



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

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ  
ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ

ΑΡΜΕΝΗ Γ. ΑΓΓΕΛΙΚΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, 2022

Εξέταση Διδακτορικής Διατριβής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Σεπτέμβριος 2022.

## **Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή**

### Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Α. Λοΐζος, Καθηγητής ΕΜΠ (Επιβλέπων)

Π. Ψαράκη-Καλουπτσίδη, Ομότιμη Καθηγήτρια ΕΜΠ

Χ. Πλατή, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ

### Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής

Γ. Γιαννής, Καθηγητής ΕΜΠ

Π. Κοπελιάς, Αναπληρωτής Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Ε. Μάνθος, Επίκουρος Καθηγητής ΑΠΘ

Π. Παπαντωνίου, Επίκουρος Καθηγητής ΠΑΔΑ

## **Ευχαριστίες**

---

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα Καθηγητή ΕΜΠ κ. Ανδρέα Λοΐζο για την ανάθεση της Διδακτορικής Διατριβής, τη συνεχή καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησής της. Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην κα Χριστίνα Πλατή, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ, για την υποστήριξη της σε όλα τα στάδια εκπόνησης της Διδακτορικής Διατριβής, καθώς και την κα Παρασκευή Ψαράκη-Καλουππίδη, Ομότιμη Καθηγήτρια ΕΜΠ, για την πολύτιμη συμβολή της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη συνεχή και αμέριστη στήριξή της.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>23</b>
1.1	ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΕΥΝΑΣ	23
1.2	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	26
1.3	ΔΟΜΗ	27
<b>2</b>	<b>ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ</b>	<b>29</b>
2.1	ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	29
2.2	ΕΜΠΕΙΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ FAA	29
2.2.1	Θεωρητικό υπόβαθρο	30
2.2.2	Θεώρηση κυκλοφορίας	31
2.2.3	Τυπικά υλικά	34
2.3	ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ FAA	36
2.3.1	Βασικές αρχές	36
2.3.2	Εκτίμηση καλύψεων-διελεύσεων έως την αστοχία	38
2.3.3	Λόγος P/C (pass-to-coverage)	39
2.3.4	Χαρακτηριστικά υλικών	40
2.3.5	Εξέλιξη αναλυτικής μεθόδου FAA	41
2.3.5.1	Νόμος κόπωσης ασφαλτομιγμάτων	42
2.3.5.2	Νόμος αστοχίας στρώσης έδρασης	44
2.4	ΣΥΛΛΟΓΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	45
2.4.1	Μη καταστρεπτικές δοκιμές	46
2.4.1.1	Καταγραφές με Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους (FWD)	46
2.4.1.2	Καταγραφές με γεωραντάρ (GPR)	48
2.4.1.3	Δυναμικό Πενετρόμετρο Κώνου (DCP)	51
2.4.2	Επεξεργασία στοιχείων συλλογής	52
2.4.2.1	Δείκτες υποχωρήσεων	52
2.4.2.2	Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού (Back-calculation)	53
<b>3</b>	<b>ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΥΣΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ</b>	<b>55</b>
3.1	ΕΜΠΕΙΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ FAA	55
3.1.1	Θεωρητικό υπόβαθρο	55
3.1.2	Τυπικά υλικά μεθόδου FAA	59
3.2	ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ FAA	60
3.2.1	Βασικές αρχές	60



3.2.2	Εκτίμηση καλύψεων-διελεύσεων έως την αστοχία .....	62
3.2.3	Λόγος P/C (pass-to-coverage) .....	65
3.2.4	Χαρακτηριστικά υλικών.....	65
3.2.5	Εξέλιξη αναλυτικής μεθόδου FAA.....	66
<b>4</b>	<b>ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ .....</b>	<b>68</b>
4.1	ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	68
4.2	Η ΜΕΘΟΔΟΣ LCN .....	69
4.3	ΜΕΘΟΔΟΣ ACN-PCN.....	72
4.3.1	Δείκτης ACN (Aircraft Classification Number) .....	72
4.3.2	Δείκτης PCN (Pavement Classification Number) .....	76
4.3.3	Εκτίμηση δείκτη PCN με τη μέθοδο της FAA .....	77
4.3.3.1	Αρχική μορφή μεθόδου.....	77
4.3.3.2	Ισχύουσα μέθοδος.....	78
4.4.4	Έλεγχος δομικής επάρκειας οδοστρώματος .....	84
4.3.4	Υπερφόρτωση οδοστρωμάτων.....	85
4.4	ΜΕΘΟΔΟΣ ACR-PCR.....	86
4.4.1	Δείκτης ACR (Aircraft Classification Rating) .....	86
4.4.2	Δείκτης PCR (Pavement Classification Rating).....	91
4.4.1	Εκτίμηση δείκτη PCR με τη μέθοδο της FAA .....	91
4.4.1.1	Υπολογισμός PCR μέσω εμπειρίας μακράς χρήσης του αεροδρομίου – Using Aircraft Method ...	91
4.4.1.2	Υπολογισμός PCR μέσω υπολογιστικής διαδικασίας αξιολόγησης – Technical Evaluation Method	92
4.4.2	Έλεγχος δομικής επάρκειας οδοστρώματος .....	94
4.4.3	Υπερφόρτωση οδοστρωμάτων.....	95
<b>5</b>	<b>ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΘΕΩΡΗΣΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ</b>	
	<b>ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ.....</b>	<b>96</b>
5.1	ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ .....	96
5.2	ΣΥΛΛΟΓΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	96
5.3	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ FAA.....	97
5.3.1	Επίδραση μεταβολής νόμου κόπωσης αφαλτομιγμάτων.....	101
5.3.2	Επίδραση μεταβολής μέτρου ελαστικότητας στρώσης βάσης από ασύνδετα αμμοχάλικα	103
5.4	ΣΧΟΛΙΑ- ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ.....	105
<b>6</b>	<b>ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ</b>	
	<b>ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ ΤΗΣ FAA .....</b>	<b>106</b>
6.1	ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ .....	106

6.2	ΣΥΛΛΟΓΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	107
6.3	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΥΛΛΟΓΗΣ.....	108
6.3.1	<i>Διατομή οδοστρώματος .....</i>	<i>108</i>
6.3.2	<i>Διαχωρισμός σε ομογενή υποτιμήματα .....</i>	<i>109</i>
6.3.3	<i>Εκτίμηση μηχανικών χαρακτηριστικών οδοστρώματος και φθοράς .....</i>	<i>110</i>
6.3.4	<i>Επίδραση νόμων κόπωσης ασφαλτομιγμάτων.....</i>	<i>113</i>
6.4	ΣΧΟΛΙΑ- ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ.....	114
<b>7</b>	<b>ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΙΞΩΔΟΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ.....</b>	<b>116</b>
7.1	ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	116
7.2	ΣΥΛΛΟΓΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	117
7.3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	118
7.4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	121
7.4.1	<i>Παραμορφώσεις .....</i>	<i>121</i>
7.4.2	<i>Φθορά έναντι κόπωσης.....</i>	<i>126</i>
7.5	ΣΧΟΛΙΑ - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ .....	128
<b>8</b>	<b>ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΠΕΡΦΟΡΤΩΣΗΣ ΕΥΚΑΜΠΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟΥ ΜΕ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....</b>	<b>130</b>
8.1	ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ .....	130
8.2	ΣΥΛΛΟΓΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	132
8.3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	132
8.3.1	<i>Επίδραση υπερφόρτωσης στη φθορά.....</i>	<i>132</i>
8.3.1	<i>Επίδραση μεταβολής ποσοστού ετήσιων διελεύσεων στη φθορά.....</i>	<i>134</i>
8.4	ΣΧΟΛΙΑ-ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ .....	136
<b>9</b>	<b>ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ ACR-PCR.....</b>	<b>138</b>
9.1	ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	138
9.2	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΑΡΧΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ACN-PCN ΚΑΙ ACR-PCR .....	139
9.2.1	<i>Θεωρητικό υπόβαθρο.....</i>	<i>139</i>
9.2.2	<i>Κατηγορία εδαφικής αντοχής .....</i>	<i>139</i>
9.2.3	<i>Προσδιορισμός δεικτών ACN και ACR.....</i>	<i>141</i>
9.3	ΕΥΚΑΜΠΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ.....	142
9.3.1	<i>Σύγκριση δεικτών ACN-ACR.....</i>	<i>142</i>
9.3.2	<i>Σύγκριση δεικτών PCN-PCR.....</i>	<i>150</i>
9.3.2.1	<i>Εκτίμηση δεικτών PCN-PCR για σταθερή κυκλοφορία σε διατομές με <math>CDF_{subgrade}=1</math>.....</i>	<i>150</i>

9.3.2.2	Εκτίμηση δεικτών PCN-PCR για διαφορετικά σενάρια κυκλοφορίας .....	153
9.3.2.3	Επίδραση θεώρησης της κυκλοφορίας στην κατάταξη φέρουσας ικανότητας οδοστρώματος.....	159
9.3.3	<i>Πρακτική εφαρμογή μεθόδων ACN-PCN και ACR-PCR</i> .....	162
9.3.3.1	Αεροδρόμιο Α .....	162
9.3.3.2	Αεροδρόμιο Β .....	165
9.4	ΔΥΣΚΑΜΠΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ.....	167
9.4.1	<i>Σύγκριση δεικτών ACN-ACR</i> .....	167
9.4.2	<i>Σύγκριση δεικτών PCN-PCR</i> .....	171
9.4.2.1	Εκτίμηση δεικτών PCN-PCR για σταθερή κυκλοφορία σε διατομές με $CDF_{PCC}=1$ .....	171
9.4.2.2	Επίδραση θεώρησης της κυκλοφορίας στην κατάταξη φέρουσας ικανότητας οδοστρώματος.....	174
9.4.3	<i>Πρακτική εφαρμογή μεθόδων ACN-PCN και ACR-PCR</i> .....	176
9.4.3.1	Διατομή Α .....	177
9.4.3.2	Διατομή Β .....	178
9.4.3.1	Αεροδρόμιο Γ.....	181
9.5	ΣΧΟΛΙΑ - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ .....	183
<b>10</b>	<b>ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΔΥΣΚΑΜΠΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟΥ .....</b>	<b>185</b>
10.1	ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ .....	185
10.2	ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ.....	186
10.3	ΣΥΛΛΟΓΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	188
10.4	ΠΥΡΗΝΕΣ .....	190
10.5	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	192
10.5.1	<i>Πάχος πλάκας σκυροδέματος</i> .....	192
10.5.2	<i>Ανάλυση ελαστικών υποχωρήσεων</i> .....	192
10.5.3	<i>Εργαστηριακές δοκιμές</i> .....	195
10.5.4	<i>Αποτελέσματα ανάλυσης φθοράς</i> .....	195
10.5.5	<i>Κατάταξη φέρουσας ικανότητας δαπέδου</i> .....	197
10.6	ΣΧΟΛΙΑ-ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ .....	200
<b>11</b>	<b>ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΕΥΚΑΜΠΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟΥ .....</b>	<b>202</b>
11.1	ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ .....	202
11.2	ΣΥΛΛΟΓΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	203
11.3	ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	204
11.4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΘΟΡΑΣ .....	211
11.5	ΣΧΟΛΙΑ-ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ .....	213

