257	279	296

Πίνακας 8.1 Ακτίνα ισοδύναμου μοναδιαίου τροχού DSWL

Με την ακτίνα που προκύπτει και με την πίεση των 1,25MPa χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα BISAR και φορτίζουμε τις ίδιες διατομές τις οποίες φορτίσαμε προηγουμένως με το πραγματικό σύστημα τροχών. Τα αποτελέσματα που αναφέρονται στην περίπτωση του λόγου του Poisson $\nu=0,35$ παρουσιάζονται εδώ, ενώ τα υπόλοιπα καταγράφονται στο έβδομο παράρτημα της εργασίας (πίνακες 2,3,4,5,6,7):



Διάγραμμα 8.1. Σύγκριση τάσεων πραγματικού συστήματος και ισοδύναμου μονού τροχού (DSWL)



Διάγραμμα 8.2. Σύγκριση οριζόντιων ανηγμένων παραμορφώσεων πραγματικού συστήματος και ισοδύναμου μονού τροχού (DSWL)

Από τα παραπάνω αντιλαμβανόμαστε ότι οι τιμές των τάσεων και των παραμορφώσεων παρουσιάζουν μικρή απόκλιση για πάχη της πλάκας σκυροδέματος μεγαλύτερα από 30cm. Για πάχη μικρότερα από αυτή την τιμή η απόκλιση είναι πολύ μεγαλύτερη. Οι τιμές της οριζόντιας τάσης για το πάχος σκυροδέματος μεγαλύτερο από 30cm είναι μεταξύ 1,8 και 3,5Μpa, ενώ για πάχος κάτω από 30cm είναι πολύ μεγαλύτερες. Φαίνεται δηλαδή ότι η ισοδυναμία της φόρτισης μεταξύ του πραγματικού συστήματος και του μοναδιαίου τροχού δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για διατομές με πλάκα σκυροδέματος τουλάχιστον 30cm. Αντίθετα, σε μικρότερο πάχος ο μονός τροχός εμφανίζεται δυσμενέστερος, αφού οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες του πραγματικού φορείου. Επομένως, η θεώρηση της μεθόδου ACN/PCN, σχετικά με τον ισοδύναμο μονό τροχό, είναι ικανοποιητική για οδοστρώματα με πάχος μεγαλύτερο των 30cm, ενώ για μικρότερες τιμές η μέθοδος εμφανίζεται μάλλον συντηρητική.

Εξαίρεση αποτελεί το B737-400 η συμπεριφορά του οποίου διαφοροποιείται και η απόκλιση είναι λίγο μικρότερη στις διατομές με πάχος κάτω από 30cm, ενώ και το πραγματικό σύστημα εμφανίζεται να προκαλεί μεγαλύτερη τάση στις διατομές αυτές. Τεχνικά, η διαφοροποίηση είναι πιθανό να οφείλεται στο γεγονός ότι είναι το μόνο από τα πέντε α/φ που εξετάστηκαν το οποίο έχει σύστημα διπλού τροχού (dual), ενώ τα υπόλοιπα είχαν σύστημα dual tandem. Είναι γεγονός πάντως ότι στην περίπτωση του B737-400 η μέθοδος του DSWL παρουσίασε γενικά καλύτερη προσαρμογή.

Καταλήγουμε πάντως στο συμπέρασμα ότι η θεώρηση του ICAO και η αντικατάσταση του πραγματικού συστήματος με μονό τροχό με σταθερή πίεση και μεταβλητή ακτίνα είναι μάλλον ικανοποιητική στα δύσκαμπτα οδοστρώματα για τιμές πάχους πλάκας σκυροδέματος άνω των 30cm. Οι διατομές με πάχος σκυροδέματος μικρότερο των 30cm είναι μάλλον μη συνηθισμένες με δεδομένο ότι οι τάσεις πλησιάζουν πολύ την εφελκυστική αντοχή του υλικού. Η συμπεριφορά αυτή έρχεται σε πλήρη αντίθεση με τα εύκαμπτα, όπου στα μεγάλα α/φ η ακτίνα του μονού τροχού αυξάνει πολύ με αποτέλεσμα να εμφανίζονται συνθήκες μονοδιάστατης φόρτισης που οδηγούν στη μείωση της αναπτυσσόμενης τάσης, παρά την αύξηση του φορτίου [11].

8.3 Έλεγχος πάχους αναφοράς

Σημαντική παραδοχή της μεθόδου ACN/PCN είναι το πάχος αναφοράς, δηλαδή η πλάκα του σκυροδέματος στο μέσο της οποίας το πραγματικό φορείο των τροχών αναπτύσσει τάση 2,75 MPa. Ο υπολογισμός του πάχους αναφοράς γίνεται με τη μέθοδο σχεδιασμού της Portland Cement Association [12]. Οι εταιρείες κατασκευής α/φ παρέχουν το πάχος αναφοράς για όλους τους τύπους α/φ που διαθέτουν μέσω ειδικών διαγραμμάτων. Ο ICAO παρέχει, επίσης, στο εγχειρίδιο του τον κώδικα προγράμματος FORTRAN με τον οποίο γίνεται ο προσδιορισμός του πάχους αναφοράς και του ACN οποιουδήποτε α/φ. Για να ελέγξουμε αυτήν την παράμετρο επιλέγουμε έναν ορισμένο αριθμό α/φ. Τα α/φ που χρησιμοποιούμε είναι: B707-320C, B727-200, B737-200, B737-200ADV, B737-400, B747-200C, B757-200, B767-300. Τα διαγράμματα απαιτήσεων πάχους τα παίρνουμε από την Boeing [3]. Ο προσδιορισμός του πάχους αναφοράς γίνεται σ' όλες τις κατηγορίες εδαφικής αντοχής και για το πλήρες φορτίο απογείωσης των α/φ. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα APSA, πραγματοποιούμε ανάλυση των διατομών αναφοράς. Ακολουθώντας, στις ίδιες διατομές εφαρμόζουμε το φορτίο του μοναδιαίου τροχού (DSWL), το οποίο το προσδιορίζουμε, όπως αναφέραμε στην παράγραφο 8.2, από το ACN του α/φ. Τα αποτελέσματα των φορτίσεων για μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος 28000MPa (όση είναι και η τιμή που χρησιμοποιεί η PCA στη μέθοδό της) δίνονται εδώ, ενώ τα αντίστοιχα για 25000 και 20000MPa και μόνο για τις κατηγορίες B και C δίνονται στο έβδομο παράρτημα (ο υπολογισμός για άλλες τιμές πέραν αυτής που χρησιμοποιεί η PCA έγινε για να ελεγχθεί και η ευαισθησία των αποτελεσμάτων στη συγκεκριμένη παράμετρο):

Α/Φ	Βάρος (Kg)	Κατηγορία Α						
		πάχος πλάκας (mm)	Poisson Υπόβασης	Ε υπόβασης (Mpa)	σ _{πραγμ} (Mpa)	σ _{μον} (Mpa)	ε _{πραγμ} (micro)	ε _{μον} (micro)
B707-320C	143000	279	0,45	150	2,77	2,60	85	80
B727-200	77100	292	0,45	150	3,04	2,88	97	88
B737-200	52610	236	0,45	150	2,87	2,72	91	83
B737-200ADV	58330	255	0,45	150	2,88	2,73	91	83
B737-400	64850	285	0,45	150	2,90	2,67	93	81
B747-200C	373300	300	0,45	150	2,78	2,68	85	82
B757-200	109300	229	0,45	150	2,60	2,69	80	82
B767-300	159650	279	0,45	150	2,70	2,59	82	79

Πίνακας 8.4 Σύγκριση τάσεων και οριζοντίων ανηγμένων παραμορφώσεων πραγματικού συστήματος τροχών και ισοδύναμου φορτίου μονού τροχού σε διατομές αναφοράς με στρώση έδρασης κατηγορίας Α

Α/Φ	Βάρος (Kg)	Κατηγορία Β						
		πάχος πλάκας (mm)	Poisson Υπόβασης	Ε υπόβασης (Mpa)	σ _{πραγμ} (Mpa)	σ _{μον} (Mpa)	ε _{πραγμ} (micro)	ε _{μον} (micro)
B707-320C	143000	315	0,45	100	2,81	2,64	86	80
B727-200	77100	318	0,45	100	2,97	2,81	94	85
B737-200	52610	254	0,45	100	2,85	2,76	90	84
B737-200ADV	58330	269	0,45	100	2,90	2,83	92	86
B737-400	64850	310	0,45	100	2,85	2,61	90	79
B747-200C	373300	338	0,45	100	2,76	2,76	84	84
B757-200	109300	260	0,45	100	2,61	2,72	80	83
B767-300	159650	315	0,45	100	2,72	2,63	83	80

Πίνακας 8.5 Σύγκριση τάσεων και οριζοντίων ανηγμένων παραμορφώσεων πραγματικού συστήματος τροχών και ισοδύναμου φορτίου μονού τροχού σε διατομές αναφοράς με στρώση έδρασης κατηγορίας Β

Α/Φ	Βάρος (Kg)	Κατηγορία C						
		πάχος πλάκας (mm)	Poisson Υπόβασης	Ε υπόβασης (Mpa)	σ _{πραγμ} (Mpa)	σ _{μον} (Mpa)	ε _{πραγμ} (micro)	ε _{μον} (micro)
B707-320C	143000	356	0,45	60	2,87	2,69	88	82
B727-200	77100	333	0,45	60	3,09	2,98	97	91
B737-200	52610	274	0,45	60	2,84	2,72	90	83
B737-200ADV	58330	290	0,45	60	2,92	2,85	92	87
B737-400	64850	328	0,45	60	2,87	2,67	91	81
B747-200C	373300	385	0,45	60	2,79	2,82	86	86
B757-200	109300	301	0,45	60	2,60	2,69	80	82
B767-300	159650	360	0,45	60	2,74	2,67	84	81

Πίνακας 8.6 Σύγκριση τάσεων και οριζοντίων ανηγμένων παραμορφώσεων πραγματικού συστήματος τροχών και ισοδύναμου φορτίου μονού τροχού σε διατομές αναφοράς με στρώση έδρασης κατηγορίας C

Α/Φ	Βάρος (Kg)	Κατηγορία D						
		πάχος πλάκας (mm)	Poisson Υπόβασης	Ε υπόβασης (Mpa)	Σπραγμ (Mpa)	Σμον (Mpa)	Επραγμ (micro)	Εμον (micro)
B707-320C	143000	390	0,45	30	3,07	2,88	94	87
B727-200	77100	367	0,45	30	3,03	2,94	95	89
B737-200	52610	290	0,45	30	2,97	2,94	93	89
B737-200ADV	58330	311	0,45	30	2,98	2,87	94	87
B737-400	64850	335	0,45	30	3,10	2,97	98	90
B747-200C	373300	427	0,45	30	3,07	2,95	95	90
B757-200	109300	340	0,45	30	2,74	2,74	84	83
B767-300	159650	406	0,45	30	2,86	2,74	87	83

Πίνακας 8.7 Σύγκριση τάσεων και οριζοντίων ανηγμένων παραμορφώσεων πραγματικού συστήματος τροχών και ισοδύναμου φορτίου μονού τροχού σε διατομές αναφοράς με στρώση έδρασης κατηγορίας D

Στα παραπάνω αποτελέσματα όσα α/φ έχουν κόκκινο χρώμα σημαίνει ότι το διάγραμμα που παρείχε η εταιρεία δεν είχε τιμές βάρους τόσο υψηλές όσο ήταν το βάρος του α/φ, γι' αυτό χρησιμοποιήθηκε η ανώτερη τιμή του διαγράμματος (δηλαδή το διάγραμμα αφορούσε τις διάφορες εκδοχές του ίδιου α/φ και το μέγιστο βάρος που έδινε ήταν λίγο μικρότερο από αυτό της εκδοχής που επιλέγαμε).

Από τα αποτελέσματα προκύπτει μια αρκετά καλή προσαρμογή, ειδικά για τις κατηγορίες εδάφους A,B,C, καθώς οι τιμές των τάσεων και για τα δύο συστήματα (πραγματικό σύστημα-μονός τροχός DSWL) είναι πολύ κοντά στο 2,75Mpa με μέγιστο ποσοστό απόκλισης κάτω του 10%. Στην κατηγορία D οι τάσεις αποκλίνουν λίγο περισσότερο από την τιμή 2.75 (η απόκλιση φτάνει ως και το 16%), αλλά και πάλι δείχνουν ότι επιβεβαιώνουν γενικά την παραδοχή του πάχους αναφοράς. Με τη χρήση του προγράμματος COMFAA που παρέχει η FAA για τον προσδιορισμό του πάχους αναφοράς και του ACN, προσδιορίσαμε εκ νέου την τιμή του πάχους της πλάκας σκυροδέματος του οδοστρώματος αναφοράς. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι τιμές είναι σχεδόν ίδιες με αυτές που προέκυψαν προηγουμένως από τα διαγράμματα, ενώ η μέγιστη απόκλιση είναι κάτω από 15mm, το οποίο αντιστοιχεί σε μήκος 0,5in, ένα μήκος που δύσκολα προσδιορίζεται στα διαγράμματα λόγω της γραφικής κλίμακας τους. Το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγήσει την πολύ μικρή απόκλιση από την τιμή 2.75Mpa που παρατηρείται σε κάποια α/φ. Η μόνη περίπτωση στην οποία η απόκλιση είναι μεγάλη είναι για το α/φ της σειράς B727. Αυτό πιθανώς οφείλεται στο γεγονός ότι για τη συγκεκριμένη σειρά η εταιρεία παρέχει ένα μόνο διάγραμμα για όλους τους τύπους, ενώ για τις υπόλοιπες σειρές α/φ δίνει ένα διάγραμμα για κάθε τύπο. Η μη ύπαρξη εξειδικευμένου διαγράμματος για τον κάθε τύπο α/φ είναι πιθανό να 'χει ως αποτέλεσμα τη μικρότερη ακρίβεια στον προσδιορισμό του πάχους αναφοράς. Οδηγούμαστε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι το πάχος αναφοράς πράγματι δίνει τάση 2.75Mpa.

Ο ICAO παρέχει στο εγχειρίδιό του τον κώδικα προγράμματος για τον προσδιορισμό του πάχους αναφοράς και του ACN των α/φ. Ο κώδικας αυτός χρησιμοποιήθηκε και

προέκυψε έτσι το πρόγραμμα ACNR1A [9]. Είναι λίγο δύσχρηστο λόγω του μη φιλικού προς το χρήστη περιβάλλοντός του. Από τον ICAO μπορέσαμε ν' αποκτήσουμε νεώτερη έκδοση σε γλώσσα TURBO C, με περιβάλλον πολύ πιο εύχρηστο. Εναλλακτικά χρησιμοποιήθηκε και το αντίστοιχο πρόγραμμα της FAA, το COMFAA, το οποίο παρουσιάζει ακρίβεια και ευκολία στη χρήση, ενώ ταυτόχρονα δίνεται δωρεάν και με "ανοιχτό κώδικα" (open source).

8.4 Έλεγχος εφαρμογής μεθόδου ACN/PCN σε σχέση με αναλυτικές μεθόδους

Στην προσπάθεια ανεύρεσης πιθανών αιτιών για τις αδυναμίες που εμφάνισαν οι μέθοδοι προσδιορισμού του PCN, εξετάσαμε ως τώρα τις δύο βασικές παραδοχές στις οποίες στηρίζεται η μέθοδος ACN/PCN. Παρατηρώντας ότι οι δύο αυτές παραδοχές παρουσιάζουν αρκετά μεγάλη ακρίβεια, αυτό που απομένει να διερευνηθεί είναι το κατά πόσο η ίδια η μέθοδος ACN/PCN, όταν εφαρμοστεί, με οποιαδήποτε διαδικασία κατάταξης της φέρουσας ικανότητας, μπορεί να δώσει ακριβή και ασφαλή συμπεράσματα. Είναι γνωστό ότι η ακριβέστερη διαδικασία για τον έλεγχο της δομικής επάρκειας ενός οδοστρώματος θεωρείται ο αναλυτικός προσδιορισμός των τάσεων που προκαλεί η διέλευση των φορτίων στη διατομή και η πραγματοποίηση μιας ανάλυσης κόπωσης-αστοχίας των στρώσεων [13]. Στα δύσκαμπτα οδοστρώματα το κρίσιμο υλικό είναι το σκυρόδεμα διότι, λόγω της μεγάλης δυσκαμψίας του, "απορροφά" το μεγαλύτερο μέρος των τάσεων, με αποτέλεσμα η στρώση έδρασης να δέχεται πολύ μικρές τάσεις και να μην παρουσιάζει προβλήματα αστοχίας.

Προκειμένου να ελέγξουμε την ακρίβεια της ACN/PCN με αναλυτικές διαδικασίες, χρησιμοποιούμε δέκα διατομές από αυτές που χρησιμοποιήσαμε και στο έβδομο κεφάλαιο αυτής της εργασίας. Οι διατομές που επιλέγουμε είναι οι ακόλουθες:

Διατομή	Σκυρόδεμα		Υπόβαση			Στρώση έδρασης	
	πάχος (mm)	f_{ct} (Mpa)	E(Mpa)	πάχος (mm)	ν	E(Mpa)	ν
1	350	4	250	300	0,4	70	0,45
2	400	5	250	300	0,4	70	0,45
3	300	5	250	300	0,4	70	0,45
4	300	4	250	400	0,4	70	0,45
5	350	4,5	250	300	0,4	70	0,45
6	350	4	250	300	0,4	90	0,45
7	300	5	250	300	0,4	90	0,45
8	300	5	250	400	0,4	70	0,45
9	350	4	250	400	0,4	70	0,45
10	350	4	250	350	0,4	70	0,45

Πίνακας 8.8 Διατομές οδοστρωμάτων για τον έλεγχο της εφαρμογής της μεθόδου ACN/PCN με αναλυτικές διαδικασίες

Οι τιμές του PCN που προέκυψαν με όλες τις μεθόδους προσδιορισμού που εφαρμόσαμε σε αυτές τις διατομές παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Μέθοδος	Τιμές PCN									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FAA	38 B	60 B	40 B	26 B	45 B	37 B	38 B			37 B
British	27 B	61 B	29 B	20 B	36 B	31 B	32 B	29 B	29 B	28 B
French	29 B	43 B	35 B	28 B	34 B	27 B	38 B	38 B	30 B	29 B
UFC (Air force)	48 B	48 B	48 B	51 A	48 B	50 A	51 A	51 A	51 A	46 B
UFC (Navy)	56 B	56 B	50 B	42 A	56 B	45 A	46 A	46 A	46 A	56 B
UFC (Λογισμικό Air force)	35 B	58 B	35 B	29 B	41 B	39 B	39 B	37 B	37 B	36 B
UFC (Λογισμικό Navy)	38 B	61 B	40 B	32 B	44 B	36 B	38 B	43 B	41 B	39 B

Πίνακας 8.9 Τιμές PCN των διατομών του πίνακα 8.6

Έχοντας τις τιμές του PCN, επόμενο βήμα είναι η αναλυτική επίλυση των δέκα διατομών με τη βοήθεια του APSA για το στόλο των α/φ με τα οποία έγινε και η εύρεση του PCN. Οι προκύπτουσες τάσεις χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του μέγιστου αριθμού επιτρεπόμενων διελεύσεων του κάθε α/φ μέσω του νόμου κόπωσης του σκυροδέματος. Οι νόμοι που χρησιμοποιούνται [7] είναι:

$$\log N = 17.61(1 - \frac{\sigma}{f}) \quad \text{Darter}$$

$$\log N = 20(1 - \frac{\sigma}{f}) \quad (8.2) \quad \text{Verveca}$$

$$\log N = 11.78 - 12.11 \frac{\sigma}{f} \quad \text{PCA}$$

Έχοντας υπολογίσει το μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό διελεύσεων για κάθε α/φ μέσω των εξισώσεων 8.2, εφαρμόζουμε την υπόθεση Miner [7] για να ελέγξουμε αν μπορούν να πραγματοποιηθούν τόσες διελεύσεις των α/φ από το οδόστρωμα. Τα αποτελέσματα για κάθε νόμο αστοχίας είναι:

Νόμος κόπωσης	Αποτέλεσμα υπόθεσης Miner									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PCA	20,617	0,333	23,394	2127	2,143	6,235	8,522	14,990	14,506	17,880
Darter	0,685	0,002	0,838	594,819	0,025	0,121	0,194	0,438	0,411	0,558
Verveca	0,217	0,001	0,275	476,595	0,005	0,030	0,052	0,132	0,122	0,172

Πίνακας 8.10 Αποτελέσματα αναλυτικής επίλυσης

Πρέπει να σημειωθεί ότι σε κανέναν από τους παραπάνω νόμους αστοχίας δε χρησιμοποιούνται οι τάσεις λόγω θερμοκρασίας. Όσον αφορά τις μεθόδους σχεδιασμού των οδοστρωμάτων των αεροδρομίων, το θέμα της χρήσης των θερμοκρασιακών τάσεων στον υπολογισμό της κόπωσης είναι αμφιλεγόμενο [13]: υπάρχουν μέθοδοι που τις λαμβάνουν υπ' όψιν και άλλες οι οποίες τις αγνοούν. Είναι χαρακτηριστικό ότι η μέθοδος ανάλυσης κόπωσης της Portland Cement Association, η οποία και αποτελεί τη βάση της μεθόδου ACN/PCN για τα

δύσκαμπτα οδοστρώματα, δε συμπεριλαμβάνει τάσεις από θερμοκρασία αλλά χρησιμοποιεί μόνο αυτές που προκαλούνται από τα φορτία των α/φ [13].

Από τις δέκα διατομές που εξετάστηκαν μόνο στη δεύτερη οι τιμές του PCN, που προσδιορίστηκαν επιτρέπουν τη διέλευση του συγκεκριμένου στόλου στο δεδομένο αριθμό διελεύσεων. Εξαιρέση αποτελούν η Γαλλική και η UFC για την αεροπορία, οι οποίες όμως λόγω του προβλήματος που παρουσιάζουν με τα διαγράμμά τους μας ανάγκασαν να χρησιμοποιήσουμε τις οριακές τιμές καθιστώντας μ' αυτόν τον τρόπο τα αποτελέσματα αναξιόπιστα (πρακτικά οι μέθοδοι δεν μπόρεσαν να εφαρμοστούν και απλώς έγινε χρήση των ορίων των διαγραμμάτων). Σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις οι τιμές του PCN είναι πολύ μικρότερες από το ACN των α/φ (των 2 μεγάλων α/φ B727-200standard και B747-100), με αποτέλεσμα το οδόστρωμα να μη μπορεί να χρησιμοποιηθεί από αυτά. Εξαιρέση αποτελεί η μέθοδος UFC για το ναυτικό (μέσω των διαγραμμάτων), το αποτέλεσμα της οποίας σε 5 περιπτώσεις επιτρέπει τη διέλευση του συγκεκριμένου στόλου.

Από τους τρεις νόμους κόπωσης που χρησιμοποιήθηκαν, μόνο αυτός της Portland Cement Association (PCA) δίνει ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα με τις μεθόδους (πλην της UFC του ναυτικού με τα διαγράμματα), δηλαδή επιτρέπει μόνο στην περίπτωση της δεύτερης διατομής τη διέλευση των α/φ, ενώ σε όλες τις άλλες διατομές η υπόθεση Miner έχει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας. Οι άλλοι δύο νόμοι κόπωσης παρουσιάζουν τα ίδια αποτελέσματα με όλες τις μεθόδους προσδιορισμού του PCN μόνο στη δεύτερη και στην τέταρτη διατομή, όπου στη δεύτερη επιτρέπουν τη διέλευση του στόλου ενώ στην τέταρτη όχι.

Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι ανάλογα με το νόμο κόπωσης τον οποίο χρησιμοποιούμε στην αναλυτική επίλυση των διατομών τα αποτελέσματα είναι διαφορετικά. Επίσης παρατηρούμε ότι λόγω της μεγάλης διασποράς των αποτελεσμάτων των μεθόδων δεν μπορούμε να καθορίσουμε μια κοινή συμπεριφορά. Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν και στην παράγραφο 7.4 θεωρούμε ότι για τη μέθοδο UFC μπορούμε να επιλέξουμε τα αποτελέσματα του λογισμικού. Στην περίπτωση αυτή, η διασπορά των αποτελεσμάτων μειώνεται και οι μέθοδοι παρουσιάζουν το ίδιο αποτέλεσμα σχετικά με την επάρκεια της διατομής (δηλαδή είτε όλες επιτρέπουν τη διέλευση των α/φ είτε όλες δεν την επιτρέπουν). Με αυτή την παραδοχή, αν επιλέξουμε το νόμο της PCA, με δεδομένο ότι αυτή αποτελεί τη βάση της μεθόδου ACN/PCN στα δύσκαμπτα, μπορούμε να πούμε ότι η μέθοδος αναφοράς ACN/PCN παρουσιάζει ικανοποιητική ακρίβεια (αν εφαρμοσθεί κάποια από τις τέσσερις μεθόδους που δόθηκαν για τον προσδιορισμό του PCN). Αντίθετα, χρησιμοποιώντας κάποιον από τους άλλους δύο νόμους κόπωσης τα αποτελέσματα αποκλίνουν, η μέθοδος ACN/PCN παρουσιάζεται ανεπαρκής και απαιτείται αναθεώρησή της.

8.5 Σχολιασμός

Σε μια προσπάθεια να εντοπιστούν οι πιθανές αδυναμίες της μεθόδου ACN/PCN, εξετάσαμε με τη βοήθεια αναλυτικών μεθόδων προσδιορισμού τάσεων τις δύο βασικές παραδοχές που έχουν πραγματοποιηθεί και τον τρόπο με τον οποίο η μέθοδος εφαρμόζεται. Αυτό που υποδεικνύουν οι αναλύσεις είναι ότι οι δύο παραδοχές φαίνεται να λειτουργούν με ικανοποιητική ακρίβεια. Ο μονός τροχός με σταθερή πίεση 1.25Mpa μπορεί στις συνήθεις διατομές ν' αντικαταστήσει το πραγματικό σύστημα τροχών με σφάλμα μικρότερο του 5%, διευκολύνοντας τις περαιτέρω αναλύσεις. Το πάχος αναφοράς της πλάκας του σκυροδέματος φαίνεται να ικανοποιεί την απαίτηση για ανάπτυξη τάσης 2.75Mpa με αρκετά μεγάλη ακρίβεια στις τρεις πρώτες κατηγορίες αντοχής του εδάφους και με ελαφρά μικρότερη ακρίβεια στην κατηγορία D. Όσον αφορά την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων κατά την εφαρμογή της μεθόδου ACN/PCN για τον έλεγχο της δομικής επάρκειας των οδοστρωμάτων, τα συμπεράσματα δεν είναι ξεκάθαρα. Η επιλογή του ICAO να μην καθορίσει μια συγκεκριμένη διαδικασία για τον προσδιορισμό του PCN, δημιουργεί, όπως διαπιστώθηκε, ένα πρόβλημα με τη διασπορά των τιμών που δίνει η κάθε μέθοδος. Καθίσταται με αυτόν τον τρόπο δύσκολη η επιλογή μιας τιμής για το PCN και κυρίως δεν επιτρέπει τη συσχέτιση της φέρουσας ικανότητας διατομών, διότι δεν είναι βέβαιο ότι μια διατομή η οποία αξιολογήθηκε με τη μέθοδο, για παράδειγμα, της FAA και έδωσε μια τιμή PCN μεγαλύτερη από αυτή μια άλλης διατομής, η οποία αξιολογήθηκε με τη Βρετανική μέθοδο, έχει και μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα. Φαίνεται ακόμη, ότι η επιλογή μιας αναλυτικής διαδικασίας ελέγχου, όπως αυτή με το νόμο κόπωσης της PCA, μπορεί να επιβεβαιώσει τα αποτελέσματα των μεθόδων που εξετάσαμε. Αντίθετα, κάποιος άλλος νόμος κόπωσης είναι πολύ πιθανό να δώσει διαφορετικά αποτελέσματα.

Στο σημείο αυτό, και έχοντας χρησιμοποιήσει αναλύσεις με προσδιορισμό τάσεων, μπορούμε να εξετάσουμε και την αδυναμία που φαίνεται ότι παρουσιάζουν οι μέθοδοι υπολογισμού της τιμής του PCN με την εξάρτηση της τιμής αυτής από την κυκλοφορία. Πρακτική συνέπεια αυτού του προβλήματος είναι το γεγονός ότι η βασική ανισότητα με την οποία γίνεται ο έλεγχος για το αν ένα α/φ μπορεί να χρησιμοποιεί το αεροδρόμιο, είναι πιθανό να οδηγήσει σε εσφαλμένο αποτέλεσμα. Ενώ δηλαδή, με βάση τον ορισμό που δίνει ο ICAO, οποιοδήποτε α/φ έχει ACN μικρότερο ή ίσο με το PCN του οδοστρώματος μπορεί να το χρησιμοποιήσει για απεριόριστο αριθμό διελεύσεων, είναι πιθανό κάτι τέτοιο να μην μπορεί να γίνει. Ως παράδειγμα μπορούμε να παρουσιάσουμε τη δεύτερη διατομή που χρησιμοποιήσαμε στην παράγραφο 8.4 (πίνακας 8.6). Το PCN που προσδιορίστηκε με τις διάφορες μεθόδους φαίνεται στον πίνακα 8.9. Αν μεταβάλαμε την κυκλοφορία, και επιλέγαμε 10000 διελεύσεις του DC-10-30/40, το οποίο έχει ACN 55 στη Β κατηγορία αντοχής εδάφους,

αλλά διατηρούσαμε σταθερή την τιμή του PCN που προσδιορίσαμε προηγουμένως (αφού με βάση τον ορισμό αυτή είναι ανεξάρτητη της κυκλοφορίας), τότε σύμφωνα με τη μέθοδο ACN/PCN το α/φ θα μπορούσε να διέλθει από το αεροδρόμιο αυτό χωρίς πρόβλημα για απεριόριστο αριθμό διελεύσεων. Αν όμως ακολουθούσαμε την αναλυτική διαδικασία ελέγχου με προσδιορισμό των αναπτυσσόμενων τάσεων και των επιτρεπόμενων διελεύσεων μέσω του νόμου κόπωσης του σκυροδέματος, θα προέκυπτε ότι η υπόθεση Miner θα έδινε αποτέλεσμα μεγαλύτερο της μονάδας και επομένως η διατομή θ' αστοχούσε. Παρατηρούμε δηλαδή ότι για να μπορεί να εφαρμοσθεί η μέθοδος ACN/PCN μέσω των μεθόδων που εξετάσαμε, θα πρέπει κάθε φορά που η αναμενόμενη κυκλοφορία μεταβάλλεται να υπολογίζουμε εκ νέου την τιμή του PCN, προκειμένου να ελέγξουμε τη δομική επάρκεια των οδοστρώματων. Άμεση επίπτωση αυτής της αδυναμίας είναι το γεγονός ότι η δημοσίευση του PCN ενός αεροδρομίου δε συνιστά και δικλίδα ασφαλείας για το κατά πόσο ένα α/φ μπορεί να χρησιμοποιήσει ή όχι το αεροδρόμιο αυτό. Αυτός όμως ήταν ο κύριος σκοπός αυτής της μεθόδου, δηλαδή η δυνατότητα μέσω μιας απλής σύγκρισης να ελέγχεται η δυνατότητα χρησιμοποίησης ενός οδοστρώματος. Πρόβλημα όμως δημιουργείται και στα συστήματα διαχείρισης των οδοστρώματων σε περίπτωση που η τιμολόγηση της χρήσης του οδοστρώματος στηρίζεται στην τιμή του PCN που υπολογίζεται, διότι σε κάθε αλλαγή της τιμής αυτής θα προκαλείται αντίστοιχη αλλαγή και στο κόστος χρήσης του οδοστρώματος από ένα α/φ. Η αδυναμία αυτή είναι πιθανό να οφείλεται τόσο στον ορισμό του ICAO, ο οποίος αναφέρεται σε απεριόριστο αριθμό διελεύσεων (κάτι τέτοιο δε θα μπορούσε να συμβεί για καμία διατομή), όσο και στις ίδιες τις μεθόδους.

Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με τον προσδιορισμό των τάσεων που προκαλεί ένα α/φ σε μια διατομή, διαπιστώθηκε και μια ακόμη αδυναμία του συστήματος κατάταξης ACN. Κατόπιν αναλύσεων με το πρόγραμμα APSA σε ορισμένο αριθμό διατομών παρατηρήθηκε ότι σε διατομές με πάχος σκυροδέματος 20cm ορισμένα α/φ ανέπτυξαν τάσεις μεγαλύτερες από αυτές που αναπτύσσουν άλλα α/φ με ACN μεγαλύτερο των πρώτων. Για παράδειγμα, τα α/φ B737-400 και MD-83 που έχουν ACN 43 και 53 αντίστοιχα, έδωσαν τάσεις μεγαλύτερες σε αυτές τις διατομές από το B747-200C και το A300-B4 τα οποία έχουν ACN 55. Αυτή η ανακρίβεια δημιουργεί μικρά προβλήματα στην ταξινόμηση των α/φ· ενώ δηλαδή θα περιμέναμε με βάση τη θεώρηση του ACN το B747-200C και το A300-B4 να θεωρούνται δυσμενέστερα, εντούτοις στις διατομές με πάχος 20cm αυτό δε συνέβη. Το φαινόμενο αυτό στις διατομές με πάχος σκυροδέματος κοντά σε αυτή την τιμή των 20cm είναι σχετικά συχνό (εμφανίστηκε και με άλλα α/φ) και αποτελεί ένα σημείο το οποίο χρήζει διερεύνησης και διόρθωσης.

Ολοκληρώνοντας αυτή τη μελέτη σχετικά με τη μέθοδο ACN/PCN μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η μέθοδος εφαρμόζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με την

αντίστοιχη εφαρμογή της στα εύκαμπτα, όπου οι περισσότερες παραδοχές αποδείχτηκε ότι δε λειτουργούν [11]. Εντούτοις, η διασπορά των αποτελεσμάτων του PCN σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες αδυναμίες που διαπιστώθηκαν και κυρίως αυτής της εξάρτησης του PCN από την κυκλοφορία, υποδεικνύουν ότι η μέθοδος απέχει από το να θεωρηθεί απολύτως ασφαλής για να χρησιμοποιηθεί. Είναι επομένως σκόπιμο να μελετηθεί η δυνατότητα ανάπτυξης μιας εναλλακτικής διαδικασίας δομικού ελέγχου των δύσκαπτων οδοστρωμάτων.

9.Διερεύνηση δυνατότητας χρήσης του ALI στα δύσκαμπτα οδοστρώματα

9.1 Γενικά

Διαπιστώθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια η αναγκαιότητα της ανάπτυξης μιας εναλλακτικής διαδικασίας για την κατάταξη και τον έλεγχο της δομικής επάρκειας των δύσκαμπτων οδοστρώματων. Στον Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής έχει αναπτυχθεί μια τέτοια διαδικασία αξιολόγησης στα εύκαμπτα οδοστρώματα μέσω του Δείκτη Ισοδύναμης Φόρτισης Αεροσκάφους (ΔΙΦΑ) ή Aircraft Loading Index (ALI) [14]. Κρίνεται, λοιπόν, σκόπιμο να ελεγχθεί η δυνατότητα μεταφοράς αυτής της διαδικασίας και στα δύσκαμπτα οδοστρώματα.

9.2 Έλεγχος δυνατότητας εφαρμογής ALI σε δύσκαμπτα οδοστρώματα

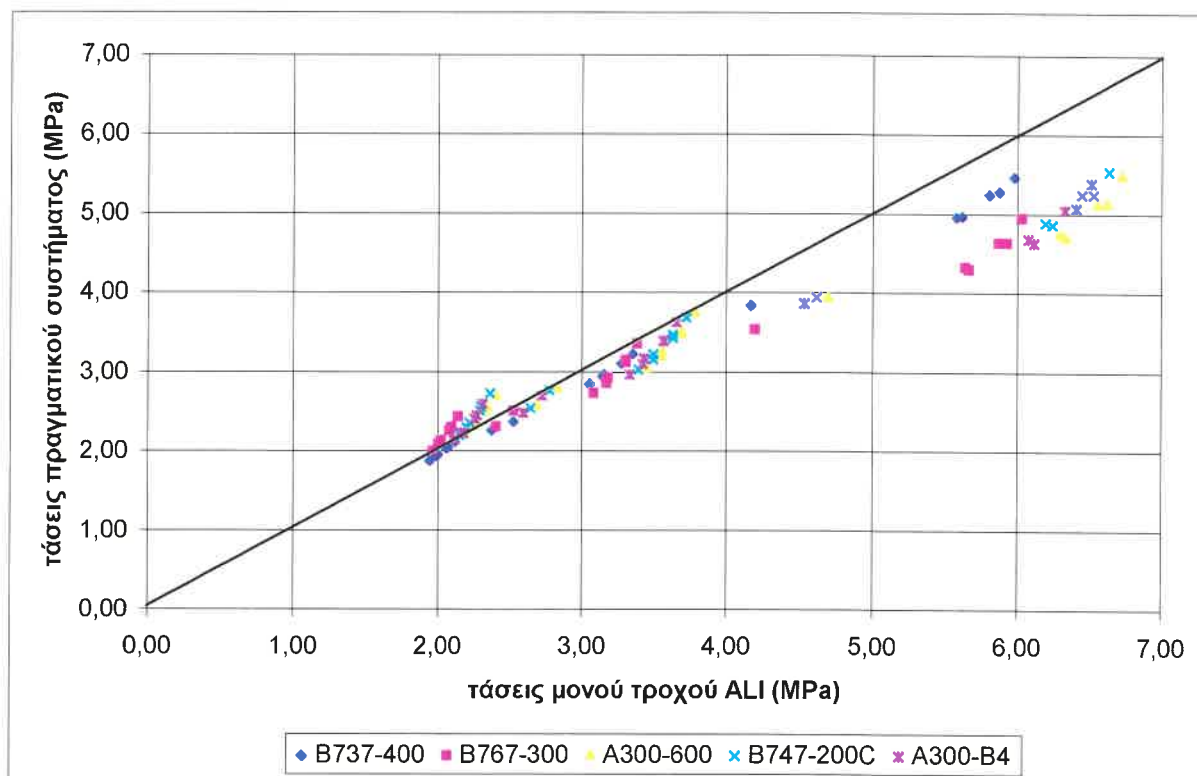
Ο ALI στα εύκαμπτα οδοστρώματα υπολογίζεται για δύο κατηγορίες οδοστρώματων, [11] σε κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχεί και μια τιμή σταθερής ακτίνας επαφής του μονού τροχού. Τα δύσκαμπτα οδοστρώματα, επειδή δεν μπορούν να καταταγούν σε καμία από τις δύο κατηγορίες λόγω της διαφορετικής τους δομής, είναι σκόπιμο στην ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί να επιλύονται όλες οι διατομές και για τις δύο κατηγορίες ακτίνας.

Η διαδικασία που ακολουθούμε είναι ανάλογη με αυτή που ακολουθείται στα εύκαμπτα. Ορίζεται μια διατομή αναφοράς. Η διατομή αυτή φορτίζεται πρώτα με το πραγματικό σύστημα τροχών μέσω του προγράμματος APSA και προσδιορίζουμε την οριζόντια παραμόρφωση στην κάτω επιφάνεια της πλάκας του σκυροδέματος. Στη συνέχεια, με την τιμή της παραμόρφωσης αυτής και με τη χρήση του προγράμματος **LOad BAck Calculation (LOBAC)** [11] προσδιορίζεται η πίεση του μονού τροχού, η οποία προκαλεί την παραμόρφωση αυτή στη διατομή μας. Αυτή η πίεση είναι και η τιμή του ALI. Στη συνέχεια, για τον έλεγχο της ισχύος της μεθόδου, επιλέγουμε έναν αριθμό διατομών και αφού τις φορτίσουμε με το πραγματικό σύστημα τροχών μέσω του APSA, χρησιμοποιούμε την τιμή του ALI που βρήκαμε πριν από το LOBAC και τις φορτίζουμε με το πρόγραμμα **STANDARD Loading Area Analysis (STALAA)** [11], από το οποίο παίρνουμε τις τάσεις και τις παραμορφώσεις που προκαλεί ο μονός τροχός. Συγκρίνοντας τις τάσεις και τις παραμορφώσεις λόγω του μονού τροχού με αυτές λόγω του πραγματικού συστήματος ελέγχουμε αν η μέθοδος του ALI εφαρμόζεται στα δύσκαμπτα με τις ίδιες παραδοχές που χρησιμοποιείται και στα εύκαμπτα.