<b>12</b>	<b>ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΔΕΙΚΤΗ PCR</b>	<b>215</b>
12.1	ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	215
12.2	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	215
12.3	ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	218
<b>13</b>	<b>ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	<b>221</b>
13.1	ΚΥΡΙΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	221
13.1.1	<i>Διερεύνηση επίδρασης της θεώρησης των μηχανικών χαρακτηριστικών στην αξιολόγηση</i> <i>221</i>	
13.1.2	<i>Διερεύνηση επίδρασης εξέλιξης μεθόδου αξιολόγησης</i>	<i>221</i>
13.1.3	<i>Διερεύνηση επίδρασης ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς ασφαλτομιγμάτων</i>	<i>222</i>
13.1.4	<i>Διερεύνηση υπερφόρτωσης με αναλυτική διαδικασία</i>	<i>223</i>
13.1.5	<i>Διερεύνηση επίδρασης εισαγωγής μεθόδου ACR-PCR</i>	<i>223</i>
13.1.6	<i>Αξιοποίηση επιτόπου στοιχείων για την κατάταξη φέρουσας ικανότητας δύσκαμπτου</i> <i>οδοστρώματος αεροδρομίου</i>	<i>225</i>
13.1.7	<i>Αξιοποίηση επιτόπου στοιχείων για την κατάταξη φέρουσας ικανότητας εύκαμπτου</i> <i>οδοστρώματος αεροδρομίου</i>	<i>226</i>
13.1.8	<i>Διερεύνηση ανάπτυξης μοντέλου εκτίμησης δείκτη PCR</i>	<i>226</i>
13.2	ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	226
13.3	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	228
<b>14</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>229</b>

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Συντελεστές ισοδυναμίας συστημάτων τροχών .....	32
Πίνακας 2.2 Τιμές λόγων διελεύσεων προς καλύψεις-διελεύσεις C .....	33
Πίνακας 2.3 Υλικά εμπειρικής μεθόδου FAA.....	35
Πίνακας 2.4 Συντελεστές ισοδυναμίας υλικών FAA (εύκαμπτο οδόστρωμα) .....	35
Πίνακας 2.5 Χαρακτηριστικά υλικών FAA .....	40
Πίνακας 2.6 Συσχέτιση δείκτη DCP και CBR .....	51
Πίνακας 3.1 Υλικά εμπειρικής μεθόδου FAA (δύσκαμπτο οδόστρωμα) .....	59
Πίνακας 3.2 Παράμετροι a,b,c,d μοντέλου αστοχίας.....	66
Πίνακας 4.1 Κατηγορίες εδαφικής αντοχής για υπολογισμό δείκτη ACN (Εύκαμπτα οδοστρώματα) .....	73
Πίνακας 4.2 Κατηγορίες εδαφικής αντοχής για υπολογισμό δείκτη ACN (Δύσκαμπτα Οδοστρώματα) .....	73
Πίνακας 4.3 Κατηγορίες πίεσης ελαστικών μεθόδου ACN-PCN.....	76
Πίνακας 4.4 Πάχη στρώσεων διατομής αναφοράς με βάση τη διάταξη τροχών των αεροσκαφών (FAA 2014b) .....	79
Πίνακας 4.5 Εύρος τιμών συντελεστών ισοδυναμίας στρώσεων.....	79
Πίνακας 4.6 Κατηγορίες εδαφικής αντοχής για τον υπολογισμό του δείκτη ACR.....	86
Πίνακας 4.7 Διατομή οδοστρώματος αναφοράς για υπολογισμό δείκτη ACR για εύκαμπτα οδοστρώματα (Αεροσκάφη με $\leq 2$ τροχούς σε όλα τα κύρια φορεία) .....	87
Πίνακας 4.8 Διατομή οδοστρώματος αναφοράς για υπολογισμό δείκτη ACR για εύκαμπτα οδοστρώματα (Αεροσκάφη με $>2$ τροχούς σε ένα τουλάχιστον κύριο φορείο).....	87
Πίνακας 4.9 Διατομή οδοστρώματος αναφοράς για υπολογισμό δείκτη ACR για δύσκαμπτα οδοστρώματα .....	89
Πίνακας 4.10 Στοιχεία έκφρασης του δείκτη PCR - Κωδικοποίηση .....	91
Πίνακας 7.1 Χαρακτηριστικά αεροσκαφών .....	118
Πίνακας 7.2 Έλεγχοι t-test για τις κρίσιμες παραμορφώσεις στις ασφαλτικές στρώσεις .....	123
Πίνακας 7.3 Σύγκριση ελαστικών και ιξωδοελαστικών παραμορφώσεων για διαφορετικές ταχύτητες (έλεγχος t-test με $t_{crit}=2.14$ κα μηδενική υπόθεση $\epsilon_{EL}=\epsilon_{VISCO}$ ).....	124
Πίνακας 8.1 Τιμές ACN αεροσκαφών .....	133
Πίνακας 9.1 Σύνθεση κυκλοφορίας και χαρακτηριστικά αεροσκαφών.....	150
Πίνακας 9.2 Ετήσια στοιχεία κίνησης αεροσκαφών για 13 αεροδρόμια .....	155
Πίνακας 9.3 Σύνθεση κυκλοφορίας .....	162
Πίνακας 9.4 Σύνθεση κυκλοφορίας .....	181
Πίνακας 10.1 Διάταξη γεωφώνων FWD.....	188
Πίνακας 10.2 Συντελεστής μεταβλητότητας CV (%) για τους δείκτες D1 και D9 κατά μήκος των λωρίδων .....	193

Πίνακας 11.1 Χαρακτηριστικά αεροσκαφών .....	204
Πίνακας 12.1 Κριτήρια αξιολόγησης μοντέλου .....	217

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 2.1 Νομογράφημα μεθόδου CBR.....	30
Εικόνα 2.2 Διάγραμμα αξιολόγησης οδοστρώματος για τυπικό φορείο διπλού τροχού (FAA 1995).....	31
Εικόνα 2.3 Κατανομή βάρους αεροσκάφους στα φορεία.....	32
Εικόνα 2.4 Τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος κατά FAA.....	34
Εικόνα 2.5 Κρίσιμες θέσεις αστοχίας εύκαμπτου οδοστρώματος.....	36
Εικόνα 2.6 Αρχή δείκτη αθροιστικής φθοράς CDF.....	37
Εικόνα 2.7 Αθροιστική φθορά αεροσκαφών (Δείκτης CDF).....	38
Εικόνα 2.8 Ένεργα πλάτη δύο τροχών για υπολογισμό του λόγου P/C σε εύκαμπτο οδόστρωμα .....	39
Εικόνα 2.9 Εγκατάσταση δοκιμών NAPTF της FAA .....	41
Εικόνα 2.10 Η έννοια του RDEC στην αξιολόγηση της κόπωσης.....	42
Εικόνα 2.11 α) Συσκευή εργαστηριακής δοκιμής standard four-point bending beam fatigue test, β) σχηματική απεικόνιση σημείων φόρτισης .....	43
Εικόνα 2.12 Σύγκλιση μοντέλων Bleasdale και μοντέλου αρχικής αναλυτικής μεθόδου FAA (Kawa, 2017) .....	45
Εικόνα 2.13 (α) Το σύστημα FWD του ΕΜΠ και (β) διάταξη των γεωφώνων.....	46
Εικόνα 2.14 Τυπικό προφίλ υποχωρήσεων FWD .....	47
Εικόνα 2.15 Παλμική φόρτιση με σύστημα FWD .....	47
Εικόνα 2.16 Μέτρηση θερμοκρασίας: (1) αέρα, (2) επιφάνειας οδοστρώματος, (3) μέσο ασφαλτικών στρώσεων .....	48
Εικόνα 2.17 Διερεύνηση στρωματογραφίας οδοστρώματος με σύστημα GPR .....	49
Εικόνα 2.18 α) Πομπός σε απόσταση από την επιφάνεια ελέγχου και β) πομπός σε πλήρη επαφή με την επιφάνεια ελέγχου .....	50
Εικόνα 2.19 Σχηματική απεικόνιση παλμών GPR σε οδόστρωμα τριών στρώσεων.....	50
Εικόνα 2.20 Δοκιμή δυναμικού πνευρόμετρου κώνου (Dynamic Cone Penetrometer).....	51
Εικόνα 2.21 Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων ελαστικών υποχωρήσεων .....	53
Εικόνα 3.1 Έδαφος τύπου Winkler .....	55
Εικόνα 3.2 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε πλάκα από σκυρόδεμα κατά Westergaard .....	56
Εικόνα 3.3 Διάγραμμα αξιολόγησης οδοστρώματος για τυπικό φορείο διπλού τροχού (FAA, 1995).....	57
Εικόνα 3.4 Μοντέλο αστοχίας εμπειρικής μεθόδου ενός σταδίου.....	58
Εικόνα 3.5 Τυπική διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος .....	59
Εικόνα 3.6 Κάνναβος διακριτοποίησης δύσκαμπτου οδοστρώματος.....	60
Εικόνα 3.7 Προσομοίωση συστημάτων τροχών αεροσκαφών με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων ...	61
Εικόνα 3.8 Ανάλυση τάσεων με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων .....	61

Εικόνα 3.9 Κρίσιμη θέση αστοχίας δύσκαμπτου οδοστρώματος.....	62
Εικόνα 3.10 Κρίσιμη θέση αστοχίας δύσκαμπτου οδοστρώματος.....	62
Εικόνα 3.11 Σχέση μεταξύ δείκτη SCI και λογαρίθμου των καλύψεων-διελεύσεων (Rollings 1988).....	63
Εικόνα 3.12 Μοντέλο αστοχίας αναλυτικής μεθόδου FAA.....	63
Εικόνα 3.13 Ενεργό πλάτος τροχού για υπολογισμό του λόγου P/C σε δύσκαμπτο οδόστρωμα.....	65
Εικόνα 4.1 Εξέλιξη βάρους αεροσκαφών και συστημάτων κατάταξης φέρουσας ικανότητας οδοστρώματων.....	69
Εικόνα 4.2 Πρότυπη καμπύλη κατάταξης φορτίων (Αμπακούμκιν 1990).....	70
Εικόνα 4.3 Σχέση LCN, ESWL, πίεσης αεροθαλάμων τροχών και επιφάνειας επαφής με το οδόστρωμα, για εύκαμπτα και δύσκαμπτα οδοστρώματα (Αμπακούμκιν 1990).....	72
Εικόνα 4.4 Υπολογισμός δείκτη ACN αεροσκαφών με βάση το πάχος αναφοράς σε εύκαμπτα οδοστρώματα (ICAO 1983).....	75
Εικόνα 4.5 Υπολογισμός δείκτη ACN αεροσκαφών με βάση το πάχος αναφοράς σε δύσκαμπτα οδοστρώματα (ICAO 1983).....	75
Εικόνα 4.6 Στοιχεία που αποτελούν τον κωδικό έκφρασης του δείκτη PCN.....	76
Εικόνα 4.7 Υπολογισμός δείκτη PCN εύκαμπτου οδοστρώματος για χρήση από αεροσκάφη με φορείο διπλού τροχού.....	78
Εικόνα 4.8 Κατανομή κίνησης αεροσκαφών (FAA 2014β).....	83
Εικόνα 4.9 Καθορισμός πλέγματος για τα σημεία υπολογισμού των παραμορφώσεων για απλή διάταξη τροχών αεροσκάφους.....	90
Εικόνα 4.10 Καθορισμός πλέγματος για τα σημεία υπολογισμού των παραμορφώσεων για σύνθετη διάταξη τροχών αεροσκάφους.....	90
Εικόνα 4.11 Διάγραμμα ροής διαδικασίας υπολογισμού δείκτη PCR (FAA 2020, FAA 2022).....	94
Εικόνα 5.1 Διατομή σχεδιασμού εύκαμπτου οδοστρώματος διαδρόμου Π/Α.....	97
Εικόνα 5.2 Στοιχεία διατομής οδοστρώματος (θεώρηση τυπικών υλικών της FAA).....	98
Εικόνα 5.3 Μεταβολή $E_{AC}$ με θερμοκρασία.....	99
Εικόνα 5.4 Επίδραση $E_{AC}$ σε δείκτη CDF.....	99
Εικόνα 5.5 Επίδραση μεταβολής $E_{AC}$ σε παραμορφώσεις και καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία.....	101
Εικόνα 5.6 Επίδραση $E_{AC}$ στις καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία για διάφορους νόμους κόπωσης..	102
Εικόνα 5.7 Επίδραση $E_{AC}$ σε $CDF_{AC}$ για διάφορους νόμους κόπωσης.....	103
Εικόνα 5.8 Επίδραση μεταβολής μέτρου ελαστικότητας βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο στο δείκτη $CDF_{AC}$ για θερμοκρασίες 32°C, 25°C και 20°C.....	104
Εικόνα 6.1 Μεθοδολογία αξιολόγησης οδοστρώματος.....	107
Εικόνα 6.2 Μετρήσεις FWD και GPR στο διάδρομο Π/Α αεροσκαφών.....	108
Εικόνα 6.3 Διατομή οδοστρώματος.....	108
Εικόνα 6.4 Διαχωρισμός ίχνους διαδρόμου σε ομογενή υπομήματα.....	109



Εικόνα 6.5 Πάχη στρώσεων αντιπροσωπευτικών διατομών .....	110
Εικόνα 6.6 Μέτρα ελαστικότητας στρώσεων αντιπροσωπευτικών διατομών .....	111
Εικόνα 6.7 Αποτελέσματα CDFac.....	112
Εικόνα 6.8 Καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία για νόμους κόπωσης ασφαλτομιγμάτων .....	112
Εικόνα 6.9 Επίδραση νόμων κόπωσης ασφαλτομιγμάτων στη φθορά .....	113
Εικόνα 6.10 Αναλογία φθορών διαφόρων νόμων κόπωσης ως προς το νόμο των «Heukelom & Klomp» .....	114
Εικόνα 7.1 Σύνοψη ερευνητικής διαδικασίας για την αξιολόγησης του οδοστρώματος.....	116
Εικόνα 7.2 Τυπική διατομή οδοστρώματος διαδρόμου Π/Α .....	117
Εικόνα 7.3 Αρχική και μετασχηματισμένη κεντρική καμπύλη .....	120
Εικόνα 7.4 Προφίλ οριζόντιων παραμορφώσεων στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων για ελαστική και ιξωδοελαστική συμπεριφορά ασφαλτομιγμάτων. ....	121
Εικόνα 7.5 Σύγκριση εγκάρσιων και διαμηκών παραμορφώσεων για (α) ελαστική συμπεριφορά ασφαλτομίγματος και (β) ιξωδοελαστική συμπεριφορά ασφαλτομίγματος. ....	122
Εικόνα 7.6 Σύγκριση παραμορφώσεων για θεώρηση ελαστικής και ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς ασφαλτομίγματος για φόρτιση αεροσκάφους (α) A320-200, (β) B757-300, (γ) C-130 και (δ) F-16C .....	123
Εικόνα 7.7 Παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων για θεώρηση ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς ασφαλτομίγματος για διαφορετικές ταχύτητες για τα αεροσκάφη (α) A320-200, (β) B757-300, (γ) C-130 και (δ) F-16C .....	124
Εικόνα 7.8 Κατακόρυφες παραμορφώσεις στην κορυφή της στρώσης έδρασης για θεώρηση ελαστικής και ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς ασφαλτομίγματος για φόρτιση αεροσκάφους (α) A320-200, (β) B757-300, (γ) C-130 και (δ) F-16C .....	125
Εικόνα 7.9 Θηκογράμματα εγκάρσιων παραμορφώσεων στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων για θεώρηση (α) ελαστικής και (β) ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς ασφαλτομίγματος.....	126
Εικόνα 7.10: Θηκογράμματα κατακόρυφων παραμορφώσεων στην κορυφή της στρώσης έδρασης για θεώρηση (α) ελαστικής και (β) ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς ασφαλτομίγματος.....	126
Εικόνα 7.11 Σύγκριση επιτρεπόμενων καλύψεων έναντι αστοχίας σε κόπωση για τις περιπτώσεις φόρτισης με τα αεροσκάφη (α) A320-200, (β) B757-300, (γ) C-130 και (δ) F-16C. ....	127
Εικόνα 7.12 Κατανομή εγκάρσιων παραμορφώσεων στη θέση ελέγχου για τον υπολογισμό της φθοράς: (α) θεώρηση ελαστικής συμπεριφοράς ασφαλτομίγματος και (β) θεώρηση ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς ασφαλτομίγματος .....	128
Εικόνα 7.13: Φθορά οδοστρώματος λόγω κόπωσης: (α) ελαστική συμπεριφορά ασφαλτομίγματος και (β) ιξωδοελαστική συμπεριφορά ασφαλτομίγματος .....	128
Εικόνα 8.1 Μεθοδολογία αξιολόγησης κριτηρίου υπερφόρτωσης .....	131
Εικόνα 8.2 Διατομή οδοστρώματος διαδρόμου Π/Α αεροσκαφών.....	132
Εικόνα 8.3 Επίδραση υπερφόρτωσης στη φθορά .....	134
Εικόνα 8.4 Επίδραση της υπερφόρτωσης στη φθορά για διαφορετικά ποσοστά ετήσιων απογειώσεων	134

Εικόνα 8.5 Επιμέρους φθορά αεροσκαφών $CDF_{subgrade}$ .....	135
Εικόνα 8.6 Συνεισφορά αεροσκαφών με ίδιο ACN και ίδια φθορά στον συνολικό δείκτη $CDF_{subgrade}$ .....	136
Εικόνα 9.1 Στάδια διερεύνησης.....	138
Εικόνα 9.2 Κατηγορίες εδαφικής αντοχής συστημάτων ACN-PCN και ACR-PCR ως προς το δείκτη CBR (Εύκαμπτα Οδοστρώματα) .....	140
Εικόνα 9.3 Κατηγορίες εδαφικής αντοχής συστημάτων ACN-PCN και ACR-PCR ως προς το E (Δύσκαμπτα Οδοστρώματα) .....	140
Εικόνα 9.4 Διαδικασία υπολογισμού του δείκτη α) ACN και β) ACR σε εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων .....	142
Εικόνα 9.5 Συσχέτιση δεικτών ACN και ACR για εδαφική κατηγορία: (α) A, (β) B, (γ) C και (δ) D (εύκαμπτα οδοστρώματα). .....	143
Εικόνα 9.6 Λόγος ACR/ACN (εύκαμπτα οδοστρώματα).....	144
Εικόνα 9.7 Σύγκριση δεικτών ACN και ACR αεροσκαφών με διάταξη διπλών τροχών για εδαφική κατηγορία D.....	145
Εικόνα 9.8 Σύγκριση δεικτών ACN και ACR αεροσκαφών με διάταξη διπλών τροχών για εδαφική κατηγορία C.....	145
Εικόνα 9.9 Σύγκριση δεικτών ACN και ACR αεροσκαφών με διάταξη διπλών τροχών για εδαφική κατηγορία B.....	146
Εικόνα 9.10 Σύγκριση δεικτών ACN και ACR αεροσκαφών με διάταξη διπλών τροχών για εδαφική κατηγορία A.....	146
Εικόνα 9.11 Διατομή οδοστρώματος για ανάλυση συμπεριφοράς οδοστρώματος (pavement response analysis) .....	147
Εικόνα 9.12 Μεταβολή της κατακόρυφης παραμόρφωσης (ez) και της φθοράς της στρώσης έδρασης ( $CDF_{subgrade}$ ) αυξανόμενου του δείκτη ACN.....	148
Εικόνα 9.13 Μεταβολή της κατακόρυφης παραμόρφωσης (ez) και του δείκτη ACR αυξανόμενου του δείκτη ACN .....	148
Εικόνα 9.14 Μεταβολή της κατακόρυφης παραμόρφωσης (ez) και της φθοράς της στρώσης έδρασης ( $CDF_{subgrade}$ ) αυξανόμενου του δείκτη ACR.....	149
Εικόνα 9.15 Διατομή οδοστρώματος.....	150
Εικόνα 9.16 Πάχη διατομών για κατηγορία εδαφικής αντοχής: (α) A, (β) B, (γ) C and (δ) D. ....	151
Εικόνα 9.17 Σύγκριση PCN και PCR (εύκαμπτα οδοστρώματα) .....	152
Εικόνα 9.18 Δείκτες $CDF_{subgrade}$ , $CDF_{ac}$ και PCR για διατομές με κατηγορία εδαφικής αντοχής: (α) A, (β) B, (γ) C and (δ) D.....	153
Εικόνα 9.19 Διατομή οδοστρώματος.....	156
Εικόνα 9.20 Πάχη διατομών για CBR: (α) 7%, (β) 9%, (γ) 12% και (δ) 15%.....	156
Εικόνα 9.21 Δείκτες PCN και PCR για διατομές με CBR: (α) 7%, (β) 9%, (γ) 12% και (δ) 15%.....	157
Εικόνα 9.22 Συσχέτιση δεικτών PCN και PCR για CBR: (α) 7%, (β) 9%, (γ) 12% και (δ) 15%.....	158