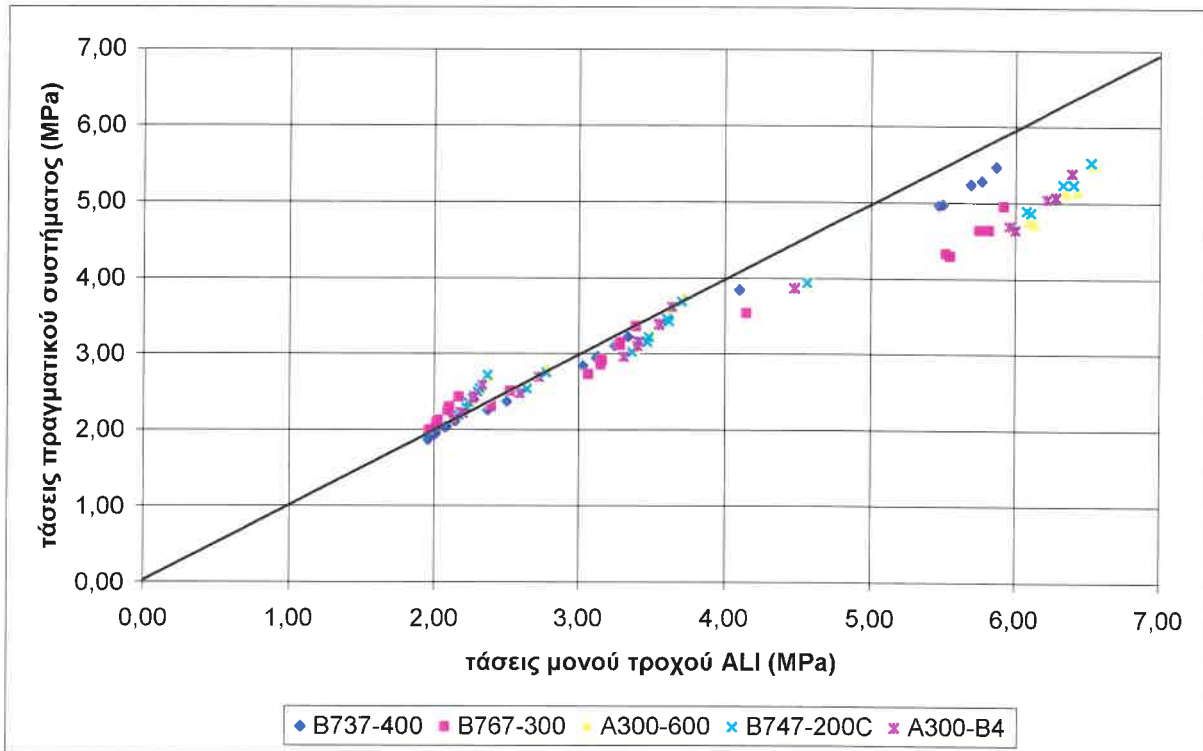
Οι διατομές που επιλέγουμε για τον έλεγχο είναι οι ίδιες που χρησιμοποιήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο στη σύγκριση του ισοδύναμου μονού τροχού και του πραγματικού συστήματος τροχών και τα μέτρα ελαστικότητας του σκυροδέματος, υπόβασης και στρώσης έδρασης καθώς και οι δύο τιμές του λόγου του Poisson παραμένουν και αυτά τα ίδια με πριν (πίνακας 12 παράρτημα έβδομο). Η τυπική διατομή που επιλέγουμε για τον προσδιορισμό του ALI αποτελείται από μια πλάκα σκυροδέματος 350mm, μια υπόβαση πάχους 300mm και μέτρου ελαστικότητας 250MPa και από στρώση έδρασης μέτρου ελαστικότητας 80MPa. Από την ανάλυση προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Κατηγορία ακτίνας	Τιμές ALI				
	B737-400	B767-300	A300-600	B747-200C	A300-B4
A	1,544	1,558	1,742	1,714	1,682
B	1,346	1,358	1,5	1,496	1,468

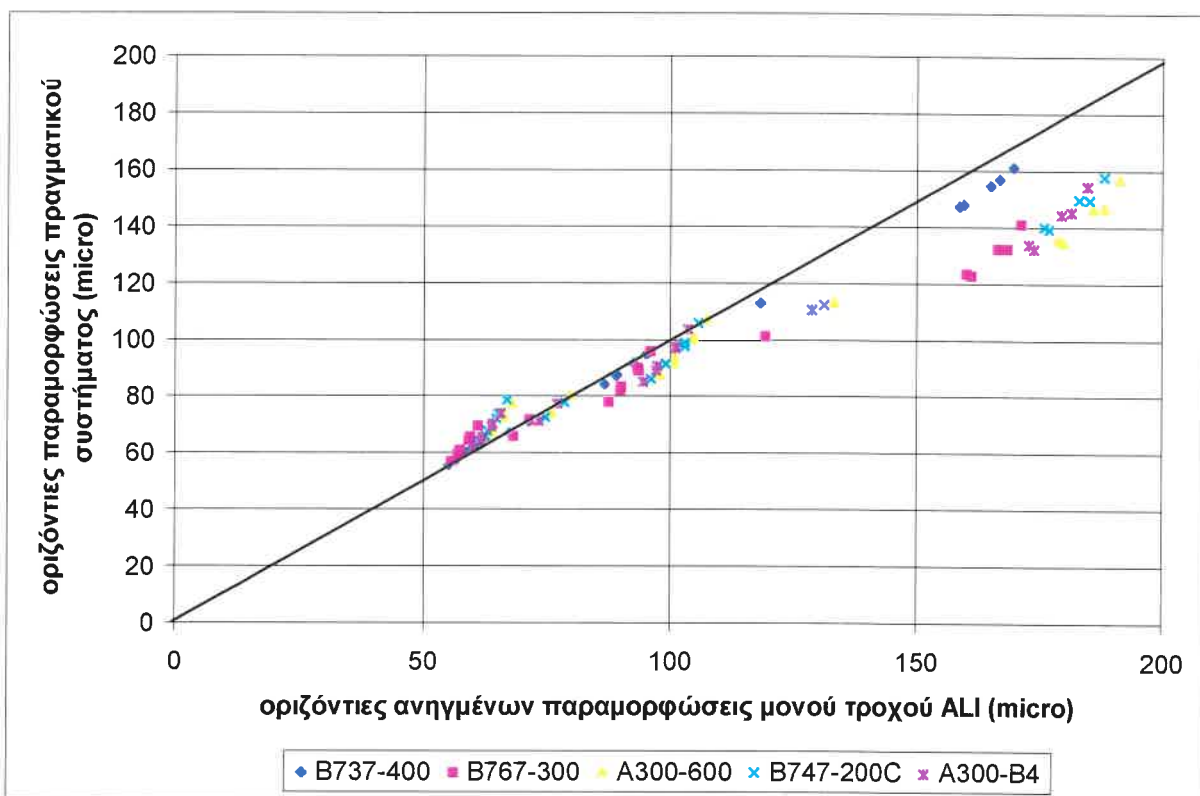
Πίνακας 9.1 Τιμές ALI



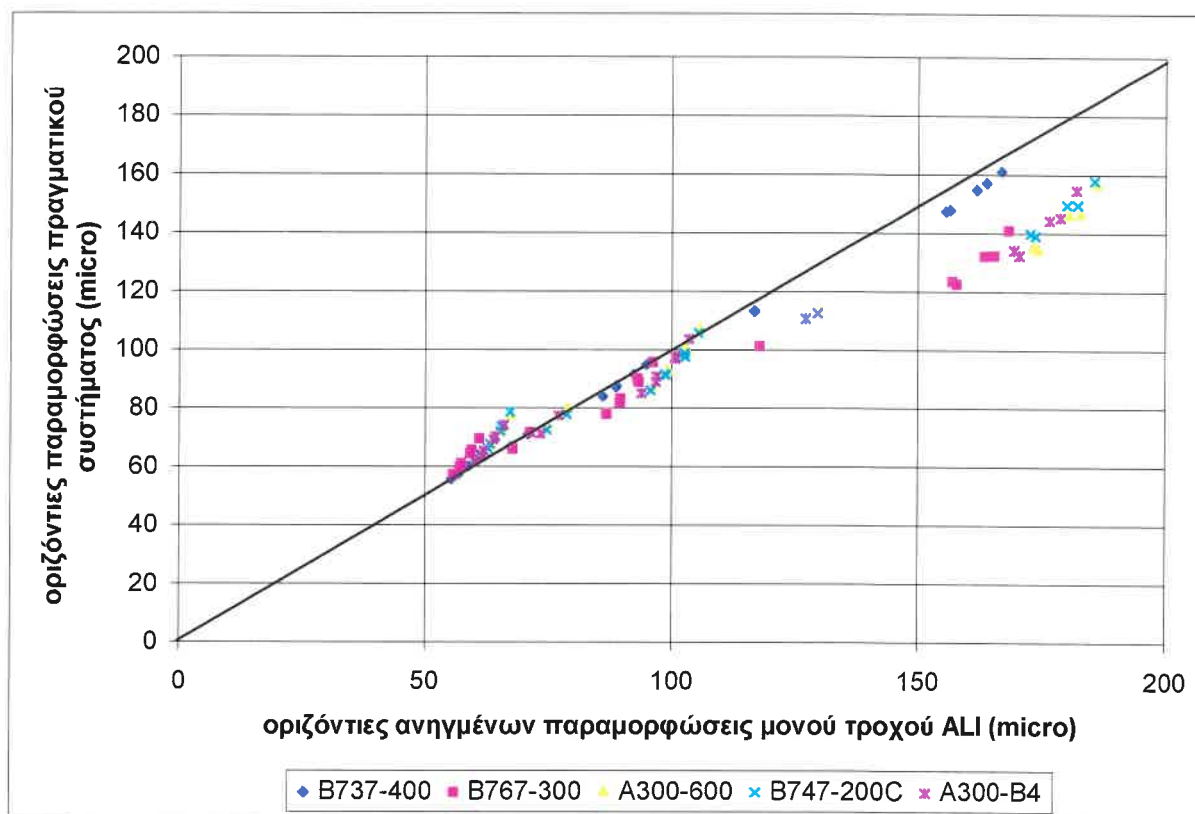
Διάγραμμα 9.1 Σύγκριση τάσεων πραγματικού συστήματος- μονού τροχού ALI (ακτίνες κατηγορίας A)



Διάγραμμα 9.2 Σύγκριση τάσεων πραγματικού συστήματος- μονού τροχού ALI (ακτίνες κατηγορίας Β)



Διάγραμμα 9.3 Σύγκριση οριζόντιων ανηγμένων παραμορφώσεων πραγματικού συστήματος- μονού τροχού ALI (ακτίνες κατηγορίας Α)

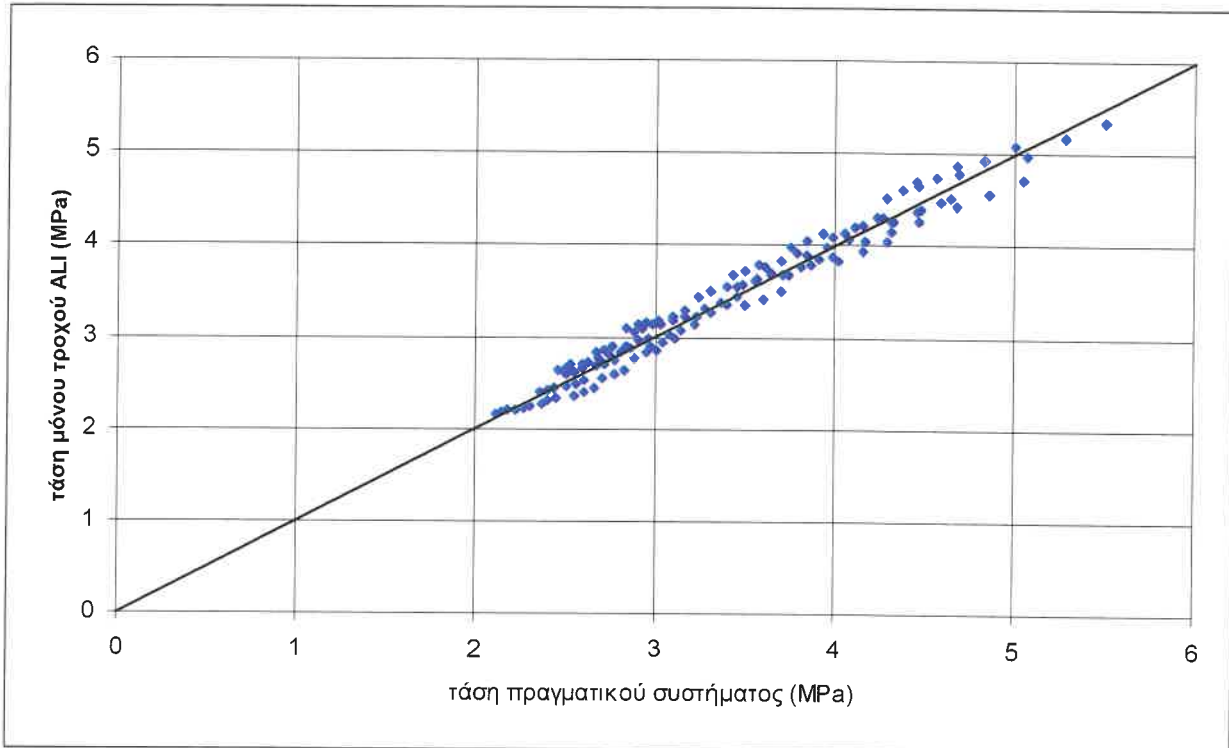


Διάγραμμα 9.4 Σύγκριση οριζόντιων ανηγμένων παραμορφώσεων πραγματικού συστήματος- μονού τροχού ALI (ακτίνες κατηγορίας B)

Από τα διαγράμματα που παρέχονται φαίνεται ότι τα τέσσερα α/φ B747-200C, B767-300, A300-600 και A300B4 παρουσιάζουν την ίδια μορφή αποτελεσμάτων και για τις δύο κατηγορίες διατομών με μικρή διαφοροποίηση στις τιμές, ενώ το B737-400 παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά. Τα υπόλοιπα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο έβδομο παράρτημα (πίνακες 13 έως 24).

Το διάγραμμα υποδεικνύει για το B747-200C (και τα άλλα 3 με όμοια συμπεριφορά α/φ) ότι για διατομές με πάχος πλάκας σκυροδέματος μεγαλύτερο των 30cm οι τάσεις από τα δύο συστήματα τροχών παρουσιάζουν μικρή απόκλιση. Αντίθετα, για πάχη μικρότερα από 30cm, η απόκλιση είναι μεγάλη και η διαδικασία του ALI φαίνεται να μη λειτουργεί. Το γεγονός, όμως, ότι η απόκλιση αυξάνει για πάχη κάτω από 30cm μας οδηγεί στο να ελέγξουμε μήπως υπάρχει δυνατότητα ομαδοποίησης των διατομών, όπως έχει γίνει και για τα εύκαμπτα, σε δύο κατηγορίες: σε διατομές με πάχος πλάκας μέχρι και 30cm και σε διατομές με πάχος πλάκας μεγαλύτερο ή ίσο των 31cm. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας απέδειξαν ότι ενώ η ακρίβεια αυξάνει, εντούτοις η απόκλιση στις διατομές με πλάκα σκυροδέματος μικρότερη από 30cm παραμένει μεγάλη. Επόμενη κίνηση είναι ο διαχωρισμός της κατηγορίας 200-300mm σε υποκατηγορίες: αρχικά σε δύο 200-250mm και 251-300mm και στη συνέχεια σε τρεις υποκατηγορίες 200-225mm, 226-275mm και 276-300mm, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται και η σταθερή ακτίνα που χρησιμοποιείται για το μονό τροχό στα 280mm (προκειμένου η πίεση ALI να μειωθεί). Για τον έλεγχο αυτό

χρησιμοποιήθηκε το α/φ A300-600 και 132 διατομές (πίνακας 28 στο παράρτημα). Τα αποτελέσματα (πίνακας 30 στο παράρτημα) υποδεικνύουν ότι με αυτό το διαχωρισμό σε τέσσερις κατηγορίες οδοστρωμάτων με βάση το πάχος της πλάκας, η μέθοδος του ALI δίνει αποτελέσματα με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Η απόκλιση περιορίζεται σε ποσοστά μικρότερα του 5%, όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 9.5 σύγκριση τάσεων μονού τροχού (ALI) και πραγματικού συστήματος στην περίπτωση τεσσάρων κατηγοριών διατομών

Παρατηρούμε ότι η τάση που προκαλεί το πραγματικό σύστημα και ο μονός τροχός είναι πολύ κοντά και η απόκλιση είναι μικρή.

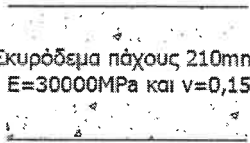
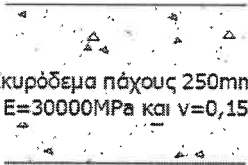
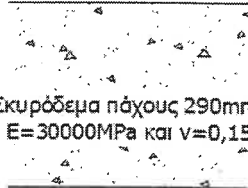
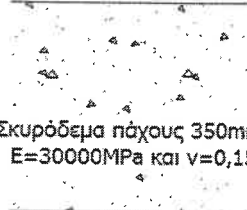
Η διαφορετική συμπεριφορά που εμφάνισαν τα α/φ με σύστημα διπλού τροχού (dual) δεν παρουσιάστηκε κατά το χωρισμό σε τέσσερις κατηγορίες, αφού η απόκλιση των τάσεων από τα δύο συστήματα τροχών (πραγματικό και μονός τροχός) είναι της ίδιας τάξης (5%) με αυτή των dual tandem α/φ. Μπορούμε επομένως να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο του μονού τροχού ALI με την εξής διαδικασία:

- Τα οδοστρώματα χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες με βάση το πάχος της πλάκας του σκυροδέματος:

Κατηγορία Α	Κατηγορία Β	Κατηγορία Γ	Κατηγορία Δ
πάχος πλάκας σκυροδέματος 200÷225mm	πάχος πλάκας σκυροδέματος 226÷275mm	πάχος πλάκας σκυροδέματος 276÷300mm	πάχος πλάκας σκυροδέματος 301÷400mm

Πίνακας 9.2 Κατηγορίες διατομών

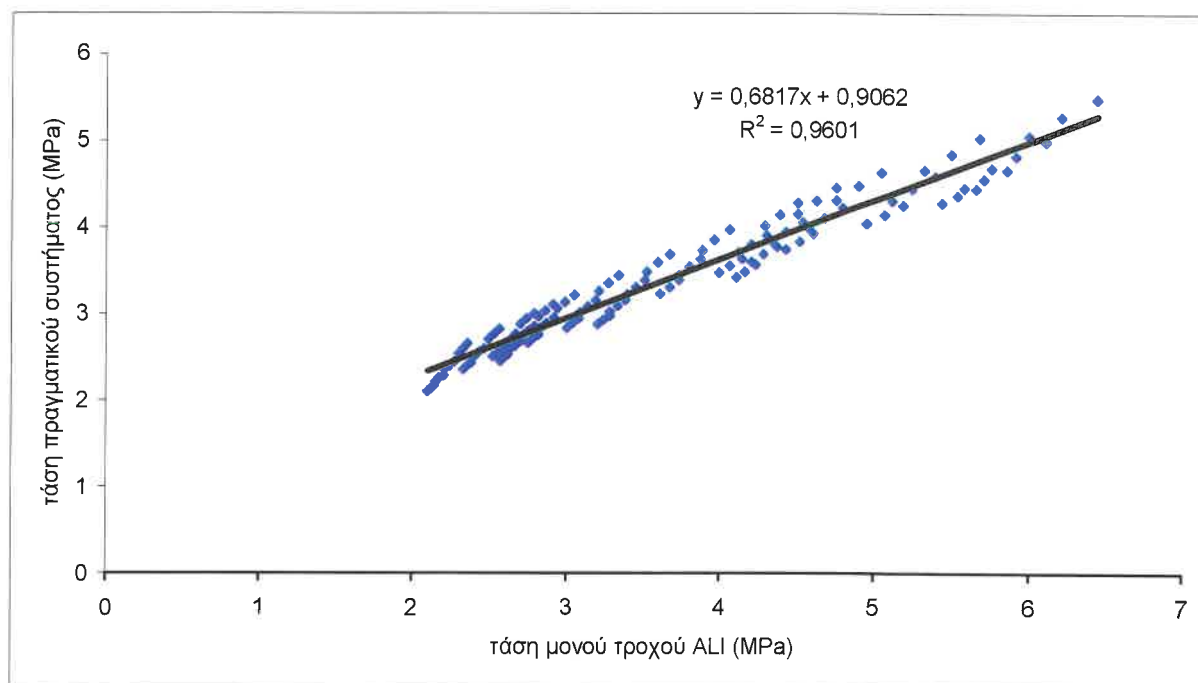
- Για κάθε κατηγορία υπάρχει και μια διατομή αναφοράς:

Κατηγορία Α	Κατηγορία Β	Κατηγορία Γ	Κατηγορία Δ
			
Σκυρόδεμα πάχους 210mm $E=30000\text{MPa}$ και $\nu=0,15$	Σκυρόδεμα πάχους 250mm $E=30000\text{MPa}$ και $\nu=0,15$	Σκυρόδεμα πάχους 290mm $E=30000\text{MPa}$ και $\nu=0,15$	Σκυρόδεμα πάχους 350mm $E=30000\text{MPa}$ και $\nu=0,15$
Υπόβαση πάχους 300mm $E=250\text{MPa}$ και $\nu=0,4$	Υπόβαση πάχους 300mm $E=250\text{MPa}$ και $\nu=0,4$	Υπόβαση πάχους 300mm $E=250\text{MPa}$ και $\nu=0,4$	Υπόβαση πάχους 300mm $E=250\text{MPa}$ και $\nu=0,4$
			
Στρώση έδρασης $E=80\text{MPa}$ και $\nu=0,45$	Στρώση έδρασης $E=80\text{MPa}$ και $\nu=0,45$	Στρώση έδρασης $E=80\text{MPa}$ και $\nu=0,45$	Στρώση έδρασης $E=80\text{MPa}$ και $\nu=0,45$

Σχήμα 9.1 διατομές αναφοράς

- Στη διατομή αναφοράς κάθε κατηγορίας προσδιορίζουμε για κάθε α/φ την οριζόντια παραμόρφωση που αναπτύσσεται στον πυθμένα της πλάκας του σκυροδέματος. Στη συνέχεια με αυτή την οριζόντια παραμόρφωση προσδιορίζουμε την πίεση του μονού τροχού, ο οποίος με σταθερή ακτίνα επαφής 280mm προκαλεί την ίδια οριζόντια παραμόρφωση. Αυτή η πίεση είναι και ο ALI του συγκεκριμένου α/φ. Για κάθε α/φ προσδιορίζονται τέσσερις ALI (ένας για κάθε κατηγορία) και με αυτή την πίεση προσδιορίζουμε την εντατική κατάσταση του οδοστρώματος και μπορούμε να το αξιολογήσουμε.

Λόγω της ύπαρξης των τεσσάρων κατηγοριών, το μοντέλο μπορεί να καταστεί δύσχρηστο και πολύπλοκο. Για το λόγο αυτό εξετάστηκε ακόμη μία περίπτωση: η χρήση μιας διατομής αναφοράς, μίας δηλαδή τιμής ALI για κάθε α/φ, και η διόρθωση των τάσεων που προκύπτουν από την τιμή αυτή. Χρησιμοποιήσαμε ως διατομή αναφοράς μια διατομή με πάχος πλάκας σκυροδέματος 325mm, μέτρο ελαστικότητας 30000MPa, υπόβαση πάχους 300mm με μέτρο ελαστικότητας 250MPa και με λόγο Poisson 0.4 και στρώση έδρασης με λόγο Poisson 0.45 και μέτρο ελαστικότητας 80MPa. Η τιμή του ALI που προκύπτει είναι 1.202MPa και με αυτή φορτίζουμε το σύνολο των 132 διατομών με το πρόγραμμα STALAA. Τα αποτελέσματα σε σχέση με τις αντίστοιχες τάσεις του πραγματικού συστήματος είναι:



Διάγραμμα 9.6 σύγκριση τάσεων πραγματικού συστήματος-μονού τροχού ALI για μία κατηγορία διατομών

Όπως παρατηρούμε και από το προηγούμενο σχήμα τα αποτελέσματα δείχνουν μια αρκετά μεγάλη απόκλιση των τιμών των τάσεων του πραγματικού συστήματος και του μονού τροχού. Εντούτοις, μπορούμε κάνοντας γραμμική παρεμβολή στ' αποτελέσματα να περάσουμε μια ευθεία την οποία θα χρησιμοποιήσουμε για να διορθώσουμε τις τιμές των τάσεων που προκύπτουν από το μονό τροχό. Η ευθεία αυτή είναι:

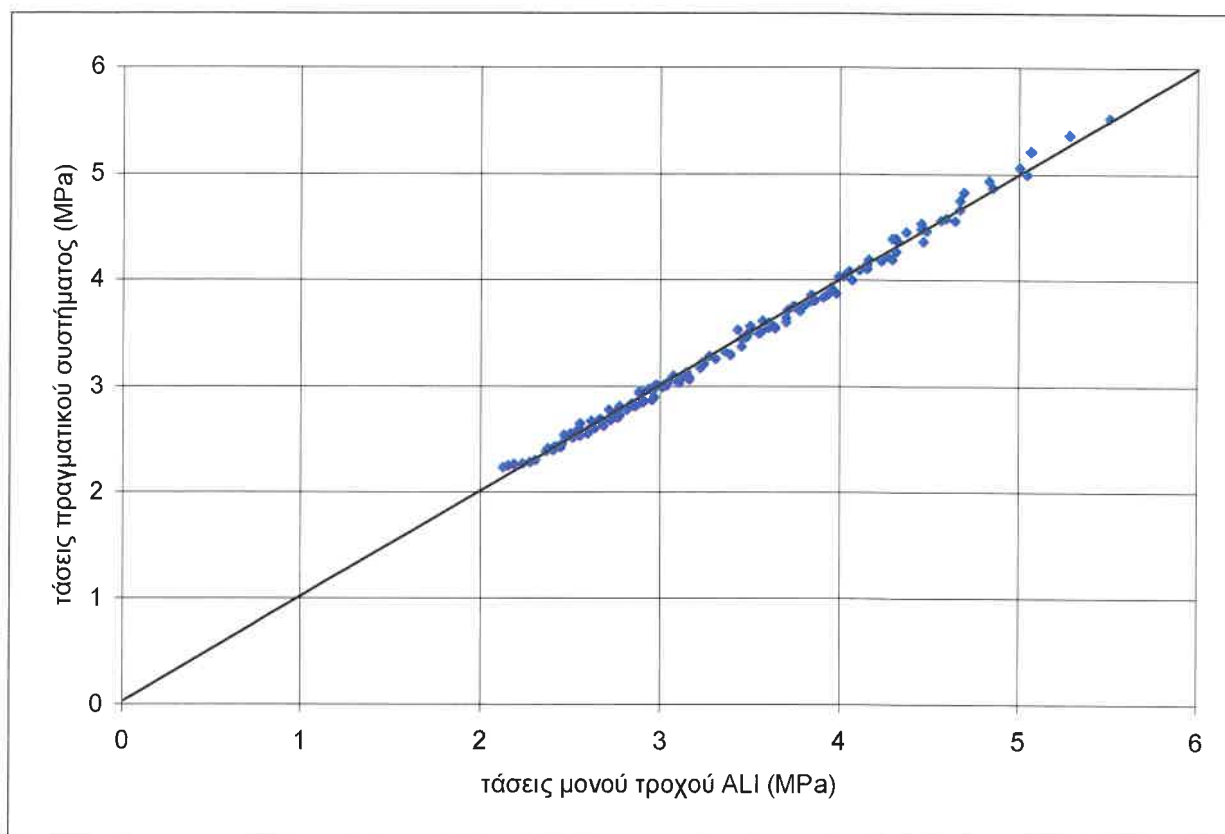
$$y = 0.6817x + 0.9062 \quad (9.1)$$

Διορθώνοντας τα αποτελέσματα με την ευθεία αυτή, η ακρίβεια με την οποία προσεγγίζουμε το πραγματικό σύστημα τροχών μέσω του μονού τροχού αυξάνεται γενικά, αλλά η απόκλιση σε ορισμένες διατομές παραμένει υψηλή (άνω του 10%). Παρατηρήθηκε όμως ότι σε διατομές με μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης άνω των 80MPa ο μονός τροχός προκαλεί την ανάπτυξη τάσεων μεγαλύτερων από τις αντίστοιχες που προκαλεί το πραγματικό σύστημα. Αντίθετα, στις διατομές με μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης μικρότερο των 80MPa, αντιστρέφεται η σχέση τάσεων του μονού τροχού και του πραγματικού συστήματος. Με βάση αυτή την παρατήρηση χωρίζουμε τις διατομές σε τρεις κατηγορίες: αυτές με μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης μεγαλύτερο των 80MPa, ίσο με 80MPa και μικρότερο των 80MPa. Στη δεύτερη κατηγορία τα αποτελέσματα παρουσίασαν ικανοποιητική ακρίβεια (απόκλιση τάσεων πραγματικού συστήματος-μονού τροχού μικρότερη του 5%), οπότε δεν πραγματοποιήθηκε καμία περαιτέρω διόρθωση των τιμών των τάσεων. Στις άλλες δύο κατηγορίες χρησιμοποιήσαμε τις διατομές εκείνες στις οποίες πραγματικό σύστημα και μονός τροχός παρουσίασαν απόκλιση άνω του 5% και με γραμμική παρεμβολή βρήκαμε για κάθε κατηγορία άλλη μία ευθεία, η οποία να διορθώνει τις

τιμές των ήδη μία φορά διορθωμένων τάσεων. Καταλήγουμε δηλαδή σε μια συνολική διόρθωση των τάσεων που παίρνουμε από το ALI, η οποία καθορίζεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$T_{ALI\delta i o r \theta} = \begin{cases} 0.6471 T_{ALI} + 0.8782, & \text{αν } E_{\sigma \tau \rho \omega \sigma \eta \varsigma \acute{\epsilon} \delta \rho \alpha \sigma \eta \varsigma} > 80 \text{MPa} \\ 0.6817 T_{ALI} + 0.9062, & \text{αν } E_{\sigma \tau \rho \omega \sigma \eta \varsigma \acute{\epsilon} \delta \rho \alpha \sigma \eta \varsigma} = 80 \text{MPa} \\ 0.6937 T_{ALI} + 1.0490, & \text{αν } E_{\sigma \tau \rho \omega \sigma \eta \varsigma \acute{\epsilon} \delta \rho \alpha \sigma \eta \varsigma} < 80 \text{MPa} \end{cases} \quad (9.2)$$

Με τη διόρθωση αυτή οι τιμές της τάσης που υπολογίζουμε παρουσιάζουν ακρίβεια υψηλότερη αυτής που έχουμε στην περίπτωση των τεσσάρων κατηγοριών διατομών που είδαμε πιο πριν. Τα αποτελέσματα του μοντέλου αυτού καταγράφονται στο έβδομο παράρτημα (πίνακας 32) και στο ακόλουθο διάγραμμα:

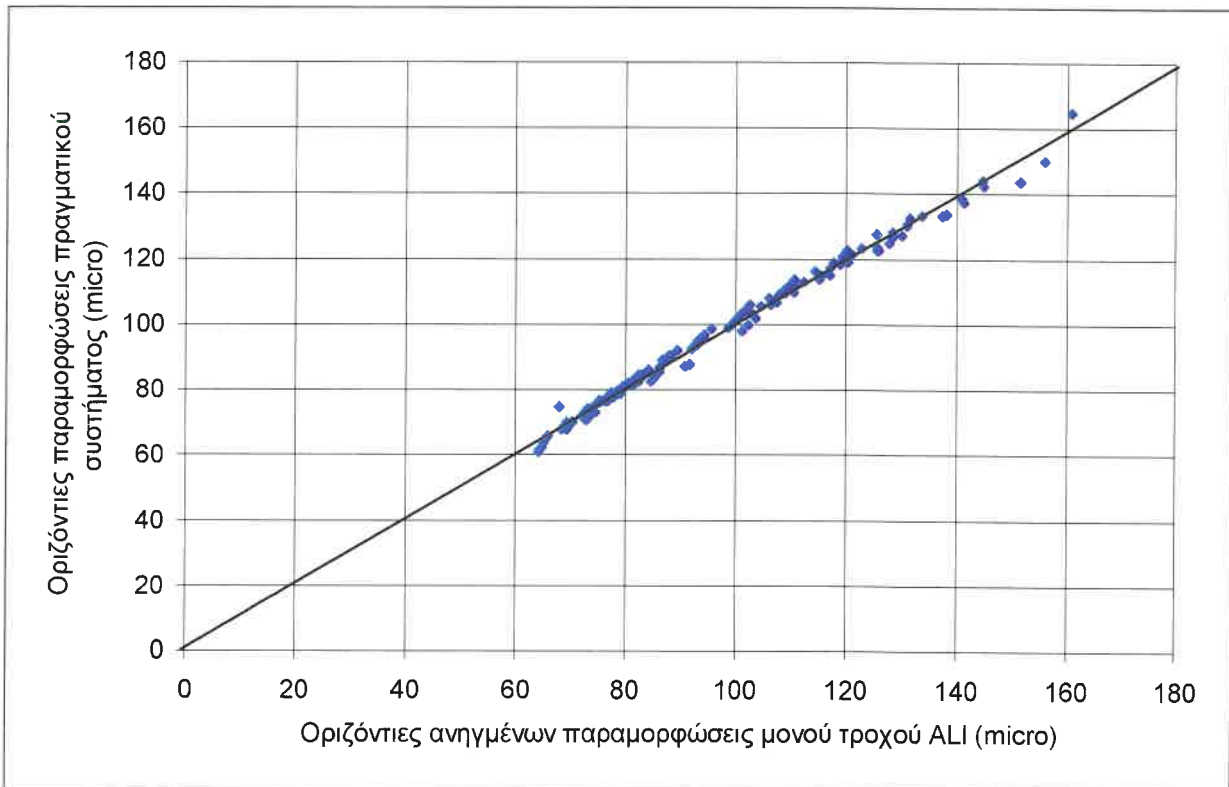


Διάγραμμα 9.7 Σύγκριση τάσεων μονού τροχού (ALI) και πραγματικού συστήματος

Ακολουθώντας την ίδια ακριβώς διαδικασία και για τις οριζόντιες παραμορφώσεις προκύπτουν οι εξής εξισώσεις για διόρθωση των τιμών που προκύπτουν από το ALI:

$$\epsilon_{ALI\delta i o r \theta} = \begin{cases} 0.6522 \epsilon_{ALI} + 25.1572, & \text{αν } E_{\sigma \tau \rho \omega \sigma \eta \varsigma \acute{\epsilon} \delta \rho \alpha \sigma \eta \varsigma} > 80 \text{MPa} \\ 0.6848 \epsilon_{ALI} + 26.143, & \text{αν } E_{\sigma \tau \rho \omega \sigma \eta \varsigma \acute{\epsilon} \delta \rho \alpha \sigma \eta \varsigma} = 80 \text{MPa} \\ 0.74 \epsilon_{ALI} + 25.4891, & \text{αν } E_{\sigma \tau \rho \omega \sigma \eta \varsigma \acute{\epsilon} \delta \rho \alpha \sigma \eta \varsigma} < 80 \text{MPa} \end{cases} \quad (9.3)$$

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν μετά τη διόρθωση με τις προηγούμενες εξισώσεις παρουσιάζονται στον πίνακα 33 του παραρτήματος και στο ακόλουθο διάγραμμα:



Διάγραμμα 9.8 Σύγκριση οριζόντιων ανηγμένων παραμορφώσεων πραγματικού συστήματος και μονού τροχού ALI

Για τον έλεγχο του προτύπου ALI με μία κατηγορία διατομών χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα α/φ στις διατομές οδοστρώματων του πίνακα 12 του παραρτήματος και προέκυψαν αποτελέσματα τα οποία επιβεβαιώνουν την ακρίβεια του συγκεκριμένου προτύπου (πίνακες 34 και 35 παραρτήματος). Οι τιμές ALI των τεσσάρων α/φ είναι:

A/Φ	A300-600	B767-300	B747-200	A300-B4
ALI	1,202	1,076	1,178	1,164

Πίνακας 9.3 Τιμές ALI για δύσκαμπτα οδοστρώματα

Στα εύκαμπτα οδοστρώματα ο ALI είχε παρουσιάσει μια σημαντική ιδιότητα: ο λόγος των ALI δύο οποιονδήποτε α/φ ισούται με τον λόγο των τάσεων που προκαλούνται από το ALI και είναι ίσος με το λόγο των οριζόντιων παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στο οδόστρωμα λόγω του ALI [11]:

$$\frac{ALI_1}{ALI_2} = \frac{\varepsilon_{ALI1}}{\varepsilon_{ALI2}} = \frac{\sigma_{ALI1}}{\sigma_{ALI2}} \quad (9.4)$$

Με τη βοήθεια των αποτελεσμάτων των τάσεων από τα τέσσερα α/φ που χρησιμοποιήθηκαν προηγουμένως για τον έλεγχο του προτύπου ALI, επιβεβαιώνουμε αυτή τη

βασική ιδιότητα με μέγιστη απόκλιση 4% (τα αποτελέσματα στους πίνακες 35,36,37 του παραρτήματος).

Η σημασία της αναλογίας αυτής μεταξύ του ALI δύο οποιονδήποτε α/φ και των τάσεων και παραμορφώσεων αυτών είναι μεγάλη διότι επιτρέπει την κατάταξη των α/φ. Δηλαδή ένα α/φ με μεγαλύτερο ALI από ένα άλλο προκαλεί και μεγαλύτερες τάσεις από το δεύτερο και επομένως είναι δυσμενέστερο όσον αφορά την επίδραση του στο οδόστρωμα. Γνωρίζοντας επομένως το ALI ενός α/φ αντιλαμβανόμαστε και τη σχετική επίδρασή του.

9.3 Δείκτης αντοχής οδοστρώματος (APCI)

Με τη χρήση του ALI είναι δυνατόν να αξιολογήσουμε τη φέρουσα ικανότητα μιας διατομής και την ικανότητά της να δεχτεί μια συγκεκριμένη κυκλοφορία, καθώς και να σχεδιάσουμε μια διατομή οδοστρώματος αεροδρομίου ανάλογα με τον προβλεπόμενο φόρτο α/φ. Για το σκοπό αυτό εισάγεται η έννοια του Δείκτη Αντοχής Οδοστρώματος ή Airfield Pavement Capacity Index (APCI) [14], ο οποίος ορίζεται ως το ALI του α/φ που προκαλεί στο οδόστρωμα με τάση ίση με τη μέγιστη επιτρεπόμενη για έναν καθορισμένο αριθμό διελεύσεων $N_{\text{επ}}$. Η τιμή του $N_{\text{επ}}$ καθορίζεται είτε αυθαίρετα είτε ανάλογα με την αναμενόμενη κυκλοφορία.

Για την εύρεση του APCI είναι αναγκαία η χρήση κάποιου νόμου κόπωσης του σκυροδέματος. Η επιλογή του νόμου αυτού δεν είναι δεσμευτική για τη διαδικασία. Ο κάθε μελετητής μπορεί να επιλέγει εκείνη την εξίσωση που θεωρεί ότι ταιριάζει καλύτερα στις δεδομένες συνθήκες. Η γενική μορφή με την οποία παρουσιάζονται αυτοί οι νόμοι είναι:

$$\log N = K_1 - K_2 \frac{\sigma}{f} \quad (9.5)$$

με τα K_1, K_2 να είναι σταθερές (συνήθως ίσες αριθμητικά) και σ, f η οριζόντια εφελκυστική τάση που αναπτύσσεται στο σκυρόδεμα και η εφελκυστική αντοχή του αντίστοιχα. Με τη βοήθεια αυτής της εξίσωσης μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τους ALI και APCI για τον έλεγχο της φέρουσας ικανότητας μιας υφιστάμενης διατομής καθώς και για το σχεδιασμό μιας νέας.

Έστω σ_0 η τάση που αντιστοιχεί στο APCI και N_0 ο μέγιστος αριθμός διελεύσεων που μπορεί να πραγματοποιήσει το APCI, όπως αυτές υπολογίζονται από την εξίσωση 9.5. Για ένα οποιοδήποτε α/φ με ένα ALI, μπορούμε να προσδιορίσουμε την τάση σ_1 που προκαλεί και το μέγιστο αριθμό διελεύσεων N_1 που μπορεί να πραγματοποιήσει. Οι τιμές σ_0, N_0 και σ_1, N_1 ικανοποιούν την εξίσωση 9.5:

$$\log N_o = K_1 - K_2 \frac{\sigma_o}{f} \quad (9.6) \quad \text{και} \quad \log N_1 = K_1 - K_2 \frac{\sigma_1}{f} \quad (9.7)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις εξισώσεις 9.6 και 9.7 προκύπτει:

$$\frac{\log N_1 - K_1}{\log N_o - K_1} = \frac{\sigma_1}{\sigma_o} \quad \text{και λόγω της ιδιότητας 9.4 αντικαθιστούμε} \quad \frac{\log N_1 - K_1}{\log N_o - K_1} = \frac{ALI_1}{APCI} \quad \text{και}$$

μετά από ορισμένες απλές πράξεις έχουμε:

$$\frac{N_1}{N_o} = \frac{ALI_1}{APCI} \times 10^{K_1 \left(1 - \frac{ALI_1}{APCI}\right)} \quad (9.8)$$

Με τη σχέση αυτή έχοντας επιλέξει έναν αριθμό διελεύσεων και έχοντας προσδιορίσει το APCI που αντιστοιχεί στο επίπεδο κυκλοφορίας αυτό, μπορούμε να μετατρέπουμε τις διελεύσεις οποιουδήποτε α/φ σε ισοδύναμες διελεύσεις του APCI. Αν αυτές οι ισοδύναμες διελεύσεις είναι λιγότερες από το επίπεδο κυκλοφορίας που αντιστοιχεί στο APCI τότε η διατομή επαρκεί, ενώ σε αντίθετη περίπτωση απαιτείται αλλαγή της κυκλοφορίας ή των χαρακτηριστικών της διατομής. Οι διαδικασίες του σχεδιασμού και ελέγχου μιας διατομής παρουσιάζονται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

Ο αριθμός των διελεύσεων που θα επιλεγεί προκειμένου να προσδιοριστεί το APCI είναι ανεξάρτητος και δεν είναι δεσμευτικός. Αν επιλεγεί ένας μεγάλος αριθμός, η τιμή του APCI θα είναι πιο κοντά στις τιμές των ALI των α/φ με αποτέλεσμα η μετατροπή σε ισοδύναμες διελεύσεις του APCI να οδηγεί σε τιμές της ίδιας τάξης μεγέθους με τις πραγματικές διελεύσεις. Αντίθετα, η επιλογή ενός μικρού αριθμού για την εύρεση του APCI (για παράδειγμα 1000) θα οδηγήσει σε μια πολύ μεγάλη τιμή ALI. Αυτή όμως η περίπτωση αντιστοιχεί στη μετατροπή των διελεύσεων ενός α/φ σε ισοδύναμες διελεύσεις ενός πολύ μεγαλύτερου α/φ, οπότε η τάξη μεγέθους του αριθμού των ισοδυνάμων διελεύσεων θα είναι πολύ μικρότερη από αυτή του πραγματικού επιπέδου κυκλοφορίας. Είναι προτιμότερο, επομένως, σε περίπτωση τυχαίας επιλογής αριθμού διελεύσεων η εκλογή ενός μεγάλου σχετικά αριθμού, ώστε η μετατροπή να οδηγεί σε τιμές πιο εύχρηστες.

9.3.1 Σχεδιασμός διατομής οδοστρώματος

Η διαδικασία του σχεδιασμού μιας διατομής μέσω του ALI και του APCI είναι η εξής:

Βήμα 1°: Επιλέγουμε τα χαρακτηριστικά των υλικών της διατομής

Βήμα 2°: Επιλέγουμε έναν αριθμό διελεύσεων (ίσο συνήθως με το άθροισμα των διελεύσεων της αναμενόμενης κυκλοφορίας ή κάνουμε μια αυθαίρετη επιλογή) και μέσω του νόμου κόπωσης του σκυροδέματος, που επιλέγουμε (εξίσωση 9.5), προσδιορίζουμε την τάση που

αντιστοιχεί σε αυτήν την κυκλοφορία. Με τη βοήθεια του προγράμματος LOBAC (ή άλλης αντίστοιχης μεθόδου) προσδιορίζουμε το APCI του οδοστρώματος.

Βήμα 3°: Με την αναλογία 9.6 και γνωρίζοντας τον αριθμό των προβλεπόμενων διελεύσεων κάθε α/φ καθώς και το ALI του, μετατρέπουμε τις διελεύσεις αυτές σε ισοδύναμες διελεύσεις του APCI.

Βήμα 4°: Αθροίζοντας τις ισοδύναμες διελεύσεις που προσδιορίσαμε στο προηγούμενο βήμα ελέγχουμε αν το άθροισμα είναι μικρότερο ή ίσο του επιπέδου κυκλοφορίας που επιλέξαμε για να προσδιορίσουμε το APCI. Αν είναι όντως μικρότερο, η διατομή επαρκεί. Σε αντίθετη περίπτωση η διατομή τροποποιείται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

9.3.2 Αξιολόγηση φέρουσας ικανότητας υφισταμένης διατομής

Έστω ότι μας δίνεται μία διατομή και μας ζητείται να ελέγξουμε αν μπορεί να δεχτεί για το υπόλοιπο της ζωής της ένα συγκεκριμένο στόλο α/φ. Η διαδικασία που ακολουθούμε είναι η εξής:

Βήμα 1°: Προσδιορίζουμε τα χαρακτηριστικά της προς έλεγχου διατομής (πάχη στρώσεων, μέτρα ελαστικότητας κλπ.)

Βήμα 2°: Επιλέγουμε έναν αριθμό διελεύσεων (ίσο συνήθως με το άθροισμα των διελεύσεων της αναμενόμενης κυκλοφορίας ή κάνουμε μια αυθαίρετη επιλογή) και μέσω του νόμου κόπωσης του σκυροδέματος που επιλέγουμε (εξίσωση 9.5) προσδιορίζουμε την τάση που αντιστοιχεί σε αυτή την κυκλοφορία και με τη βοήθεια του προγράμματος LOBAC (ή άλλης αντίστοιχης μεθόδου) προσδιορίζουμε το APCI του οδοστρώματος.

Βήμα 3°: Με την αναλογία 9.6 και γνωρίζοντας τον αριθμό των προβλεπόμενων διελεύσεων κάθε α/φ καθώς και το ALI του, μετατρέπουμε τις διελεύσεις αυτές σε ισοδύναμες διελεύσεις του APCI.

Βήμα 4°: Αθροίζοντας τις ισοδύναμες διελεύσεις που προσδιορίσαμε στο προηγούμενο βήμα ελέγχουμε αν το άθροισμα είναι μικρότερο ή ίσο του επιπέδου κυκλοφορίας που επιλέξαμε για να προσδιορίσουμε το APCI. Αν είναι όντως μικρότερο η διατομή επαρκεί. Σε αντίθετη περίπτωση, η διατομή τροποποιείται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

9.4 Παραδείγματα

Παράδειγμα 1°

Έστω διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος με πάχος πλάκας σκυροδέματος 400mm και εφελκυστική αντοχή 4MPa, υπόβαση από θραυστό αμμοχάλικο πάχους 300mm, μέτρου ελαστικότητας 250MPa και λόγου Poisson 0,4 και στρώση έδρασης με λόγο Poisson 0,45 και

μέτρο ελαστικότητας 80Mpa. Ζητείται να ελεγχθεί η επάρκεια της διατομής για τη διέλευση 10000 α/φ A300-600, 5000 B747-200 και 8000 B767-300.

Αθροίζουμε τις διελεύσεις των α/φ και προκύπτει ένας συνολικός αριθμός $N_{tot}=23000$ διελεύσεις. Με αυτό τον αριθμό και με τη βοήθεια του νόμου αστοχίας της PCA προσδιορίζουμε την τάση στην οποία αντιστοιχεί αυτός. Προκύπτει ότι η τάση είναι 3.06Mpa. Με την τάση αυτή και μέσω του προγράμματος LOBAC προσδιορίζουμε τον APCI της διατομής ο οποίος είναι ίσος με: 1.258Mpa. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια της εξίσωσης 9.6 μετατρέπουμε τις διελεύσεις του κάθε α/φ σε ισοδύναμες διελεύσεις του APCI. Προκύπτει:

	Αρχικές διελεύσεις	Ισοδύναμες διελεύσεις
A300-600	10000	2958
B747-200	5000	846
B767-300	8000	95
Σύνολο		3899

Παρατηρούμε ότι το άθροισμα των ισοδύναμων διελεύσεων είναι μικρότερο του επιπέδου κυκλοφορίας που επιλέξαμε (23000διελεύσεις), οπότε η διατομή επαρκεί.

Παράδειγμα 2°:

Ζητείται η επιλογή διατομής δύσκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου με προβλεπόμενη κυκλοφορία 3000 διελεύσεων του α/φ A300-600, 2000 διελεύσεων του α/φ B747-200 και 4000 διελεύσεων του B767-300 σε έδαφος με λόγο Poisson 0,45 και μέτρο ελαστικότητας 80Mpa.

Έστω ότι επιλέγουμε διατομή με πάχος πλάκα σκυροδέματος 350mm και εφελκυστική αντοχή 5MPa, υπόβαση από θραυστό αμμοχάλικο πάχους 400mm, μέτρου ελαστικότητας 250Mpa και λόγου Poisson 0,4.

Το άθροισμα των διελεύσεων είναι 9000. Από το νόμο κόπωσης της PCA προκύπτει ότι η τάση είναι: 2.91Mpa. Από το LOBAC προκύπτει ότι ο APCI του οδοστρώματος είναι: 1.222Mpa. Με τη σχέση 9.6 μετατρέπουμε τις διελεύσεις των α/φ σε ισοδύναμες διελεύσεις του APCI και βρίσκουμε:

	Αρχικές διελεύσεις	Ισοδύναμες διελεύσεις
A300-600	3000	1942
B747-200	2000	753
B767-300	4000	115
Σύνολο		2810

Οι συνολικές διελεύσεις είναι λιγότερες από τις 9000 που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του APCI και επομένως η διατομή επαρκεί.

9.5 Σχολιασμός

Η εναλλακτική διαδικασία που διερευνήθηκε στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Κατ' αρχάς επιτρέπει τη χρήση οποιουδήποτε νόμου κόπωσης του σκυροδέματος παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα χρήσης της σε συνδυασμό με οποιαδήποτε εμπειρική ή αναλυτική διαδικασία έχει αναπτυχθεί. Με τον τρόπο αυτό αξιοποιείται η προηγούμενη εμπειρία που υπάρχει στο σχεδιασμό των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.

Ο δείκτης ALI μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στη διαχείριση των οδοστρωμάτων. Με τον υπολογισμό της τιμής του APCI ενός οδοστρώματος, οι αρχές του αεροδρομίου μπορούν, μέσω της σχέσης 9.8, να προσδιορίσουν τη σχετική φθορά στο οδόστρωμα από τη διέλευση ενός α/φ. Η γνώση αυτής της παραμέτρου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παράδειγμα στην τιμολόγηση της χρήσης του οδοστρώματος από ένα α/φ. Μάλιστα, σε αντίθεση με την τιμή του PCN η οποία όπως είδαμε μεταβάλλεται με την κυκλοφορία καθιστώντας αδύνατη μια τέτοια εκμετάλλευσή της, η τιμή του APCI, όπως και η φθορά που προκαλεί στο οδόστρωμα το α/φ, είναι σταθερή και εξαρτάται μόνο από το συνολικό αριθμό διελεύσεων που θα επιλέξουμε και ο οποίος δεν είναι απαραίτητο να σχετίζεται με την πραγματική κυκλοφορία.

Ολοκληρώνοντας, μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι ο δείκτης ALI είναι μια αξιολογική εναλλακτική διαδικασία ελέγχου της δομικής επάρκειας των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων και επομένως και της διαχείρισης αυτών. Η μέχρι τώρα εφαρμογή του αφορά τα οδοστρώματα άοπλου σκυροδέματος. Είναι επομένως σημαντικό να γίνει προσπάθεια επέκτασής του και σε άλλες μορφές δύσκαμπτων οδοστρωμάτων καθώς και σε επιστρώσεις για την επιδιόρθωση των υφισταμένων διατομών.

10. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τη δομική αναφορά των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Πρώτη μορφή της συγκεκριμένης διαδικασίας με αριθμό κατάταξής του οδοστρώματος σε καθορισμένο σύστημα αναφοράς φορτίων αποτέλεσε η μέθοδος LCN. Στην Ελλάδα το σύστημα αυτό εξακολουθεί να βρίσκεται σε χρήση και γι' αυτό γίνεται μια αναφορά στον τρόπο προσδιορισμού του, καθώς και στους λόγους που οδήγησαν τον ICAO στην αντικατάστασή της.

Η μέθοδος η οποία αντικατέστησε αυτή του LCN είναι η ACN/PCN, η οποία εξακολουθεί να χρησιμοποιείται παγκοσμίως. Η μέθοδος αναλύεται και παρουσιάζεται στο δεύτερο κεφάλαιο. Με δεδομένο ότι ο ICAO δεν έχει ορίσει συγκεκριμένη διαδικασία προσδιορισμού του PCN, κρίθηκε σκόπιμο να διερευνηθούν οι κυριότερες διαδικασίες κατάταξης των οδοστρωμάτων. Οι μέθοδοι που διερευνήθηκαν είναι αυτές της FAA, της Property Services Agency (Βρετανική), του Γαλλικού Υπουργείου Συγκοινωνιών και της UFC (ERDC).

Η μέθοδος προσδιορισμού του PCN της FAA αποτελεί μια μέθοδο ευρύτατα χρησιμοποιημένη παγκοσμίως. Είναι αναλυτική και πλήρης, με οδηγίες για ολόκληρο το φάσμα των εργασιών στα οδοστρώματα αεροδρομίων. Στα δύσκαμπτα οδοστρώματα έδειξε ότι τα αποτελέσματά της παρουσιάζουν μια έντονη εξάρτηση από το πάχος της πλάκας του σκυροδέματος και από την εφελκυστική αντοχή του. Οι τιμές του PCN, που έδωσε, είναι πάντοτε ανάμεσα στις τιμές των υπόλοιπων μεθόδων και ποτέ δεν είναι ούτε οι μεγαλύτερες ούτε οι μικρότερες. Δεν είναι δηλαδή μια μέθοδος πολύ συντηρητική αλλά όχι και πολύ αισιόδοξη στα αποτελέσματά της. Για να χρησιμοποιηθεί απαιτεί μια ελάχιστη τιμή της εφελκυστικής αντοχής 3.5Μρα, ενώ η μέγιστη τιμή πάχους της υπόβασης που δέχεται είναι τα 35cm. Τα αποτελέσματά της είναι πολύ κοντά με αυτά της UFC, όταν χρησιμοποιείται το λογισμικό.

Η μέθοδος για την αξιολόγηση των οδοστρωμάτων της Μ. Βρετανίας είναι μία από τις πιο παλιές μεθόδους που ασχολούνται με το συγκεκριμένο αντικείμενο. Είναι η πιο συντηρητική απ' όλες όσες εξετάσαμε καθώς έδωσε τις χαμηλότερες τιμές του PCN, εκτός από τις περιπτώσεις όπου η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος ήταν 5Μρα. Το γεγονός αυτό έδειξε ότι απαιτεί υψηλές τιμές εφελκυστικής αντοχής προκειμένου να δώσει αποτελέσματα παρόμοια με τις υπόλοιπες μεθόδους. Επίσης, η διατομή που προτείνεται από το συγκεκριμένο οργανισμό, είναι διαφορετική από τις υπόλοιπες μεθόδους, αφού στην υπόβαση το υλικό δεν είναι κάποιο θραυστό αμμοχάλικο ή κάποιο σταθεροποιημένο υλικό αλλά DLC (dry lean concrete). Είναι η μόνη μέθοδος που παρέχει διάγραμμα για τη μετατροπή του PCN σε LCN, καθώς και διάγραμμα για τον εμπειρικό προσδιορισμό του PCN.

Η διαδικασία αξιολόγησης του Γαλλικού Υπουργείου Συγκοινωνιών ήταν αυτή που παρουσίασε τα εντονότερα προβλήματα στην εφαρμογή της. Τα διαγράμμάτα της φαίνεται ότι δεν είναι επαρκή, αφού για τιμές εφελκυστικής αντοχής σκυροδέματος μεταξύ 4 και 5Μpa δε δίνουν αποτέλεσμα και αναγκαζόμαστε να χρησιμοποιούμε την ελάχιστη τιμή επιτρεπόμενου φορτίου. Η μόνη περίπτωση που είναι δυνατό να προκύψει αποτέλεσμα είναι με τη χρήση εφελκυστικής αντοχής 5Μpa και άνω. Πρέπει ακόμη να σημειωθεί ότι τα διαγράμματα παρουσιάζουν μια ανακολουθία μεταξύ του ελάχιστου/μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου του α/φ για το οποίο χρησιμοποιούνται και της ελάχιστης/μέγιστης τιμής του ACN του α/φ αυτού. Φαίνεται δηλαδή ότι τα διαγράμματα της μεθόδου μάλλον απαιτούν διόρθωση, ώστε να αντιστοιχούν στο εύρος τιμών του βάρους του κάθε α/φ, καθώς επίσης είναι αναγκαίος και ο εμπλουτισμός της μεθόδου με διαγράμματα για τα νέα α/φ.

Η μέθοδος UFC, για την αξιολόγηση της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων, προορίζεται για χρήση σε στρατιωτικά κυρίως αεροδρόμια, γεγονός το οποίο φαίνεται και από τη διαφοροποίησή της ανάμεσα στα διάφορα σώματα στρατού. Η επιλογή της μεθόδου στην περίπτωση της αεροπορίας, για αξιολόγηση του οδοστρώματος με βάση το α/φ C-17 και 50000 διελεύσεις αυτού, έχει ως αποτέλεσμα να μη χρησιμοποιείται η πραγματική κυκλοφορία και να μην υπάρχει με αυτόν τον τρόπο δυνατότητα εφαρμογής της διαδικασίας σε πολιτικά αεροδρόμια, όπου το ευρύ φάσμα α/φ που τα χρησιμοποιούν δημιουργεί διαφορετική μορφή έντασης από το α/φ αυτό. Αξίζει να σημειωθεί ότι με αυτή τη διαδικασία η μέγιστη τιμή PCN που μπορεί να δοθεί σε μια διατομή είναι 51 A, ενώ υπάρχουν α/φ με τιμές ACN πολύ μεγαλύτερες αυτής. Τα διαγράμματα που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση στην περίπτωση των αεροδρομίων του σώματος της αεροπορίας φαίνεται να είναι ανεπαρκή σε ορισμένες περιπτώσεις, καθώς για μεγάλο αριθμό συνδυασμών πάχους σκυροδέματος και εφελκυστικής αντοχής φτάνουμε στα όριά τους και αναγκαζόμαστε να παίρνουμε το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο. Αντίθετα, η μέθοδος που αφορά τα αεροδρόμια του ναυτικού δεν παρουσιάζει τέτοια προβλήματα, δίνει αποτελέσματα και μάλιστα δίνει τις υψηλότερες τιμές από τις τέσσερις μεθόδους. Είναι πιο αξιόπιστη διαδικασία από την αντίστοιχη της αεροπορίας και γι' αυτό θα ήταν προτιμότερη η χρήση της σε σχέση με την πρώτη. Η UFC συνοδεύεται και από λογισμικό ώστε να διευκολυνθεί η διαδικασία αξιολόγησης. Το λογισμικό παρουσιάζει διαφορές στη διαδικασία υπολογισμού και τα αποτελέσματα έναντι των διαγραμμάτων. Επειδή όμως οι τιμές του προσεγγίζουν πιο πολύ αυτές των άλλων μεθόδων (και ειδικά της FAA) και με δεδομένο ότι και για τα δύο σώματα στρατού έδωσε αποτελέσματα, ακόμη και σε διατομές όπου τα διαγράμματα εξαντλούσαν τα όριά τους, είναι πιθανό η χρήση του να οδηγήσει σε καλύτερα και πιο αξιόπιστα αποτελέσματα στην περίπτωση που ο μελετητής επιλέξει τη μέθοδο UFC.

Ένα πρόβλημα όλων των μεθόδων, πλην της Βρετανικής, είναι η αδυναμία ενοποίησης της στρώσης έδρασης και της υπόβασης όταν ο συντελεστής αντίδρασης του εδάφους είναι υψηλός και πλησιάζει στα όρια μεταξύ της κατηγορίας A και B εδαφικής αντοχής. Τα διαγράμματα με τα οποία γίνεται η ενοποίηση φτάνουν στα όρια τους και από τους οργανισμούς δεν παρέχεται κάποια επιπλέον πληροφορία για τις περιπτώσεις αυτές. Μια πιθανή εξήγηση του φαινομένου ίσως να είναι το γεγονός ότι σε τόσο υψηλές τιμές του K οι μέθοδοι θεωρούν ότι δε θα χρησιμοποιηθεί υπόβαση.

Συνολικά, και στις τέσσερις μεθόδους η διασπορά των αποτελεσμάτων είναι μεγάλη. Δε μπορούμε να πούμε με απόλυτη ακρίβεια ποια είναι η τιμή του PCN διότι η κάθε μέθοδος δίνει τη δική της τιμή. Επίσης, η εξάρτηση του PCN από την κυκλοφορία έδειξε ν' αποτελεί σημαντική αδυναμία όλων των μεθόδων πλην της Γαλλικής. Προκειμένου να διερευνηθούν τα αίτια των αδυναμιών, που παρουσίασαν όλες οι μέθοδοι, κρίθηκε σκόπιμο να εξεταστούν οι βασικές παραδοχές της θεωρίας της ACN/PCN, καθώς και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της.

Εξετάστηκε αρχικά η συσχέτιση του πραγματικού συστήματος τροχών με το μονό τροχό με σταθερή πίεση 1.25Mpa και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ισοδυναμία παρουσιάζει ικανοποιητική ακρίβεια για τις συνήθεις διατομές με πάχος πλάκας σκυροδέματος μεγαλύτερο των 30cm. Στη συνέχεια διερευνήθηκε η παραδοχή του πάχους αναφοράς, όπου και αποδείχτηκε ότι τόσο ο μονός τροχός που προκύπτει από το ACN όσο και το πραγματικό σύστημα τροχών στα οδοστρώματα αναφοράς δίνουν τιμή τάσης πολύ κοντά στα 2.75Mpa. Τέλος, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα των τεσσάρων μεθόδων προσδιορισμού του PCN με αυτά που προκύπτουν από την αναλυτική επίλυση των διατομών και το αποτέλεσμα που προέκυψε δείχνει ότι η ακρίβεια των αποτελεσμάτων σχετίζεται με το νόμο κόπωσης που θα θεωρήσουμε, ενώ και η διαδικασία περιορίζεται λόγω της διασποράς των αποτελεσμάτων. Πρέπει να σημειωθεί ότι με τη χρήση αυτών των νόμων κόπωσης δεν εξετάστηκαν όλες οι δυνατές περιπτώσεις φόρτισης (επίδραση θερμοκρασίας, φόρτιση στην ακμή ή τη γωνία της πλάκας), ούτε συγκρίθηκαν μεταξύ τους οι νόμοι κόπωσης αυτοί. Παρατηρήθηκε επίσης ότι υπάρχει μια εξάρτηση της τιμής του PCN από την αναμενόμενη κυκλοφορία, γεγονός που αντιβαίνει στον ορισμό του από τον ICAO, ενώ εντοπίστηκε και μια μικρή αδυναμία του συστήματος ταξινόμησης με το ACN σε διατομές με πάχος πλάκας σκυροδέματος 20cm. Γενικά η μέθοδος έδειξε ότι λειτουργεί αρκετά ικανοποιητικά στα δύσκαμπτα οδοστρώματα ειδικά αν για τον προσδιορισμό του PCN ακολουθηθούν οι οδηγίες των μεθόδων και σ' ενδεχόμενη μεταβολή του κυκλοφοριακού φόρτου υπάρξει και αντίστοιχη μεταβολή της τιμής του. Εξαιτίας όμως της ύπαρξης των συγκεκριμένων προβλημάτων, που αναφέρθηκαν, κρίθηκε σκόπιμο να εξεταστεί η δυνατότητα ανάπτυξης μιας εναλλακτικής διαδικασίας ελέγχου της δομικής επάρκειας των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.

Για το σκοπό αυτό εξετάσαμε τη δυνατότητα εφαρμογής στα δύσκαμπτα οδοστρώματα της εναλλακτικής διαδικασίας αξιολόγησης και σχεδιασμού που έχει δημιουργηθεί στα εύκαμπτα οδοστρώματα με το Δείκτη Ισοδύναμης Φόρτισης Αεροσκάφους. Αρχικά, διερευνήθηκε το ενδεχόμενο μεταφοράς της διαδικασίας αυτούσιας από τα εύκαμπτα στα δύσκαμπτα οδοστρώματα, κάτι το οποίο όμως δεν τελεσφόρησε λόγω της διαφορετικής δομής και συμπεριφοράς των δύο κατηγοριών οδοστρωμάτων. Μελετήθηκε στη συνέχεια η περίπτωση αύξησης της σταθερής ακτίνας του μονού τροχού, διαδικασία η οποία επίσης δεν έδωσε ακριβή αποτελέσματα. Επόμενο στάδιο υπήρξε ο διαχωρισμός των διατομών σε κατηγορίες και με τον τρόπο αυτό πετύχαμε αρκετά μεγάλη ακρίβεια. Η πολυπλοκότητα όμως του προσομοιώματος μας οδήγησε στην αναζήτηση ενός πιο απλού τρόπου και αυτός στον οποίο καταλήξαμε είναι η χρήση μιας κατηγορίας διατομών και η διόρθωση των αποτελεσμάτων με τη βοήθεια καμπυλών που προέκυψαν από στατιστική επεξεργασία. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίσαμε ένα αρκετά ακριβές και σαφώς πιο απλό μοντέλο για τη χρήση του ALI στα δύσκαμπτα οδοστρώματα. Επιβεβαιώθηκε η βασική ιδιότητα αυτού του δείκτη, η οποία είναι η αναλογία μεταξύ των τιμών του δείκτη δύο α/φ και των αντίστοιχων τάσεων και παραμορφώσεων που προκαλούν αυτά. Με την ιδιότητα αυτή είναι δυνατή η χρησιμοποίηση του ALI για κατάταξη των α/φ καθώς και για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση των οδοστρωμάτων.

Έχοντας μεταφέρει τη μέθοδο του ALI και στα δύσκαμπτα οδοστρώματα δημιουργούμε μια εναλλακτική πρόταση για το σχεδιασμό, την αξιολόγηση και τη διαχείριση του συνόλου των οδοστρωμάτων των αεροδρομίων. Η μεγάλη σημασία της πρότασης αυτής στα δύσκαμπτα οδοστρώματα έγκειται στην ευκολία εφαρμογής, στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων και στη μεγάλη ευελιξία όσον αφορά τη χρήση νόμων κόπωσης, διαδικασιών υπολογισμού τάσεων και των παραδοχών που μπορούν να γίνουν.

Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση που μένουν ανοιχτά αποτελούν:

- Η εξάρτηση της τιμής του PCN από την κυκλοφορία αποτέλεσε το σημαντικότερο μειονέκτημα των μεθόδων και είναι επομένως σημαντικό να βρεθεί μια άλλη διαδικασία υπολογισμού, η οποία να είναι απαλλαγμένη από το πρόβλημα αυτό. Σημαντικό στοιχείο αυτής της διαδικασίας είναι η “επεξήγηση” του άπειρου αριθμού διελεύσεων που αναφέρει ο ορισμός και ο καθορισμός μιας παραμέτρου πιο συγκεκριμένης, η οποία θα επιτρέπει την κατάταξη των οδοστρωμάτων κατά τρόπο απόλυτο και όμοιο για κάθε περίπτωση
- Η αδυναμία που παρουσίασε το μοντέλο κατάταξης α/φ με βάση τις τιμές του ACN για διατομές με πάχος σκυροδέματος 20cm υποδεικνύει την ανάγκη επανεξέτασης του συγκεκριμένου προτύπου σε διατομές με αυτό το εύρος τιμών

- Θα ήταν χρήσιμο να διερευνηθεί η δυνατότητα καθορισμού ενός ενιαίου συστήματος κατάταξης των διατομών με βάση το ALI και το APCI προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισης των διατομών μεταξύ τους
- Η ύπαρξη και άλλων μορφών δύσκαμπτων οδοστρωμάτων (οπλισμένα, προεντεταμένα) καθιστά απαραίτητη τη διερεύνηση για την επέκταση του συστήματος ALI στις υπόλοιπες μορφές δύσκαμπτων οδοστρωμάτων (οπλισμένα, προεντεταμένα οδοστρώματα)
- Για λόγους συμβατότητας του συστήματος κατάταξης ALI με το υπάρχον σύστημα ACN/PCN θα ήταν χρήσιμο να βρεθεί μια συσχέτιση των δύο, ώστε να υπάρχει δυνατότητα, αφού προσδιοριστεί η φέρουσα ικανότητα με το ένα, να μπορούμε να βρούμε την αντίστοιχη τιμή στο άλλο
- Η σημασία των θερμοκρασιακών τάσεων στα δύσκαμπτα οδοστρώματα των οδών καθιστά αναγκαία τη διερεύνηση της επίδρασης των τάσεων από θερμοκρασία στις θεωρήσεις του ACN/PCN

Βιβλιογραφία-Παραπομπές

- [1] Κ.Γ. Αμπακούμκιν, **"Αεροδρόμια"**, εκδόσεις "Συμμετρία", Αθήνα 1990
- [2] Κ.Γ. Αμπακούμκιν, Α. Λοΐζος, **"Δομική Αξιολόγηση Οδοστρωμάτων με τη Μέθοδο ACN-PCN"**, εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1997
- [3] Boeing Company, **"Pavement Data"**, Boeing Company, 2002
- [4] Federal Aviation Administration Advisory Circular, **"Airport Pavement Design and Evaluation"**, Department of Transportation (publications and forms section), USA, June 1995
- [5] Federal Aviation Administration Advisory Circular, **"Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength-PCN"**, Department of Transportation (publications and forms section), USA, May 1983
- [6] Α.Λοΐζος, Κ.Αμπακούμκιν, Γ.Χαρωνίτης, **"Εναλλακτικές Δυνατότητες Κατάταξης Ασφαλτικών Οδοστρωμάτων Αεροδρομίων με Βάση τη Διεθνή Εμπειρία"**, **3^ο Διεθνές Συνέδριο Ασφαλτικά Μίγματα και Οδοστρώματα**, Θεσσαλονίκη, 21-22 Νοεμβρίου 2002
- [7] Σ.Κόλιας, Α.Λοΐζος, **"Σημειώσεις Οδοστρωμάτων"**, εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1999
- [8] Directorate of Civil Engineering Services, **"A Guide to Airfield Pavement Design and Evaluation"**, Property Agency Services, Department of the environment, United Kingdom, 1989
- [9] International Civil Aviation Organization, **"Aerodrome Design Manual" (Part 3 Pavements)**, ICAO Publications, 1983
- [10] Engineer Research and Development Center (ERDC), **"Unified Facilities Criteria"**, Engineer Research and Development Center (ERDC), USA, April 2001
- [11] A.Loizos, G.Charonitis, **"Alternative Aircraft Loading Index for Pavement Structural Analysis"**, **ASCE Journal of Transportation Engineering, Vol. 125, No. 3**, May-June 1999
- [12] Portland Cement Association, **"Thickness Design for Concrete Pavement"**, Portland Cement Association, 1966
- [13] Yang H. Huang, **"Pavement Analysis and Design"**, Prentice Hall, New Jersey 1993
- [14] A.Loizos, G.Charonitis, **"An Alternative Proposal for Reporting the Bearing Capacity of Flexible Airfield Pavements"**, **International Journal of Pavement Engineering, Vol. 2(1), pp. 59-66**, 2001

Παράρτημα 1°: Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων της FAA (Federal Aviation Administration)

1. Διάγραμμα Π1.1 Πηγή [4]
2. Διάγραμμα Π1.2 Πηγή [4]
3. Διάγραμμα Π1.3 Πηγή [4]
4. Διάγραμμα Π1.4 Πηγή [4]
5. Διάγραμμα Π1.5 Πηγή [4]

1/30/96

AC 150/5320-60 CHG 1

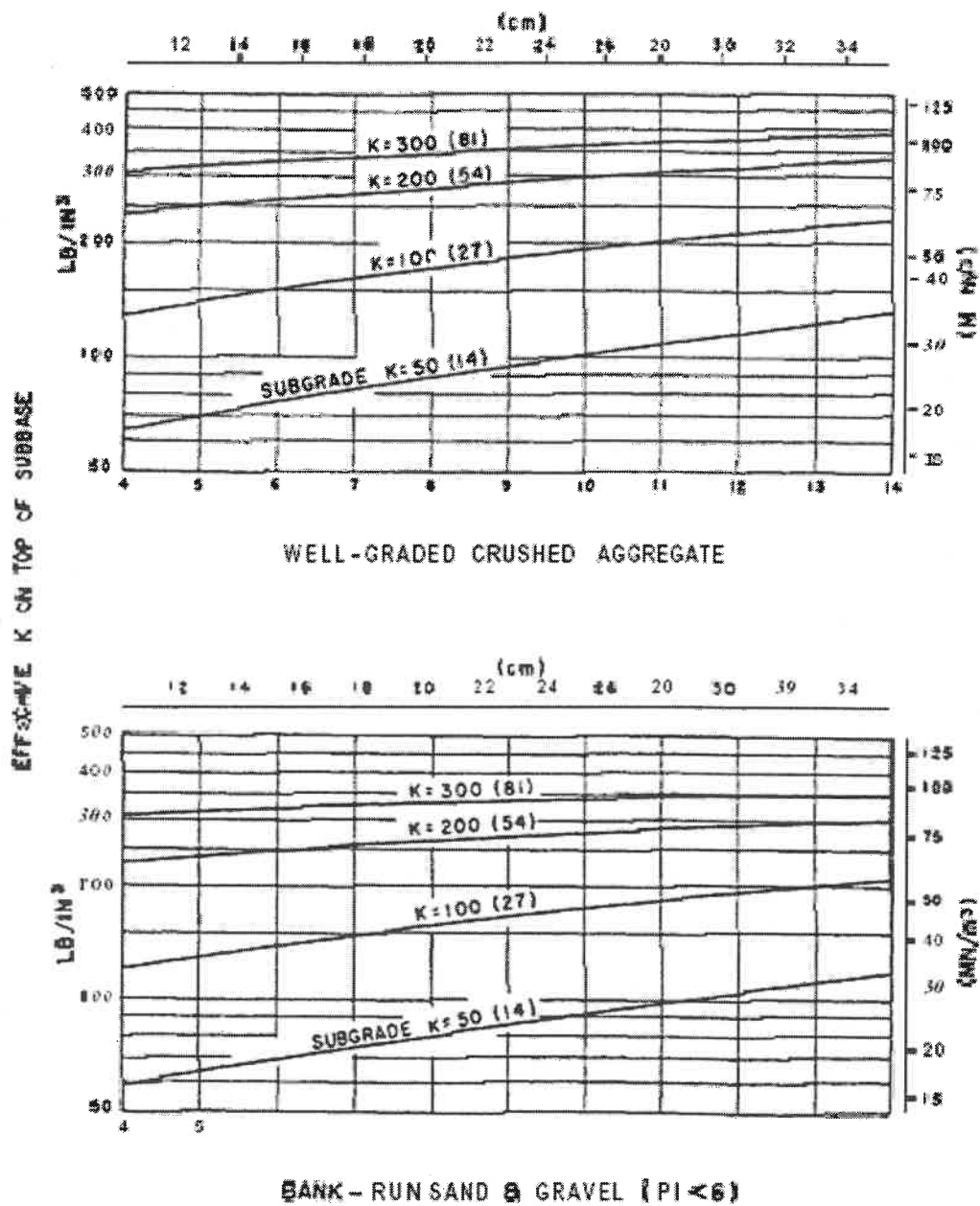
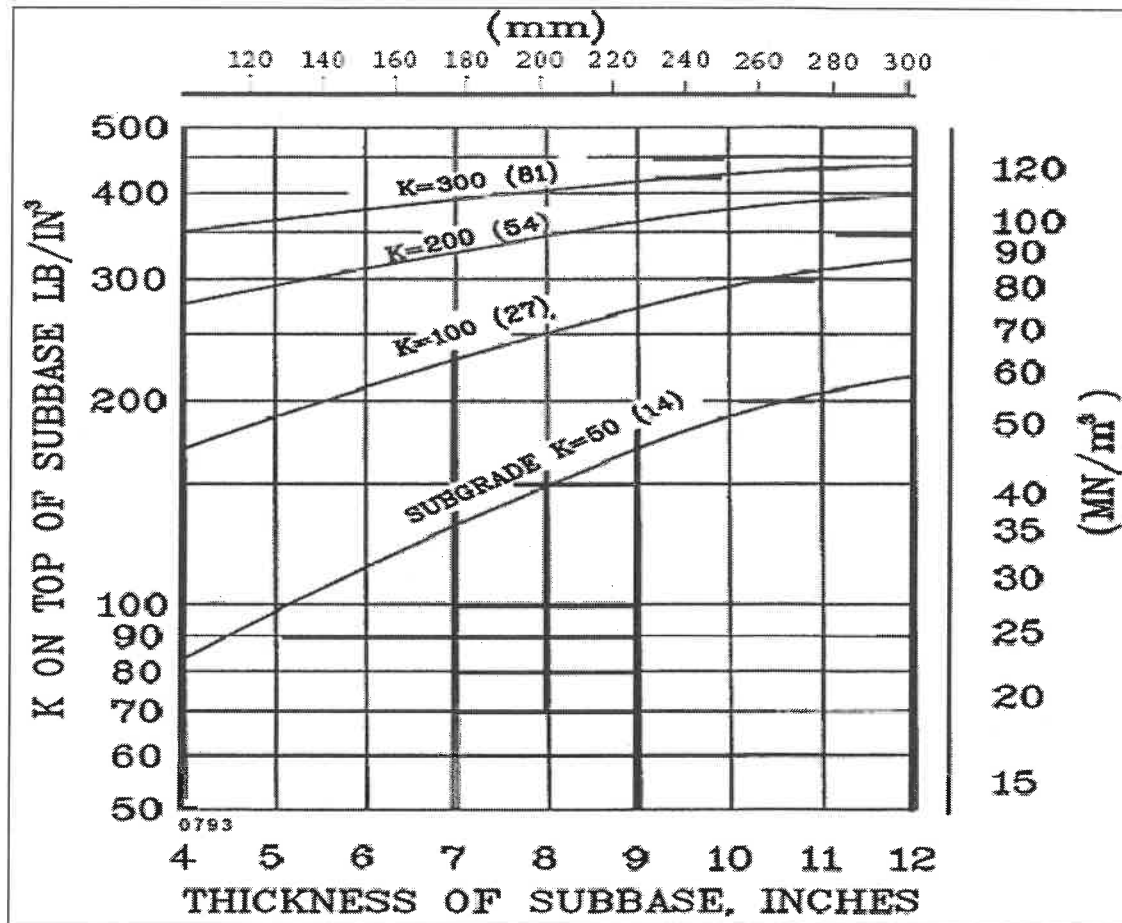
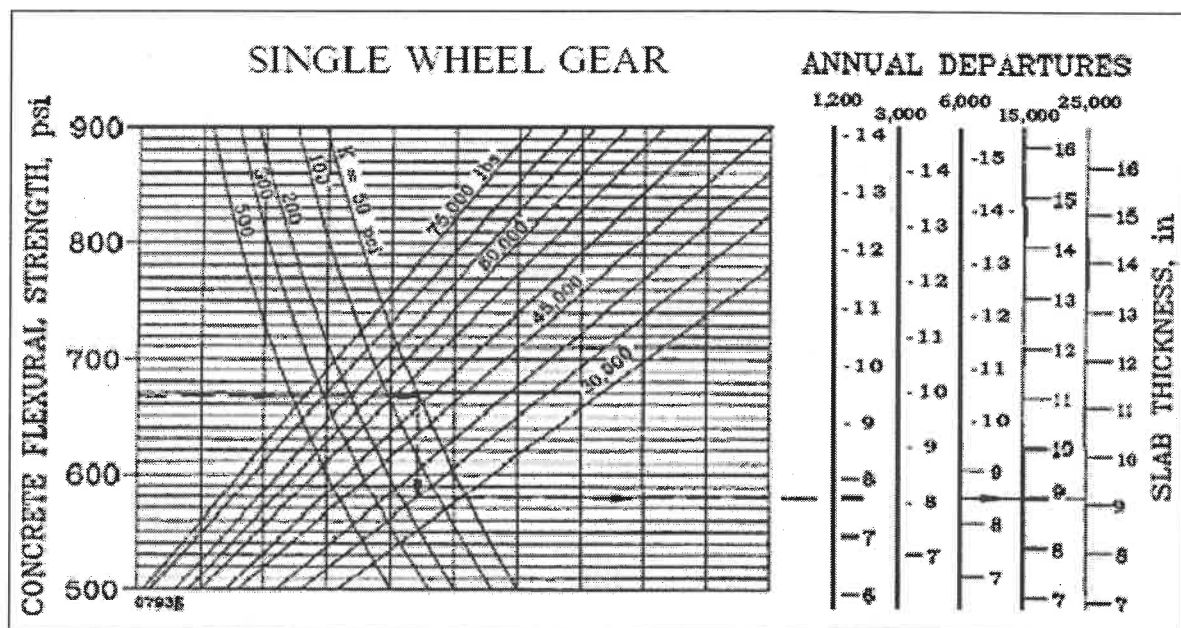


FIGURE 2-4. EFFECT OF SUBBASE ON MODULUS OF SUBGRADE REACTION

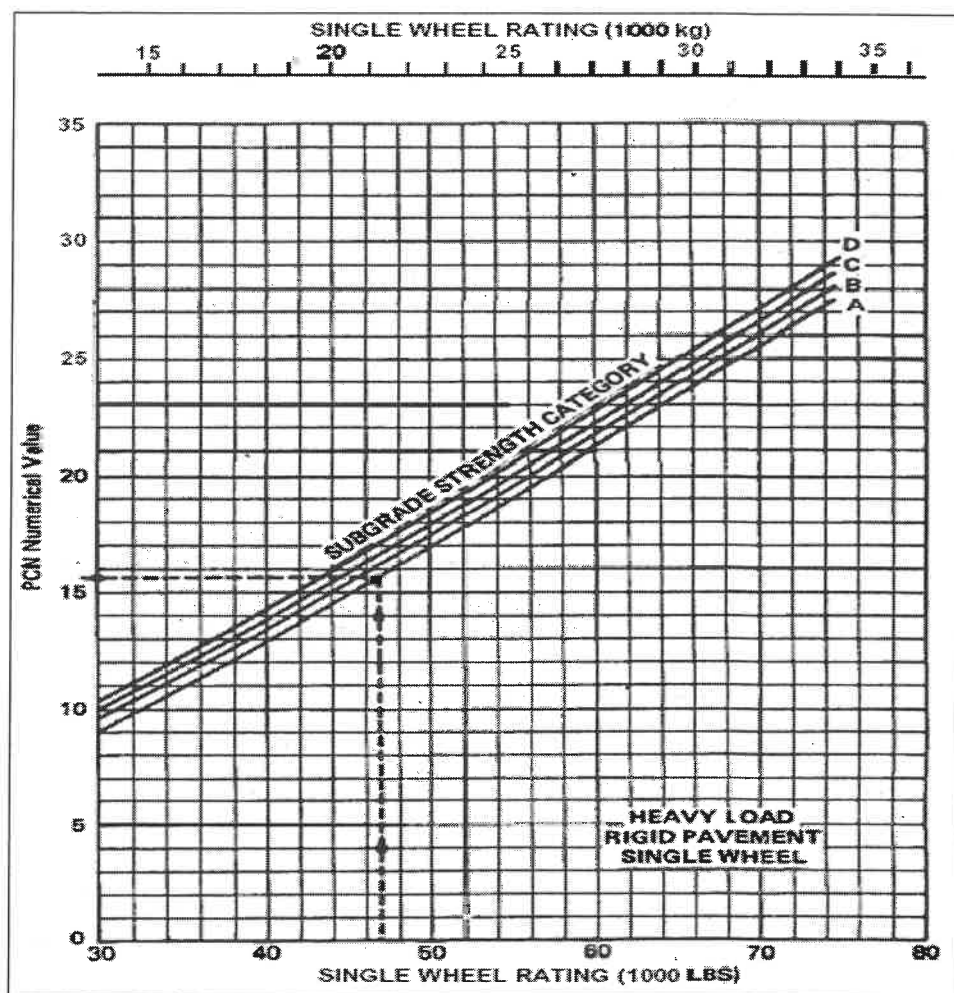
Διάγραμμα Π1.1 Πηγή [4]



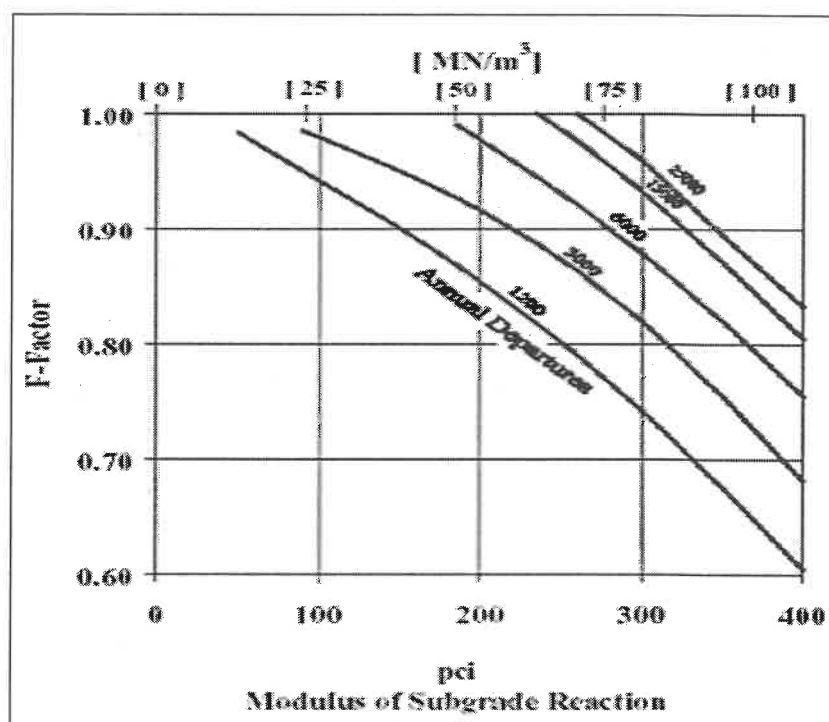
Διάγραμμα Π1.2 Πηγή [4]



Διάγραμμα Π1.3 Πηγή [4]