Εικόνα 9.23 Συσχέτιση δείκτη PCR και φθοράς: (α) στρώσης έδρασης (β) ασφαλτικών στρώσεων (CBR=7%) .....	158
Εικόνα 9.24 Συσχέτιση δείκτη PCR και φθοράς: (α) στρώσης έδρασης (β) ασφαλτικών στρώσεων (CBR=9%) .....	158
Εικόνα 9.25 Συσχέτιση δείκτη PCR και φθοράς: (α) στρώσης έδρασης (β) ασφαλτικών στρώσεων (CBR=12%) .....	159
Εικόνα 9.26 Συσχέτιση δείκτη PCR και φθοράς: (α) στρώσης έδρασης (β) ασφαλτικών στρώσεων (CBR=15%) .....	159
Εικόνα 9.27 Διατομή οδοστρώματος.....	160
Εικόνα 9.28 Δείκτης PCR, φθορά στρώσης έδρασης (CDFsubgrade) και φθορά ασφαλτικών στρώσεων (CDFac).....	160
Εικόνα 9.29 Συσχέτιση δείκτη PCR και φθοράς: (α) στρώσης έδρασης (CDFsubgrade) (β) ασφαλτικών στρώσεων (CDFac).....	161
Εικόνα 9.30 Συσχέτιση δεικτών PCN και PCR.....	161
Εικόνα 9.31 Διατομή οδοστρώματος διαδρόμου Π/Α αεροσκαφών (Αεροδρόμιο Α).....	162
Εικόνα 9.32 Τιμές ACN αεροσκαφών για εδαφική κατηγορία Α σε σχέση με το PCN.....	164
Εικόνα 9.33 Τιμές ACR αεροσκαφών για εδαφική κατηγορία Α σε σχέση με το PCR.....	164
Εικόνα 9.34 Διατομή οδοστρώματος διαδρόμου Π/Α αεροσκαφών (Αεροδρόμιο Β).....	165
Εικόνα 9.35 Τιμές ACN αεροσκαφών για εδαφική κατηγορία C σε σχέση με το PCN .....	166
Εικόνα 9.36 Τιμές ACR αεροσκαφών για εδαφική κατηγορία D σε σχέση με το PCR .....	166
Εικόνα 9.37 Συσχέτιση δεικτών ACN και ACR για εδαφική κατηγορία: (α) Α, (β) Β, (γ) C και (δ) D (δύσκαμπτα οδοστρώματα) .....	167
Εικόνα 9.38 Λόγος ACR/ACN (δύσκαμπτα οδοστρώματα) .....	168
Εικόνα 9.39 Σύγκριση δεικτών ACN και ACR αεροσκαφών με διάταξη διπλών τροχών για εδαφική κατηγορία D.....	169
Εικόνα 9.40 Σύγκριση δεικτών ACN και ACR αεροσκαφών με διάταξη διπλών τροχών για εδαφική κατηγορία C.....	169
Εικόνα 9.41 Σύγκριση δεικτών ACN και ACR αεροσκαφών με διάταξη διπλών τροχών για εδαφική κατηγορία Β.....	170
Εικόνα 9.42 Σύγκριση δεικτών ACN και ACR αεροσκαφών με διάταξη διπλών τροχών για εδαφική κατηγορία Α.....	170
Εικόνα 9.43 Διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος .....	171
Εικόνα 9.44 Πάχη διατομών για κατηγορία εδαφικής αντοχής: (α) Α, (β) Β, (γ) C and (δ) D .....	172
Εικόνα 9.45 Δείκτες CDF <sub>PCB</sub> και PCR για διατομές με κατηγορία εδαφικής αντοχής: (α) Α, (β) Β, (γ) C and (δ) D .....	173
Εικόνα 9.46 Σύγκριση PCN και PCR (δύσκαμπτα οδοστρώματα) .....	173
Εικόνα 9.47 Διατομή οδοστρώματος.....	174

Εικόνα 9.48 Δείκτης PCR και φθορά πλάκας σκυροδέματος ( $CDF_{PCR}$ ).....	175
Εικόνα 9.49 Συσχέτιση δείκτη PCR και φθοράς.....	175
Εικόνα 9.50 Συσχέτιση δεικτών PCN και PCR.....	176
Εικόνα 9.51 Διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος (Διατομή Α).....	177
Εικόνα 9.52 Τιμές ACN και ACR αεροσκαφών για εδαφική κατηγορία Β και D αντίστοιχα .....	178
Εικόνα 9.53 Διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος (Διατομή Β).....	179
Εικόνα 9.54 Τιμές ACN και ACR αεροσκαφών για εδαφική κατηγορία Β και D αντίστοιχα .....	180
Εικόνα 9.55 Διατομή οδοστρώματος δαπέδου αναμονής αεροσκαφών (Αεροδρόμιο Γ) .....	181
Εικόνα 9.56 Τιμές ACN και ACR αεροσκαφών για εδαφική κατηγορία Β .....	182
Εικόνα 10.1 Μεθοδολογία αξιολόγησης .....	186
Εικόνα 10.2 Πειραματικές δοκιμές: (α) FWD, (β) DCP και (γ) πυρηνοληψίες.....	186
Εικόνα 10.3 Διατομή υπό διερεύνηση οδοστρώματος (Αεροδρόμιο Γ) .....	187
Εικόνα 10.4 Περιοχή διερεύνησης κατασκευασμένου τμήματος δύσκαμπτου οδοστρώματος .....	187
Εικόνα 10.5 Κάτοψη περιοχής διερεύνησης και σημεία μετρήσεων .....	188
Εικόνα 10.6 (α) Μετρήσεις LTE σε αρμούς, (β) Μετρήσεις LTE σε ρωγμές και (γ) Μετρήσεις απευθείας σε ρωγμή.....	190
Εικόνα 10.7 Διάταξη εργαστηριακής δοκιμής διάρρηξης (Splitting strength test).....	191
Εικόνα 10.8 Μεταβολή δεικτών D1 και D9 σε: (α) Λωρίδα Ι, (b) Λωρίδα ΙΙ, (c) Λωρίδα ΙΙΙ και (d) Λωρίδα ΙV .....	192
Εικόνα 10.9 Θηκογράμματα δείκτη ανθεκτικότητας στις γωνίες και στις ακμές των πλακών σκυροδέματος .....	194
Εικόνα 10.10 Αποτελέσματα LTE στους αρμούς.....	194
Εικόνα 10.11 Επίδραση πάχους πλάκας και καμπτικής αντοχής σκυροδέματος στη φθορά του οδοστρώματος .....	197
Εικόνα 10.12 Επίδραση πάχους πλάκας και καμπτικής αντοχής σκυροδέματος στο δείκτη PCN.....	198
Εικόνα 10.13 Επίδραση πάχους πλάκας και καμπτικής αντοχής σκυροδέματος στο δείκτη PCR.....	198
Εικόνα 10.14 Συσχέτιση δεικτών PCN και PCR οδοστρώματος.....	199
Εικόνα 11.1 Μεθοδολογία που ακολουθήθηκε .....	202
Εικόνα 11.2 Πειραματικές δοκιμές: (α) FWD, (β) πυρηνοληψίες και (γ) GPR .....	203
Εικόνα 11.3 Τυπική διατομή οδοστρώματος διαδρόμου Π/Α .....	203
Εικόνα 11.4 Πάχη στρώσεων χαρακτηριστικών διατομών .....	205
Εικόνα 11.5 Δείκτες PCN και PCR χαρακτηριστικών διατομών οδοστρώματος.....	205
Εικόνα 11.6 Συσχέτιση δεικτών PCN και PCR.....	206
Εικόνα 11.7 Μέτρο ελαστικότητας ασφαλτικών στρώσεων διατομών μέσω ανάστροφου υπολογισμού .	207
Εικόνα 11.8 Επίδραση θεώρησης επιτόπου μηχανικών χαρακτηριστικών στο δείκτη PCR .....	208

Εικόνα 11.9 Συσκευή ITSM του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ.....	209
Εικόνα 11.10 Κατανομή τάσεων κατά τη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού.....	209
Εικόνα 11.11 Μέτρο δυσκαμψίας ασφαλικών στρώσεων (32°C) .....	210
Εικόνα 11.12 Πάχος ασφαλικών στρώσεων από πυρήνες .....	211
Εικόνα 11.13 Επίδραση πάχους ασφαλικών στρώσεων και μέτρου ελαστικότητας ασφαλομιγμάτων στη φθορά της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος .....	212
Εικόνα 11.14 Επίδραση πάχους και μέτρου ελαστικότητας στο δείκτη PCR.....	213
Εικόνα 12.1 Διαδικασία ανάπτυξης μοντέλου εκτίμησης δείκτη PCR .....	216
Εικόνα 12.2 Μοντέλο συσχέτισης δεικτών PCN-PCR.....	216
Εικόνα 12.3 Διαγράμματα ελέγχου υπολοίπων .....	218
Εικόνα 12.4 Διάγραμμα διασποράς .....	219

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Μία από τις βασικές υποδομές ενός αεροδρομίου αποτελούν τα οδοστρώματα, τα οποία θα πρέπει να διατηρούνται σε καλή κατάσταση ώστε να διασφαλίζουν την ασφαλή κίνηση των αεροσκαφών. Για το σκοπό αυτό είναι απαραίτητη η αξιολόγηση της δομικής κατάστασής των οδοστρωμάτων σε τακτά χρονικά διαστήματα, η οποία συμβάλλει στον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητάς τους. Διεθνώς έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων, οι οποίες αρχικά βασίστηκαν σε εμπειρικές διαδικασίες ενώ ορισμένες εξ αυτών διαχρονικά επικαιροποιήθηκαν, λαμβάνοντας υπόψη τις γενικότερες εξελίξεις στον τομέα της ανάλυσης των οδοστρωμάτων. Παράλληλα η ανάπτυξη συστημάτων κατάταξης της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων λειτούργησε υποστηρικτικά στις διαδικασίες διαχείρισης οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Δεδομένου όμως ότι ακόμα και η επίσημη μέθοδος κατάταξης ACN-PCN (Aircraft Classification Number-Pavement Classification Number) παρουσιάζει αρκετές αδυναμίες, στο εγγύς μέλλον αναμένεται να τεθεί σε ισχύ η επικαιροποιημένη διαδικασία κατάταξης οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACR-PCR (Aircraft Classification Rating-Pavement Classification Rating).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας διερευνήθηκε η επίδραση της εξέλιξης των μεθοδολογιών αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Επιπλέον διερευνήθηκε η εφαρμοσιμότητα των υπόψη μεθοδολογιών σε συνθήκες διαφορετικές από εκείνες για τις οποίες έχουν αναπτυχθεί. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη θεώρηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος και ειδικότερα στη συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων των ασφαλτικών στρώσεων.

Επιπλέον πραγματοποιήθηκε προκαταρκτική διερεύνηση της επίδρασης της εισαγωγής της επικαιροποιημένης διαδικασίας κατάταξης της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACR-PCR. Στο πλαίσιο αυτό διερευνήθηκε η ύπαρξη συσχέτισης μεταξύ των δεικτών PCN και PCR και πραγματοποιήθηκε εφαρμογή των δύο συστημάτων κατάταξης σε αεροδρόμια του ελλαδικού χώρου για τον εντοπισμό πρακτικών θέματα που μπορεί να προκύψουν κατά την εφαρμογή του νέου συστήματος ACR-PCR. Επιπροσθέτως, διερευνήθηκαν και θέματα που αφορούν στη μεταβατική περίοδο μέχρι την πλήρη ισχύ του συστήματος κατάταξης ACR-PCR, όπως είναι ο έλεγχος της επάρκειας της φέρουσας ικανότητας υφιστάμενων οδοστρωμάτων αεροδρομίων στα οποία παρατηρούνται φαινόμενα υπερφόρτωσης.

Ακολούθησε η διεξαγωγή πειραμάτων πεδίου για την ακριβέστερη εκτίμηση των επιτόπου στοιχείων του οδοστρώματος και την αξιολόγηση της δομικής κατάστασής του με στόχο την τροφοδότηση των συστημάτων κατάταξης.

Επιστέγασμα της διερεύνησης αποτέλεσε η ανάπτυξη ενός μοντέλου εκτίμησης του επικαιροποιημένου δείκτη κατάταξης της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος ενός αεροδρομίου PCR με βάση τον ισχύοντα δείκτη PCN.

## **ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

---

Τα οδοστρώματα αποτελούν μία από τις βασικές υποδομές ενός αεροδρομίου που καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη λειτουργία του. Για την εξασφάλιση της κίνησης των αεροσκαφών με ασφάλεια είναι απαραίτητη η αξιολόγηση της κατάστασης των οδοστρωμάτων του αεροδρομίου σε τακτά χρονικά διαστήματα. Ειδικότερα η αξιολόγηση της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος καθορίζει τις απαιτούμενες ενέργειες για επέμβαση προκειμένου να διατηρηθεί η κατάσταση του οδοστρώματος σε επιθυμητά επίπεδα. Η υπόψη διαδικασία είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος, για την οποία έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες διεθνώς.

Αρχικά, η αξιολόγηση βασίστηκε σε εμπειρικές διαδικασίες σχεδιασμού που εφαρμόστηκαν και σε οδοστρώματα οδών. Πλην όμως, οι εξελίξεις στον τομέα της ανάλυσης των οδοστρωμάτων και η ανάπτυξη εξελιγμένων αναλυτικών μεθοδολογιών σχεδιασμού οδήγησαν στην τροποποίηση και των διαδικασιών αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Παράλληλα, χρήσιμο εργαλείο για τη διαχείριση οδοστρωμάτων αεροδρομίων αποτέλεσε η ανάπτυξη συστημάτων κατάταξης της φέρουσας ικανότητάς τους σε καθορισμένο σύστημα αναφοράς φορτίων. Παρόλο που η εφαρμογή συστημάτων κατάταξης τυγχάνει αποδοχής πάνω από μισό αιώνα, ακόμα και η επίσημη μέθοδος κατάταξης ACN-PCN (Aircraft Classification Number-Pavement Classification Number) παρουσιάζει αρκετές αδυναμίες. Προς τούτο στο εγγύς μέλλον αναμένεται να τεθεί σε ισχύ η επικαιροποιημένη διαδικασία κατάταξης οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACR-PCR (Aircraft Classification Rating-Pavement Classification Rating) .

Υπό το πρίσμα των παραπάνω στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας διερευνήθηκε η επίδραση της εξέλιξης των μεθοδολογιών αξιολόγησης εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Από τη σχετική διερεύνηση προέκυψε ότι οδοστρώματα που έχουν σχεδιαστεί με εμπειρικές διαδικασίες σχεδιασμού φαίνεται να είναι δομικά επαρκή όταν αξιολογούνται με τις πρόσφατες αναλυτικές διαδικασίες αξιολόγησης που έχουν αναπτυχθεί.

Επιπλέον διερευνήθηκε η εφαρμοσιμότητα των υπόψη μεθοδολογιών σε συνθήκες διαφορετικές από εκείνες για τις οποίες έχουν αναπτυχθεί. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη θεώρηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος και ειδικότερα στη συμπεριφορά των ασφαλικών στρώσεων. Η διερεύνηση ανέδειξε τη σημασία της ορθής θεώρησης του μέτρου ελαστικότητας των ασφαλικών στρώσεων, το οποίο επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, κατά την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης οδοστρωμάτων του ελλαδικού χώρου. Επίσης κατά την ανάλυση ελήφθησαν υπόψη και εξελιγμένες θεωρήσεις των υλικών, όπως είναι η ιξωδοελαστική θεώρηση, η οποία μέχρι στιγμής δεν περιλαμβάνεται στις ισχύουσες μεθοδολογίες αξιολόγησης οδοστρωμάτων



αεροδρομίων. Από τη σχετική διερεύνηση προέκυψε ότι η συνήθης θεώρηση της ελαστικής συμπεριφοράς των υλικών που υιοθετείται μέχρι στιγμής εμφανίζεται ευμενέστερη ως προς την αναπτυσσόμενη εντατική κατάσταση των οδοστρωμάτων, γεγονός το οποίο μπορεί να επηρεάσει τη λήψη αποφάσεων για τη διαχείριση των οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε προκαταρκτική διερεύνηση της επίδρασης της εισαγωγής της επικαιροποιημένης διαδικασίας κατάταξης της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACR-PCR. Από τη σχετική διαδικασία προέκυψε ότι το επικαιροποιημένο σύστημα είναι βελτιωμένο, εντούτοις εξακολουθούν να εντοπίζονται κάποιες αδυναμίες όσον αφορά στο προσομοίωμα εκτίμησης του δείκτη ACR για την περίπτωση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Επιπλέον το σύστημα ACR-PCR εξακολουθεί να μην λαμβάνει υπόψη το μηχανισμό αστοχίας των ασφαλικών στρώσεων, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε εκτεταμένη φθορά κατά τη λήψη αποφάσεων στο πλαίσιο της διαχείρισης του αεροδρομίου.

Αναφορικά με τη διερεύνηση της ύπαρξης συσχέτισης μεταξύ των δεικτών PCN και PCR, προέκυψε ότι υπάρχει ικανοποιητική συσχέτιση, η οποία μπορεί να δώσει μία προκαταρκτική εικόνα της μεταβολής της κατάταξης κατά την εφαρμογή του επικαιροποιημένου συστήματος για σενάρια κυκλοφορίας που εντοπίζονται στον ελλαδικό χώρο. Επιπλέον από την εφαρμογή των δύο συστημάτων κατάταξης σε αεροδρόμια του ελλαδικού χώρου εντοπίστηκαν πρακτικά θέματα που μπορεί να προκύψουν κατά την εφαρμογή του νέου συστήματος ACR-PCR.

Σχετικά με τη μεταβατική περίοδο μέχρι την πλήρη ισχύ του συστήματος κατάταξης ACR-PCR διερευνήθηκε ο έλεγχος της επάρκειας της φέρουσας ικανότητας υφιστάμενων οδοστρωμάτων αεροδρομίων στα οποία παρατηρούνται φαινόμενα υπερφόρτωσης. Από τη σχετική διαδικασία προέκυψε ότι το εμπειρικό κριτήριο υπερφόρτωσης του Διεθνούς Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας ICAO (ICAO: International Civil Aviation Organization) θα πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή για το χρονικό διάστημα κατά το οποίο είναι σε ισχύ η μέθοδος ACN-PCN.

Ακολούθησε η διεξαγωγή πειραμάτων πεδίου για την ακριβέστερη εκτίμηση των επιτόπου στοιχείων του οδοστρώματος και την αξιολόγηση της δομικής κατάστασής του με στόχο την τροφοδότηση των συστημάτων κατάταξης. Ο συνδυασμός στοιχείων πεδίου και στοιχείων εργαστηριακών δοκιμών μπορεί να συμβάλλει στη βελτιστοποίηση των διαδικασιών κατάταξης της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων κατά την εφαρμογή μεθόδων σε χώρες διαφορετικές από εκείνες στις οποίες έχουν αναπτυχθεί οι ισχύουσες μεθοδολογίες.

Επιστέγασμα της διερεύνησης αποτέλεσε η ανάπτυξη ενός μοντέλου εκτίμησης του επικαιροποιημένου δείκτη κατάταξης της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος ενός αεροδρομίου PCR με βάση τον ισχύοντα δείκτη PCN. Το υπόψη μοντέλο θα μπορούσε να

αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο κατά την προκαταρκτική φάση εφαρμογής του νέου συστήματος κατάταξης.

## **EXTENDED ABSTRACT**

---

Pavements are one of the most important airfield infrastructures that determines airport's operation. To ensure the safe operation of aircrafts, it is necessary to assess pavement condition at regular intervals. In particular, the assessment of the structural condition of a pavement determines the required interventions in order to maintain pavement condition at desired levels. This process is inextricably linked to the determination of the bearing capacity of a pavement, for which various methodologies have been developed internationally.

Initially, pavement evaluation was based on empirical design procedures that were implemented on highway pavements. However, developments in the field of pavement analysis and the development of sophisticated analytical design procedures have led to the modification of airfield pavement evaluation techniques. At the same time, the development of classification systems for reporting the bearing capacity of airfield pavements provided a useful tool for airport management procedures. Although the implementation of classification systems has been used for over half a century, even the official ACN-PCN (Aircraft Classification Number-Pavement Classification Number) classification method has several disadvantages. On this basis, the updated ACR-PCR (Aircraft Classification Rating-Pavement Classification Rating) system is expected to come into force in the near future.

In the light of the above, in the present research, the effect of the evolution of flexible airfield pavement evaluation procedures was investigated. The relevant investigation showed that pavements designed with empirical design procedures seem to be structurally adequate when evaluated using the recent detailed evaluation procedures that have been developed.

In addition, the applicability of these methodologies in conditions different from those for which they have been developed was investigated. Special emphasis was given to the assumptions made for the mechanical characteristics of the materials of the individual layers of the pavement and in particular to the behavior of the asphalt layers. The investigation highlighted the importance of the appropriate assumptions concerning the modulus of elasticity of the asphalt layers, which is affected by temperature, when assessing the structural condition of airfield pavements in Greece. Moreover, the analysis took into account advanced material assumptions, such as the viscoelastic assumption, which is not included in the current airfield pavement evaluation procedures. The relevant investigation showed that the elastic behavior of the materials adopted so far, appears to be more favorable in terms of pavement response, a fact that can influence the decision-making in terms of airfield pavement management.

A preliminary investigation was then carried out in order to examine the effect of the introduction of the updated ACR-PCR airfield pavement reporting system. The relevant procedure showed that the updated system has been improved, however some shortcomings are still identified concerning the ACR modelling for flexible pavements. In addition, the ACR-PCR system still does not take into account the failure mechanism of the asphalt concrete layers, which can lead to extensive damage in terms of airfield management.

Regarding the investigation of the correlation between PCN and PCR indices, it emerged that there is a satisfactory correlation, which can give a preliminary view of the modification of bearing capacity reporting, during the implementation of the updated system for aircraft traffic data located in Greece. In addition, from the implementation of the two reporting systems at Greek airports, practical issues were identified that may arise during the implementation of the new ACR-PCR system.

Regarding the transition period until the full implementation of the ACR-PCR reporting system, the adequacy of the bearing capacity of existing airfield pavements, where overloading is observed, was investigated. From the relevant analysis it occurs that the empirical overload criterion of the International Civil Aviation Organization (ICAO) should be used with caution for the period during which the ACN-PCN method is still in force.

Field experiments were performed for the accurate assessment of the insitu pavement condition and the evaluation of its structural condition in order to feed the reporting systems. The combination of field data and laboratory test data can optimize the bearing capacity reporting procedures when applying methods in countries other than those in which the existing methodologies have been developed.

The highlight of the investigation was the development of a model for estimating the PCR index for reporting the bearing capacity of an airfield pavement based on the PCN index. This model could provide a useful tool during the preliminary phase of the implementation of the new reporting system.

---

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

### 1.1 Γενική θεώρηση προβλήματος και αντικείμενο έρευνας

Τα αεροδρόμια αποτελούν βασικό πυλώνα του δικτύου των μεταφορών τόσο επιβατών όσο και αγαθών. Μία από τις κρίσιμες υποδομές ενός αεροδρομίου που καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη λειτουργία του είναι τα οδοστρώματα, τα οποία εξυπηρετούν τις κινήσεις των αεροσκαφών. Σε ένα αεροδρόμιο εντοπίζονται διάφορες κατηγορίες καταστρωμάτων, ανάλογα με τις λειτουργίες που πρέπει αυτό να εξυπηρετήσει. Πιο συγκεκριμένα, τα καταστρώματα που εντοπίζονται σε ένα αεροδρόμιο αφορούν στους διαδρόμους προσγείωσης-απογείωσης (Π/Α) αεροσκαφών, στους τροχόδρομους, στους συνδετήριους διαδρόμους, στα δάπεδα στάθμευσης, στα δάπεδα αναμονής, στα δάπεδα συντήρησης καθώς και στα βοηθητικά δάπεδα.