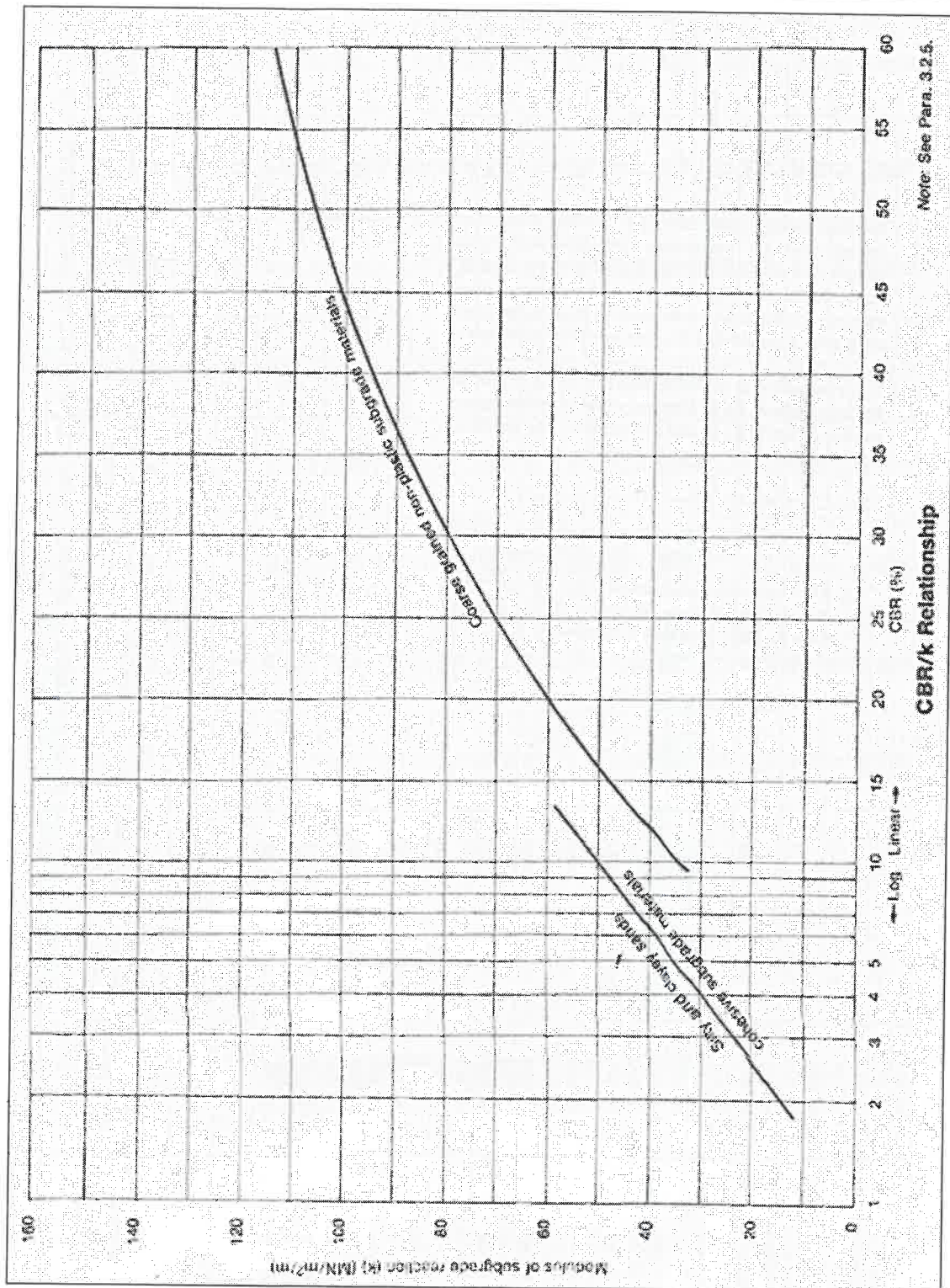
Διάγραμμα Π1.4 Πηγή [5]



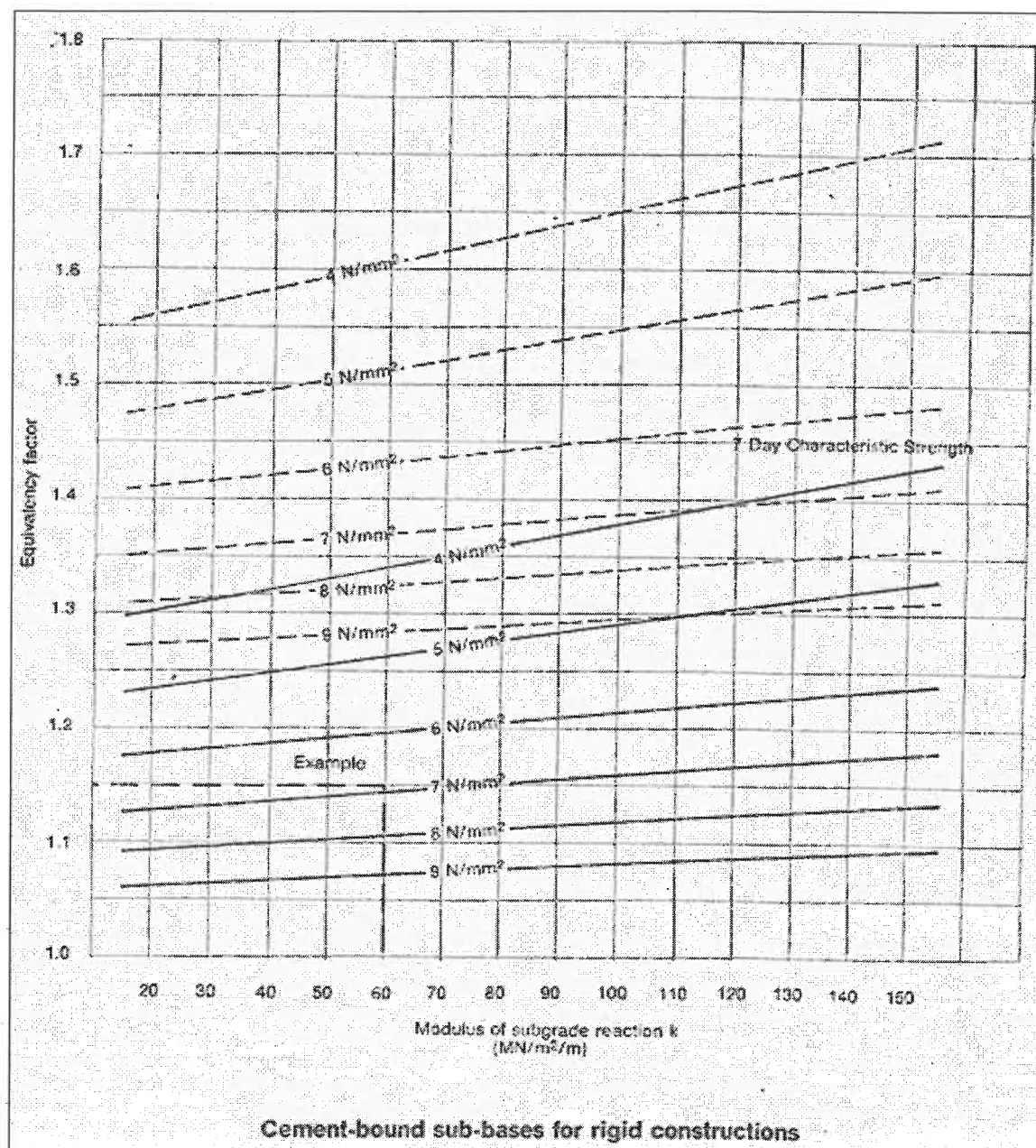
Διάγραμμα Π1.5 Πηγή [5]

**Παράρτημα 2°: Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων της Διεύθυνσης Υπηρεσιών
Πολιτικού Μηχανικού της Μ. Βρετανίας (Directorate of Civil Engineering Services)**

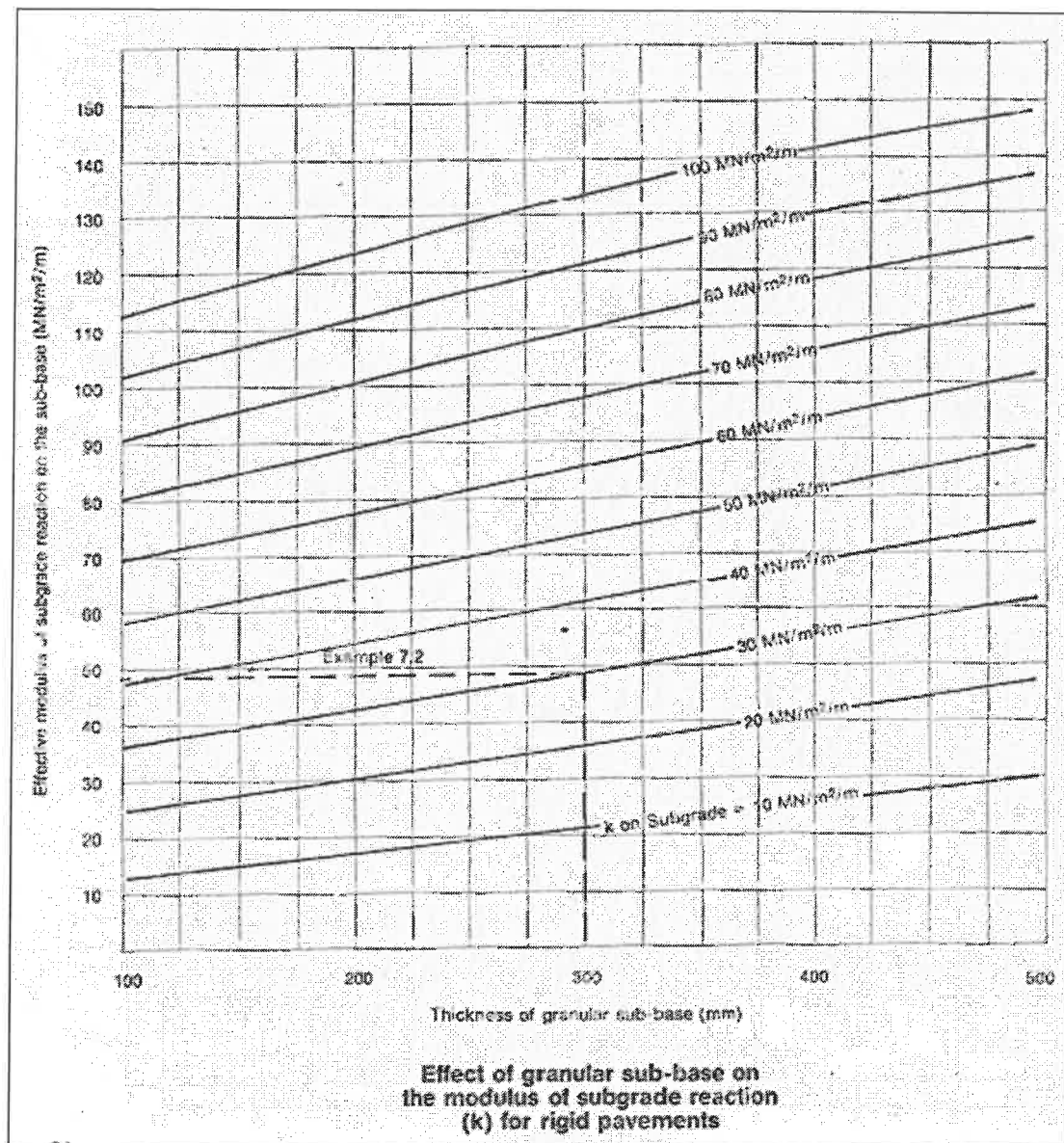
1. Διάγραμμα Π2.1 Πηγή [8]
2. Διάγραμμα Π2.2 Πηγή [8]
3. Διάγραμμα Π2.3 Πηγή [8]
4. Διάγραμμα Π2.4 Πηγή [8]
5. Διάγραμμα Π2.5 Πηγή [8]
6. Διάγραμμα Π2.6 Πηγή [8]
7. Διάγραμμα Π2.7 Πηγή [8]



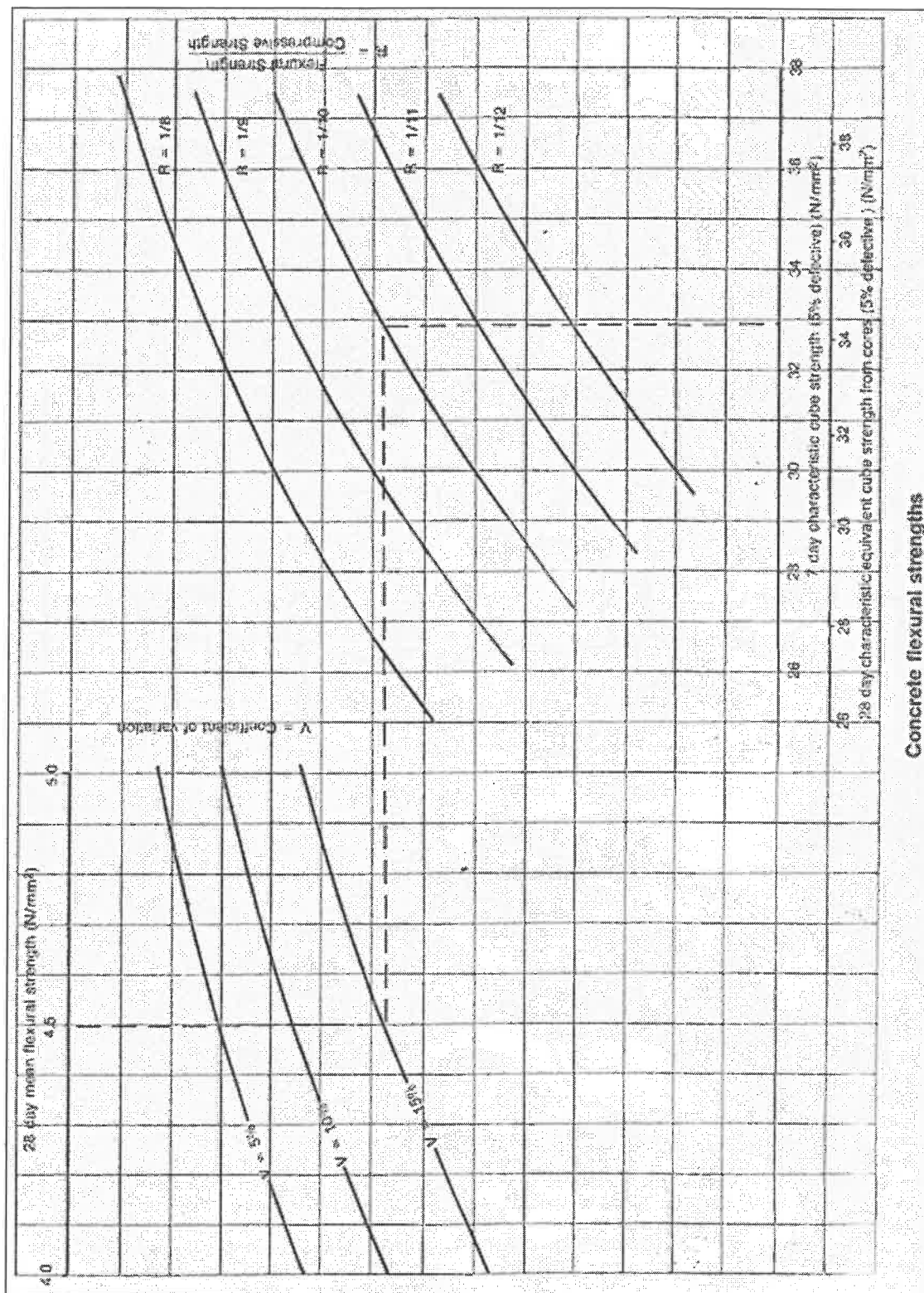
Διάγραμμα Π2.1 Πηγή [8]



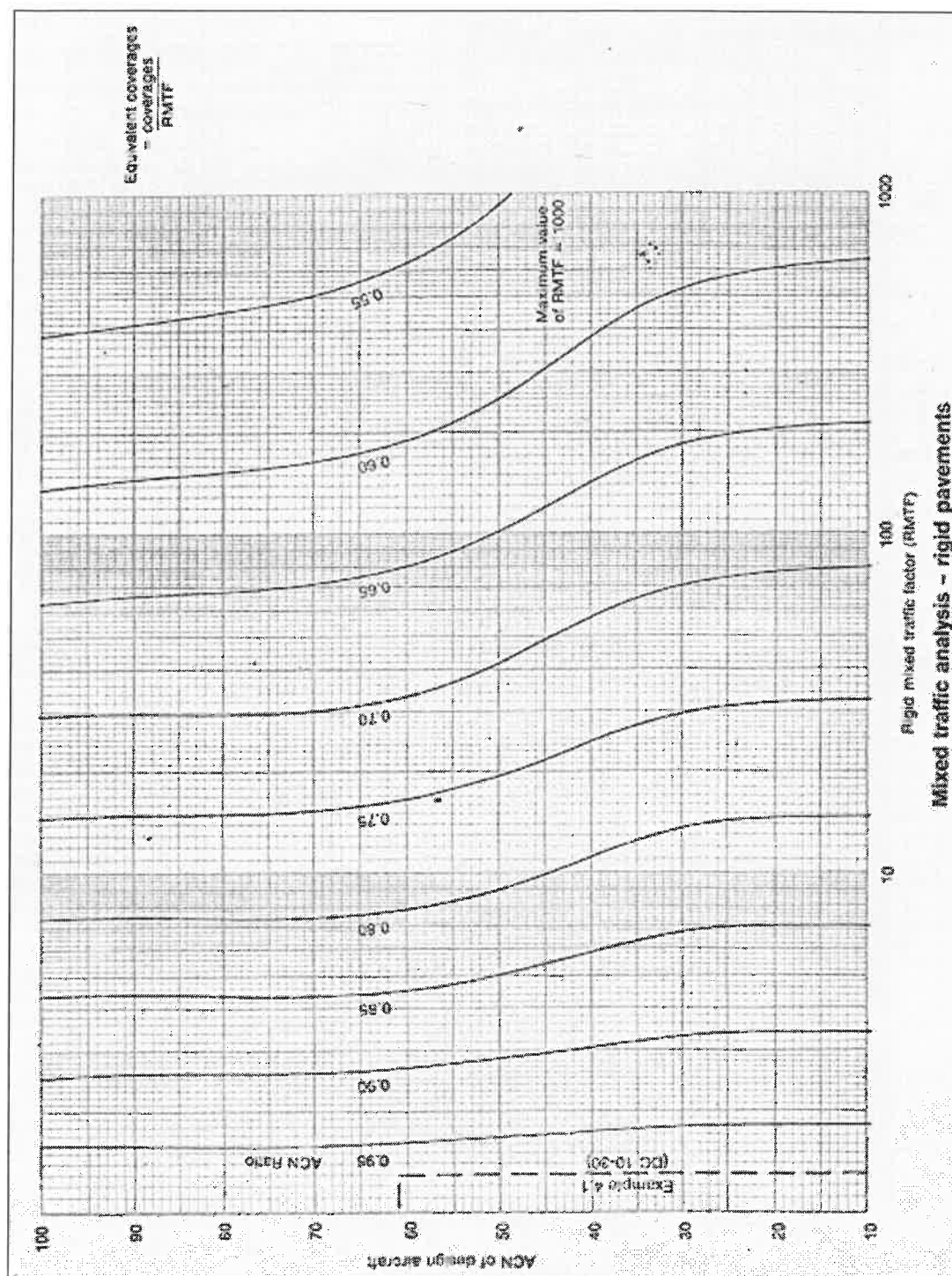
Διάγραμμα Π2.3 Πηγή [8]



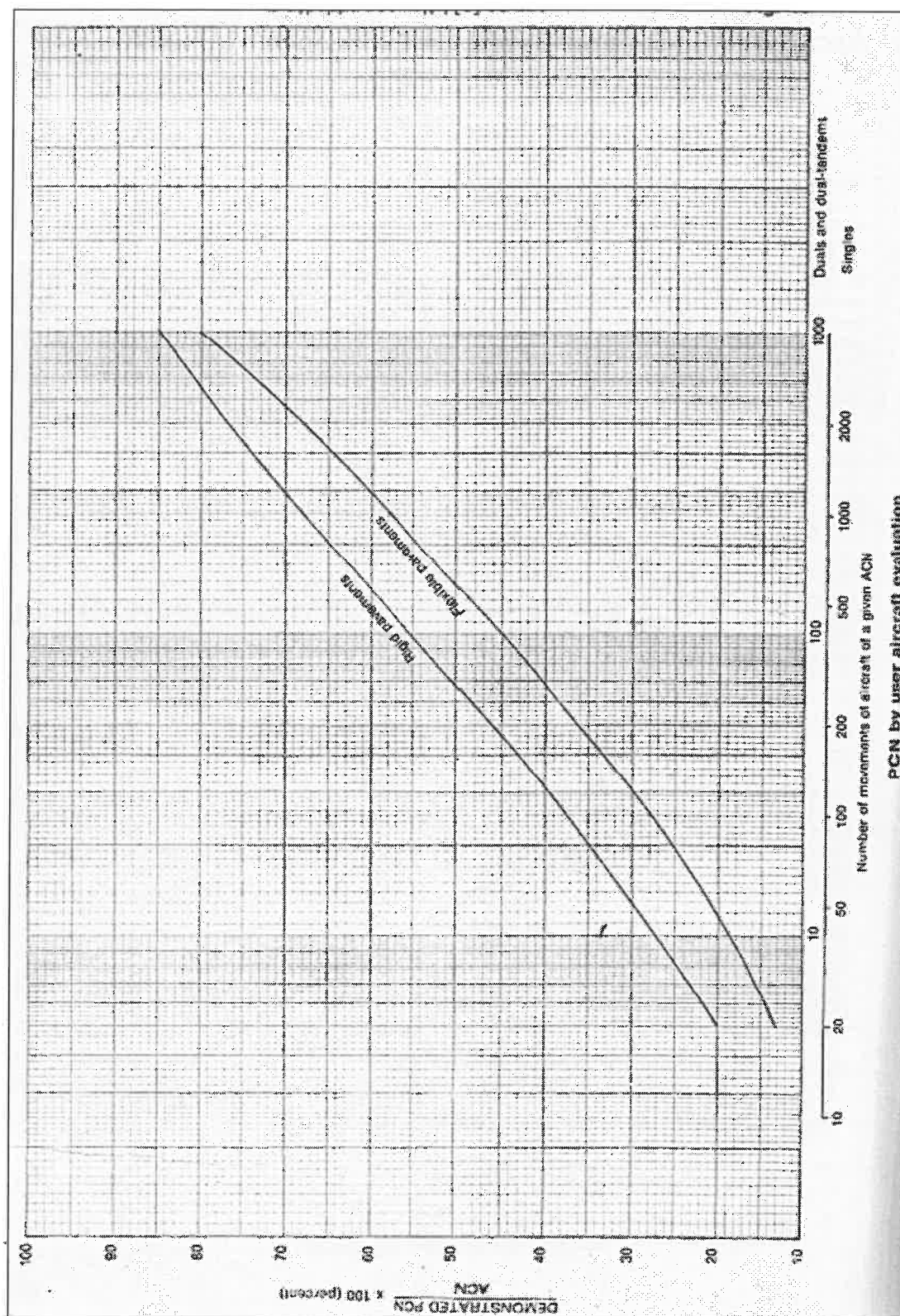
Διάγραμμα Π2.4 Πηγή [8]



Διάγραμμα Π2.5 Πηγή [8]



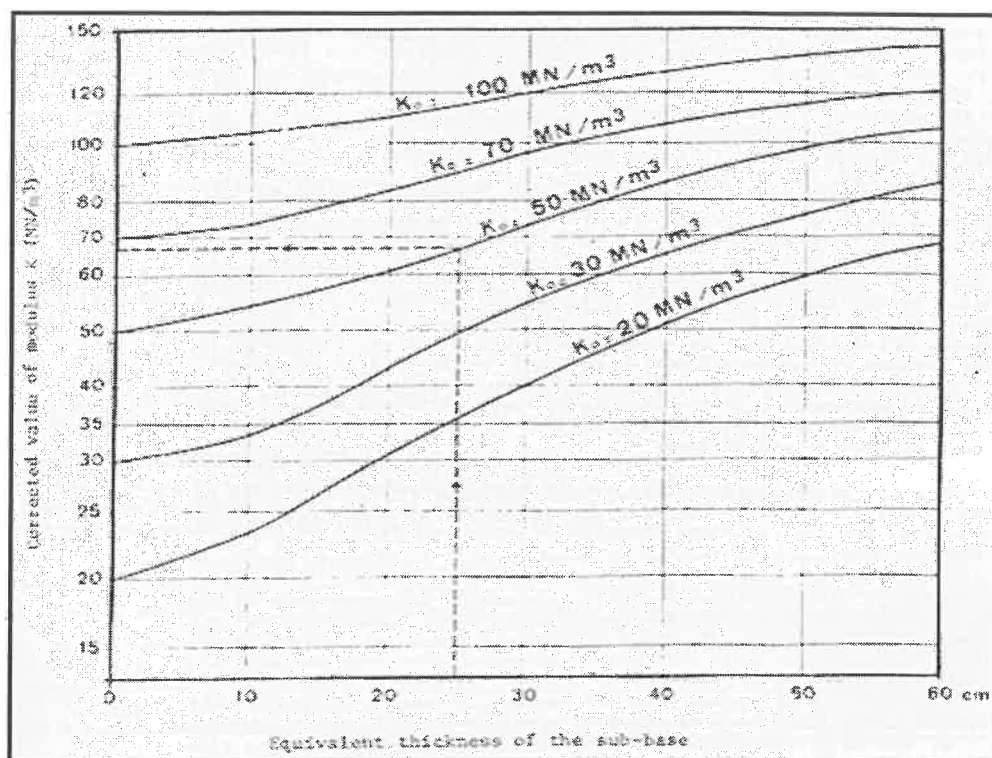
Διάγραμμα Π2.6 Πηγή [8]



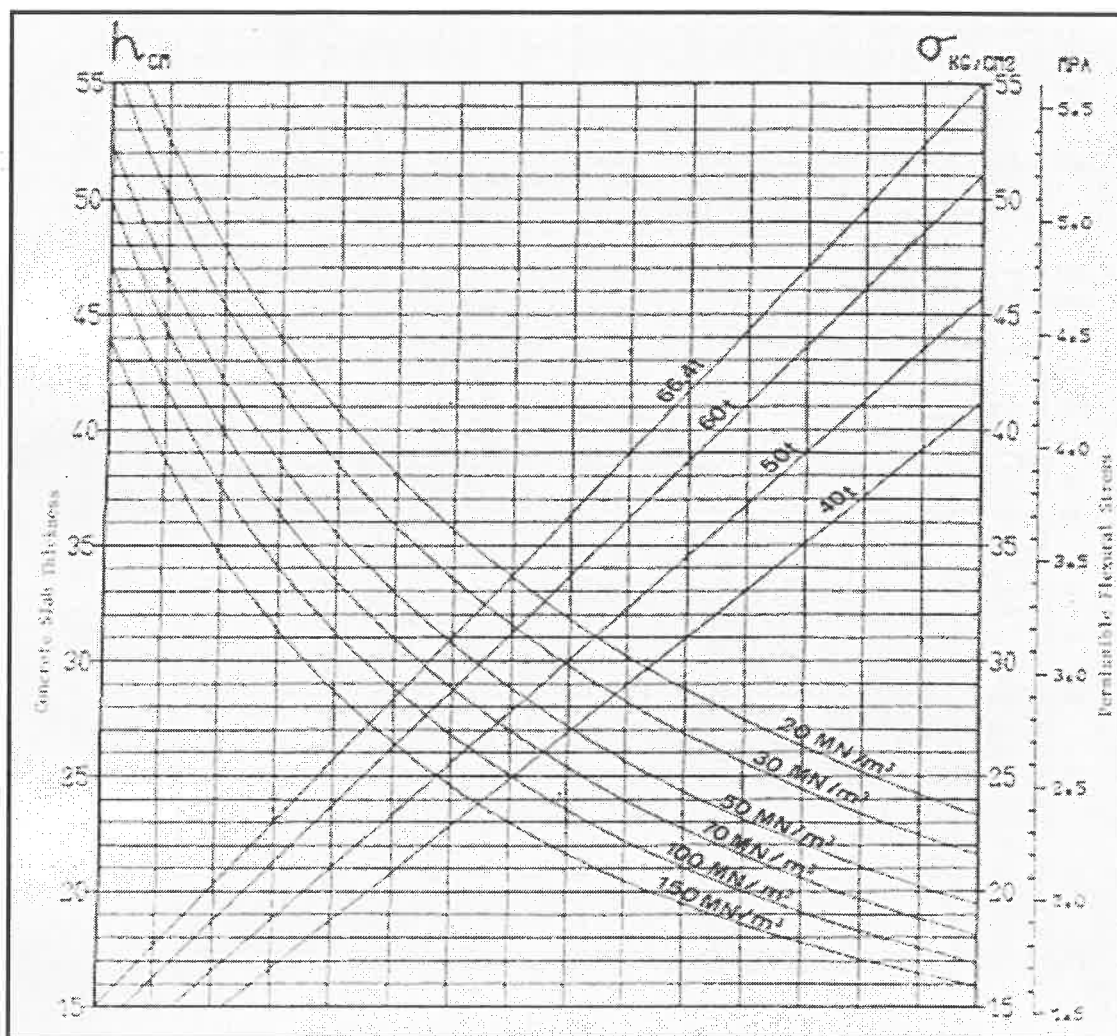
Διάγραμμα Π2.7 Πηγή [8]

Παράρτημα 3°: Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων Γαλλικού Υπουργείου Συγκοινωνιών (Service Technique des Bases Aeriennes, Ministry of Transportation)

- 8. Διάγραμμα Π3.1 Πηγή [9]
- 9. Διάγραμμα Π3.2 Πηγή [9]



Διάγραμμα Π3.1 Πηγή [9]



Διάγραμμα Π3.2 Πηγή [9]

Παράρτημα 4°: Μέθοδος κατάταξης οδοστρωμάτων UFC (ERDC)

1. Διάγραμμα Π4.1 Πηγή **[10]**
2. Διάγραμμα Π4.2 Πηγή **[10]**
3. Διάγραμμα Π4.3 Πηγή **[10]**
4. Διάγραμμα Π4.4 Πηγή **[10]**
5. Διάγραμμα Π4.5 Πηγή **[10]**
6. Διάγραμμα Π4.6 Πηγή **[10]**
7. Διάγραμμα Π4.7 Πηγή **[10]**

UFC 3-260-03
15 Apr 01

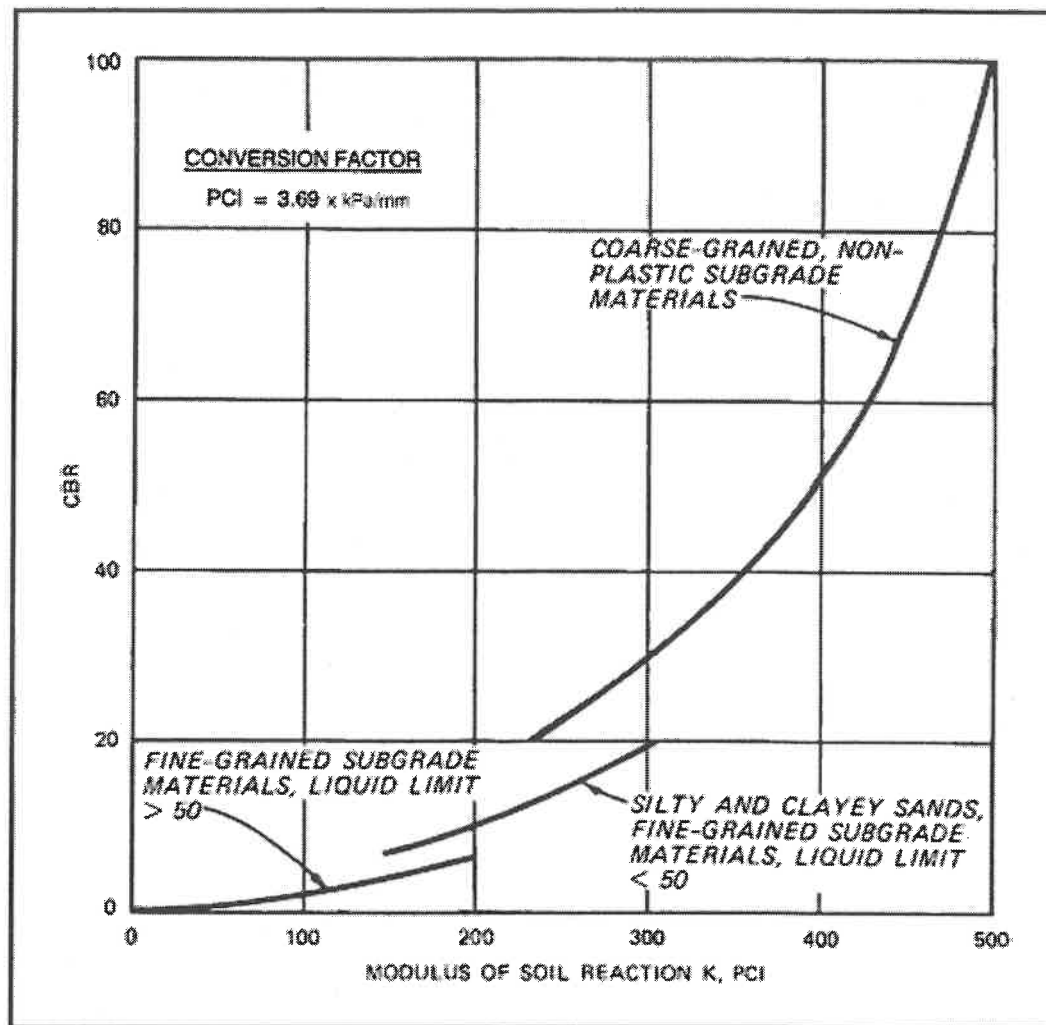
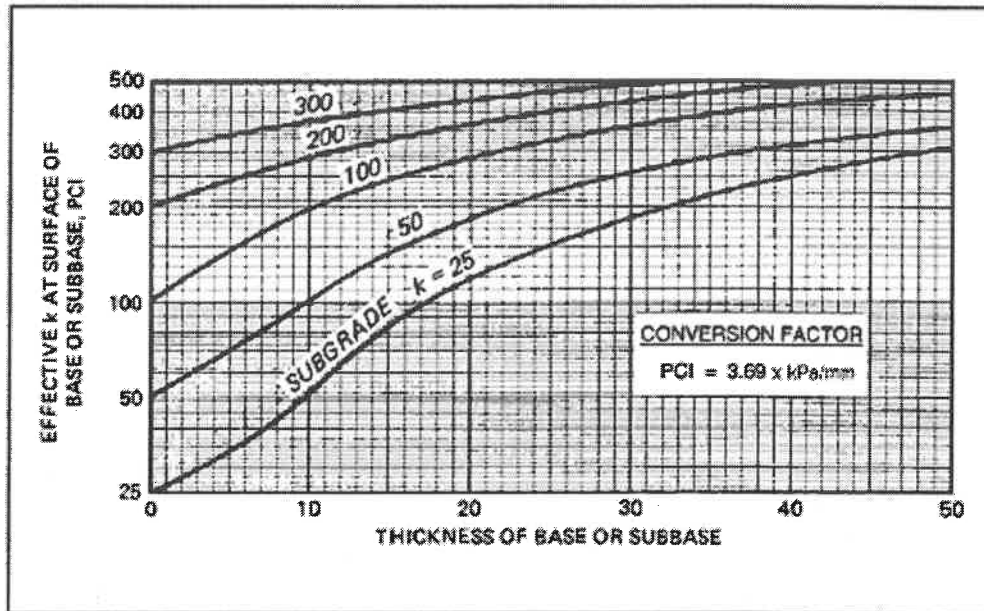


Figure 3-5. General relationship between CBR and modulus of subgrade or base-course reaction

Διάγραμμα Π4.1 Πηγή [10]



Διάγραμμα Π4.2 Πηγή [10]

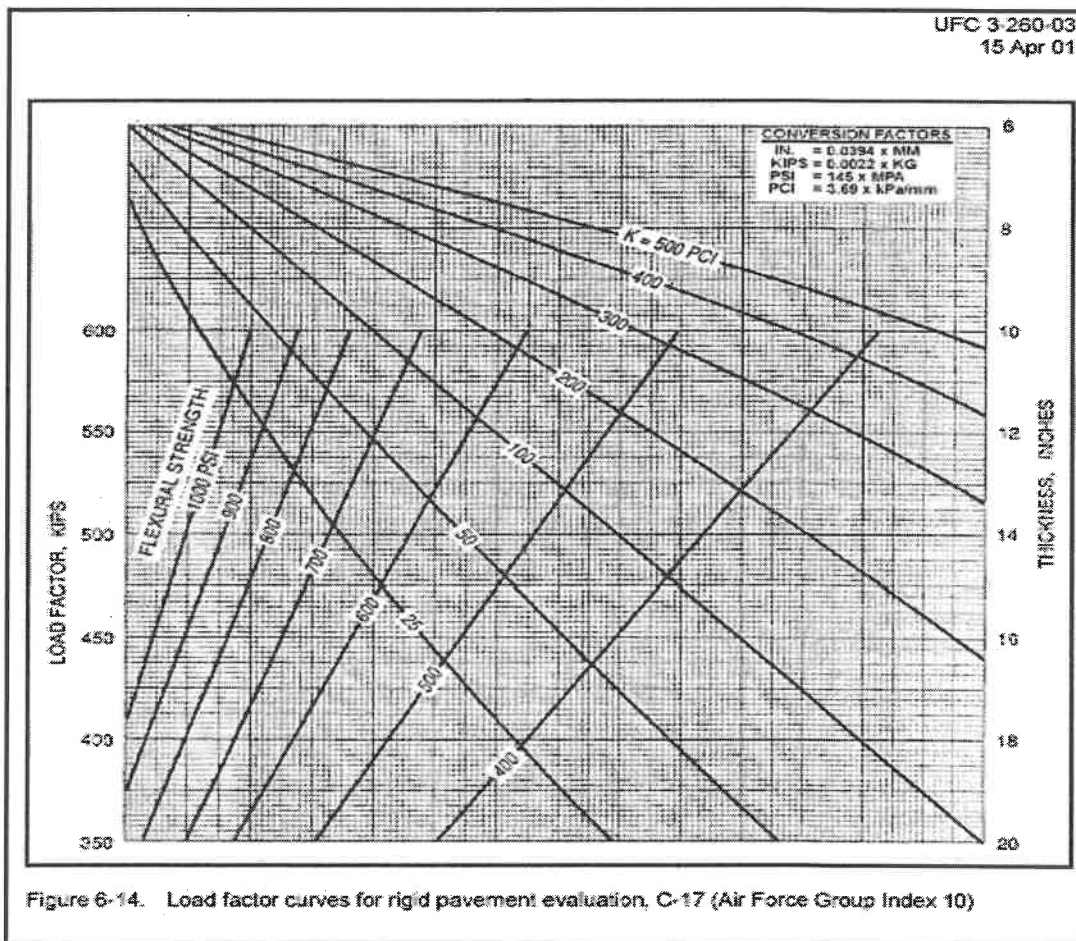
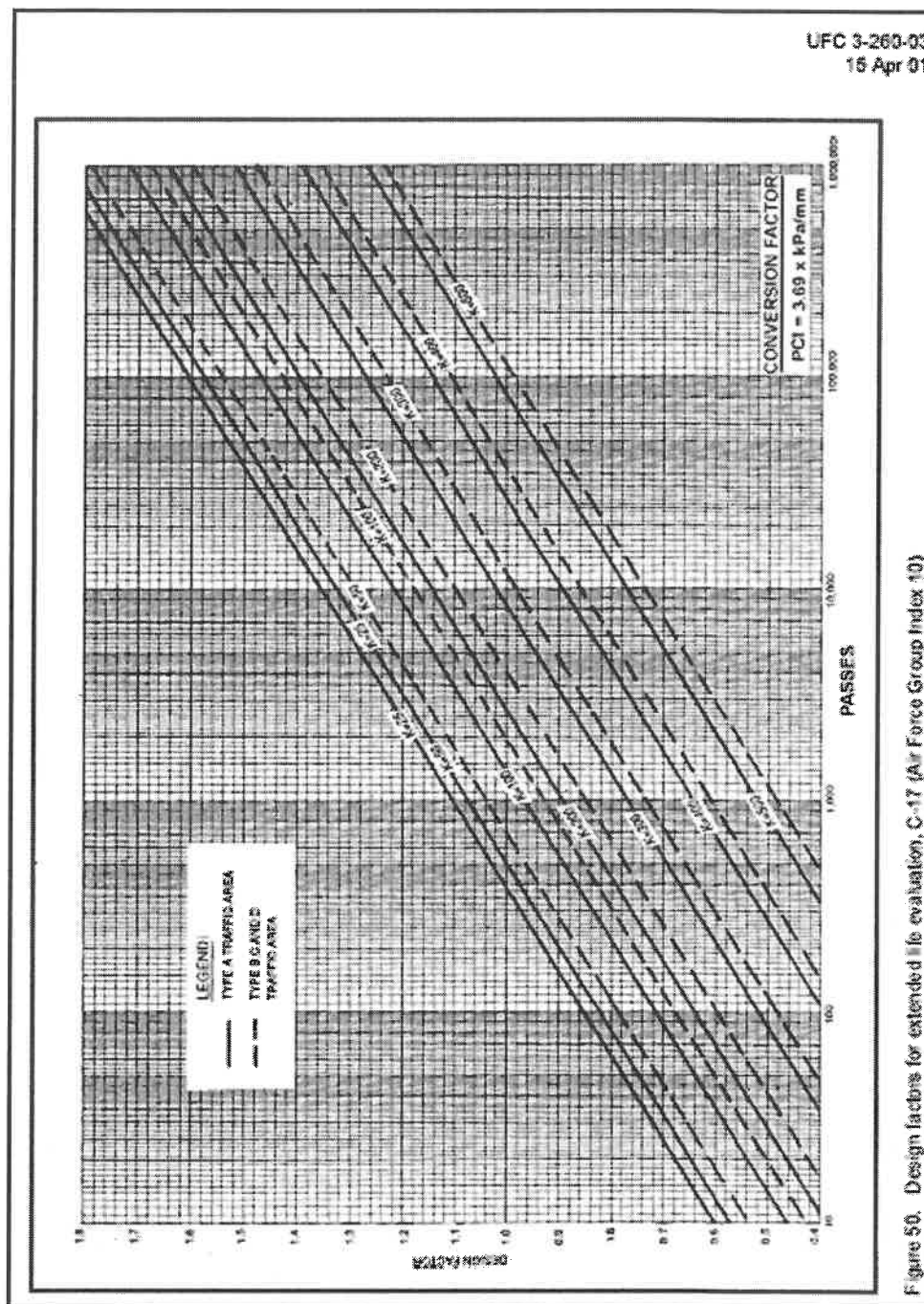
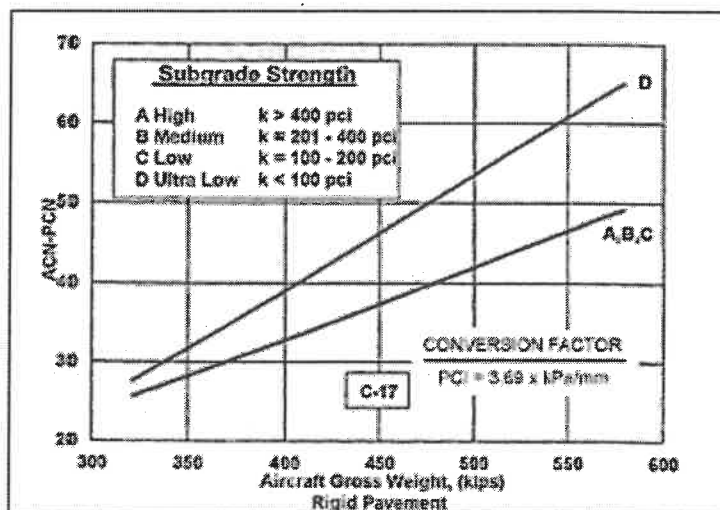