Με στόχο την ασφαλή κίνηση των αεροσκαφών στα διάφορα καταστρώματα και την απρόσκοπτη λειτουργία του αεροδρομίου είναι απαραίτητη η αξιολόγηση της κατάστασης των οδοστρωμάτων του σε τακτά χρονικά διαστήματα σε όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του. Η υπόψη διαδικασία περιλαμβάνει τόσο την εκτίμηση της λειτουργικής κατάστασης ενός οδοστρώματος όσο και τον προσδιορισμό της δομικής κατάστασής του. Ειδικότερα, η αξιολόγηση της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος συμβάλλει στον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητάς του, η οποία αποτελεί βασικό στοιχείο για την ορθή διαχείριση των υποδομών του αεροδρομίου. Δεδομένου ότι οι απαιτήσεις ως προς την παρεχόμενη φέρουσα ικανότητα των οδοστρωμάτων ενός αεροδρομίου είναι ιδιαίτερες υψηλές και οποιαδήποτε επέμβαση για συντήρηση επηρεάζει δυσμενώς τη λειτουργία του αεροδρομίου, η παρούσα διερεύνηση επικεντρώνεται στην αξιολόγηση της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος (pavement structural evaluation) και στον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητάς του.

Για τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων αεροδρομίων έχουν αναπτυχθεί διεθνώς διάφορες μεθοδολογίες οι οποίες βασίζονται στην αξιολόγηση της δομικής κατάστασής τους. Ενδεικτικά αναφέρονται οι μέθοδοι της Διεύθυνσης Υπηρεσιών Πολιτικού Μηχανικού της Μεγάλης Βρετανίας (Directorate of Civil Engineering Services) (DCES 1989, DMG27 2011), του Γαλλικού Υπουργείου Συγκοινωνιών (STBA: Service Technique des Bases Aériennes) (STBA 2001), του Κέντρου Ανάπτυξης και Έρευνας των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (ERCD: Engineer Research and Development Center) (ERDC 2001) και της Ομοσπονδιακής Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας (FAA: Federal Aviation Administration), η οποία αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μέθοδο, τόσο σε διεθνές όσο και σε εθνικό επίπεδο (FAA 1995, FAA 2009, FAA 2016, FAA 2021).

Στις παραπάνω μεθοδολογίες (DCES 1989, DMG27 2011, ERDC 2001, FAA 1995) η αξιολόγηση της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος αρχικά βασίστηκε σε εμπειρικές διαδικασίες σχεδιασμού που εφαρμόστηκαν και σε οδοστρώματα οδών, όπως είναι για παράδειγμα η μέθοδος CBR (California Bearing Ratio) του Σώματος Μηχανικών των ΗΠΑ. Στόχο της αξιολόγησης ενός οδοστρώματος αποτέλεσε ο προσδιορισμός του επιτρεπόμενου φορτίου που μπορούσε να δεχθεί το υπό διερεύνηση οδόστρωμα. Κατόπιν, οι γενικότερες εξελίξεις στον τομέα της ανάλυσης των οδοστρωμάτων και η ανάπτυξη εξελιγμένων αναλυτικών μεθοδολογιών σχεδιασμού οδήγησαν στην τροποποίηση και των διαδικασιών αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Αποτέλεσμα των παραπάνω εξελίξεων αποτέλεσε η σταδιακή εισαγωγή και η συνεχής επικαιροποίηση αναλυτικών διαδικασιών σχεδιασμού και αξιολόγησης (FAA 2009, FAA 2016, FAA 2021). Σημειώνεται ότι η αξιολόγηση των οδοστρωμάτων αεροδρομίων πραγματοποιείται διαχρονικά μέσω μίας ανάστροφης εφαρμογής των μεθοδολογιών σχεδιασμού οδοστρωμάτων.

Εκτός από τις διαδικασίες αξιολόγησης οδοστρωμάτων που προαναφέρθηκαν, στα οδοστρώματα αεροδρομίων, σε αντίθεση με τα οδοστρώματα των οδών, πραγματοποιείται κατάταξη της φέρουσας ικανότητάς τους σε καθορισμένο σύστημα αναφοράς φορτίων μέσω κατάλληλων δεικτών. Η εφαρμογή συστημάτων κατάταξης τυγχάνει αποδοχής πάνω από μισό αιώνα και θεωρείται χρήσιμο εργαλείο. Εντούτοις, ακόμα και η επίσημη μέθοδος κατάταξης ACN-PCN (Aircraft Classification Number-Pavement Classification Number) που εισήχθη από τον Διεθνή Οργανισμό Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO: International Civil Aviation Organization) (ICAO 1983) παρουσιάζει αρκετές αδυναμίες (Λοΐζος κ.α. 1998, Loizos et al. 2002, Loizos and Charonitis 2005, Fabre and Vauris 2017, White 2017, White 2019) και δεν αρκεί για μία ορθολογική διαχείριση ενός αεροδρομίου. Επιπλέον διεθνώς έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες εκτίμησης του δείκτη κατάταξης PCN, οι οποίες οδηγούν σε διαφορετικά αποτελέσματα, όπως προκύπτει και από σχετικές διερευνήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί από το Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ (Loizos et al. 2007, Loizos et al. 2011, Loizos et al. 2017a).

Παράλληλα, διερευνάται η εισαγωγή ενός βελτιωμένου συστήματος κατάταξης της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων αεροδρομίων με στόχο την ενσωμάτωση σύγχρονων αναλυτικών μεθοδολογιών ανάλυσης οδοστρωμάτων (FAA 2022, White 2022). Ειδικότερα στο προσεχές χρονικό διάστημα αναμένεται να τεθεί σε ισχύ η επικαιροποιημένη διαδικασία κατάταξης οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACR-PCR (Aircraft Classification Rating - Pavement Classification Rating). Στο πλαίσιο αυτό, η ορθή αξιολόγηση της δομικής κατάστασης των οδοστρωμάτων αεροδρομίων με αξιόπιστες διαδικασίες αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον, δεδομένου ότι οι παρεμβάσεις συντήρησης και οι ενέργειες αποκατάστασης που

πραγματοποιούνται στα αεροδρόμια είναι δαπανηρές, χρονοβόρες και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να επηρεάσουν δυσμενώς τη δυνατότητα εξυπηρέτησης του οδοστρώματος και κατ' επέκταση του αεροδρομίου.

Υπό το πρίσμα των παραπάνω η παρούσα έρευνα πραγματοποιείται σε μία εποχή όπου παρατηρούνται ραγδαίες εξελίξεις στον τομέα της αξιολόγησης και της κατάταξης της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων αεροδρομίων γεγονός που δημιουργεί καινούργια θέματα διερεύνησης. Ειδικότερα, η παρούσα εργασία περιλαμβάνει δύο ευρύτερες περιοχές διερεύνησης.

Το πρώτο σκέλος της παρούσας εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της επίδρασης της εξέλιξης των μεθοδολογιών ανάλυσης οδοστρωμάτων αεροδρομίων στην αξιολόγηση της δομικής κατάστασής τους. Το αντικείμενο αυτό θεωρείται ότι παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον δεδομένου ότι συχνά προκύπτει η ανάγκη αξιολόγησης ενός οδοστρώματος, το οποίο έχει σχεδιαστεί με προγενέστερες εμπειρικές μεθοδολογίες σχεδιασμού, αξιοποιώντας τις νέες εξελιγμένες αναλυτικές διαδικασίες αξιολόγησης που έχουν αναπτυχθεί. Παράλληλα δίνεται έμφαση στο γεγονός ότι στον ελλαδικό χώρο δεν έχει θεσμοθετηθεί κάποια συγκεκριμένη μεθοδολογία σχεδιασμού και αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Κατά συνέπεια για τον σκοπό αυτό στην πράξη χρησιμοποιούνται οι μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί διεθνώς, οι οποίες έχουν διαμορφωθεί με βάση τις επικρατούσες συνθήκες της χώρας στην οποία έχουν αναπτυχθεί. Συνεπώς διερευνάται η εφαρμοσιμότητα των υπόψη μεθοδολογιών σε συνθήκες διαφορετικές από εκείνες για τις οποίες έχουν αναπτυχθεί. Επιπλέον, δεδομένου ότι τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται νέες εξελιγμένες θεωρήσεις της συμπεριφοράς των υλικών με εφαρμογή κυρίως στα οδοστρώματα οδών και αφορούν στην ιξωδοελαστική θεώρηση της συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων (Gkyrtis et al. 2021c), στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται προκαταρκτική διερεύνηση της επίδρασης της υπόψη θεώρησης για τα οδοστρώματα αεροδρομίων.

Το δεύτερο σκέλος αφορά στη διερεύνηση της επίδρασης της εναρμόνισης των συστημάτων κατάταξης της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων με σύγχρονες αναλυτικές μεθοδολογίες ανάλυσης οδοστρωμάτων και της εισαγωγής της επικαιροποιημένης διαδικασίας κατάταξης οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACR-PCR. Αντικείμενο της παρούσας διερεύνησης αποτελεί η προκαταρκτική αξιολόγηση της παραπάνω διαδικασίας τόσο για εύκαμπτα όσο και για δύσκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων. Επιπλέον διερευνώνται οι επιπτώσεις της εισαγωγής του νέου συστήματος στις διαδικασίες διαχείρισης ενός αεροδρομίου. Επίσης διερευνώνται και θέματα που αφορούν στη μεταβατική περίοδο μέχρι την πλήρη ισχύ του συστήματος κατάταξης ACR-PCR. Ένα τέτοιο θέμα αποτελεί ο έλεγχος της επάρκειας της φέρουσας ικανότητας υφιστάμενων οδοστρωμάτων αεροδρομίων στα οποία παρατηρούνται

φαινόμενα υπερφόρτωσης (overloading), γεγονός το οποίο είναι πολύ σημαντικό για την ορθή λειτουργία ενός αεροδρομίου. Σημειώνεται ότι μέχρι στιγμής, η πάγια τακτική αξιολόγησης περιστατικών υπερφόρτωσης οδοστρωμάτων αεροδρομίων, πραγματοποιείται με τη βοήθεια συστημάτων κατάταξης σε καθορισμένο σύστημα αναφοράς φορτίων, όπως είναι η επίσημη μέθοδος κατάταξης ACN-PCN, η οποία όχι μόνο παρουσιάζει ορισμένες αδυναμίες, αλλά βασίζεται και σε προγενέστερες εμπειρικές μεθοδολογίες ανάλυσης οδοστρωμάτων. Προς τούτο διερευνώνται τα βασικά κριτήρια υπερφόρτωσης που περιλαμβάνονται στην ισχύουσα πάγια τακτική του ICAO, ακολουθώντας εξελιγμένες αναλυτικές διαδικασίες αξιολόγησης των οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

## 1.2 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την επίτευξη του στόχου του πρώτου σκέλους της παρούσας έρευνας, περιλαμβάνει αρχικά ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας αναφορικά με τις διαδικασίες δομικής αξιολόγησης εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Η έρευνα επικεντρώθηκε στις διαδικασίες αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων της FAA, η οποία αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μέθοδο, τόσο σε διεθνές όσο και σε εθνικό επίπεδο (FAA 1995, FAA 2009, FAA 2016, FAA 2021). Στη συνέχεια διερευνάται η επίδραση της εισαγωγής των αναλυτικών διαδικασιών αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων καθώς και οι παραδοχές με βάση τις οποίες πραγματοποιείται η αξιολόγηση ενός οδοστρώματος όσον αφορά στις θεωρήσεις των υλικών. Η έρευνα εστιάζει στην περίπτωση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων και ιδιαίτερα στη θεώρηση της συμπεριφοράς των ασφαλικών στρώσεων. Προς τούτο λαμβάνονται υπόψη οι διαφορετικές θεωρήσεις των υλικών που πραγματοποιούνται από τη μέθοδο της FAA στα διάφορα στάδια εξέλιξής της. Επιπλέον διερευνώνται και θεωρήσεις που συνάδουν με εξελιγμένες προσεγγίσεις της συμπεριφοράς των ασφαλομιγμάτων, όπως είναι η ιξοδωελαστική θεώρηση, οι οποίες μέχρι στιγμής δεν περιλαμβάνονται στις διαδικασίες αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

Για την επίτευξη του στόχου του δεύτερου σκέλους της έρευνας αρχικά πραγματοποιείται σύγκριση των βασικών αρχών του ισχύοντος συστήματος κατάταξης της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACN-PCN με το επικαιροποιημένο σύστημα ACR-PCR. Η έρευνα αφορά στην περίπτωση των εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων ενώ παρατίθενται παραδείγματα πρακτικής εφαρμογής των δύο συστημάτων κατάταξης σε αεροδρόμια του ελλαδικού χώρου με στόχο τον εντοπισμό ενδεχόμενων προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν από την εφαρμογή του νέου συστήματος ACR-PCR. Επιπλέον διερευνάται η ύπαρξη συσχέτισης μεταξύ των δεικτών ACN-ACR και PCN-PCR. Ακολουθούν πειράματα πεδίου για την ακριβέστερη εκτίμηση των επιτόπου στοιχείων του οδοστρώματος και την αξιολόγηση της δομικής κατάστασής του με στόχο την τροφοδότηση



των συστημάτων κατάταξης και τη συνδυαστική αξιολόγηση της κατάστασής τους. Η διερεύνηση ολοκληρώνεται με την ανάπτυξη ενός μοντέλου εκτίμησης του δείκτη PCR μέσω του δείκτη PCN.

Για τις σχετικές αναλύσεις αξιοποιήθηκαν και στοιχεία από υφιστάμενα οδοστρώματα του ελλαδικού χώρου, τα οποία περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ. Η περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση των υπόψη στοιχείων και η διενέργεια σχετικών αναλύσεων πραγματοποιείται με διεθνώς αποδεκτά λογισμικά που συνάδουν με τη διεθνή πρακτική.

### 1.3 Δομή

Για την επίτευξη των στόχων της παρούσας εργασίας, παρατίθενται πέραν του παρόντος (**Κεφάλαιο 1**) τα εξής κεφάλαια:

Στα **Κεφάλαια 2-3**, παρουσιάζεται η εξέλιξη της μεθόδου αξιολόγησης εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων της FAA αντίστοιχα. Αρχικά γίνεται σύντομη αναφορά στην εμπειρική μέθοδο και ακολουθεί εκτενέστερη αναφορά στις βασικές αρχές της αναλυτικής μορφής της μεθόδου.

Στο **Κεφάλαιο 4**, πραγματοποιείται αναφορά στα συστήματα κατάταξης της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων που έχουν διαχρονικά τεθεί σε ισχύ. Έμφαση δίνεται στην ισχύουσα μέθοδο κατάταξης φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACN-PCN καθώς και στο επικαιροποιημένο σύστημα ACR-PCR.

Στο **Κεφάλαιο 5**, πραγματοποιείται διερεύνηση της επίδρασης της θεώρησης των χαρακτηριστικών των υλικών κατά την αξιολόγηση ενός οδοστρώματος. Προς τούτο πραγματοποιείται αξιολόγηση διατομής οδοστρώματος που είχε προκύψει από την εφαρμογή της εμπειρικής μεθόδου της FAA με χρήση της αναλυτικής διαδικασίας της FAA λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές θεωρήσεις των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών των στρώσεων του οδοστρώματος. Η ανάλυση ολοκληρώνεται με τη θεώρηση διαφορετικών μοντέλων αστοχίας λόγω κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων από τη διεθνή βιβλιογραφία.

Στο **Κεφάλαιο 6**, παρουσιάζεται η διερεύνηση της επίδρασης της εξέλιξης της αναλυτικής μεθόδου αξιολόγησης της FAA, η οποία περιλαμβάνει εξελιγμένα μοντέλα αστοχίας λόγω κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων. Η σχετική διερεύνηση πραγματοποιήθηκε μέσω πειράματος πεδίου σε υφιστάμενο οδοστρωμα αεροδρομίου του ελλαδικού χώρου. Τα στοιχεία του οδοστρώματος συλλέχθηκαν μέσω των μη καταστρεπτικών συστημάτων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ.

Στο **Κεφάλαιο 7**, πραγματοποιείται συγκριτική διερεύνηση της ιξωδοελαστικής θεώρησης της συμπεριφοράς ασφαλτομιγμάτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων σε σχέση με την ελαστική θεώρηση. Η σχετική διερεύνηση πραγματοποιήθηκε μέσω πειράματος πεδίου σε υφιστάμενο οδόστρωμα αεροδρομίου του ελλαδικού χώρου. Τα στοιχεία του οδοστρώματος συλλέχθηκαν μέσω των μη καταστρεπτικών συστημάτων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ.

Στο **Κεφάλαιο 8**, παρουσιάζεται διερεύνηση του κριτηρίου της υπερφόρτωσης εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων σύμφωνα με τις οδηγίες του ICAO, με χρήση της αναλυτικής διαδικασίας αξιολόγησης οδοστρωμάτων της FAA.

Στο **Κεφάλαιο 9**, διερευνάται ενδεχόμενη συσχέτιση της ισχύουσας μεθόδου κατάταξης φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACN-PCN με το επικαιροποιημένο σύστημα ACR-PCR. Προς τούτο πραγματοποιείται σύγκριση των δεικτών ACN-ACR και PCN-PCR και εντοπίζονται ενδεχόμενα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν από την εφαρμογή του επικαιροποιημένου συστήματος στην πράξη για τις αρχές ενός αεροδρομίου στο πλαίσιο της διαχείρισής του.

Στο **Κεφάλαιο 10**, πραγματοποιείται πείραμα πεδίου για την κατάταξη της φέρουσας ικανότητας δύσκαμπτου δαπέδου αναμονής αεροσκαφών αξιοποιώντας στοιχεία επιτόπου και εργαστηριακών δοκιμών. Η διερεύνηση αναδεικνύει την σπουδαιότητα αξιοποίησης αναλυτικών στοιχείων του οδοστρώματος για τη δομική αξιολόγηση της κατάστασής του και τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών κατάταξης.

Στο **Κεφάλαιο 11**, πραγματοποιείται πείραμα πεδίου για την κατάταξη της φέρουσας ικανότητας εύκαμπτου οδοστρώματος διαδρόμου Π/Α αεροσκαφών αξιοποιώντας επιτόπου στοιχεία και στοιχεία εργαστηριακών δοκιμών. Η διερεύνηση αναδεικνύει την σπουδαιότητα αξιοποίησης αναλυτικών στοιχείων του οδοστρώματος για τη δομική αξιολόγηση της κατάστασής του και τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών κατάταξης.

Στο **Κεφάλαιο 12**, πραγματοποιείται ανάπτυξη ενός μοντέλου εκτίμησης του επικαιροποιημένου δείκτη κατάταξης της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος ενός αεροδρομίου PCR με βάση τον ισχύοντα δείκτη PCN, το οποίο θα μπορούσε να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο κατά την προκαταρκτική φάση εφαρμογής του νέου συστήματος.

Στο **Κεφάλαιο 13**, αναφέρονται τα συμπεράσματα που αφορούν στα επιμέρους εδάφια της έρευνας σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας. Επίσης, διατυπώνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Η ανάπτυξη των εδαφίων υποστηρίζεται από σχετική διεθνή βιβλιογραφία (**Κεφάλαιο 14**).

## **2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ**

### **2.1 Γενικά στοιχεία**

Ο προσδιορισμός της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων αεροδρομίων είναι καθοριστικής σημασίας τόσο γιατί επηρεάζει τους τύπους αεροσκαφών που μπορεί να εξυπηρετήσει όσο και γιατί συμβάλλει στη σωστή διαχείριση του αεροδρομίου. Διεθνώς έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες για τον έλεγχο της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων, οι οποίες βασίζονται στην αξιολόγηση της δομικής κατάστασής τους (STBA 2001, DCES 1989, DMG27 2011, ERDC 2001). Εντούτοις, η πλέον διαδεδομένη μέθοδος, τόσο σε διεθνές επίπεδο όσο και στην χώρα μας, είναι η μέθοδος της Ομοσπονδιακής Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας FAA (Federal Aviation Administration) (FAA 1995, FAA 2009, FAA 2016, FAA 2021).

Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται συνοπτικά η εξέλιξη της μεθοδολογίας αξιολόγησης εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων που έχει αναπτυχθεί από την FAA. Αρχικά γίνεται αναφορά στην εμπειρική μέθοδο αξιολόγησης και ακολουθούν οι βασικές αρχές της αναλυτικής μορφής της μεθόδου. Δεδομένου ότι για την ενεργοποίηση των υπόψη μεθοδολογιών αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων συνήθως απαιτείται συνεκτίμηση διαφόρων παραμέτρων του οδοστρώματος, στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθεται συνοπτική αναφορά στις συνηθέστερες μεθόδους εκτίμησης των χαρακτηριστικών ενός υπό αξιολόγηση οδοστρώματος.

### **2.2 Εμπειρική μέθοδος FAA**

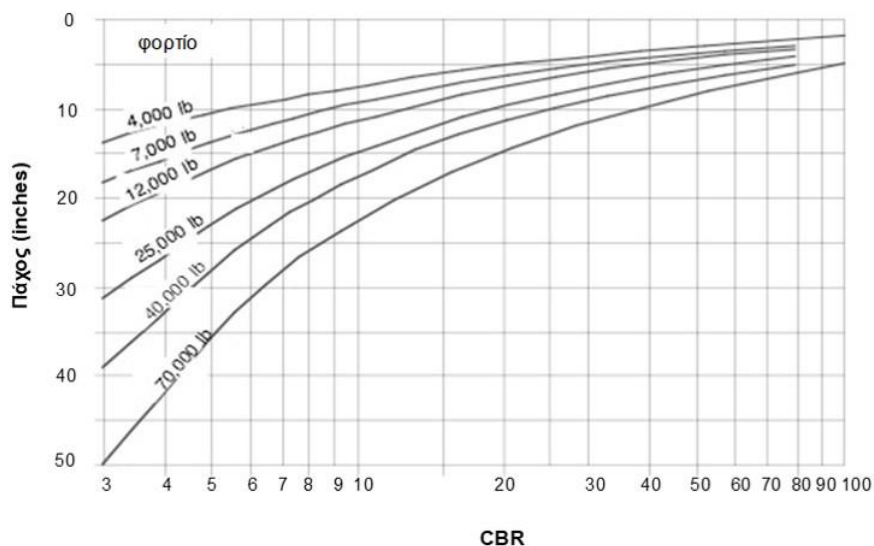
Η αρχική μορφή της μεθόδου διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων της FAA δημοσιεύτηκε το 1958 οπότε η FAA υιοθέτησε ως πολιτική το σχεδιασμό των αεροδρομίων με αεροσκάφος σχεδιασμού μέγιστου βάρους 350000lbs (159000Kg) και με τυπικό σύστημα τροχών αυτό του DC-S-50. Προσπάθησε επίσης να διασφαλίσει ότι τα μελλοντικά αεροσκάφη δεν θα καταπονούν τα οδοστρώματα περισσότερο από το αεροσκάφος αναφοράς των 350000lbs (159000Kg). Ως ένα βαθμό, οι κατασκευαστές αεροσκαφών ακολούθησαν και εφάρμοσαν αυτή την οδηγία με την αύξηση του αριθμού και της απόστασης των τροχών, παρόλο που τα φορτία των αεροσκαφών σχετικά σύντομα υπερέβησαν κατά πολύ το όριο των 159000Kg. Η τελική μορφή της εμπειρικής μεθόδου σχεδιασμού και αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων της FAA δημοσιεύθηκε το 1995 (FAA 1995).