Figure 6-14. Load factor curves for rigid pavement evaluation, C-17 (Air Force Group Index 10)

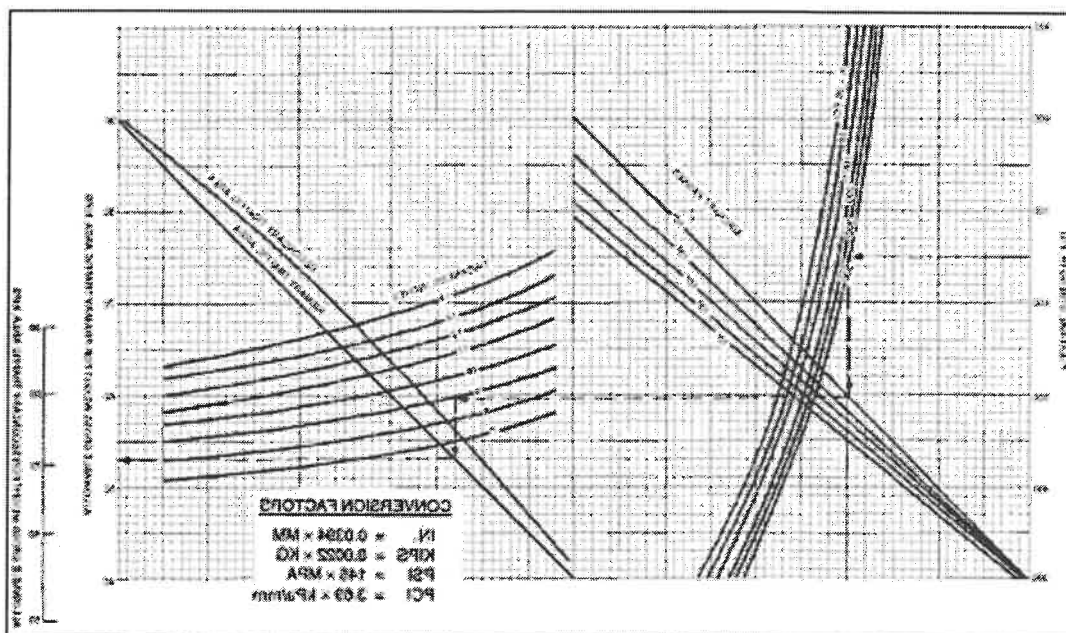
Διάγραμμα Π4.3 Πηγή [10]



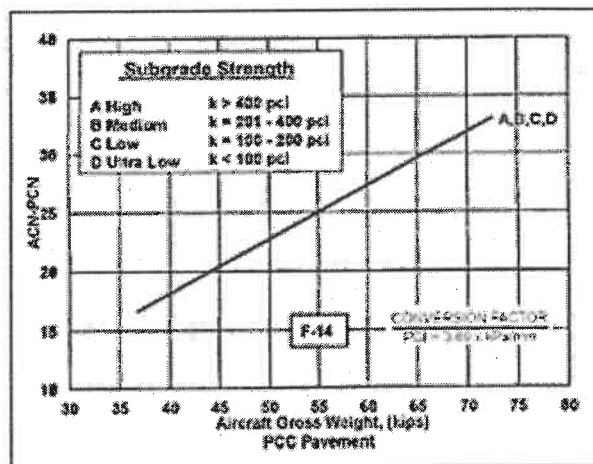
Διάγραμμα Π4.4 Πηγή [10]



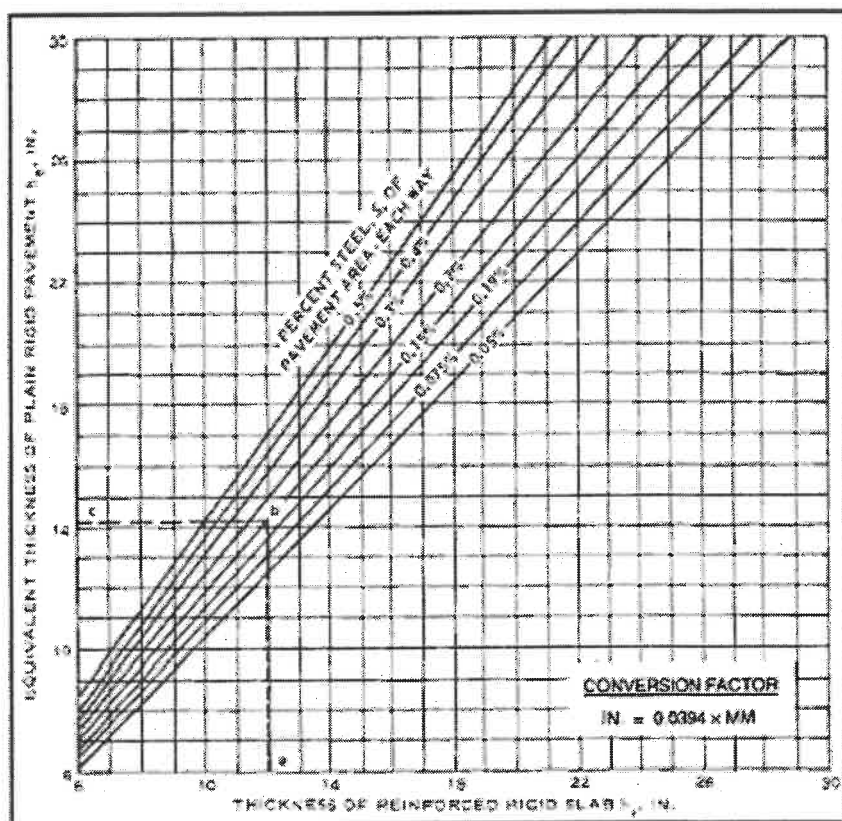
Διάγραμμα Π4.5 Πηγή [10]



Διάγραμμα Π4.6 Πηγή [10]



Διάγραμμα Π4.7 Πηγή [10]



Διάγραμμα Π4.8 Πηγή [10]

Παράρτημα 5°: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας μεθόδων

Διατομή Υπόβασης 30cm , $K=50\text{MN/m}^3$, $f_{ct}=5\text{MPa}$ και σκυρόδεμα πάχους 20÷40cm ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΠΑΧΟΥΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ							
$h_{\text{σκυροδ}}(\text{cm})$	FAA	UFCαεροπ.	UFCναυτ.	French	British	UFCλογισμικό αεροπορία	UFCλογισμικό ναυτικό
20	18 B	48 B	30 B	26 B	9 B	17 B	22 B
25	24 B	48 B	43 B	29 B	18 B	26 B	31 B
30	37 B	48 B	56 B	35 B	29 B	35 B	40 B
35	52 B	48 B	56 B	42 B	45 B	46 B	50 B
40	60 B	48 B	56 B	43 B	61 B	58 B	61 B
Διατομή Υπόβασης 35cm , $K=50\text{MN/m}^3$, $f_{ct}=4\text{MPa}$ και σκυρόδεμα πάχους 20÷40cm ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΠΑΧΟΥΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ							
$h_{\text{σκυροδ}}(\text{cm})$	FAA	UFCαεροπ.	UFCναυτ.	French	British	UFCλογισμικό αεροπορία	UFCλογισμικό ναυτικό
20	12 B	36 B	23 B	25 B	7 B	13 B	16 B
25	18 B	48 B	32 B	25 B	12 B	20 B	23 B
30	26 B	48 B	43 B	28 B	19 B	28 B	31 B
35	37 B	48 B	56 B	30 B	29 B	36 B	39 B
40	50 B	48 B	56 B	35 B	39 B	46 B	48 B
Διατομή Υπόβασης 30cm , $K=30\text{MN/m}^3$, $f_{ct}=4\text{MPa}$ και σκυρόδεμα πάχους 20÷40cm ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΠΑΧΟΥΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ							
$h_{\text{σκυροδ}}(\text{cm})$	FAA	UFCαεροπ.	UFCναυτ.	French	British	UFCλογισμικό αεροπορία	UFCλογισμικό ναυτικό
20	13 C	37 B	19 B	26 C	9 C	10 B	11 B
25	18 C	45 B	31 B	26 C	15 C	16 B	18 B
30	25 C	45 B	40 B	27 C	23 C	23 B	24 B
35	33 C	45 B	51 B	30 C	30 C	31 B	32 B
40	47 C	45 B	56 B	30 C	45 C	39 B	39 B
Διατομή Υπόβασης 30cm , $K=70\text{MN/m}^3$, $f_{ct}=4\text{MPa}$ και σκυρόδεμα πάχους 20÷40cm ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΠΑΧΟΥΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ							
$h_{\text{σκυροδ}}(\text{cm})$	FAA	UFCαεροπ.	UFCναυτ.	French	British	UFCλογισμικό αεροπορία	UFCλογισμικό ναυτικό
20	12 B	50 A	18 A	26 B	8 B	14 B	14 B
25	18 B	51 A	29 A	26 B	14 B	22 B	21 B
30	26 B	51 A	40 A	30 B	20 B	30 B	28 B
35	37 B	51 A	46 A	30 B	30 B	39 B	36 B
40	52 B	51 A	46 A	37 B	42 B	49 B	44 B

Πίνακας Π5.1. Αποτελέσματα ανάλυσης διατομών μεταβαλλόμενου πάχους σκυροδέματος

Το κόκκινο χρώμα δείχνει ότι χρησιμοποιήθηκε η μέγιστη ή η ελάχιστη τιμή του διαγράμματος εύρεσης μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου (λόγω αδυναμίας του διαγράμματος να δώσει τιμή) και το πράσινο χρώμα δείχνει ότι χρησιμοποιήθηκε η μέγιστη τιμή του διαγράμματος για τον προσδιορισμό του PCN (υπήρχε ανακολουθία ανάμεσα στη μέγιστη τιμή του επιτρεπόμενου φορτίου και του μέγιστου φορτίου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο διάγραμμα του PCN)

**Διατομή Πλάκας σκυροδέματος 30cm, $K=50\text{MN/m}^3$, $f_{ct}=5\text{MPa}$ και υπόβασης πάχους 20÷40cm
ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΠΑΧΟΥΣ ΥΠΟΒΑΣΗΣ**

$h_{\text{υποβ}}(\text{cm})$	FAA	UFCαεροπ.	UFCναυτ.	French	British	UFCλογισμικό αεροπορία	UFCλογισμικό ναυτικό
20	35 B	44 B	55 B	31 B	25 B	34 B	37 B
25	36 B	45 B	56 B	33 B	27 B	35 B	39 B
30	37 B	48 B	56 B	35 B	29 B	35 B	40 B
35	38 B	48 B	56 B	36 B	29 B	36 B	42 B
40		51 A	46 A	38 B	29 B	37 B	43 B

**Διατομή Πλάκας σκυροδέματος 35cm, $K=50\text{MN/m}^3$, $f_{ct}=4\text{MPa}$ και υπόβασης πάχους 20÷40cm
ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΠΑΧΟΥΣ ΥΠΟΒΑΣΗΣ**

$h_{\text{υποβ}}(\text{cm})$	FAA	UFCαεροπ.	UFCναυτ.	French	British	UFCλογισμικό αεροπορία	UFCλογισμικό ναυτικό
20	35 B	44 B	53 B	30 B	25 B	34 B	35 B
25	36 B	45 B	55 B	30 B	27 B	35 B	36 B
30	37 B	48 B	55 B	30 B	28 B	35 B	38 B
35	38 B	48 B	56 B	30 B	29 B	36 B	39 B
40		51 A	46 A	30 B	29 B	37 B	41 B

**Διατομή Πλάκας σκυροδέματος 30cm, $K=70\text{MN/m}^3$, $f_{ct}=4\text{MPa}$ και υπόβασης πάχους 20÷40cm
ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΠΑΧΟΥΣ ΥΠΟΒΑΣΗΣ**

$h_{\text{υποβ}}(\text{cm})$	FAA	UFCαεροπ.	UFCναυτ.	French	British	UFCλογισμικό αεροπορία	UFCλογισμικό ναυτικό
20	25 B	44 B	43 B	26 B	18 B	29 B	26 B
25	26 B	46 B	40 A	27 B	19 B	29 B	27 B
30	26 B	48 B	40 A	28 B	20 B	30 B	28 B
35	28 B	48 B	41 A	29 B	20 B	31 B	29 B
40		51 A	42 A	29 B	20 B	31 B	30 B

Πίνακας Π5.2.Αποτελέσματα ανάλυσης διατομών μεταβαλλόμενου πάχους υπόβασης

**Διατομή Πλάκας σκυροδέματος 35cm, $K=50\text{MN/m}^3$, υπόβασης πάχους 30cm και $f_{ct}=3\div 5\text{MPa}$
ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

$f_{ct}(\text{Mpa})$	FAA	UFCαεροπ.	UFCναυτ.	French	British	UFCλογισμικό αεροπορία	UFCλογισμικό ναυτικό
3		48 B	38 B	18 B		25 B	25 B
3,5	31 B	48 B	47 B	23 B		30 B	32 B
4	37 B	48 B	55 B	30 B	28 B	35 B	38 B
4,5	45 B	48 B	56 B	34 B	36 B	41 B	44 B
5	52 B	48 B	56 B	42 B	45 B	46 B	50 B

**Διατομή Πλάκας σκυροδέματος 30cm, $K=70\text{MN/m}^3$, υπόβασης πάχους 30cm και $f_{ct}=3\div 5\text{MPa}$
ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

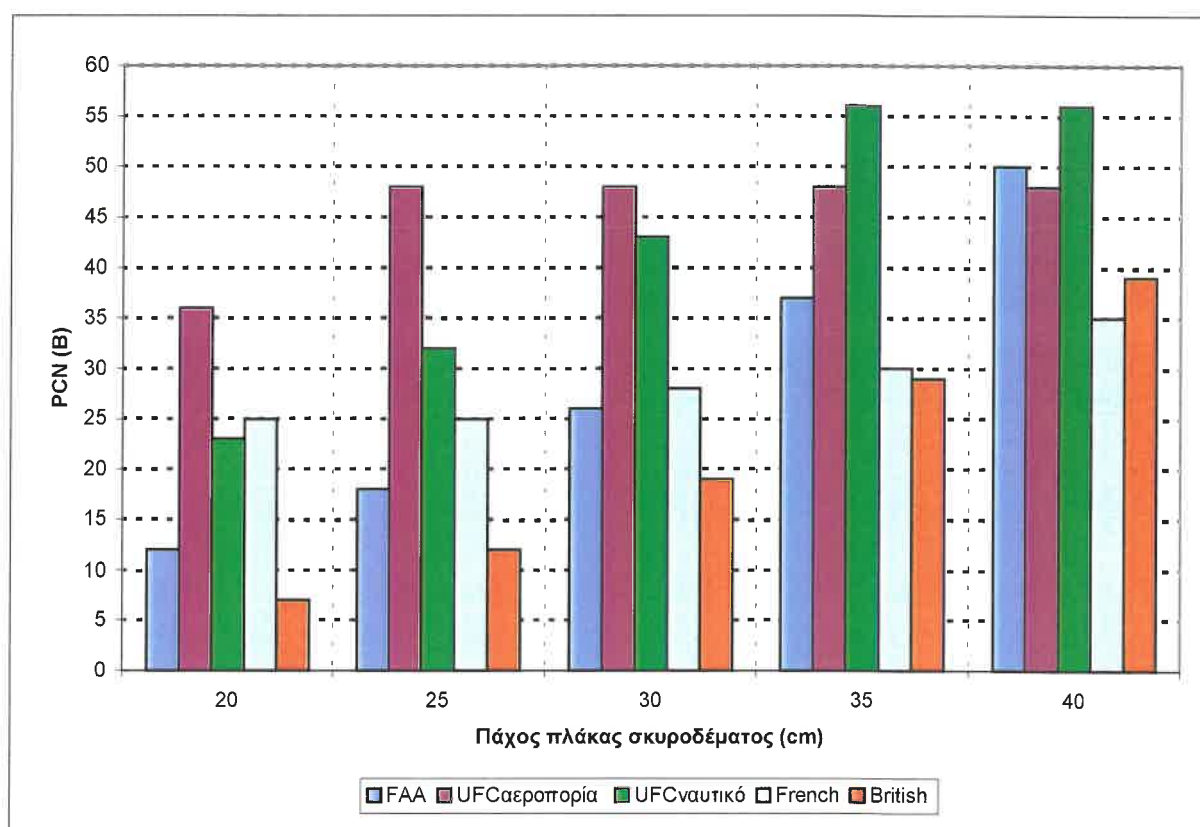
$f_{ct}(\text{Mpa})$	FAA	UFCαεροπ.	UFCναυτ.	French	British	UFCλογισμικό αεροπορία	UFCλογισμικό ναυτικό
3		51 A	28 A	18 B		21 B	18 B
3,5	22 B	51 A	34 A	24 B		25 B	23 B
4	26 B	51 A	40 A	30 B	20 B	30 B	28 B
4,5	32 B	51 A	45 A	31 B	26 B	35 B	33 B
5	38 B	51 A	46 A	37 B	33 B	39 B	38 B

Πίνακας Π5.3.Αποτελέσματα ανάλυσης διατομών μεταβαλλόμενης εφελκυστικής αντοχής

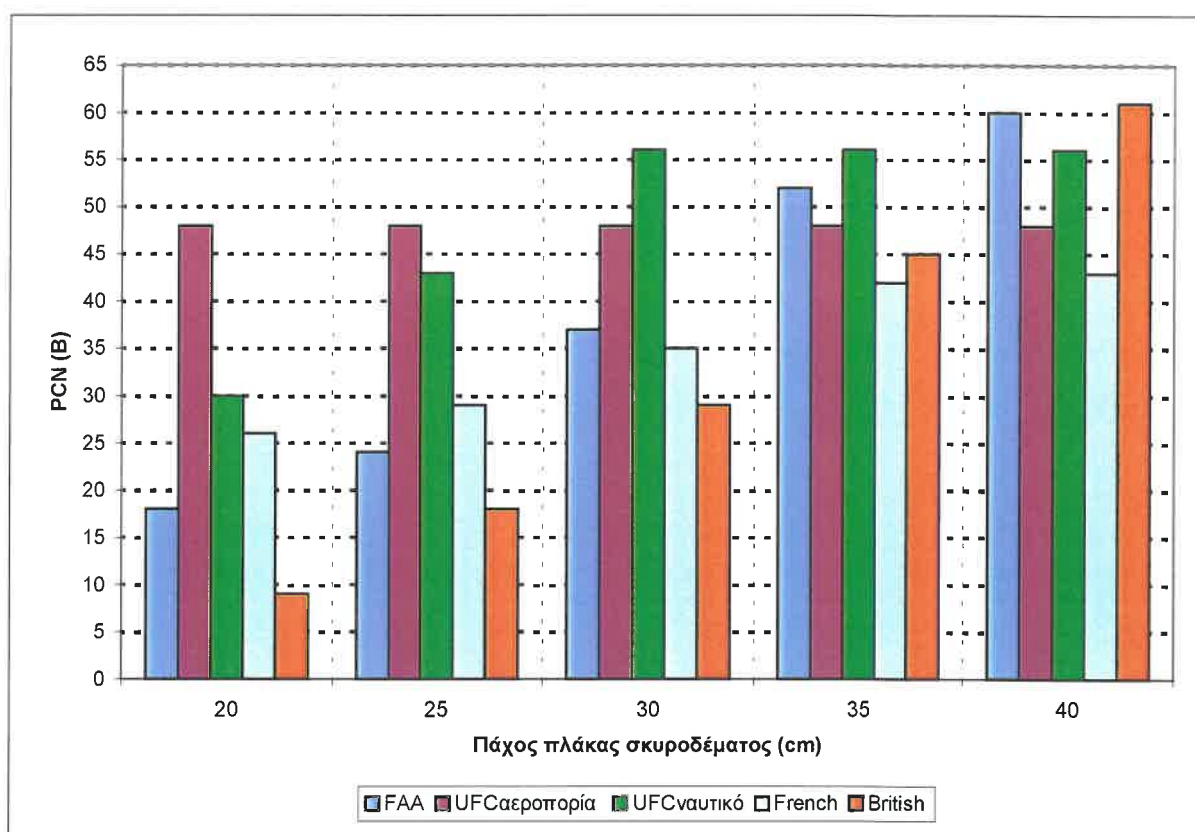
Διατομή Πλάκας σκυροδέματος 35cm, υπόβασης πάχους 30cm, $f_{ct}=4\text{MPa}$ και $K=30\div 150\text{MN/m}^3$ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ Κ							
Ko (MN/m ³)	FAA	UFCαεροπ.	UFCναυτ.	French	British	UFCλογισμικό αεροπορία	UFCλογισμικό ναυτικό
30	33 C	45 B	51 B	28 C	30 C	31 B	32 B
50	37 B	48 B	55 B	30 B	22 B	35 B	38 B
70	38 B	51 A	46 A	30 B	30 B	39 B	36 B
90	39 B			30 B	31 B	44 A	37 A
110	41 B			31 A	30 A	52 A	44 A
130					31 A	52 A	39 A
150					31 A	53 A	40 A
Διατομή Πλάκας σκυροδέματος 25cm, υπόβασης πάχους 30cm, $f_{ct}=4\text{MPa}$ και $K=30\div 150\text{MN/m}^3$ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ Κ							
Ko (MN/m ³)	FAA	UFCαεροπ.	UFCναυτ.	French	British	UFCλογισμικό αεροπορία	UFCλογισμικό ναυτικό
30	15 C	38 B	30 B	27 C	12 C	16 B	18 B
50	17 B	48 B	32 B	25 B	13 B	19 B	22 B
70	18 B	48 A	30 A	25 B	14 B	22 B	21 B
90	18 B			25 B	15 B	25 A	23 A
110	19 B			24 A	14 A	30 A	28 A
130					15 A	30 A	24 A
150					15 A	31 A	25 A
Διατομή Πλάκας σκυροδέματος 30cm, υπόβασης πάχους 30cm, $f_{ct}=5\text{MPa}$ και $K=30\div 150\text{MN/m}^3$ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ Κ							
Ko (MN/m ³)	FAA	UFCαεροπ.	UFCναυτ.	French	British	UFCλογισμικό αεροπορία	UFCλογισμικό ναυτικό
30	28 C	44 B	55 B	33 C	28 C	31 B	33 B
50	37 B	48 B	56 B	35 B	29 B	35 B	40 B
70	40 B	51 A	46 A	37 B	33 B	39 B	38 B
90	40 B			37 B	36 B	44 A	39 A
110	40 B			39 A	33 A	52 A	47 A
130					34 A	52 A	41 A
150					34 A	53 A	43 A
Διατομή Πλάκας σκυροδέματος 30cm, υπόβασης πάχους 25cm, $f_{ct}=4\text{MPa}$ και $K=30\div 150\text{MN/m}^3$ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ Κ							
Ko (MN/m ³)	FAA	UFCαεροπ.	UFCναυτ.	French	British	UFCλογισμικό αεροπορία	UFCλογισμικό ναυτικό
30	23 C	43 B	40 B	20 C	19 C	24 C	27 C
50	24 B	46 B	42 B	27 B	18 B	26 B	29 B
70	26 B	47 B	44 B	27 B	19 B	29 B	27 B
90	27 B			27 B	23 B	33 A	29 A
110	26 A			26 A	20 A	40 A	36 A
130					21 A	41 A	31 A
150					21 A	41 A	32 A

Πίνακας Π5.4.Αποτελέσματα ανάλυσης διατομών μεταβαλλόμενου συντελεστή αντίδρασης

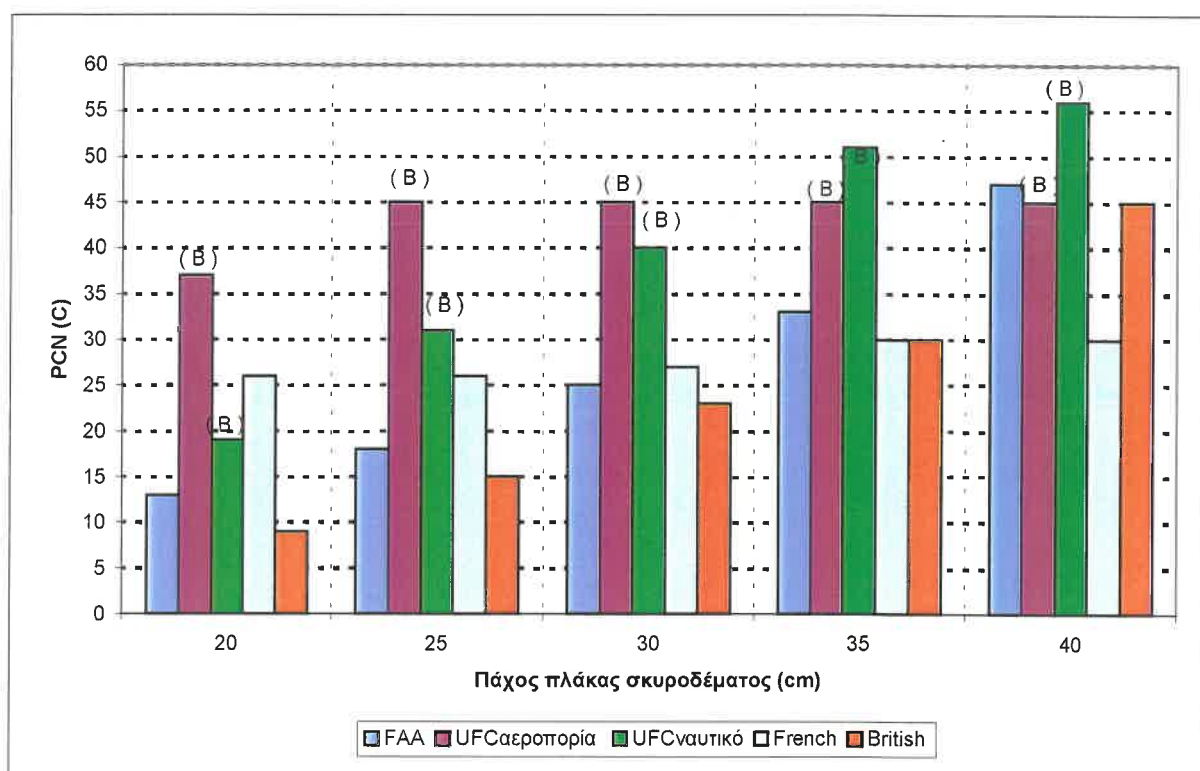
Τα παραπάνω αποτελέσματα παρουσιάζονται και στα ακόλουθα διαγράμματα:



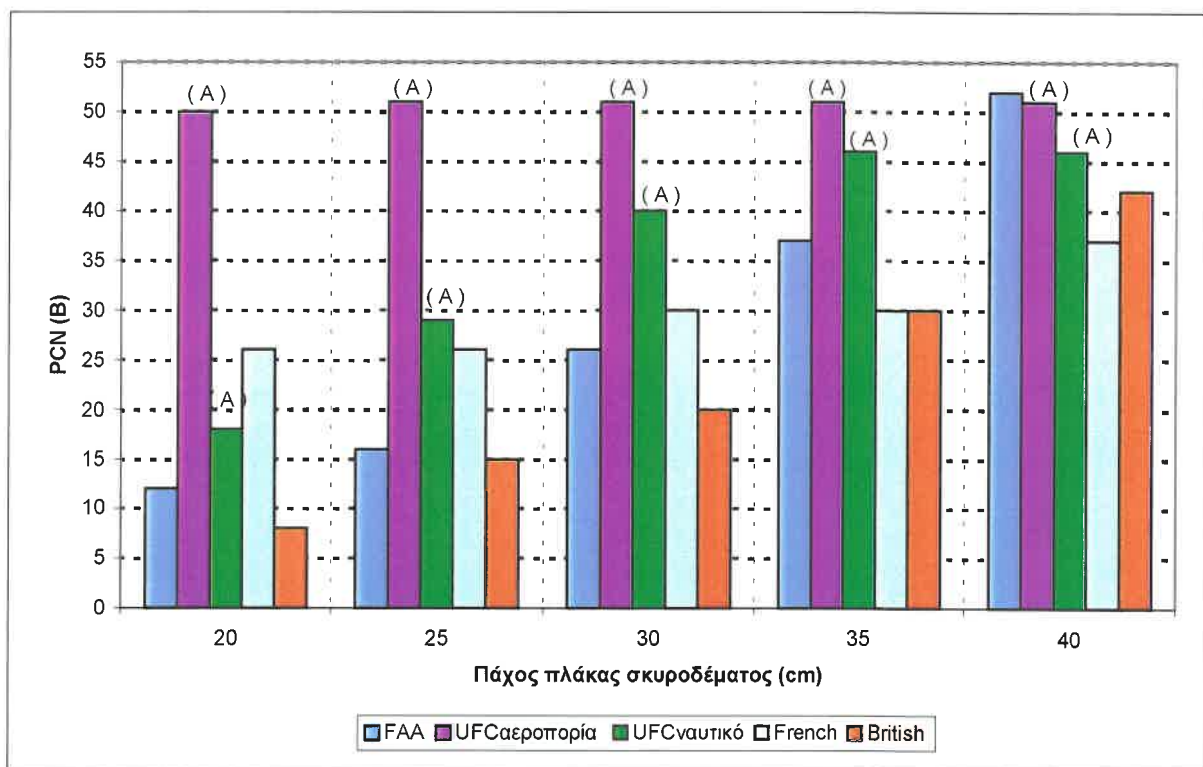
Διάγραμμα Π5.1. Επίρροη μεταβολής του πάχους σκυροδέματος στον υπολογισμό του PCN με διάφορες μεθόδους ($H_{\text{υπόβασης}}=35\text{cm}$, $K=50\text{KN/m}^2$, $f_{ct}=4\text{Mpa}$)



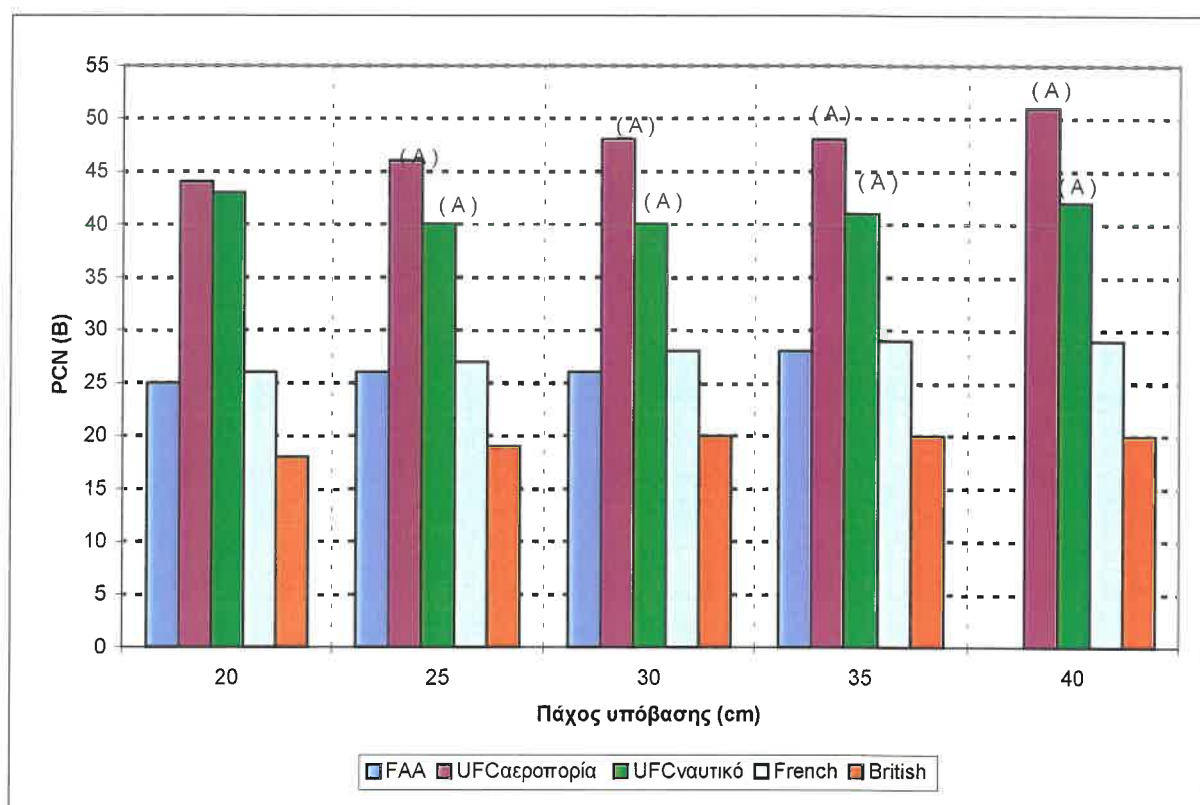
Διάγραμμα Π5.2. Επίρροη μεταβολής του πάχους σκυροδέματος στον υπολογισμό του PCN με διάφορες μεθόδους ($H_{\text{υπόβασης}}=30\text{cm}$, $K=50\text{KN/m}^2$, $f_{ct}=5\text{Mpa}$)



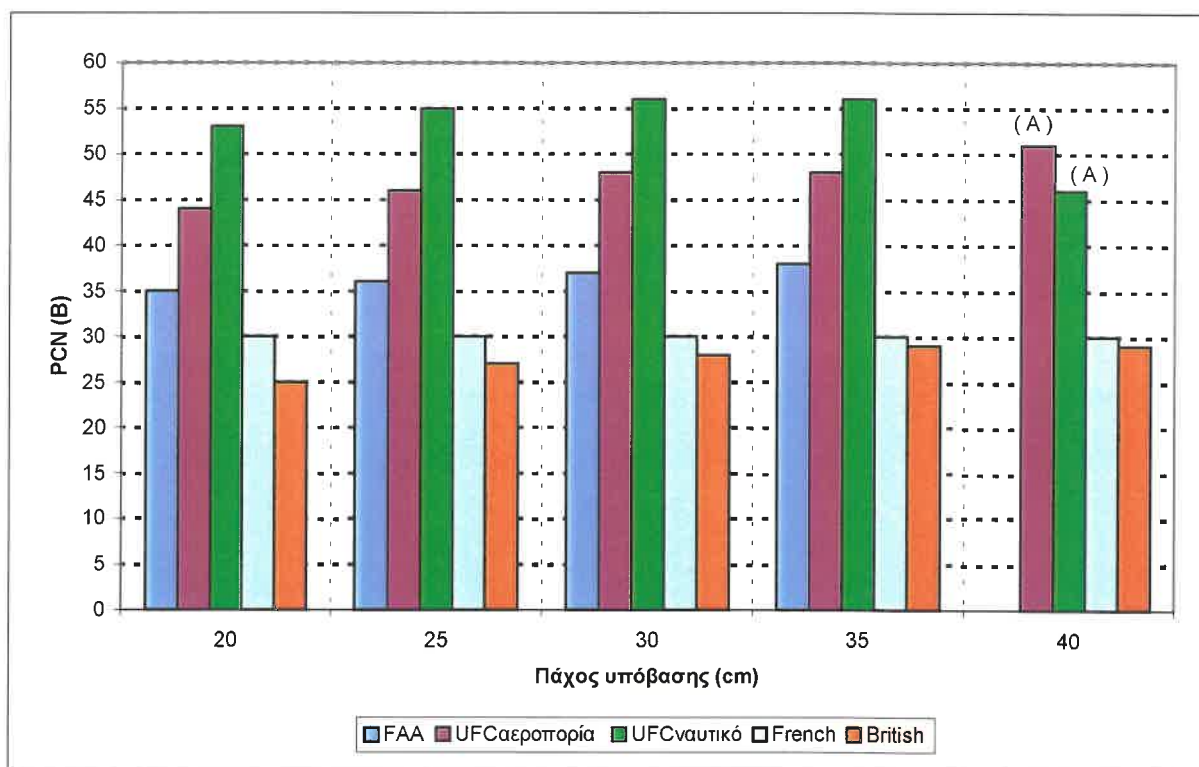
Διάγραμμα Π5.3. Επίρροή μεταβολής του πάχους σκυροδέματος στον υπολογισμό του PCN με διάφορες μεθόδους ($H_{\text{υπόθεσης}}=30\text{cm}$, $K=30\text{KN/m}^2$, $f_{ct}=4\text{Mpa}$)



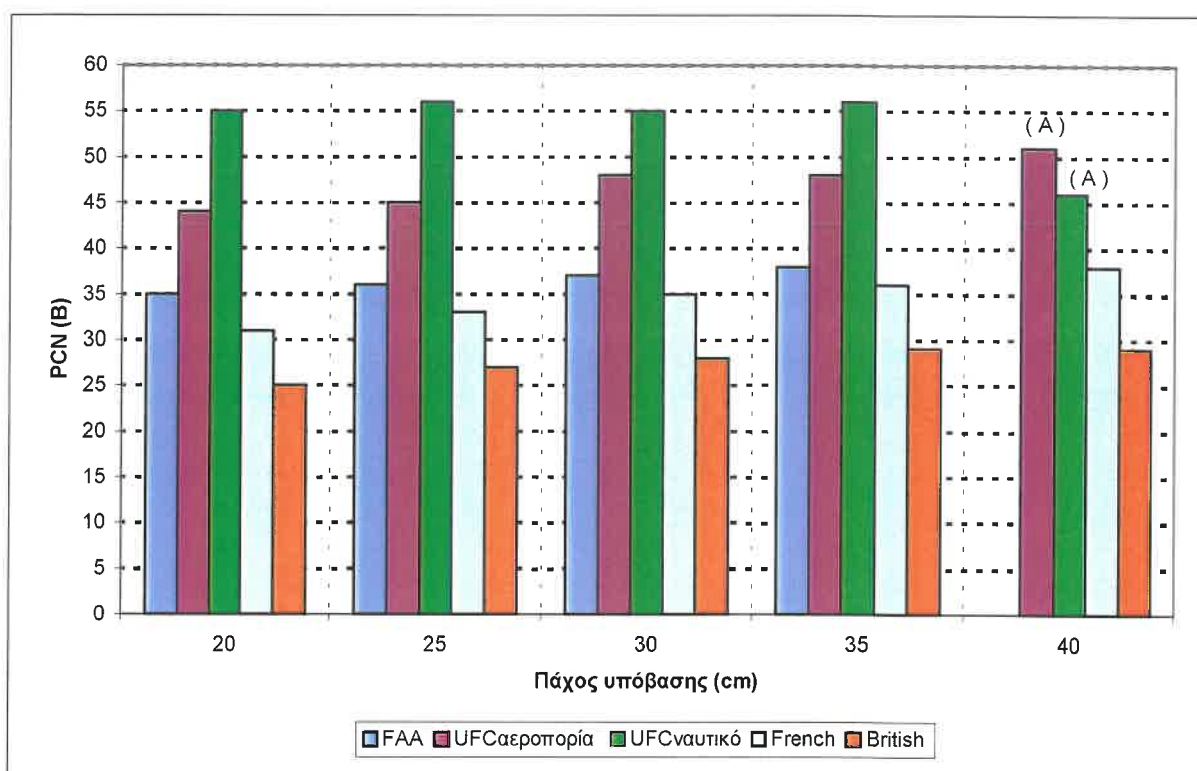
Διάγραμμα Π5.4. Επίρροή μεταβολής του πάχους σκυροδέματος στον υπολογισμό του PCN με διάφορες μεθόδους ($H_{\text{υπόθεσης}}=30\text{cm}$, $K=70\text{KN/m}^2$, $f_{ct}=4\text{Mpa}$)



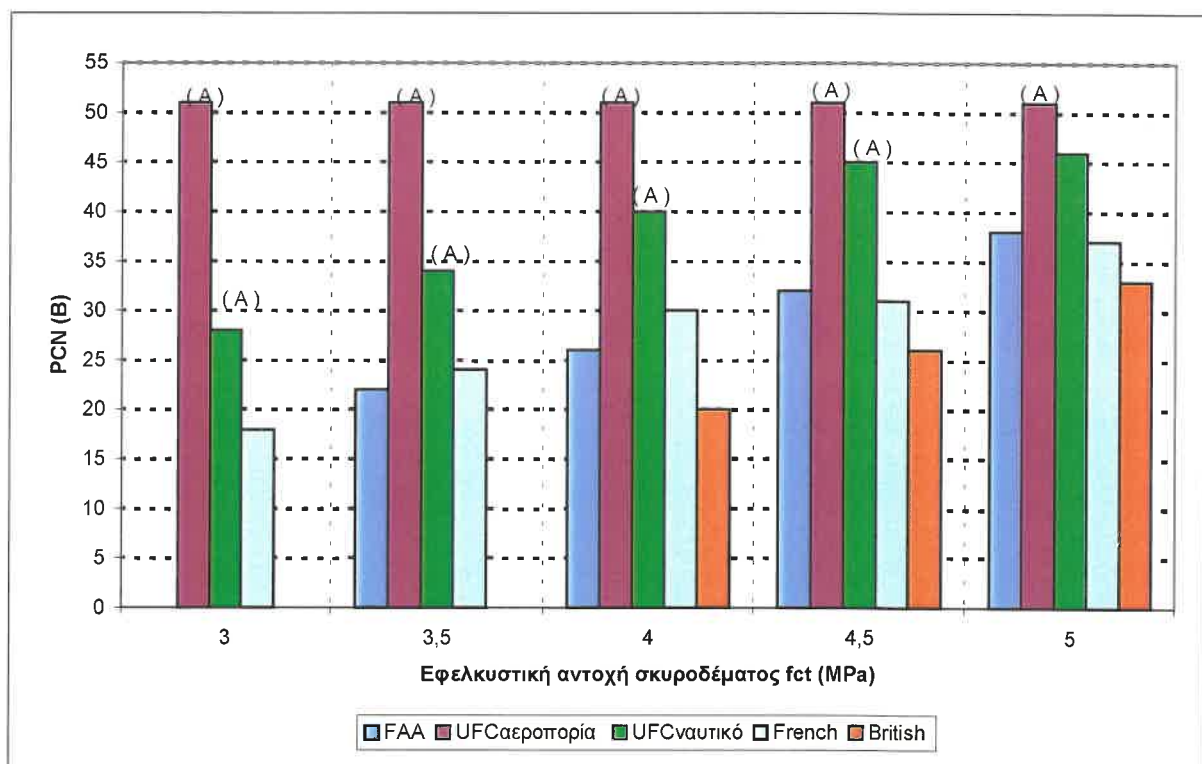
Διάγραμμα Π5.5. Επιρροή μεταβολής του πάχους της υπόβασης στον υπολογισμό του PCN με διάφορες μεθόδους ($H_{\text{σκυροδέματος}}=30\text{cm}$, $K=70\text{KN/m}^2$, $f_{ct}=4\text{Mpa}$)



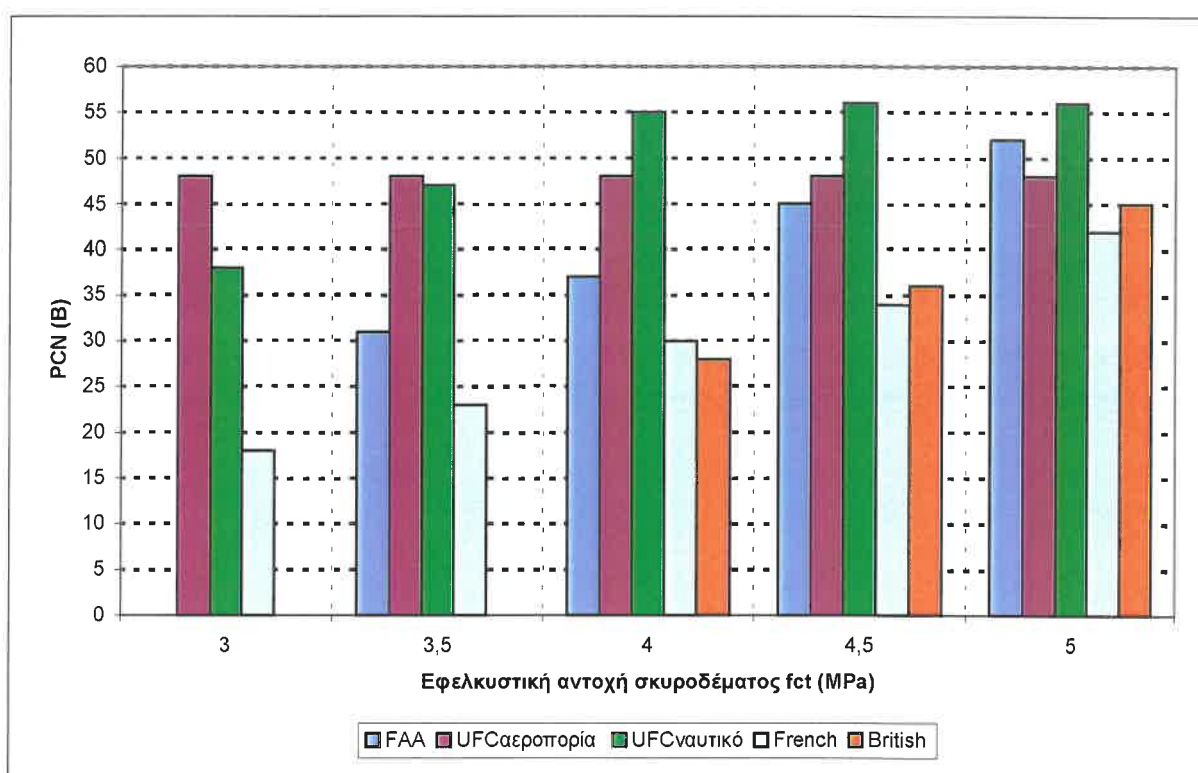
Διάγραμμα Π5.6. Επιρροή μεταβολής του πάχους της υπόβασης στον υπολογισμό του PCN με διάφορες μεθόδους ($H_{\text{σκυροδέματος}}=35\text{cm}$, $K=50\text{KN/m}^2$, $f_{ct}=4\text{Mpa}$)



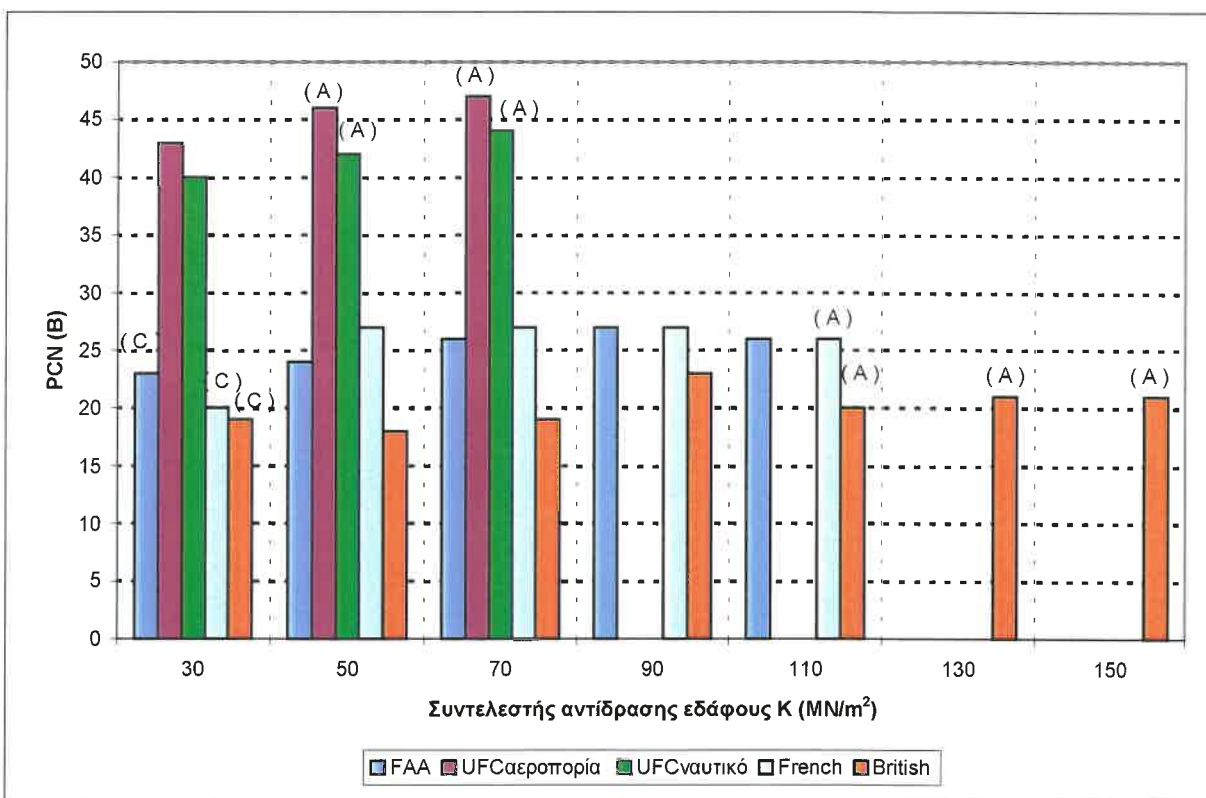
Διάγραμμα Π5.7. Επιρροή μεταβολής του πάχους της υπόβασης στον υπολογισμό του PCN με διάφορες μεθόδους ($H_{\text{σκυροδέματος}}=30\text{cm}$, $K=50\text{KN/m}^2$, $f_{ct}=5\text{MPa}$)



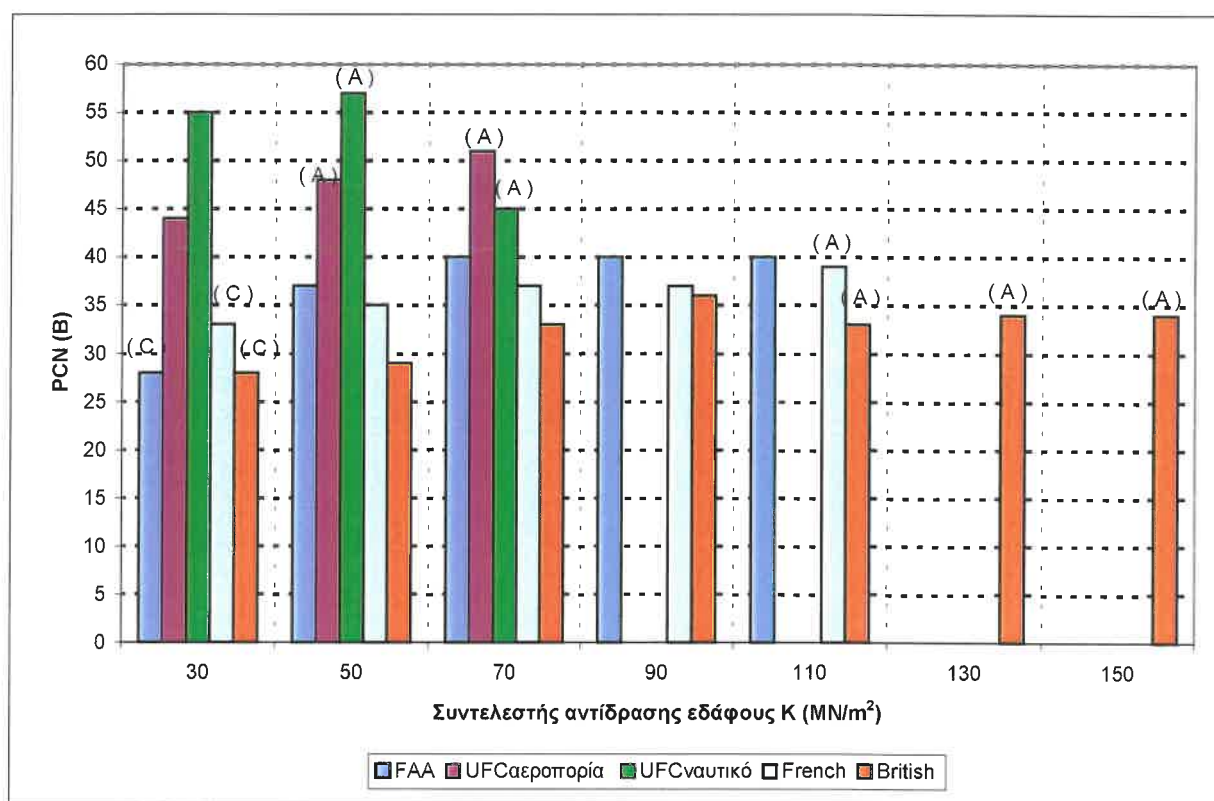
Διάγραμμα Π5.8. Επιρροή μεταβολής της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος στον υπολογισμό του PCN με διάφορες μεθόδους ($H_{\text{σκυροδέματος}}=30\text{cm}$, $H_{\text{υπόβασης}}=30\text{cm}$, $K=70\text{KN/m}^2$)



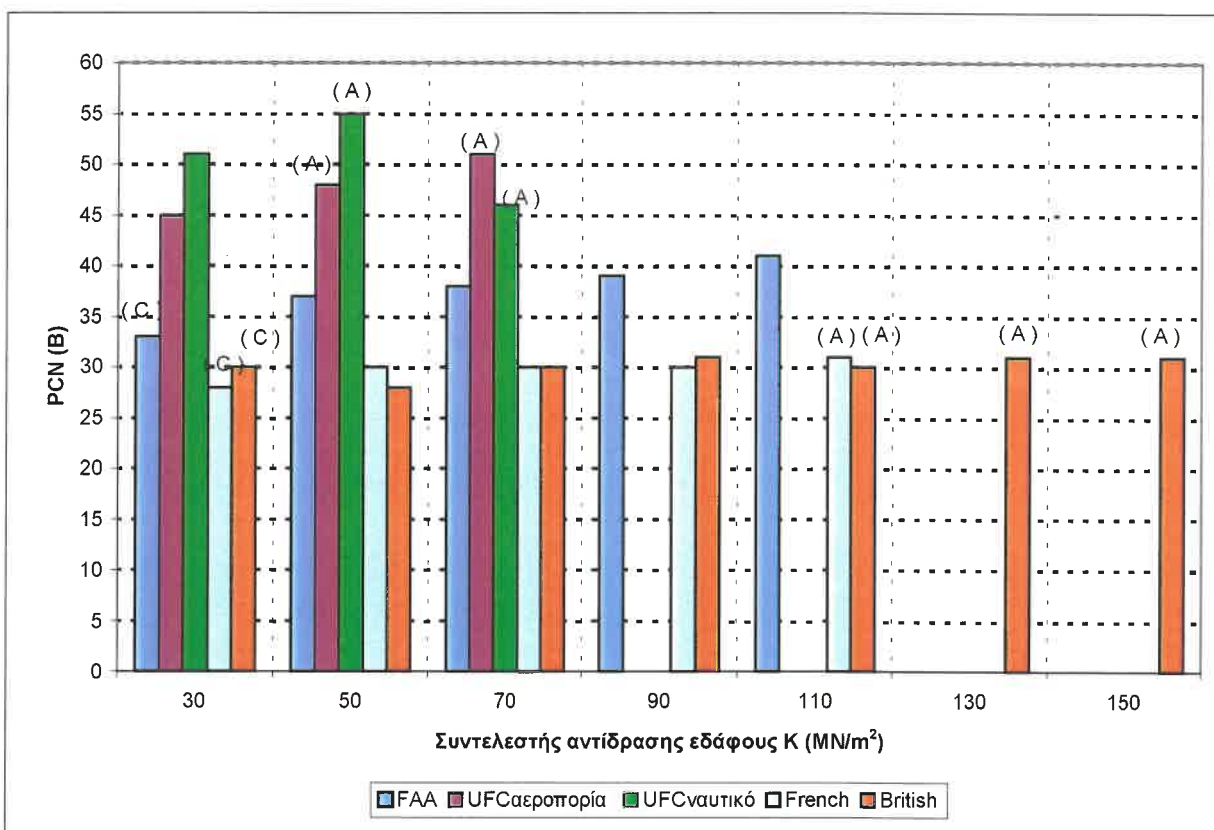
Διάγραμμα Π5.9. Επιρροή μεταβολής της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος στον υπολογισμό του PCN με διάφορες μεθόδους ($H_{\text{σκυροδέματος}}=35\text{cm}$, $H_{\text{υπόβασης}}=30\text{cm}$, $K=50\text{KN/m}^2$)



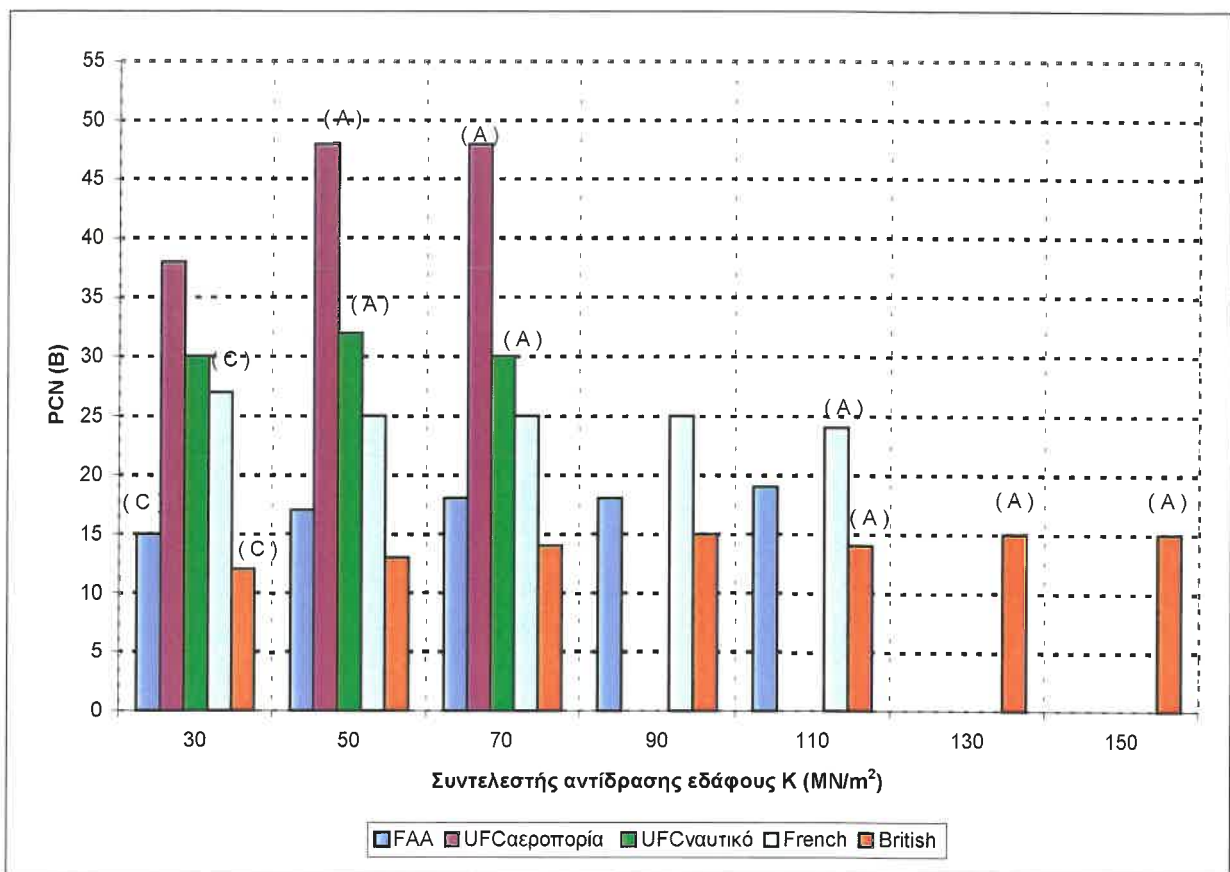
Διάγραμμα Π5.10. Επιρροή μεταβολής του συντελεστή αντίδρασης εδάφους στον υπολογισμό του PCN με διάφορες μεθόδους ($H_{\text{σκυροδέματος}}=30\text{cm}$, $H_{\text{υπόβασης}}=25\text{cm}$, $f_{ct}=4\text{MPa}$)



Διάγραμμα Π5.11. Επιρροή μεταβολής του συντελεστή αντίδρασης εδάφους στον υπολογισμό του PCN με διάφορες μεθόδους ($H_{\text{σκυροδέματος}}=30\text{cm}$, $H_{\text{υπόβασης}}=30\text{cm}$, $f_{ct}=5\text{Mpa}$)

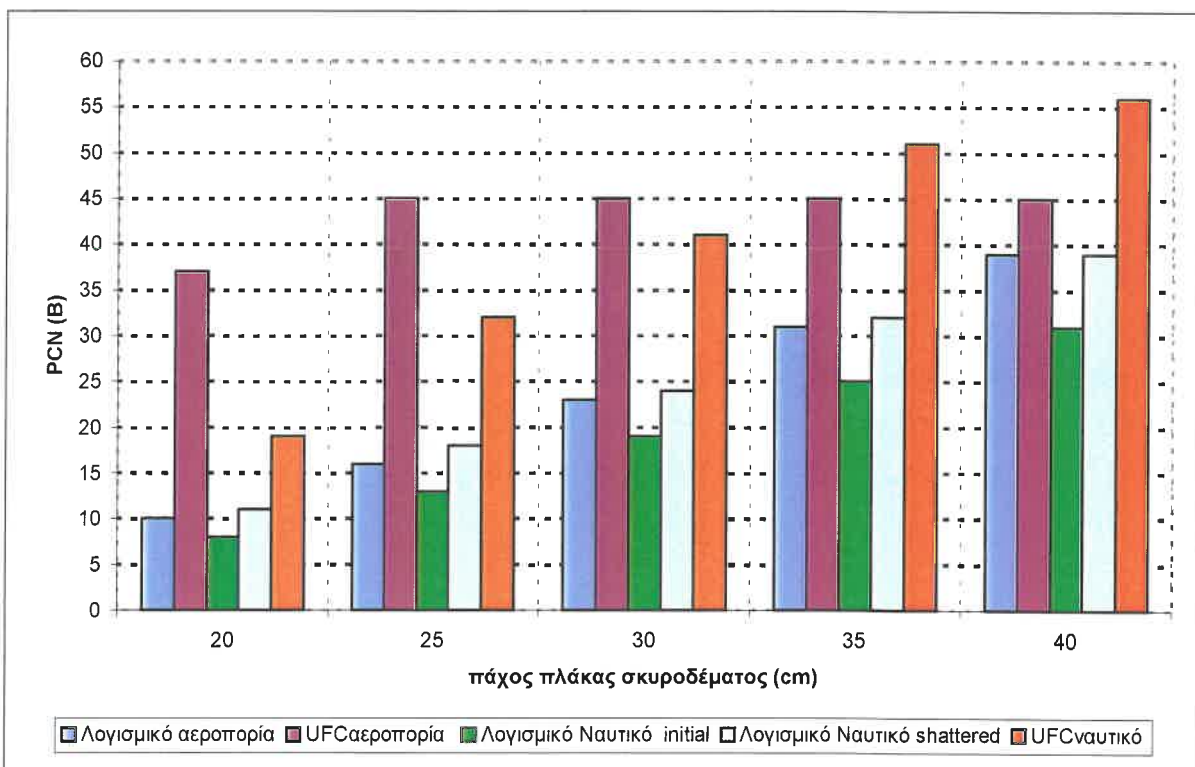


Διάγραμμα Π5.12. Επιρροή μεταβολής του συντελεστή αντίδρασης εδάφους στον υπολογισμό του PCN με διάφορες μεθόδους ($H_{\text{σκυροδέματος}}=35\text{cm}$, $H_{\text{υπόβασης}}=30\text{cm}$, $f_{ct}=4\text{Mpa}$)

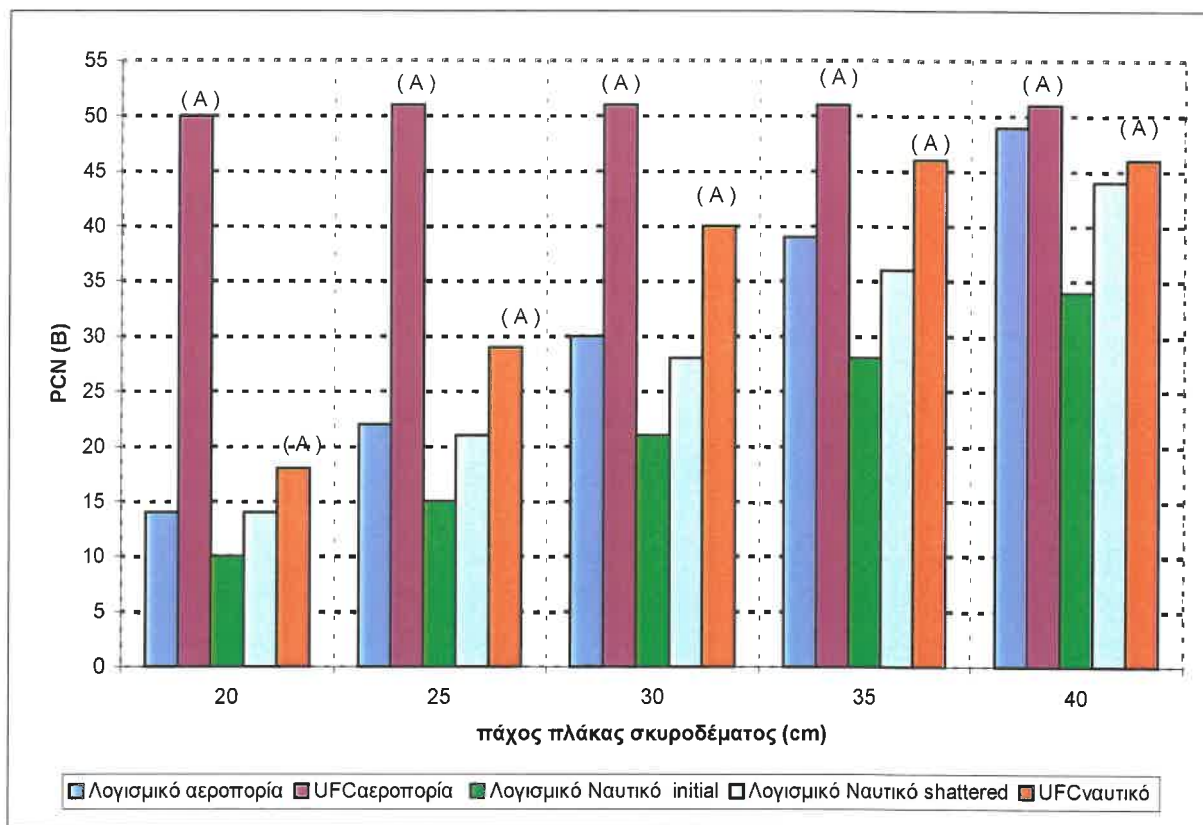


Διάγραμμα Π5.13. Επιρροή μεταβολής του συντελεστή αντίδρασης εδάφους στον υπολογισμό του PCN με διάφορες μεθόδους ($H_{\text{σκυροδέματος}}=25\text{cm}$, $H_{\text{υποβάσης}}=30\text{cm}$, $f_{ct}=4\text{Mpa}$)

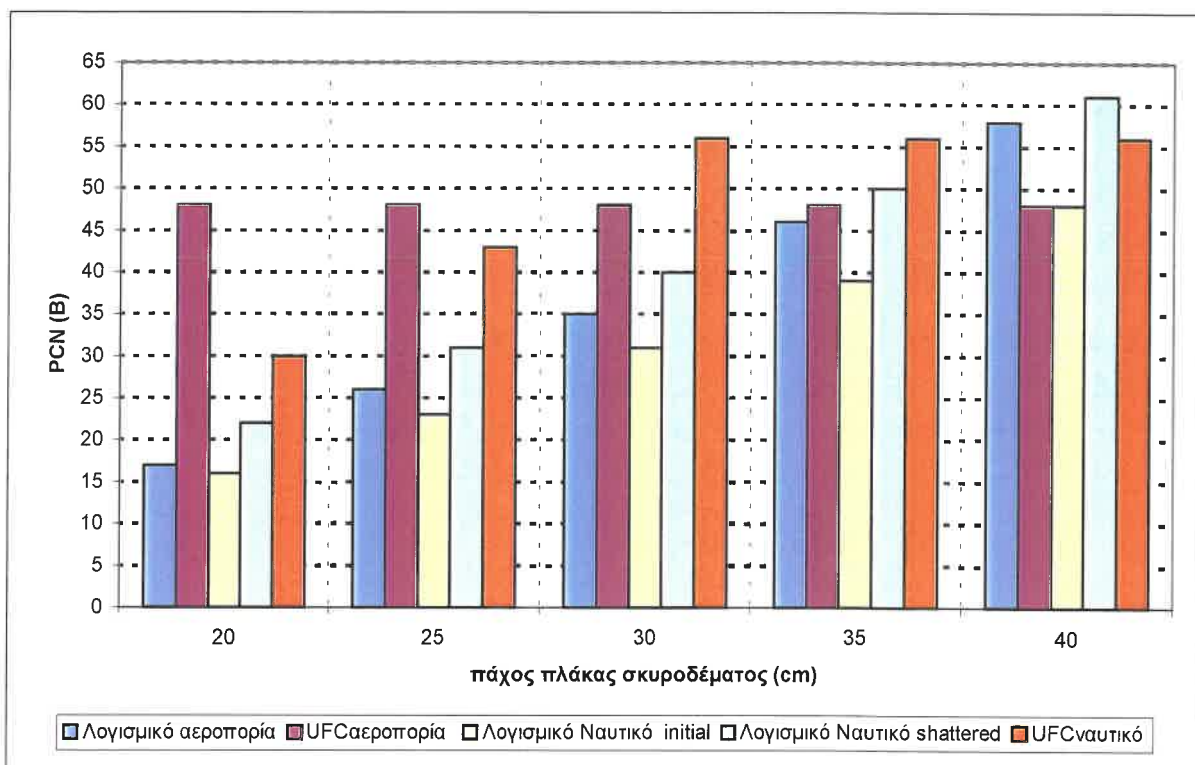
Παράρτημα 6° : Αποτελέσματα συγκριτικής ανάλυσης λογισμικού και διαγραμμάτων της UFC



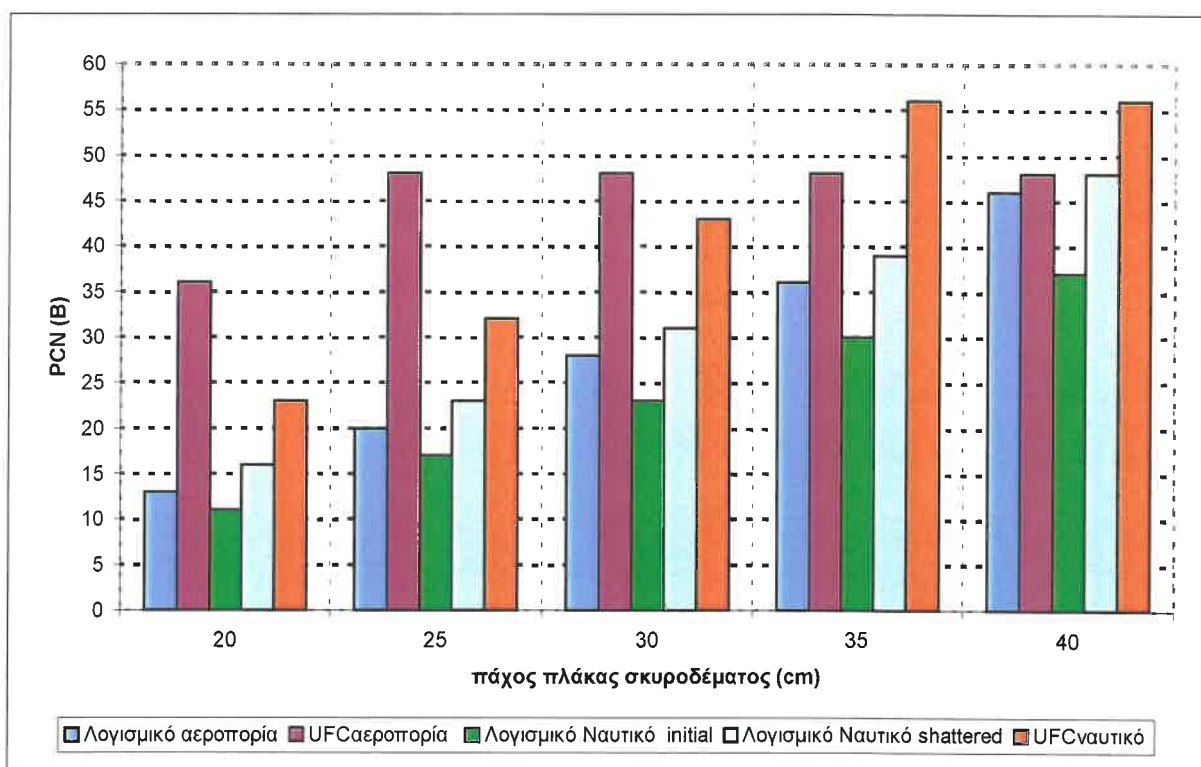
Διάγραμμα Π6.1. Σύγκριση αποτελεσμάτων λογισμικού-διαγραμμάτων UFC κατά τη διερεύνηση της επιρροής της μεταβολής του πάχους σκυροδέματος ($H_{\text{υπόβασης}}=30\text{cm}, K=30\text{KN/m}^2, f_{ct}=4\text{Mpa}$)



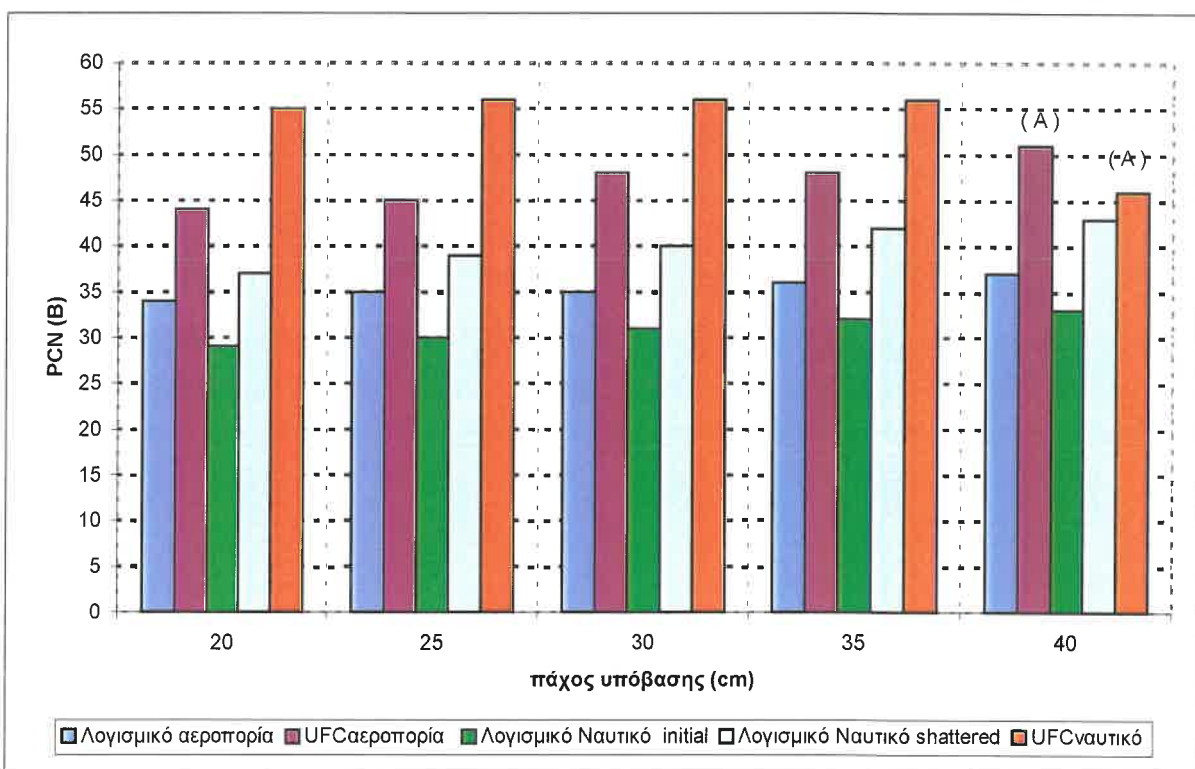
Διάγραμμα Π6.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων λογισμικού-διαγραμμάτων UFC κατά τη διερεύνηση της επιρροής της μεταβολής του πάχους σκυροδέματος ($H_{\text{υπόβασης}}=30\text{cm}, K=70\text{KN/m}^2, f_{ct}=4\text{Mpa}$)



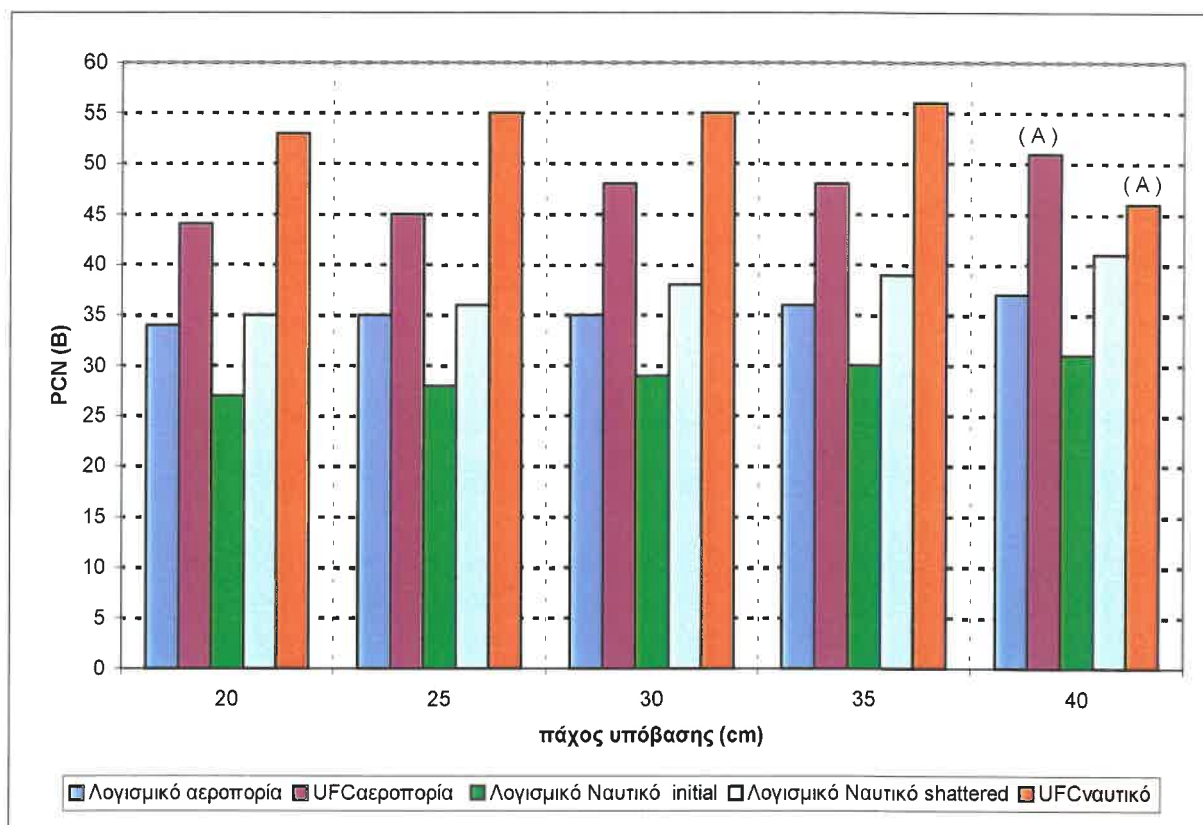
Διάγραμμα Π6.3. Σύγκριση αποτελεσμάτων λογισμικού-διαγραμμάτων UFC κατά τη διερεύνηση της επιρροής της μεταβολής του πάχους σκυροδέματος ($H_{\text{υπόβασης}} = 30\text{cm}$, $K = 50\text{KN/m}^2$, $f_{ct} = 5\text{MPa}$)



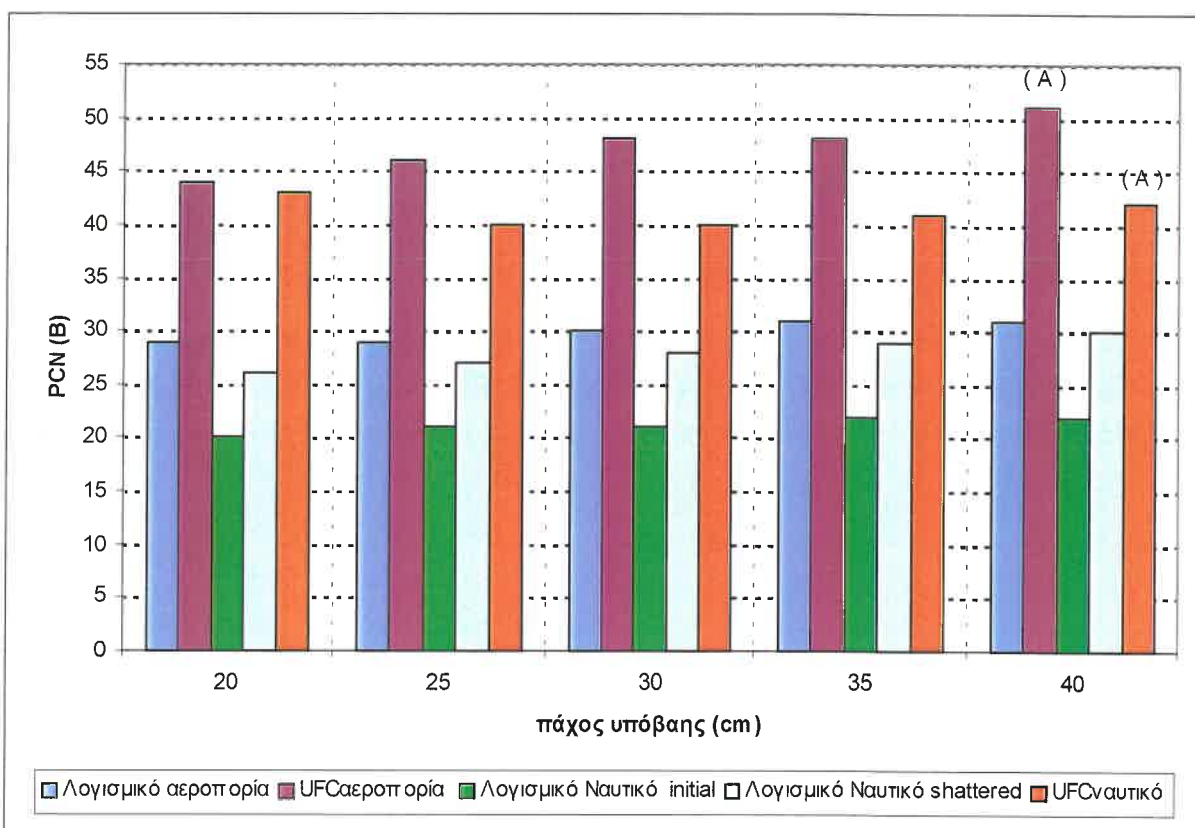
Διάγραμμα Π6.4. Σύγκριση αποτελεσμάτων λογισμικού-διαγραμμάτων UFC κατά τη διερεύνηση της επιρροής της μεταβολής του πάχους σκυροδέματος ($H_{\text{υπόβασης}} = 35\text{cm}$, $K = 50\text{KN/m}^2$, $f_{ct} = 4\text{MPa}$)



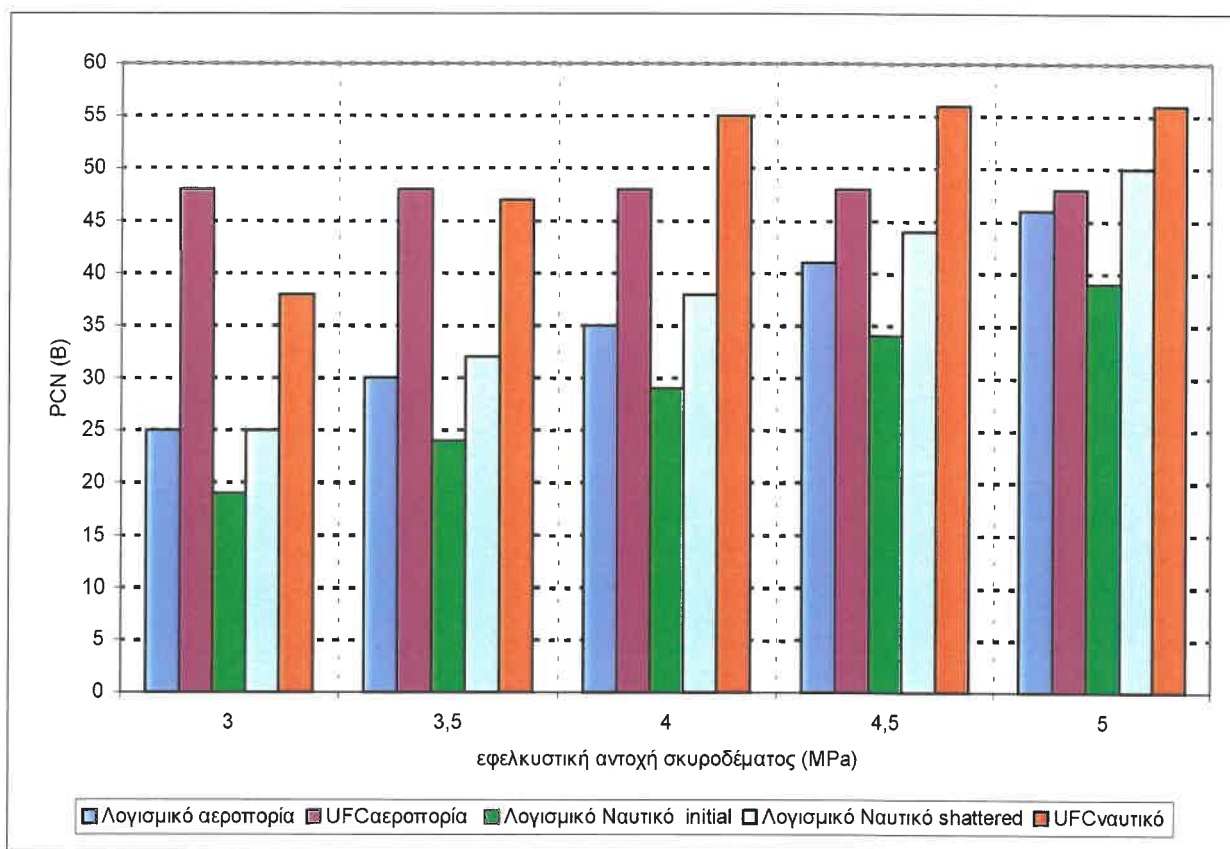
Διάγραμμα Π6.5. Σύγκριση αποτελεσμάτων λογισμικού-διαγραμμάτων UFC κατά τη διερεύνηση της επιρροής της μεταβολής του πάχους υπόβασης ($H_{\text{σκυροδέματος}}=30\text{cm}, K=50\text{KN/m}^2, f_{ct}=5\text{Mpa}$)



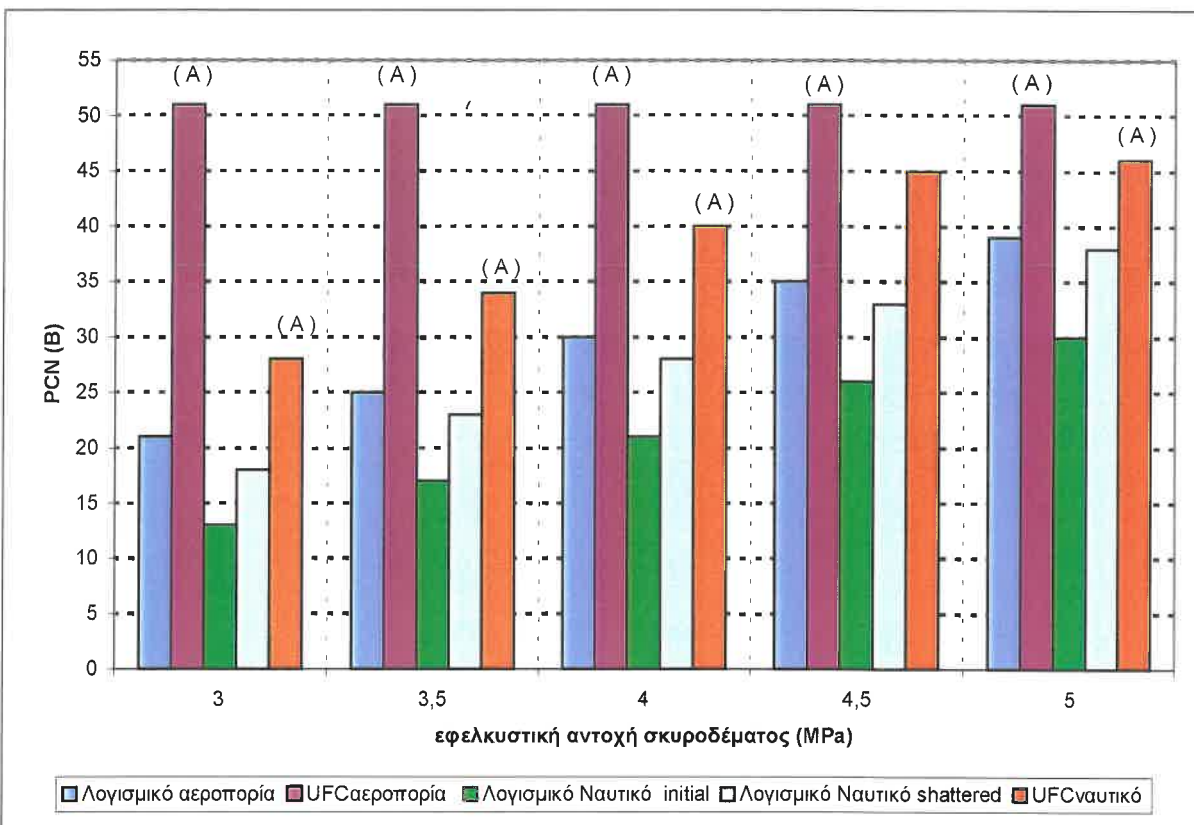
Διάγραμμα Π6.6. Σύγκριση αποτελεσμάτων λογισμικού-διαγραμμάτων UFC κατά τη διερεύνηση της επιρροής της μεταβολής του πάχους υπόβασης ($H_{\text{σκυροδέματος}}=35\text{cm}, K=50\text{KN/m}^2, f_{ct}=4\text{Mpa}$)



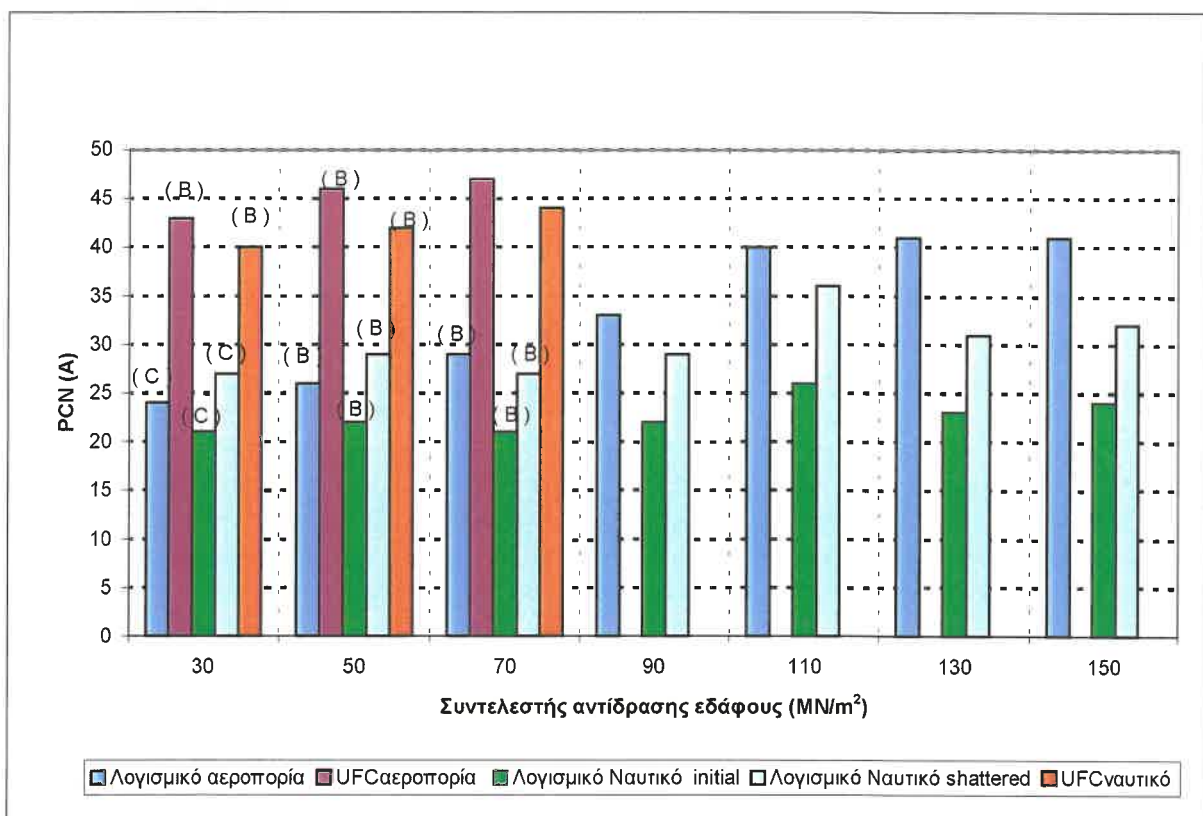
Διάγραμμα Π6.7. Σύγκριση αποτελεσμάτων λογισμικού-διαγραμμάτων UFC κατά τη διερεύνηση της επιρροής της μεταβολής του πάχους υπόβασης ($H_{\text{σκυροδέματος}}=30\text{cm}, K=70\text{KN/m}^2, f_{ct}=4\text{MPa}$)



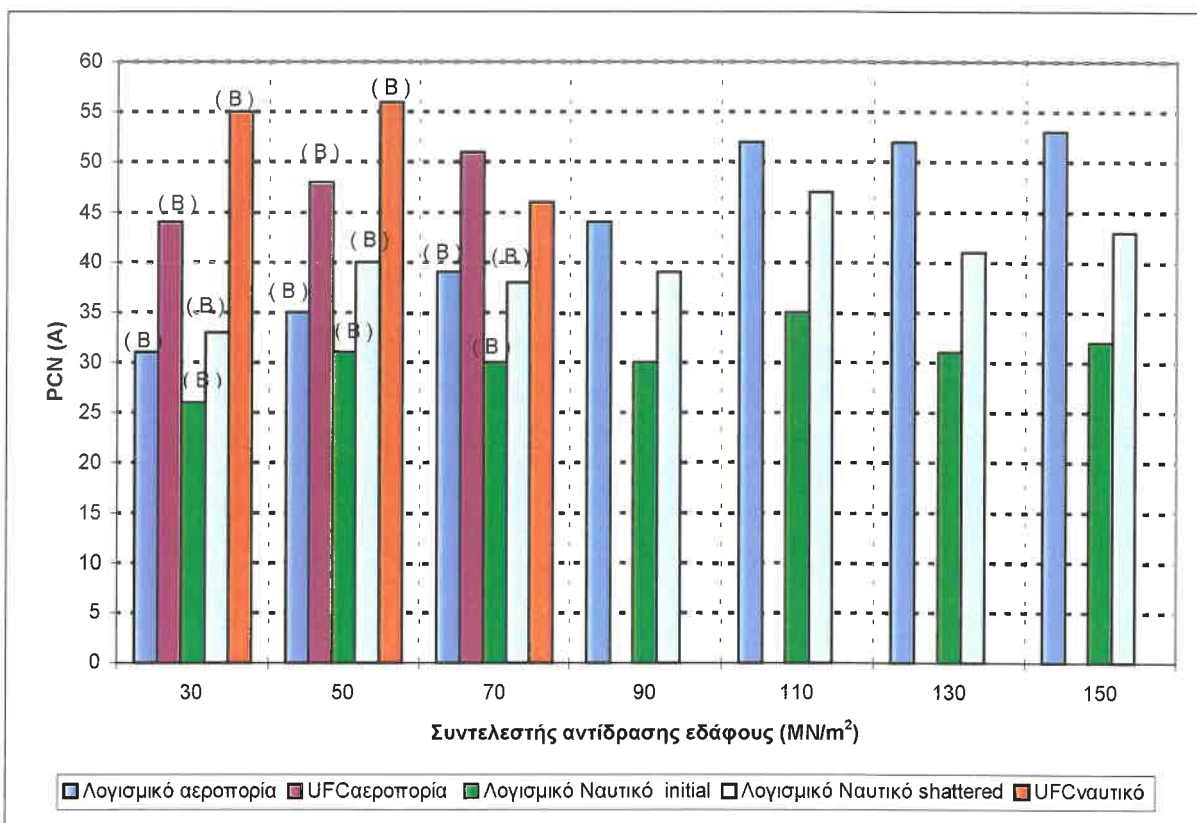
Διάγραμμα Π6.8. Σύγκριση αποτελεσμάτων λογισμικού-διαγραμμάτων UFC κατά τη διερεύνηση της επιρροής της μεταβολής της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος ($H_{\text{σκυροδέματος}}=35\text{cm}, H_{\text{υπόβασης}}=30\text{cm}, K=50\text{KN/m}^2$)



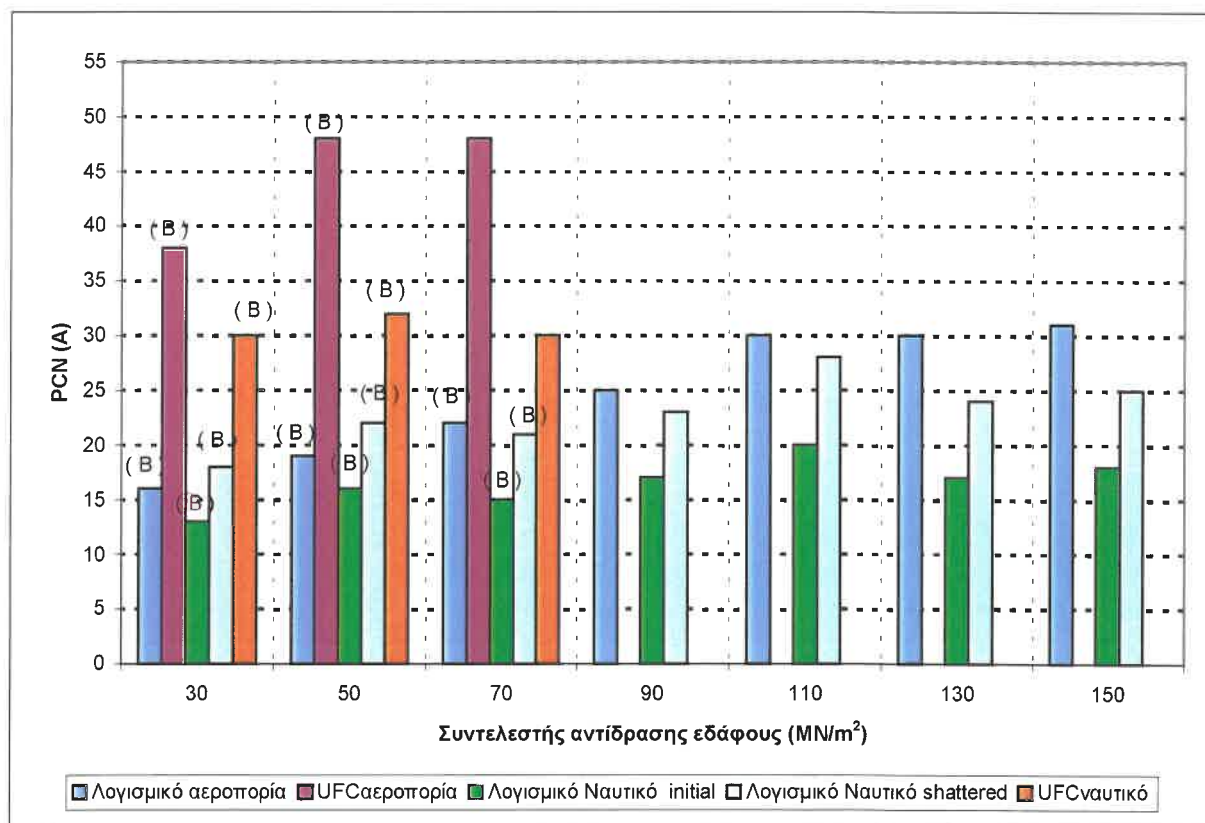
Διάγραμμα Π6.9. Σύγκριση αποτελεσμάτων λογισμικού-διαγραμμάτων UFC κατά τη διερεύνηση της επιρροής της μεταβολής της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος ($H_{\text{σκυροδέματος}}=30\text{cm}$, $H_{\text{υπόβασης}}=30\text{cm}$, $K=70\text{KN/m}^2$)



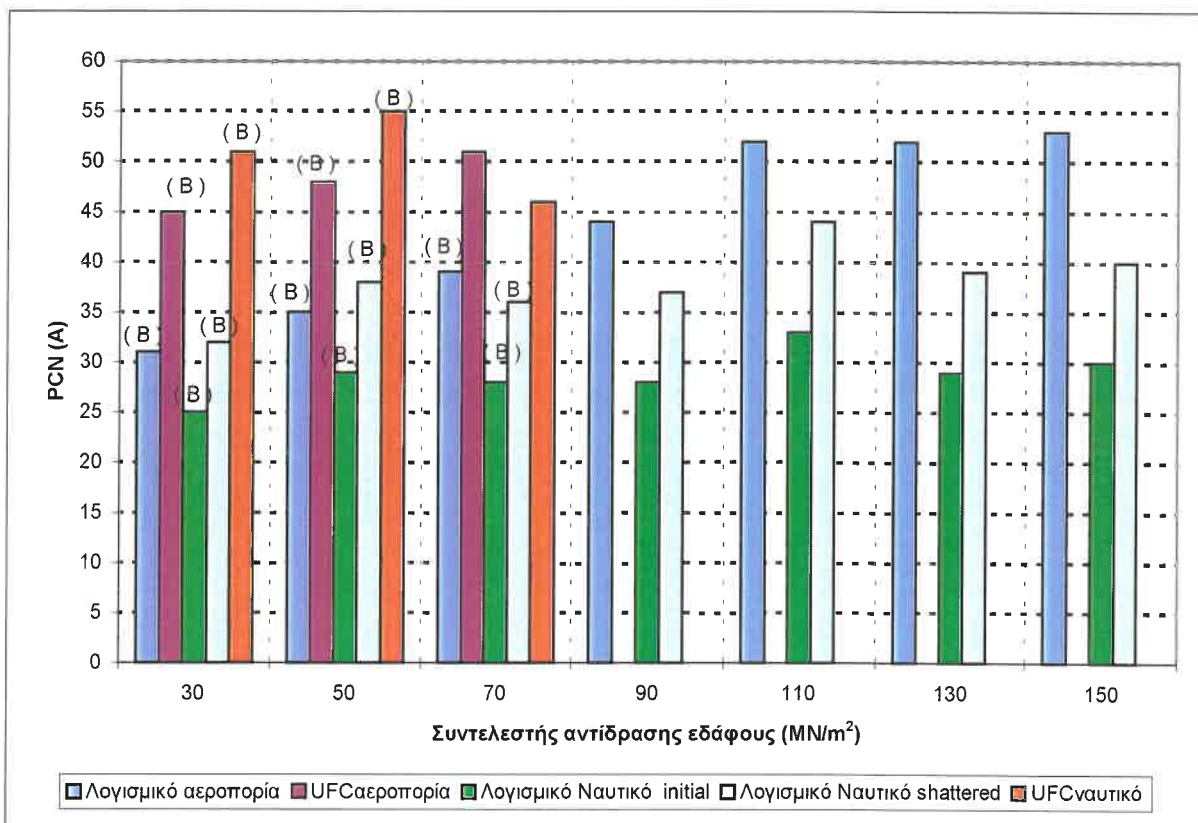
Διάγραμμα Π6.10. Σύγκριση αποτελεσμάτων λογισμικού-διαγραμμάτων UFC κατά τη διερεύνηση της επιρροής της μεταβολής του συντελεστή αντίδρασης εδάφους K ($H_{\text{σκυροδέματος}}=30\text{cm}$, $H_{\text{υπόβασης}}=25\text{cm}$, $f_{ct}=4\text{MPa}$)



Διάγραμμα Π6.11. Σύγκριση αποτελεσμάτων λογισμικού-διαγραμμάτων UFC κατά τη διερεύνηση της επιρροής της μεταβολής του συντελεστή αντίδρασης εδάφους K ($H_{\text{σκυροδέματος}}=30\text{cm}$, $H_{\text{υπόβασης}}=30\text{cm}$, $f_{ct}=5\text{MPa}$)



Διάγραμμα Π6.12. Σύγκριση αποτελεσμάτων λογισμικού-διαγραμμάτων UFC κατά τη διερεύνηση της επιρροής της μεταβολής του συντελεστή αντίδρασης εδάφους K ($H_{\text{σκυροδέματος}}=25\text{cm}$, $H_{\text{υπόβασης}}=30\text{cm}$, $f_{ct}=4\text{MPa}$)



Διάγραμμα Π6.13. Σύγκριση αποτελεσμάτων λογισμικού-διαγραμμάτων UFC κατά τη διερεύνηση της επιρροής της μεταβολής του συντελεστή αντίδρασης εδάφους K ($H_{\text{σκυροδέματος}}=35\text{cm}$, $H_{\text{υπόβασης}}=30\text{cm}$, $f_{ct}=4\text{Mpa}$)

Παράρτημα 7^ο :Αποτελέσματα αναλύσεων 8^{ου} και 9^{ου} κεφαλαίου

Π7.1.Σχέση μονού τροχού (DSWL) και πραγματικού συστήματος

Για τη σύγκριση της έντασης από το μονό τροχό (DSWL) και του πραγματικού συστήματος χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες διατομές:

Διατομή	Σκυρόδεμα		Υπόβαση			Στρώση έδρασης	
	E (Mpa)	πάχος (mm)	E (Mpa)	ν	πάχος (mm)	E (Mpa)	ν
1	30000	200	250	0,4	300	80	0,45
2	30000	300	250	0,4	300	80	0,45
3	30000	400	250	0,4	300	80	0,45
4	30000	200	250	0,4	200	70	0,45
5	30000	300	250	0,4	200	70	0,45
6	30000	400	250	0,4	200	70	0,45
7	30000	200	200	0,4	400	60	0,45
8	30000	300	200	0,4	400	60	0,45
9	30000	400	200	0,4	400	60	0,45
10	30000	250	250	0,4	250	80	0,45
11	30000	350	250	0,4	250	80	0,45
12	30000	200	200	0,4	300	90	0,45
13	30000	300	200	0,4	300	90	0,45
14	30000	400	200	0,4	300	90	0,45
15	30000	350	300	0,4	400	90	0,45
16	30000	200	250	0,4	300	50	0,45
17	30000	300	250	0,4	300	50	0,45
18	30000	400	250	0,4	300	50	0,45
19	30000	300	250	0,4	300	100	0,45
20	30000	400	250	0,4	300	100	0,45

Πίνακας Π7.1.Διατομές οδοστρωμάτων για τη σύγκριση έντασης μονού τροχού (DSWL) και πραγματικού συστήματος

Οι ίδιες διατομές επιλύονται και για την περίπτωση όπου ο λόγος του Poisson τόσο της στρώσης έδρασης όσο και της υπόβασης είναι 0,35, καθώς και για μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος 20000Mpa και 25000Mpa.

Τα αποτελέσματα για τέσσερα α/φ:

Διατομή	B767-300		A300-600		B747-200C		A300-B4	
	σ _{μον.}	σ _{πραγμ}	σ _{μον.}	σ _{πραγμ}	σ _{μον.}	σ _{πραγμ}	σ _{μον.}	σ _{πραγμ}
1	4,96	4,41	5,71	4,83	5,71	4,99	5,48	4,78
2	2,82	2,97	3,30	3,31	3,30	3,27	3,15	3,21
3	1,80	2,17	2,13	2,41	2,13	2,39	2,03	2,31
4	5,94	4,72	6,69	5,22	6,82	5,32	6,47	5,16
5	3,37	3,16	3,85	3,53	3,93	3,47	3,71	3,42
6	2,16	2,29	2,49	2,55	2,55	2,53	2,39	2,44
7	5,87	4,73	6,61	5,22	6,74	5,34	6,40	5,15
8	3,37	3,21	3,85	3,57	3,93	3,52	3,71	3,46
9	2,17	2,34	2,51	2,59	2,56	2,59	2,41	2,48
10	3,71	3,61	4,31	4,01	4,31	4,02	4,13	3,93
11	2,24	2,54	2,64	2,84	2,64	2,79	2,52	2,74
12	4,99	4,37	5,74	4,78	5,74	4,95	5,51	4,73
13	2,81	2,91	3,29	3,24	3,29	3,21	3,14	3,16
14	1,79	2,12	2,12	2,36	2,12	2,33	2,02	2,27
15	2,14	2,35	2,51	2,62	2,51	2,59	2,40	2,53
16	6,05	5,04	6,83	5,58	6,96	5,63	6,60	5,49
17	3,47	3,41	3,96	3,79	4,04	3,74	3,82	3,67
18	2,23	2,47	2,57	2,73	2,63	2,76	2,47	2,62
19	2,74	2,78	3,20	3,1	3,20	3,08	3,05	3,01
20	1,75	2,03	2,07	2,27	2,07	2,23	1,97	2,18

Πίνακας Π7.2. Τάσεις λόγω μονού τροχού (DSWL) και πραγματικού συστήματος

Διατομή	B767-300		A300-600		B747-200C		A300-B4	
	σ _{μον.}	σ _{πραγμ}	σ _{μον.}	σ _{πραγμ}	σ _{μον.}	σ _{πραγμ}	σ _{μον.}	σ _{πραγμ}
1	141	126	163	138	163	143	156	137
2	80	85	94	95	94	93	90	92
3	51	62	61	69	61	70	58	66
4	169	134	190	149	194	152	184	148
5	96	90	109	101	112	99	105	98
6	61	65	71	73	72	73	68	70
7	167	135	188	149	192	152	182	147
8	96	92	109	102	112	101	105	99
9	62	67	71	74	73	75	68	71
10	106	103	123	115	123	114	117	113
11	64	73	75	81	75	80	72	79
12	142	125	163	136	163	141	157	135
13	80	83	94	93	94	91	89	90
14	51	61	60	68	60	67	57	65
15	61	67	71	75	71	74	68	72
16	172	144	194	159	198	160	188	157
17	98	97	113	109	115	107	108	105
18	63	70	73	78	75	79	70	75
19	78	79	91	89	91	88	87	87
20	50	58	59	65	59	64	56	63

Πίνακας Π7.3.Οριζόντιες ανηγμένες παραμορφώσεις λόγω μονού τροχού (ACN) και πραγματικού συστήματος

Για τη σύγκριση της έντασης για άλλες τιμές του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος χρησιμοποιούνται οι 9 πρώτες διατομές που χρησιμοποιήθηκαν προηγουμένως. Τα αποτελέσματα για μέτρο ελαστικότητας 25000MPa και 20000MPa είναι:

Διατομή	B737-400		A300-600		B747-200C	
	σ _{μον.}	σ _{πραγμ}	σ _{μον.}	σ _{πραγμ}	σ _{μον.}	σ _{πραγμ}
1	4,31	4,42	5,08	4,16	5,08	4,32
2	2,50	2,70	3,01	2,83	3,01	2,83
3	1,61	1,80	1,97	2,10	1,97	2,07
4	4,71	4,73	5,98	4,46	6,08	4,63
5	2,70	2,84	3,52	3,04	3,60	3,02
6	1,73	1,88	2,31	2,23	2,36	2,20
7	4,64	4,65	5,87	4,45	5,97	4,62
8	2,69	2,83	3,51	3,06	3,58	3,04
9	1,73	1,88	2,32	2,26	2,37	2,24

Πίνακας Π7.4.Τάσεις μονού τροχού (DSWL) και πραγματικού συστήματος για Εσκυροδέματος 20000Μpa

Διατομή	B737-400		A300-600		B747-200C	
	ε _{μον.}	ε _{πραγμ}	ε _{μον.}	ε _{πραγμ}	ε _{μον.}	ε _{πραγμ}
1	184	195	217	179	217	186
2	107	120	129	122	129	121
3	69	80	84	90	84	89
4	201	211	255	191	260	199
5	115	126	150	131	153	129
6	74	83	98	96	101	95
7	198	207	251	191	255	198
8	115	126	150	132	153	130
9	74	84	99	97	101	97

Πίνακας Π7.5.Οριζόντιες ανηγμένες παραμορφώσεις μονού τροχού (DSWL) και πραγματικού συστήματος για Εσκυροδέματος 20000ΜPa

Διατομή	B737-400		A300-600		B747-200C	
	σ _{μον.}	σ _{πραγμ}	σ _{μον.}	σ _{πραγμ}	σ _{μον.}	σ _{πραγμ}
1	4,59	4,75	5,43	4,52	5,43	4,68
2	2,63	2,86	3,17	3,09	3,17	3,07
3	1,68	1,89	2,06	2,27	2,06	2,24
4	4,94	5,07	6,37	4,86	6,49	5,00
5	2,83	3,00	3,70	3,31	3,78	3,26
6	1,80	1,97	2,41	2,40	2,46	2,38
7	4,93	5,04	6,28	4,84	6,40	5,00
8	2,82	3,00	3,70	3,34	3,78	3,30
9	1,81	1,98	2,42	2,44	2,48	2,43

Πίνακας Π7.6.Τάσεις μονού τροχού (DSWL) και πραγματικού συστήματος για Εσκυροδέματος 25000Μpa

Διατομή	B737-400		A300-600		B747-200C	
	ε _{μον.}	ε _{πραγμ}	ε _{μον.}	ε _{πραγμ}	ε _{μον.}	ε _{πραγμ}
1	157	170	185	155	185	161
2	90	102	108	106	108	105
3	57	67	70	78	70	77
4	170	181	217	166	222	171
5	96	106	126	114	129	112
6	61	70	82	83	84	82
7	168	178	214	165	218	172
8	96	106	126	115	129	113
9	62	70	83	84	84	84

Πίνακας Π7.7.Οριζόντιες ανηγμένες παραμορφώσεις μονού τροχού (DSWL) και πραγματικού συστήματος για μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος 25000ΜPa

Π7.2.Σχέση τάσεων και παραμορφώσεων μονού τροχού (DSWL) και πραγματικού συστήματος σε διατομές με πάχος σκυροδέματος ίσο με το πάχος αναφοράς

Τα αποτελέσματα για μέτρο ελαστικότητας 20000MPa και 25000MPa:

Α/Φ	Βάρος (Kg)	Κατηγορία εδαφικής αντοχής Β						
		πάχος πλάκας	Poisson Υπόβασης	Ε υπόβασης	σ _{πραγμ} (Μpa)	σ _{μον} (Μpa)	ε _{πραγμ} (micro)	ε _{μον} (micro)
B707-320C	143000	315	0,45	100	2,71	2,49	93	85
B727-200	77100	318	0,45	100	2,90	2,67	103	91
B737-200	52610	254	0,45	100	2,78	2,62	98	89
B737-200ADV	58330	269	0,45	100	2,87	2,77	101	94
B737-400	64850	310	0,45	100	2,76	2,56	99	87
B747-200C	373300	338	0,45	100	2,66	2,71	91	92
B757-200	109300	272	0,45	100	2,39	2,49	82	85
B767-300	159650	315	0,45	100	2,61	2,58	89	87

Πίνακας Π7.8.Σύγκριση τάσεων και οριζοντίων ανηγμένων παραμορφώσεων πραγματικού συστήματος και μονού τροχού σε διατομές με πάχος σκυροδέματος ίσο με το πάχος αναφοράς (Εσκυροδέματος 25000MPa)

Α/Φ	Βάρος (Kg)	Κατηγορία εδαφικής αντοχής C						
		πάχος πλάκας	Poisson Υπόβασης	Ε υπόβασης	σ _{πραγμ} (Μpa)	σ _{μον} (Μpa)	ε _{πραγμ} (micro)	ε _{μον} (micro)
B707-320C	143000	356	0,45	60	2,77	2,38	95	81
B727-200	77100	333	0,45	60	3,02	2,57	107	87
B737-200	52610	274	0,45	60	2,78	2,46	98	84
B737-200ADV	58330	290	0,45	60	2,86	2,57	101	88
B737-400	64850	328	0,45	60	2,84	2,42	100	82
B747-200C	373300	385	0,45	60	2,69	2,55	93	87
B757-200	109300	310	0,45	60	2,45	2,32	84	79
B767-300	159650	360	0,45	60	2,65	2,41	91	82

Πίνακας Π7.9.Σύγκριση τάσεων και οριζοντίων ανηγμένων παραμορφώσεων πραγματικού συστήματος και μονού τροχού σε διατομές με πάχος σκυροδέματος ίσο με το πάχος αναφοράς (Εσκυροδέματος 25000MPa)

Α/Φ	Βάρος (Kg)	Κατηγορία Β						
		πάχος πλάκας	Poisson Υπόβασης	Ε υπόβασης	σ _{πραγμ} (Μpa)	σ _{μον} (Μpa)	ε _{πραγμ} (micro)	ε _{μον} (micro)
B707-320C	143000	315	0,45	100	2,51	2,40	108	102
B727-200	77100	318	0,45	100	2,75	2,57	122	109
B737-200	52610	254	0,45	100	2,64	2,52	117	107
B737-200ADV	58330	269	0,45	100	2,72	2,66	121	113
B737-400	64850	310	0,45	100	2,63	2,46	118	105
B747-200C	373300	338	0,45	100	2,49	2,60	106	111
B757-200	109300	272	0,45	100	2,22	2,40	95	102
B767-300	159650	315	0,45	100	2,42	2,48	104	106

Πίνακας Π7.10.Σύγκριση τάσεων και οριζοντίων ανηγμένων παραμορφώσεων πραγματικού συστήματος και μονού τροχού σε διατομές με πάχος σκυροδέματος ίσο με το πάχος αναφοράς (Εσκυροδέματος 20000MPa)

Α/Φ	Βάρος (Kg)	Κατηγορία C						
		πάχος πλάκας	Poisson Υπόβασης	Ε υπόβασης	σ _{πραγμ} (Mpa)	σ _{μον} (Mpa)	ε _{πραγμ} (micro)	ε _{μον} (micro)
B707-320C	143000	356	0,45	60	2,59	2,29	111	98
B727-200	77100	333	0,45	60	2,89	2,47	128	105
B737-200	52610	274	0,45	60	2,66	2,37	117	101
B737-200ADV	58330	290	0,45	60	2,73	2,47	121	106
B737-400	64850	328	0,45	60	2,72	2,33	120	99
B747-200C	373300	385	0,45	60	2,51	2,45	108	104
B757-200	109300	310	0,45	60	2,28	2,23	98	95
B767-300	159650	360	0,45	60	2,47	2,32	106	99

Πίνακας Π7.11. Σύγκριση τάσεων και οριζοντίων ανηγμένων παραμορφώσεων πραγματικού συστήματος και μονού τροχού σε διατομές με πάχος σκυροδέματος ίσο με το πάχος αναφοράς (Εσκυροδέματος 20000MPa)

Π7.3. Σχέση τάσεων και παραμορφώσεων μονού τροχού (ALI) και πραγματικού συστήματος

Για τη σύγκριση της εντατικής κατάστασης μονού τροχού (ALI) και πραγματικού συστήματος χρησιμοποιούμε τις παρακάτω διατομές, ενώ για τη σύγκριση για μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος 25000MPa και 20000MPa χρησιμοποιούμε μόνο τις εννέα πρώτες:

Διατομή	Σκυρόδεμα		Υπόβαση			Στρώση έδρασης	
	E (Mpa)	πάχος (mm)	E (Mpa)	ν	πάχος (mm)	E (Mpa)	ν
1	30000	200	250	0,4	300	80	0,45
2	30000	300	250	0,4	300	80	0,45
3	30000	400	250	0,4	300	80	0,45
4	30000	200	250	0,4	200	70	0,45
5	30000	300	250	0,4	200	70	0,45
6	30000	400	250	0,4	200	70	0,45
7	30000	200	200	0,4	400	60	0,45
8	30000	300	200	0,4	400	60	0,45
9	30000	400	200	0,4	400	60	0,45
10	30000	250	250	0,4	250	80	0,45
11	30000	350	250	0,4	250	80	0,45
12	30000	200	200	0,4	300	90	0,45
13	30000	300	200	0,4	300	90	0,45
14	30000	400	200	0,4	300	90	0,45
15	30000	350	300	0,4	400	90	0,45
16	30000	200	250	0,4	300	50	0,45
17	30000	300	250	0,4	300	50	0,45
18	30000	400	250	0,4	300	50	0,45
19	30000	300	250	0,4	300	100	0,45
20	30000	400	250	0,4	300	100	0,45

Πίνακας Π7.12. Διατομές οδοστρωμάτων

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι:

Διατομή	MD-83		B767-300		A300-600		B747-200C		A300-B4	
	σ _{πραγμ.}	σ _{μον.}	σ _{πραγμ.}	σ _{μον.}	σ _{πραγμ.}	σ _{μον.}	σ _{πραγμ.}	σ _{μον.}	σ _{πραγμ.}	σ _{μον.}
1	5,34	5,97	4,41	5,72	4,83	6,39	4,99	6,30	4,78	6,18
2	3,17	3,36	2,97	3,22	3,31	3,60	3,27	3,55	3,21	3,48
3	2,10	2,13	2,17	2,04	2,41	2,28	2,39	2,25	2,31	2,20
4	5,69	6,28	4,72	6,01	5,22	6,72	5,32	6,62	5,16	6,49
5	3,32	3,48	3,16	3,33	3,53	3,73	3,47	3,68	3,42	3,60
6	2,18	2,19	2,29	2,10	2,55	2,35	2,53	2,32	2,44	2,27
7	5,62	6,21	4,73	5,95	5,22	6,65	5,34	6,56	5,15	6,43
8	3,33	3,48	3,21	3,34	3,57	3,73	3,52	3,68	3,46	3,61
9	2,19	2,21	2,34	2,11	2,59	2,37	2,59	2,33	2,48	2,28
10	4,11	4,44	3,61	4,25	4,01	4,76	4,02	4,69	3,93	4,59
11	2,57	2,66	2,54	2,55	2,84	2,85	2,79	2,81	2,74	2,75
12	5,35	6,00	4,37	5,75	4,78	6,43	4,95	6,33	4,73	6,21
13	3,13	3,35	2,91	3,21	3,24	3,59	3,21	3,54	3,16	3,47
14	2,08	2,12	2,12	2,03	2,36	2,27	2,33	2,23	2,27	2,19
15	2,43	2,54	2,35	2,43	2,62	2,72	2,59	2,68	2,53	2,62
16	5,84	6,38	5,04	6,11	5,58	6,84	5,63	6,74	5,49	6,38
17	3,44	3,58	3,41	3,42	3,79	3,83	3,74	3,77	3,67	3,62
18	2,26	2,26	2,47	2,17	2,73	2,42	2,76	2,39	2,62	2,31
19	3,05	3,26	2,78	3,12	3,10	3,49	3,08	3,44	3,01	3,37
20	2,02	2,07	2,03	1,98	2,27	2,21	2,23	2,18	2,18	2,14

Πίνακας Π7.13. Σύγκριση τάσεων μονού τροχού (ALI) και πραγματικού συστήματος

Διατομή	MD-83		B767-300		A300-600		B747-200C		A300-B4	
	σ _{πραγμ.}	σ _{μον.}	σ _{πραγμ.}	σ _{μον.}	σ _{πραγμ.}	σ _{μον.}	σ _{πραγμ.}	σ _{μον.}	σ _{πραγμ.}	σ _{μον.}
1	5,34	5,87	4,41	5,61	4,83	6,27	4,99	6,18	4,78	6,06
2	3,17	3,35	2,97	3,20	3,31	3,58	3,27	3,55	3,21	3,46
3	2,10	2,14	2,17	2,05	2,41	2,29	2,39	2,26	2,31	2,21
4	5,69	6,18	4,72	5,91	5,22	6,60	5,32	6,51	5,16	6,39
5	3,32	3,47	3,16	3,32	3,53	3,71	3,47	3,66	3,42	3,59
6	2,18	2,21	2,29	2,07	2,55	2,36	2,53	2,33	2,44	2,28
7	5,62	6,11	4,73	5,85	5,22	6,53	5,34	6,44	5,15	6,32
8	3,33	3,49	3,21	3,33	3,57	3,72	3,52	3,66	3,46	3,59
9	2,19	2,23	2,34	2,13	2,59	2,38	2,59	2,34	2,48	2,30
10	4,11	4,40	3,61	4,21	4,01	4,70	4,02	4,63	3,93	4,54
11	2,57	2,67	2,54	2,55	2,84	2,85	2,79	2,81	2,74	2,76
12	5,35	5,90	4,37	5,64	4,78	6,30	4,95	6,21	4,73	6,09
13	3,13	3,34	2,91	3,19	3,24	3,57	3,21	3,52	3,16	3,45
14	2,08	2,13	2,12	2,04	2,36	2,28	2,33	2,24	2,27	2,20
15	2,43	2,54	2,35	2,43	2,62	2,71	2,59	2,67	2,53	2,62
16	5,84	6,29	5,04	6,02	5,58	6,72	5,63	6,63	5,49	6,28
17	3,44	3,57	3,41	3,41	3,79	3,81	3,74	3,76	3,67	3,61
18	2,26	2,28	2,47	2,18	2,73	2,43	2,76	2,40	2,62	2,32
19	3,05	3,24	2,78	3,10	3,10	3,47	3,08	3,42	3,01	3,35
20	2,02	2,08	2,03	1,99	2,27	2,22	2,23	2,19	2,18	2,15

Πίνακας Π7.14. Σύγκριση τάσεων μονού τροχού (ALI) και πραγματικού συστήματος

Διατομή	MD-83		B767-300		A300-600		B747-200C		A300-B4	
	Επραγμ.	Εμον.	Επραγμ.	Εμον.	Επραγμ.	Εμον.	Επραγμ.	Εμον.	Επραγμ.	Εμον.
1	158	170	126	163	138	182	143	179	137	176
2	93	96	85	91	95	102	93	101	92	99
3	62	61	62	58	69	65	70	64	66	63
4	168	178	134	171	149	191	152	188	148	184
5	98	99	90	95	101	106	99	104	98	102
6	64	62	65	60	73	67	73	66	70	64
7	166	177	135	169	149	189	152	168	147	183
8	98	99	92	95	102	106	101	105	99	102
9	65	63	67	60	74	67	75	66	71	65
10	121	126	103	121	115	135	114	33	113	131
11	76	76	73	72	81	81	80	80	79	78
12	159	171	125	163	136	183	141	180	135	177
13	93	95	83	91	93	102	91	111	90	99
14	61	60	61	58	68	64	67	63	65	62
15	72	72	67	69	75	77	74	76	72	75
16	172	181	144	174	159	194	160	191	157	181
17	101	102	97	98	109	109	107	107	105	103
18	67	64	70	62	78	69	79	68	75	66
19	90	93	79	89	89	99	88	98	87	96
20	60	59	58	56	65	63	64	62	63	61

Πίνακας Π7.15.Σύγκριση οριζόντιων ανηγμένων παραμορφώσεων μονού τροχού (ALI) και πραγματικού συστήματος

Διατομή	MD-83		B767-300		A300-600		B747-200C		A300-B4	
	Επραγμ.	Εμον.	Επραγμ.	Εμον.	Επραγμ.	Εμον.	Επραγμ.	Εμον.	Επραγμ.	Εμον.
1	158	167	126	160	138	178	143	176	137	172
2	93	95	85	91	95	102	93	100	92	98
3	62	61	62	58	69	65	70	64	66	63
4	168	176	134	168	149	188	152	185	148	182
5	98	99	90	94	101	105	99	104	98	102
6	64	63	65	59	73	67	73	66	70	65
7	166	174	135	166	149	186	152	183	147	180
8	98	99	92	94	102	106	101	104	99	102
9	65	63	67	60	74	67	75	66	71	65
10	121	125	103	120	115	134	114	132	113	129
11	76	76	73	72	81	81	80	80	79	78
12	159	168	125	160	136	179	141	177	135	173
13	93	95	83	91	93	101	91	100	90	98
14	61	61	61	58	68	65	67	64	65	63
15	72	72	67	69	75	77	74	76	72	75
16	172	179	144	171	159	191	160	188	157	178
17	101	101	97	97	109	108	107	107	105	103
18	67	65	70	62	78	69	79	68	75	66
19	90	92	79	88	89	99	88	97	87	95
20	60	59	58	57	65	63	64	62	63	61

Πίνακας Π7.16.Σύγκριση οριζόντιων ανηγμένων παραμορφώσεων μονού τροχού (ALI) και πραγματικού συστήματος

Διατομή	B737-400		A300-600		B747-200C	
	$\sigma_{\text{μον.}}$	$\sigma_{\text{πραγμ}}$	$\sigma_{\text{μον.}}$	$\sigma_{\text{πραγμ}}$	$\sigma_{\text{μον.}}$	$\sigma_{\text{πραγμ}}$
1	4,98	4,42	5,36	4,16	5,25	4,32
2	2,87	2,70	3,08	2,83	3,02	2,83
3	1,84	1,80	1,97	2,10	1,94	2,07
4	5,28	4,73	5,67	4,46	5,56	4,63
5	2,99	2,84	3,22	3,04	3,15	3,02
6	1,90	1,88	2,04	2,23	2,00	2,20
7	5,20	4,65	5,59	4,45	5,48	4,62
8	2,98	2,83	3,21	3,06	3,14	3,04
9	1,91	1,88	2,05	2,26	2,01	2,24

Πίνακας Π7.17. Σύγκριση τάσεων μονού τροχού (ALI) και πραγματικού συστήματος για Εσκυροδ.=25000Μpa

Διατομή	B737-400		A300-600		B747-200C	
	$\sigma_{\text{μον.}}$	$\sigma_{\text{πραγμ}}$	$\sigma_{\text{μον.}}$	$\sigma_{\text{πραγμ}}$	$\sigma_{\text{μον.}}$	$\sigma_{\text{πραγμ}}$
1	4,86	4,42	5,25	4,16	5,15	4,32
2	2,84	2,70	3,07	2,83	3,01	2,83
3	1,84	1,80	1,99	2,10	1,95	2,07
4	5,16	4,73	5,58	4,46	5,47	4,63
5	2,97	2,84	3,20	3,04	3,15	3,02
6	1,91	1,88	2,06	2,23	2,02	2,20
7	5,08	4,65	5,49	4,45	5,38	4,62
8	2,96	2,83	3,20	3,06	3,14	3,04
9	1,91	1,88	2,07	2,26	2,03	2,24

Πίνακας Π7.18. Σύγκριση τάσεων μονού τροχού (ALI) και πραγματικού συστήματος για Εσκυροδ.=20000Μpa

Διατομή	B737-400		A300-600		B747-200C	
	$\epsilon_{\text{μον.}}$	$\epsilon_{\text{πραγμ}}$	$\epsilon_{\text{μον.}}$	$\epsilon_{\text{πραγμ}}$	$\epsilon_{\text{μον.}}$	$\epsilon_{\text{πραγμ}}$
1	213	195	229	179	224	186
2	122	120	132	122	129	121
3	78	80	84	90	83	89
4	225	211	242	191	237	199
5	128	126	137	131	135	129
6	81	83	87	96	85	95
7	222	207	239	191	234	198
8	127	126	137	132	134	130
9	81	84	87	97	86	97

Πίνακας Π7.19. Σύγκριση οριζόντιων ανηγμένων παραμορφώσεων μονού τροχού (ALI) και πραγματικού συστήματος για Εσκυροδέματος 25000Μpa

Διατομή	B737-400		A300-600		B747-200C	
	$\epsilon_{\text{μον.}}$	$\epsilon_{\text{πραγμ}}$	$\epsilon_{\text{μον.}}$	$\epsilon_{\text{πραγμ}}$	$\epsilon_{\text{μον.}}$	$\epsilon_{\text{πραγμ}}$
1	208	195	224	179	220	186
2	121	120	138	122	129	121
3	79	80	85	90	83	89
4	220	211	238	191	233	199
5	127	126	137	131	134	129
6	81	83	88	96	86	95
7	217	207	234	191	230	198
8	126	126	136	132	134	130
9	82	84	88	97	86	97

Πίνακας Π7.20. Σύγκριση οριζόντιων ανηγμένων παραμορφώσεων μονού τροχού (ALI) και πραγματικού συστήματος για Εσκυροδέματος 20000Μpa

Διατομή	B737-400		A300-600		B747-200C	
	σ _{μον.}	σ _{πραγμ}	σ _{μον.}	σ _{πραγμ}	σ _{μον.}	σ _{πραγμ}
1	5,34	4,42	5,92	4,16	5,33	4,32
2	3,04	2,70	3,36	2,83	3,03	2,83
3	1,93	1,80	2,14	2,10	1,93	2,07
4	5,63	4,73	6,24	4,46	5,62	4,63
5	3,16	2,84	3,50	3,04	3,15	3,02
6	1,99	1,88	2,21	2,23	1,99	2,20
7	5,56	4,65	6,17	4,45	5,55	4,62
8	3,15	2,83	3,49	3,06	3,14	3,04
9	2,01	1,88	2,22	2,26	2,00	2,24

Πίνακας Π7.21. Σύγκριση τάσεων μονού τροχού (ALI) και πραγματικού συστήματος για Εσκυροδέματος 25000Μpa

Διατομή	B737-400		A300-600		B747-200C	
	σ _{μον.}	σ _{πραγμ}	σ _{μον.}	σ _{πραγμ}	σ _{μον.}	σ _{πραγμ}
1	5,23	4,42	5,80	4,16	5,21	4,32
2	3,02	2,70	3,34	2,83	3,01	2,83
3	1,94	1,80	2,15	2,10	1,93	2,07
4	5,53	4,73	6,13	4,46	5,51	4,63
5	3,14	2,84	3,48	3,04	3,13	3,02
6	2,01	1,88	2,22	2,23	2,00	2,20
7	5,46	4,65	6,05	4,45	5,44	4,62
8	3,14	2,83	3,48	3,06	3,12	3,04
9	2,02	1,88	2,23	2,26	2,00	2,24

Πίνακας Π7.22. Σύγκριση τάσεων μονού τροχού (ALI) και πραγματικού συστήματος για Εσκυροδέματος 25000Μpa

Διατομή	B737-400		A300-600		B747-200C	
	ε _{μον.}	ε _{πραγμ}	ε _{μον.}	ε _{πραγμ}	ε _{μον.}	ε _{πραγμ}
1	182	195	202	179	182	186
2	104	120	115	122	103	121
3	66	80	73	90	66	89
4	192	211	213	191	192	199
5	108	126	119	131	107	129
6	68	83	75	96	68	95
7	190	207	210	191	189	198
8	108	126	119	132	107	130
9	68	84	76	97	68	97

Πίνακας Π7.23. Σύγκριση οριζόντιων ανηγμένων παραμορφώσεων μονού τροχού (ALI) και πραγματικού συστήματος για Εσκυροδέματος 25000Μpa

Διατομή	B737-400		A300-600		B747-200C	
	ε _{μον.}	ε _{πραγμ}	ε _{μον.}	ε _{πραγμ}	ε _{μον.}	ε _{πραγμ}
1	179	195	198	179	178	186
2	103	120	114	122	103	121
3	66	80	73	90	66	89
4	189	211	209	191	188	199
5	107	126	119	131	107	129
6	68	83	76	96	68	95
7	186	207	206	191	186	198
8	107	126	119	132	107	130
9	69	84	76	97	68	97

Πίνακας Π7.24. Σύγκριση οριζόντιων ανηγμένων παραμορφώσεων μονού τροχού (ALI) και πραγματικού συστήματος για Εσκυροδέματος 25000Μpa

Οι τιμές ALI που χρησιμοποιήθηκαν κατά την επίλυση όλων αυτών των διατομών είναι:

Κατηγορία διατομής	MD-83	B767-300	B747-200C	A300B4	A300-600
A	1,636	1,566	1,726	1,692	1,752
B	1,428	1,366	1,504	1,476	1,526

Πίνακας Π7.25.Τιμές ALI για μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος 30000Μpa

Κατηγορία διατομής	B737-400	A300-600	B747-200C
A	1,534	1,7	1,53
B	1,338	1,482	1,332

Πίνακας Π7.26.Τιμές ALI για μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος 25000Μpa

Κατηγορία διατομής	B737-400	A300-600	B747-200C
A	1,522	1,636	1,604
B	1,326	1,432	1,404

Πίνακας Π7.27.Τιμές ALI για μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος 20000Μpa

Για τον έλεγχο της ομαδοποίησης σε τέσσερις κατηγορίες χρησιμοποιήθηκαν οι εξής εκατόν τριάντα δύο διατομές:

Διατομή	Σκυρόδεμα		Υπόβαση			Στρώση έδρασης	
	E (Μpa)	Πάχος (mm)	E (Μpa)	ν	πάχος(mm)	E (Μpa)	ν
1	30000	200	250	0,4	300	120	0,45
2	30000	250	250	0,4	300	120	0,45
3	30000	300	250	0,4	300	120	0,45
4	30000	350	250	0,4	300	120	0,45
5	30000	400	250	0,4	300	120	0,45
6	30000	200	250	0,4	300	100	0,45
7	30000	250	250	0,4	300	100	0,45
8	30000	300	250	0,4	300	100	0,45
9	30000	350	250	0,4	300	100	0,45
10	30000	400	250	0,4	300	100	0,45
11	30000	200	250	0,4	300	80	0,45
12	30000	250	250	0,4	300	80	0,45
13	30000	300	250	0,4	300	80	0,45
14	30000	350	250	0,4	300	80	0,45
15	30000	400	250	0,4	300	80	0,45
16	30000	200	250	0,4	300	60	0,45
17	30000	250	250	0,4	300	60	0,45
18	30000	300	250	0,4	300	60	0,45
19	30000	350	250	0,4	300	60	0,45
20	30000	400	250	0,4	300	60	0,45
21	30000	200	250	0,4	200	120	0,45
22	30000	250	250	0,4	200	120	0,45
23	30000	300	250	0,4	200	120	0,45
24	30000	350	250	0,4	200	120	0,45
25	30000	400	250	0,4	200	120	0,45
26	30000	200	250	0,4	200	100	0,45
27	30000	250	250	0,4	200	100	0,45
28	30000	300	250	0,4	200	100	0,45
29	30000	350	250	0,4	200	100	0,45

30	30000	400	250	0,4	200	100	0,45
31	30000	200	250	0,4	200	80	0,45
32	30000	250	250	0,4	200	80	0,45
33	30000	300	250	0,4	200	80	0,45
34	30000	350	250	0,4	200	80	0,45
35	30000	400	250	0,4	200	80	0,45
36	30000	200	250	0,4	200	60	0,45
37	30000	250	250	0,4	200	60	0,45
38	30000	300	250	0,4	200	60	0,45
39	30000	350	250	0,4	200	60	0,45
40	30000	400	250	0,4	200	60	0,45
41	30000	200	250	0,4	400	120	0,45
42	30000	250	250	0,4	400	120	0,45
43	30000	300	250	0,4	400	120	0,45
44	30000	350	250	0,4	400	120	0,45
45	30000	400	250	0,4	400	120	0,45
46	30000	200	250	0,4	400	100	0,45
47	30000	250	250	0,4	400	100	0,45
48	30000	300	250	0,4	400	100	0,45
49	30000	350	250	0,4	400	100	0,45
50	30000	400	250	0,4	400	100	0,45
51	30000	200	250	0,4	400	80	0,45
52	30000	250	250	0,4	400	80	0,45
53	30000	300	250	0,4	400	80	0,45
54	30000	350	250	0,4	400	80	0,45
55	30000	400	250	0,4	400	80	0,45
56	30000	200	250	0,4	400	60	0,45
57	30000	250	250	0,4	400	60	0,45
58	30000	300	250	0,4	400	60	0,45
59	30000	350	250	0,4	400	60	0,45
60	30000	400	250	0,4	400	60	0,45
61	30000	220	250	0,4	400	100	0,45
62	30000	240	250	0,4	400	100	0,45
63	30000	260	250	0,4	400	100	0,45
64	30000	280	250	0,4	400	100	0,45
65	30000	320	250	0,4	400	100	0,45
66	30000	340	250	0,4	400	100	0,45
67	30000	360	250	0,4	400	100	0,45
68	30000	380	250	0,4	400	100	0,45
69	30000	220	250	0,4	400	80	0,45
70	30000	240	250	0,4	400	80	0,45
71	30000	260	250	0,4	400	80	0,45
72	30000	280	250	0,4	400	80	0,45
73	30000	320	250	0,4	400	80	0,45
74	30000	340	250	0,4	400	80	0,45
75	30000	360	250	0,4	400	80	0,45
76	30000	380	250	0,4	400	80	0,45
77	30000	220	250	0,4	400	60	0,45
78	30000	240	250	0,4	400	60	0,45
79	30000	260	250	0,4	400	60	0,45
80	30000	280	250	0,4	400	60	0,45
81	30000	320	250	0,4	400	60	0,45
82	30000	340	250	0,4	400	60	0,45

83	30000	360	250	0,4	400	60	0,45
84	30000	380	250	0,4	400	60	0,45
85	30000	220	250	0,4	300	100	0,45
86	30000	240	250	0,4	300	100	0,45
87	30000	260	250	0,4	300	100	0,45
88	30000	280	250	0,4	300	100	0,45
89	30000	320	250	0,4	300	100	0,45
90	30000	340	250	0,4	300	100	0,45
91	30000	360	250	0,4	300	100	0,45
92	30000	380	250	0,4	300	100	0,45
93	30000	220	250	0,4	300	80	0,45
94	30000	240	250	0,4	300	80	0,45
95	30000	260	250	0,4	300	80	0,45
96	30000	280	250	0,4	300	80	0,45
97	30000	320	250	0,4	300	80	0,45
98	30000	340	250	0,4	300	80	0,45
99	30000	360	250	0,4	300	80	0,45
100	30000	380	250	0,4	300	80	0,45
101	30000	220	250	0,4	300	60	0,45
102	30000	240	250	0,4	300	60	0,45
103	30000	260	250	0,4	300	60	0,45
104	30000	280	250	0,4	300	60	0,45
105	30000	320	250	0,4	300	60	0,45
106	30000	340	250	0,4	300	60	0,45
107	30000	360	250	0,4	300	60	0,45
108	30000	380	250	0,4	300	60	0,45
109	30000	220	250	0,4	200	100	0,45
110	30000	240	250	0,4	200	100	0,45
111	30000	260	250	0,4	200	100	0,45
112	30000	280	250	0,4	200	100	0,45
113	30000	320	250	0,4	200	100	0,45
114	30000	340	250	0,4	200	100	0,45
115	30000	360	250	0,4	200	100	0,45
116	30000	380	250	0,4	200	100	0,45
117	30000	220	250	0,4	200	80	0,45
118	30000	240	250	0,4	200	80	0,45
119	30000	260	250	0,4	200	80	0,45
120	30000	280	250	0,4	200	80	0,45
121	30000	320	250	0,4	200	80	0,45
122	30000	340	250	0,4	200	80	0,45
123	30000	360	250	0,4	200	80	0,45
124	30000	380	250	0,4	200	80	0,45
125	30000	220	250	0,4	200	60	0,45
126	30000	240	250	0,4	200	60	0,45
127	30000	260	250	0,4	200	60	0,45
128	30000	280	250	0,4	200	60	0,45
129	30000	320	250	0,4	200	60	0,45
130	30000	340	250	0,4	200	60	0,45
131	30000	360	250	0,4	200	60	0,45
132	30000	380	250	0,4	200	60	0,45

Πίνακας Π7.28. Διατομές οδοστρωμάτων για τον έλεγχο της ομαδοποίησης σε τέσσερις κατηγορίες

Οι τιμές ALI του A300-600 για τις τέσσερις κατηγορίες είναι:

Κατηγορία	A	B	Γ	Δ
ALI	1,002	1,078	1,146	1,238

Πίνακας Π7.29.Τιμές ALI A300-600

Τα αποτελέσματα από την επίλυση των διατομών:

Διατομή	$\sigma_{\text{πραγμ}}$	$\sigma_{\text{μον}}$	απόκλιση %	Διατομή	$\sigma_{\text{πραγμ}}$	$\sigma_{\text{μον}}$	απόκλιση %
1	4,37	4,61	-5,49	67	2,51	2,60	-3,59
2	3,50	3,73	-6,57	68	2,36	2,40	-1,69
3	2,93	3,09	-5,46	69	4,31	4,26	1,16
4	2,50	2,67	-6,80	70	3,99	4,10	-2,76
5	2,15	2,18	-1,40	71	3,71	3,69	0,54
6	4,56	4,75	-4,17	72	3,45	3,55	-2,90
7	3,70	3,84	-3,78	73	3,02	3,18	-5,30
8	3,10	3,18	-2,58	74	2,84	2,91	-2,46
9	2,63	2,74	-4,18	75	2,67	2,68	-0,37
10	2,27	2,24	1,32	76	2,51	2,47	1,59
11	4,83	4,93	-2,07	77	4,67	4,44	4,93
12	3,95	3,98	-0,76	78	4,32	4,27	1,16
13	3,31	3,28	0,91	79	4,02	3,84	4,48
14	2,81	2,83	-0,71	80	3,74	3,69	1,34
15	2,41	2,31	4,15	81	3,27	3,31	-1,22
16	5,28	5,17	2,08	82	3,07	3,03	1,30
17	4,31	4,16	3,48	83	2,88	2,78	3,47
18	3,60	3,43	4,72	84	2,71	2,56	5,54
19	3,04	2,95	2,96	85	4,15	4,22	-1,69
20	2,61	2,40	8,05	86	3,84	4,05	-5,47
21	4,45	4,71	-5,84	87	3,56	3,64	-2,25
22	3,57	3,79	-6,16	88	3,31	3,50	-5,74
23	2,98	3,13	-5,03	89	2,90	3,13	-7,93
24	2,53	2,70	-6,72	90	2,72	2,86	-5,15
25	2,18	2,20	-0,92	91	2,55	2,63	-3,14
26	4,67	4,88	-4,50	92	2,40	2,42	-0,83
27	3,78	3,92	-3,70	93	4,45	4,37	1,80
28	3,16	3,23	-2,22	94	4,11	4,20	-2,19
29	2,68	2,78	-3,73	95	3,81	3,77	1,05
30	2,30	2,26	1,74	96	3,55	3,62	-1,97
31	5,00	5,09	-1,80	97	3,09	3,23	-4,53
32	4,07	4,07	0,00	98	2,90	2,96	-2,07
33	3,39	3,35	1,18	99	2,72	2,71	0,37
34	2,86	2,88	-0,70	100	2,56	2,50	2,34
35	2,45	2,34	4,49	101	4,85	4,58	5,57
36	5,50	5,36	2,55	102	4,48	4,39	2,01
37	4,46	4,27	4,26	103	4,15	3,94	5,06
38	3,70	3,50	5,41	104	3,86	3,78	2,07
39	3,11	3,00	3,54	105	3,36	3,37	-0,30
40	2,66	2,44	8,27	106	3,14	3,08	1,91
41	4,29	4,52	-5,36	107	2,95	2,83	4,07
42	3,43	3,68	-7,29	108	2,77	2,60	6,14
43	2,88	3,05	-5,90	109	4,26	4,32	-1,41
44	2,46	2,64	-7,32	110	3,93	4,14	-5,34
45	2,12	2,16	-1,89	111	3,64	3,71	-1,92
46	4,46	4,65	-4,26	112	3,39	3,56	-5,01

47	3,61	3,77	-4,43	113	2,95	3,17	-7,46
48	3,03	3,13	-3,30	114	2,76	2,90	-5,07
49	2,59	2,71	-4,63	115	2,59	2,66	-2,70
50	2,23	2,22	0,45	116	2,44	2,45	-0,41
51	4,69	4,79	-2,13	117	4,59	4,49	2,18
52	3,84	3,89	-1,30	118	4,23	4,30	-1,65
53	3,23	3,23	0,00	119	3,91	3,86	1,28
54	2,75	2,79	-1,45	120	3,64	3,69	-1,37
55	2,37	2,28	3,80	121	3,16	3,29	-4,11
56	5,06	4,99	1,38	122	2,96	3,00	-1,35
57	4,16	4,05	2,64	123	2,77	2,75	0,72
58	3,49	3,36	3,72	124	2,60	2,53	2,69
59	2,97	2,90	2,36	125	5,04	4,73	6,15
60	2,55	2,37	7,06	126	4,64	4,52	2,59
61	4,05	4,13	-1,98	127	4,29	4,04	5,83
62	3,75	3,98	-6,13	128	3,98	3,87	2,76
63	3,48	3,58	-2,87	129	3,45	3,44	0,29
64	3,24	3,44	-6,17	130	3,22	3,14	2,48
65	2,84	3,09	-8,80	131	3,01	2,87	4,65
66	2,67	2,83	-5,99	132	2,83	2,64	6,71

Πίνακας Π7.30.Σύγκριση τάσεων μονού τροχού (ALI) σε τέσσερις κατηγορίες και πραγματικού συστήματος

Διατομή	επραγμ	εμον	απόκλιση %	Διατομή	επραγμ	εμον	απόκλιση %
1	125	131	-4,94	67	72	74	-2,66
2	100	106	-6,25	68	68	68	-0,44
3	84	88	-4,63	69	123	121	1,24
4	72	76	-6,05	70	114	117	-2,44
5	62	62	-0,44	71	106	105	1,05
6	130	135	-3,70	72	99	101	-2,06
7	106	109	-3,33	73	87	90	-4,36
8	89	90	-1,80	74	81	83	-1,83
9	76	78	-3,25	75	76	76	0,47
10	65	64	2,13	76	72	70	2,59
11	138	140	-1,93	77	133	126	5,45
12	113	113	0,13	78	124	121	1,85
13	95	93	1,54	79	115	109	5,00
14	80	80	0,02	80	107	105	2,04
15	69	66	5,11	81	94	94	-0,25
16	150	147	2,27	82	88	86	2,12
17	124	118	4,38	83	83	79	4,28
18	103	97	5,60	84	78	73	6,26
19	87	84	3,98	85	118	120	-1,33
20	73	68	6,78	86	110	115	-5,12
21	127	134	-5,22	87	102	104	-1,65
22	102	108	-5,88	88	95	99	-4,72
23	85	89	-4,25	89	83	89	-7,10
24	73	77	-5,66	90	78	81	-4,47
25	63	63	-0,10	91	73	75	-2,09
26	133	139	-4,00	92	69	69	0,10
27	108	111	-2,88	93	127	124	2,04
28	91	92	-1,33	94	117	119	-1,60
29	77	79	-2,80	95	109	107	1,80
30	66	64	2,51	96	102	103	-1,28

31	142	145	-1,53	97	89	92	-3,60
32	116	116	0,66	98	83	84	-1,13
33	97	95	2,07	99	78	77	1,13
34	82	82	0,51	100	73	71	3,20
35	70	66	5,53	101	139	130	6,23
36	165	152	7,66	102	128	125	2,77
37	128	121	5,01	103	119	112	5,92
38	106	99	6,18	104	111	107	2,96
39	89	85	4,51	105	96	96	0,60
40	76	69	9,14	106	90	87	2,90
41	123	129	-4,76	107	84	80	5,00
42	98	105	-6,82	108	79	74	6,93
43	83	87	-5,15	109	122	123	-0,95
44	71	75	-6,57	110	112	118	-4,68
45	61	61	-0,88	111	104	106	-1,19
46	128	132	-3,54	112	97	101	-4,28
47	103	107	-4,03	113	85	90	-6,59
48	87	89	-2,45	114	79	82	-4,01
49	74	77	-3,85	115	74	76	-1,65
50	64	63	1,63	116	70	70	0,51
51	134	136	-1,86	117	131	128	2,51
52	110	111	-0,55	118	121	122	-1,07
53	92	92	0,79	119	112	110	2,29
54	79	79	-0,65	120	104	105	-0,72
55	68	65	4,55	121	91	93	-3,06
56	144	142	1,41	122	85	85	-0,62
57	119	115	3,47	123	80	78	1,60
58	100	95	4,75	124	75	72	3,64
59	85	82	3,23	125	144	134	6,81
60	73	67	8,08	126	133	128	3,37
61	115	118	-1,91	127	123	115	6,53
62	107	113	-5,82	128	114	110	3,58
63	100	102	-2,16	129	99	98	1,19
64	93	98	-5,37	130	92	89	3,45
65	81	88	-7,76	131	86	82	5,52
66	77	80	-5,08	132	81	75	7,40

Πίνακας Π7.31. Σύγκριση οριζόντιων ανηγμένων παραμορφώσεων μονού τροχού (ALI) και πραγματικού συστήματος

Διατομή	$\sigma_{\text{πραγμ}}$	$\sigma_{\text{μον}}$	απόκλιση %	Διατομή	$\sigma_{\text{πραγμ}}$	$\sigma_{\text{μον}}$	απόκλιση %
1	4,37	4,46	-1,99	67	2,51	2,51	0,04
2	3,50	3,57	-2,01	68	2,36	2,39	-1,10
3	2,93	2,97	-1,53	69	4,31	4,39	-1,85
4	2,50	2,55	-2,17	70	3,99	4,03	-0,96
5	2,15	2,25	-4,66	71	3,71	3,71	-0,13
6	4,56	4,57	-0,15	72	3,45	3,45	0,03
7	3,70	3,65	1,41	73	3,02	3,01	0,24
8	3,10	3,03	2,16	74	2,84	2,84	0,16
9	2,63	2,60	1,16	75	2,67	2,68	-0,32
10	2,27	2,28	-0,55	76	2,51	2,54	-1,29
11	4,83	4,94	-2,17	77	4,67	4,75	-1,79
12	3,95	3,93	0,60	78	4,32	4,36	-1,01
13	3,31	3,26	1,57	79	4,02	4,04	-0,41
14	2,81	2,78	1,04	80	3,74	3,75	-0,29

15	2,41	2,43	-0,96	81	3,27	3,28	-0,44
16	5,28	5,37	-1,64	82	3,07	3,10	-0,86
17	4,31	4,27	0,86	83	2,88	2,93	-1,71
18	3,60	3,55	1,42	84	2,71	2,78	-2,69
19	3,04	3,04	-0,02	85	4,15	4,15	-0,06
20	2,61	2,67	-2,36	86	3,84	3,80	0,96
21	4,45	4,53	-1,90	87	3,56	3,51	1,53
22	3,57	3,62	-1,28	88	3,31	3,25	1,72
23	2,98	3,00	-0,70	89	2,90	2,85	1,88
24	2,53	2,57	-1,73	90	2,72	2,68	1,57
25	2,18	2,26	-3,81	91	2,55	2,53	0,85
26	4,67	4,66	0,13	92	2,40	2,40	0,04
27	3,78	3,71	1,95	93	4,45	4,48	-0,64
28	3,16	3,07	2,99	94	4,11	4,10	0,33
29	2,68	2,63	2,04	95	3,81	3,77	1,07
30	2,30	2,30	-0,08	96	3,55	3,50	1,50
31	5,00	5,06	-1,29	97	3,09	3,05	1,40
32	4,07	4,00	1,69	98	2,90	2,86	1,29
33	3,39	3,30	2,69	99	2,72	2,71	0,52
34	2,86	2,81	1,81	100	2,56	2,56	-0,11
35	2,45	2,45	-0,15	101	4,85	4,87	-0,45
36	5,50	5,53	-0,48	102	4,48	4,46	0,42
37	4,46	4,36	2,16	103	4,15	4,11	1,06
38	3,70	3,60	2,58	104	3,86	3,81	1,38
39	3,11	3,08	1,11	105	3,36	3,33	1,01
40	2,66	2,69	-1,22	106	3,14	3,13	0,28
41	4,29	4,39	-2,38	107	2,95	2,96	-0,24
42	3,43	3,53	-2,96	108	2,77	2,81	-1,47
43	2,88	2,95	-2,40	109	4,26	4,23	0,70
44	2,46	2,54	-3,30	110	3,93	3,86	1,74
45	2,12	2,24	-5,53	111	3,64	3,56	2,27
46	4,46	4,48	-0,51	112	3,39	3,29	2,89
47	3,61	3,60	0,38	113	2,95	2,87	2,67
48	3,03	3,00	0,96	114	2,76	2,70	2,06
49	2,59	2,58	0,38	115	2,59	2,55	1,38
50	2,23	2,27	-1,77	116	2,44	2,42	0,89
51	4,69	4,83	-2,90	117	4,59	4,58	0,21
52	3,84	3,86	-0,65	118	4,23	4,18	1,22
53	3,23	3,22	0,40	119	3,91	3,84	1,85
54	2,75	2,75	-0,13	120	3,64	3,54	2,63
55	2,37	2,41	-1,80	121	3,16	3,08	2,51
56	5,06	5,22	-3,17	122	2,96	2,90	2,14
57	4,16	4,19	-0,71	123	2,77	2,73	1,58
58	3,49	3,50	-0,29	124	2,60	2,58	0,65
59	2,97	3,01	-1,44	125	5,04	5,00	0,85
60	2,55	2,65	-3,95	126	4,64	4,56	1,75
61	4,05	4,08	-0,78	127	4,29	4,19	2,34
62	3,75	3,74	0,13	128	3,98	3,88	2,61
63	3,48	3,46	0,57	129	3,45	3,37	2,18
64	3,24	3,21	0,79	130	3,22	3,17	1,46
65	2,84	2,82	0,72	131	3,01	2,99	0,60
66	2,67	2,66	0,46	132	2,83	2,83	-0,06

Πίνακας Π7.32. Σύγκριση τάσεων μονού τροχού (ALI) και πραγματικού συστήματος (μία κατηγορία και διόρθωση τάσεων με κατάλληλες εξισώσεις)

Διατομή	Επραγμ	Εμον	απόκλιση %	Διατομή	Επραγμ	Εμον	απόκλιση %
1	125	128	-2,22	67	72	72	0,04
2	100	102	-2,45	68	68	68	-0,69
3	84	85	-1,52	69	123	126	-2,43
4	72	73	-2,28	70	114	115	-1,17
5	62	64	-4,34	71	106	106	-0,19
6	130	131	-0,43	72	99	99	0,27
7	106	105	1,04	73	87	86	0,45
8	89	87	2,01	74	81	81	0,15
9	76	75	1,31	75	76	77	-0,37
10	65	65	-0,69	76	72	73	-1,08
11	138	141	-2,74	77	133	138	-3,03
12	113	112	0,64	78	124	126	-1,59
13	95	93	1,71	79	115	116	-0,55
14	80	80	1,05	80	107	107	0,18
15	69	70	-0,91	81	94	93	0,78
16	150	156	-3,72	82	88	92	-4,39
17	124	123	0,47	83	83	82	0,34
18	103	101	2,01	84	78	78	-0,19
19	87	91	-4,15	85	118	119	-0,53
20	73	74	-1,82	86	110	109	0,61
21	127	130	-2,06	87	102	100	1,39
22	102	104	-1,69	88	95	93	1,89
23	85	86	-0,77	89	83	81	1,89
24	73	74	-1,54	90	78	77	1,56
25	63	65	-3,63	91	73	72	1,00
26	133	134	-0,23	92	69	69	0,24
27	108	106	1,93	93	127	128	-1,08
28	91	88	2,88	94	117	117	0,16
29	77	75	2,15	95	109	108	1,06
30	66	66	0,11	96	102	100	1,52
31	142	145	-1,76	97	89	87	1,64
32	116	114	1,70	98	83	82	1,30
33	97	94	2,72	99	78	77	0,75
34	82	80	2,01	100	73	73	0,00
35	70	70	-0,01	101	139	141	-1,62
36	165	161	2,57	102	128	128	-0,09
37	128	126	1,66	103	119	118	0,95
38	106	103	3,13	104	111	109	1,64
39	89	87	2,82	105	96	94	2,12
40	76	75	1,24	106	90	88	1,95
41	123	126	-2,43	107	84	83	1,58
42	98	101	-3,37	108	79	79	1,01
43	83	85	-2,38	109	122	121	0,32
44	71	73	-3,13	110	112	111	1,49
45	61	64	-5,15	111	104	102	2,28
46	128	129	-0,72	112	97	94	2,74
47	103	103	-0,04	113	85	82	2,78
48	87	86	0,97	114	79	77	2,41
49	74	74	0,34	115	74	73	1,83
50	64	65	-1,60	116	70	69	1,06
51	134	138	-3,21	117	131	131	-0,05
52	110	111	-0,54	118	121	120	1,22
53	92	92	0,48	119	112	110	2,07

54	79	79	-0,08	120	104	102	2,56
55	68	69	-1,97	121	91	88	2,64
56	144	152	-5,22	122	85	83	2,27
57	119	120	-1,02	123	80	78	1,70
58	100	100	0,61	124	75	68	9,18
59	85	85	0,53	125	144	145	-0,41
60	73	74	-0,89	126	133	131	1,09
61	115	117	-1,55	127	123	120	2,14
62	107	107	-0,48	128	114	111	2,79
63	100	99	0,48	129	99	96	3,20
64	93	92	0,87	130	92	89	3,00
65	81	81	0,88	131	86	84	2,60
66	77	76	0,58	132	81	79	2,00

Πίνακας Π7.33. Σύγκριση οριζόντιων ανηγμένων παραμορφώσεων μονού τροχού (ALI) και πραγματικού συστήματος (μία κατηγορία διατομών και διόρθωση παραμορφώσεων με κατάλληλες εξισώσεις)

Διατομή	B767-300			A300-600			B747-200C			A300-B4		
	σ _{πραγμ.}	σ _{μον.}	απόκλ.	σ _{πραγμ.}	σ _{μον.}	απόκλ.	σ _{πραγμ.}	σ _{μον.}	απόκλ.	σ _{πραγμ.}	σ _{μον.}	απόκλ.
1	4,41	4,51	-2,32	4,83	4,94	-2,17	4,99	4,86	2,60	4,78	4,81	-0,68
2	2,97	3,01	-1,21	3,31	3,26	1,57	3,27	3,21	1,82	3,21	3,18	0,84
3	2,17	2,28	-4,90	2,41	2,43	-0,96	2,39	2,41	-0,67	2,31	2,39	-3,27
4	4,72	4,95	-4,84	5,22	5,40	-3,47	5,32	5,32	0,04	5,16	5,27	-2,11
5	3,16	3,28	-3,93	3,53	3,54	-0,34	3,47	3,49	-0,67	3,42	3,47	-1,33
6	2,29	2,49	-8,75	2,55	2,66	-4,22	2,53	2,63	-3,94	2,44	2,61	-6,92
7	4,73	4,90	-3,59	5,22	5,35	-2,54	5,34	5,27	1,33	5,15	5,21	-1,23
8	3,21	3,28	-2,31	3,57	3,55	0,59	3,52	3,49	0,76	3,46	3,47	-0,15
9	2,34	2,50	-6,73	2,59	2,67	-3,15	2,59	2,64	-1,80	2,48	2,62	-5,48
10	3,61	3,64	-0,83	4,01	3,96	1,24	4,02	3,90	3,01	3,93	3,86	1,66
11	2,54	2,60	-2,24	2,84	2,79	1,60	2,79	2,76	1,06	2,74	2,73	0,25
12	4,37	4,32	1,12	4,78	4,72	1,21	4,95	4,64	6,17	4,73	4,60	2,77
13	2,91	2,86	1,55	3,24	3,10	4,39	3,21	3,06	4,70	3,16	3,03	4,02
14	2,12	2,17	-2,17	2,36	2,31	2,19	2,33	2,29	1,76	2,27	2,28	-0,26
15	2,35	2,40	-2,08	2,62	2,58	1,52	2,59	2,55	1,63	2,53	2,53	0,06
16	5,04	5,03	0,29	5,58	5,49	1,58	5,63	5,40	4,06	5,49	5,35	2,51
17	3,41	3,35	1,85	3,79	3,62	4,52	3,74	3,57	4,55	3,67	3,53	3,68
18	2,47	2,54	-2,80	2,73	2,71	0,61	2,76	2,68	2,95	2,62	2,66	-1,43
19	2,78	2,81	-0,96	3,10	3,03	2,16	3,08	2,99	2,78	3,01	2,97	1,38
20	2,03	2,14	-5,42	2,27	2,28	-0,55	2,23	2,26	-1,19	2,18	2,24	-2,62

Πίνακας Π7.34. Σύγκριση τάσεων μονού τροχού ALI-πραγματικού συστήματος

Διατομή	B767-300			A300-600			B747-200C			A300-B4		
	Επραγμ.	Εμον.	απόκλ.	Επραγμ.	Εμον.	απόκλ.	Επραγμ.	Εμον.	απόκλ.	Επραγμ.	Εμον.	απόκλ.
1	126	129	-2,79	138	141	-2,74	143	139	2,47	137	138	-0,73
2	85	86	-1,61	95	93	1,71	93	92	1,13	92	91	1,26
3	62	65	-5,23	69	70	-0,91	70	69	1,27	66	68	-2,93
4	134	145	-7,89	149	159	-6,60	152	156	-2,92	148	155	-4,82
5	90	95	-4,90	101	103	-1,49	99	101	-2,44	98	100	-2,10
6	65	71	-8,29	73	76	-4,05	73	75	-2,94	70	74	-6,18
7	135	144	-6,61	149	157	-5,75	152	155	-1,52	147	153	-4,02
8	92	95	-3,50	102	103	-0,39	101	101	-0,66	99	100	-1,04
9	67	71	-6,57	74	76	-2,63	75	75	-0,65	71	75	-4,84
10	103	104	-1,31	115	113	1,21	114	112	2,40	113	111	1,76
11	73	74	-2,34	81	80	1,56	80	79	1,36	79	78	0,23
12	125	122	2,13	136	134	2,07	141	131	7,07	135	130	3,58
13	83	80	3,20	93	87	6,32	91	86	6,11	90	85	5,49
14	61	60	0,28	68	64	4,83	67	64	4,65	65	63	2,53
15	67	67	0,20	72	72	-0,87	74	71	3,70	72	71	2,18
16	144	147	-2,67	159	161	-1,45	160	159	1,05	157	157	-0,10
17	97	97	0,57	109	105	3,50	107	103	3,66	105	102	2,70
18	70	72	-2,51	78	77	1,07	79	76	3,73	75	76	-1,21
19	79	79	0,78	89	85	3,92	88	84	4,09	87	83	3,72
20	58	60	-2,34	65	64	1,93	64	63	2,02	63	62	0,12

Πίνακας Π7.34. Σύγκριση οριζοντίων ανηγμένων παραμορφώσεων μονού τροχού ALI-πραγματικού συστήματος

A	B	C	D
A300-600	B767-300	B747-200	A300-B4
σ_{rALI}	σ_{rALI}	σ_{rALI}	σ_{rALI}
4,94	4,51	4,86	4,81
3,26	3,01	3,21	3,18
2,43	2,28	2,41	2,39
5,40	4,95	5,32	5,27
3,54	3,28	3,49	3,47
2,66	2,49	2,63	2,61
5,35	4,90	5,27	5,21
3,55	3,28	3,49	3,47
2,67	2,50	2,64	2,62
3,96	3,64	3,90	3,86
2,79	2,60	2,76	2,73
4,72	4,32	4,64	4,60
3,10	2,86	3,06	3,03
2,31	2,17	2,29	2,28
2,58	2,40	2,55	2,53
5,49	5,03	5,40	5,35
3,62	3,35	3,57	3,53
2,71	2,54	2,68	2,66
3,03	2,81	2,99	2,97
2,28	2,14	2,26	2,24

Αναλογία τάσεων					
A/B	A/C	A/D	B/C	B/D	C/D
1,09	1,02	1,03	0,93	0,94	1,01
1,08	1,01	1,02	0,94	0,94	1,01
1,07	1,01	1,02	0,95	0,95	1,01
1,09	1,02	1,03	0,93	0,94	1,01
1,08	1,01	1,02	0,94	0,95	1,01
1,07	1,01	1,02	0,95	0,95	1,01
1,09	1,02	1,03	0,93	0,94	1,01
1,08	1,02	1,02	0,94	0,95	1,01
1,07	1,01	1,02	0,95	0,95	1,01
1,09	1,02	1,02	0,93	0,94	1,01
1,08	1,01	1,02	0,94	0,95	1,01
1,09	1,02	1,03	0,93	0,94	1,01
1,08	1,01	1,02	0,94	0,94	1,01
1,07	1,01	1,01	0,95	0,95	1,01
1,08	1,01	1,02	0,94	0,95	1,01
1,09	1,02	1,03	0,93	0,94	1,01
1,08	1,01	1,02	0,94	0,95	1,01
1,07	1,01	1,02	0,95	0,96	1,01
1,08	1,01	1,02	0,94	0,95	1,01
1,07	1,01	1,02	0,95	0,96	1,01

Πίνακας Π7.35. Αναλογία τάσεων μεταξύ των α/φ

A	B	C	D
A300-600	B767-300	B747-200	A300-B4
ϵ_{rALI}	ϵ_{rALI}	ϵ_{rALI}	ϵ_{rALI}
141	129	139	138
93	86	92	91
70	65	69	68
159	145	156	155
103	95	101	100
76	71	75	74
157	144	155	153
103	95	101	100
76	71	75	75
113	104	112	111
80	74	79	78
134	122	131	130
87	80	86	85
64	60	64	63
72	67	71	71
161	147	159	157
105	97	103	102
77	72	76	76
85	79	84	83
64	60	63	62

Αναλογία παραμορφώσεων					
A/B	A/C	A/D	B/C	B/D	C/D
1,09	1,02	1,03	0,93	0,94	1,01
1,08	1,01	1,02	0,94	0,95	1,01
1,07	1,01	1,02	0,95	0,95	1,01
1,10	1,02	1,03	0,93	0,94	1,01
1,08	1,01	1,02	0,94	0,94	1,01
1,07	1,01	1,02	0,94	0,95	1,01
1,09	1,02	1,03	0,93	0,94	1,01
1,08	1,01	1,02	0,94	0,94	1,01
1,07	1,01	1,02	0,94	0,95	1,01
1,09	1,02	1,02	0,93	0,94	1,01
1,08	1,01	1,02	0,94	0,95	1,01
1,09	1,02	1,03	0,93	0,94	1,01
1,08	1,01	1,02	0,94	0,95	1,01
1,07	1,01	1,02	0,95	0,95	1,01
1,08	1,01	1,02	0,94	0,95	1,01
1,10	1,02	1,03	0,93	0,94	1,01
1,08	1,01	1,02	0,94	0,94	1,01
1,07	1,01	1,02	0,94	0,95	1,01
1,08	1,01	1,02	0,94	0,95	1,01
1,07	1,01	1,02	0,95	0,95	1,01

Πίνακας Π7.36. Αναλογία οριζοντίων ανηγμένων παραμορφώσεων μεταξύ των α/φ

Αναλογία ALI									
A	B	C	D	A/B	A/C	A/D	B/C	B/D	C/D
A300-600	B767-300	B747-200	A300-B4						
1,202	1,076	1,178	1,164	1,12	1,02	1,03	0,91	0,92	1,01

Πίνακας Π7.37. Αναλογία ALI μεταξύ των α/φ