Η μέθοδος περιλαμβάνει τις βασικές αρχές σχεδιασμού εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων καθώς και τις μεθοδολογίες που αφορούν στην αξιολόγηση της

κατάστασής τους. Σημειώνεται ότι η αξιολόγηση της κατάστασης ενός οδοστρώματος με την υπόψη μέθοδο πραγματοποιείται μέσω μίας ανάστροφης εφαρμογής των βασικών αρχών σχεδιασμού των οδοστρωμάτων.

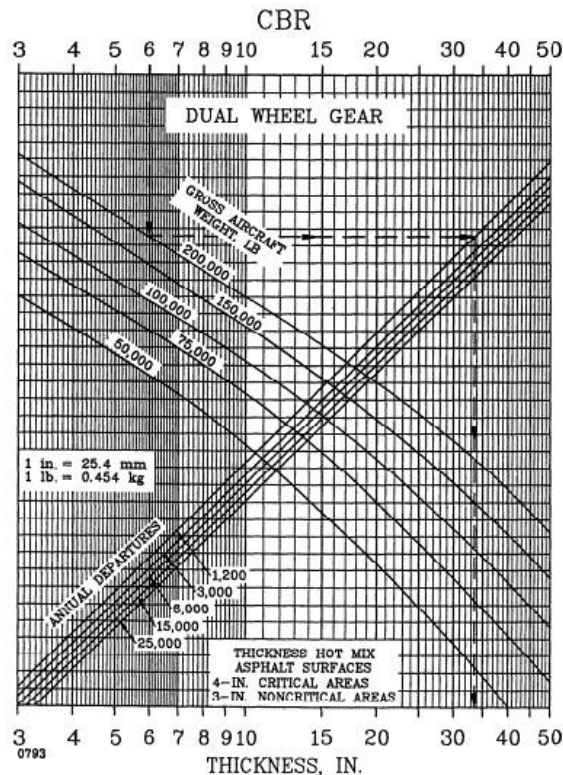
### 2.2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Η αξιολόγηση ενός εύκαμπτου οδοστρώματος με την εμπειρική μέθοδο της FAA στοχεύει στον προσδιορισμό του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου που μπορεί να δεχθεί το υπό διερεύνηση οδοστρώμα. Η εφαρμογή της πραγματοποιείται με τη χρήση διαγραμμάτων τα οποία έχουν αναπτυχθεί με βάση τη μέθοδο CBR (California Bearing Ratio) του Σώματος Μηχανικών των ΗΠΑ, συνδυάζοντας το εμπειρικό υπόβαθρο της μεθόδου με τα αποτελέσματα εκτεταμένων ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί από την FAA. Βασική αρχή της μεθόδου CBR αποτελεί η συσχέτιση του απαιτούμενου πάχους στρώσης οδοστρώματος με τη φέρουσα ικανότητα του υλικού της υποκείμενης στρώσης και το μέγεθος της φόρτισης του οδοστρώματος (Εικόνα 2.1).



**Εικόνα 2.1 Νομογράφημα μεθόδου CBR**

Τα υπόψη διαγράμματα διαφοροποιούνται ως προς το σύστημα προσγείωσης των αεροσκαφών (μονού τροχού, διπλού τροχού και διπλού δίδυμου τροχού) ενώ έχουν αναπτυχθεί και ξεχωριστά διαγράμματα για αεροσκάφη με διαφορετικά συστήματα τροχών τα οποία ήταν σε ισχύ κατά την εισαγωγή της μεθόδου, όπως τα αεροσκάφη: A300-B2, B-747, B-757, B767, C-130, DC 10-10, DC 10-30, L-1011-100 κ.α. Στην Εικόνα 2.2 παρατίθενται ενδεικτικό διάγραμμα της μεθόδου για την περίπτωση αεροσκάφους με σύστημα διπλού τροχού.



**Εικόνα 2.2** Διάγραμμα αξιολόγησης οδοστρώματος για τυπικό φορείο διπλού τροχού (FAA 1995)

Για την αξιολόγηση ενός οδοστρώματος με την εμπειρική μέθοδο της FAA απαιτείται ο προσδιορισμός των παχών των επιμέρους στρώσεων του υφιστάμενου οδοστρώματος μέσω τομών ή μέσω των στοιχείων των κατασκευαστικών διατομών (as-built drawings). Επίσης απαραίτητο στοιχείο αποτελεί η εκτίμηση του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος, μέσω εργαστηριακών ή επιτόπου δοκιμών. Με βάση τα παραπάνω στοιχεία και με εκτίμηση του αριθμού των ετήσιων αναχωρήσεων των αεροσκαφών που δέχεται το αεροδρόμιο προσδιορίζεται το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο που μπορεί να φέρει το οδόστρωμα.

### 2.2.2 Θεώρηση κυκλοφορίας

Δεδομένου ότι η κυκλοφορία που δέχεται ένα οδόστρωμα αποτελείται από μία ποικιλία αεροσκαφών με διαφορετικά βάρη και συστήματα προσγείωσης, η επίδραση της υπολογίζεται με βάση το αεροσκάφος (α/φ) σχεδιασμού. Ως αεροσκάφος σχεδιασμού κατά την FAA θεωρείται εκείνο που απαιτεί το μεγαλύτερο πάχος οδοστρώματος. Γνωρίζοντας το συνολικό βάρος, το σύστημα προσγείωσης και τις ετήσιες διελεύσεις κάθε αεροσκάφους καθώς επίσης και το CBR της στρώσης έδρασης είναι δυνατός ο προσδιορισμός του αεροσκάφους που απαιτεί το μεγαλύτερο πάχος οδοστρώματος το οποίο και ταυτίζεται με το αεροσκάφος

σχεδιασμού. Ο υπολογισμός του απαιτούμενου πάχους του οδοστρώματος πραγματοποιείται με τη βοήθεια των διαγραμμάτων της μεθόδου.

Για την αναγωγή της μικτής κυκλοφορίας σε διελεύσεις ενός μόνο αεροσκάφους έχουν προσδιοριστεί συντελεστές ισοδυναμίας (Πίνακας 2.1), για τη μετατροπή των ετήσιων διελεύσεων των υπόλοιπων αεροσκαφών σε διελεύσεις του ίδιου συστήματος τροχών με το αεροσκάφος σχεδιασμού.

**Πίνακας 2.1 Συντελεστές ισοδυναμίας συστημάτων τροχών**

Τύπος φορείου α/φ για το οποίο απαιτείται μετατροπή	Τύπος φορείου α/φ στο οποίο γίνεται η αναγωγή	Συντελεστής ισοδυναμίας
μονού τροχού	διπλού τροχού	0.8
μονού τροχού	διπλού δίδυμου τροχού	0.5
διπλού τροχού	διπλού δίδυμου τροχού	0.6
τετραπλού δίδυμου τροχού	διπλού δίδυμου τροχού	1.0
διπλού δίδυμου τροχού	Μονού τροχού	2.0
διπλού δίδυμου τροχού	διπλού τροχού	1.7
διπλού τροχού	Μονού τροχού	1.3
τετραπλού δίδυμου τροχού	διπλού τροχού	1.7

Κατόπιν, πραγματοποιείται μετατροπή των διελεύσεων σε διελεύσεις του αεροσκάφους σχεδιασμού λαμβάνεται υπόψη το φορτίο τροχού του κάθε αεροσκάφους μέσω της εξίσωσης 2.1. Σύμφωνα με τη μέθοδο της FAA θεωρείται ότι το 95% του συνολικού φορτίου του αεροσκάφους μεταβιβάζεται στα πίσω φορεία, ενώ το 5% παραλαμβάνεται από το ρινιαίο φορείο τροχών (Εικόνα 2.3).



**Εικόνα 2.3 Κατανομή βάρους αεροσκάφους στα φορεία**

$$\log R_1 = \log R_2 \times \left(\frac{W_2}{W_1}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Εξ. 2.1})$$

Όπου:

- $W_1$ : φορτίο τροχού του α/φ σχεδιασμού
- $W_2$ : φορτίο τροχού του α/φ του οποίου μετατρέπονται οι διελεύσεις

- $R_1$ : ισοδύναμες ετήσιες διελεύσεις α/φ σχεδιασμού
- $R_2$ : διελεύσεις του α/φ μετά τη μετατροπή τους σε ισοδύναμες του ίδιου συστήματος τροχών με το α/φ σχεδιασμού

Η μέθοδος θεωρεί ότι στην εγκάρσια διεύθυνση μιας διατομής η κυκλοφορία των αεροσκαφών ακολουθεί κανονική κατανομή τόσο κατά τις απογειώσεις όσο και κατά τις προσγειώσεις. Οι διελεύσεις των αεροσκαφών λαμβάνονται υπόψη στα διαγράμματα μέσω του αριθμού των καλύψεων-διελεύσεων C (Coverages). Δεδομένου ότι τα φορεία ενός αεροσκάφους σπανίως κινούνται κατά μήκος του ίδιου ίχνους μπορεί να χρειαστούν περισσότερες από μία διελεύσεις του φορείου του αεροσκάφους ώστε ένα συγκεκριμένο σημείο του οδοστρώματος να δεχτεί τη μέγιστη επιβαλλόμενη φόρτιση. Σύμφωνα με την FAA μία κάλυψη-διέλευση C προκύπτει από έναν ορισμένο αριθμό διελεύσεων αεροσκαφών (passes) και αντιστοιχεί σε μία μέγιστη φόρτιση του οδοστρώματος. Υπό το πρίσμα αυτό οι καλύψεις-διελεύσεις C ενέχουν την έννοια των «διελεύσεων μέγιστης επιπόνησης». Για να ληφθεί υπόψη στην αξιολόγηση ενός υφιστάμενου οδοστρώματος ο αριθμός των διελεύσεων που απαιτούνται ώστε μια ονομαστική περιοχή (unit area) του οδοστρώματος να δεχτεί τη μέγιστη επιβαλλόμενη φόρτιση εισάγεται η έννοια του λόγου των διελεύσεων αεροσκαφών προς τις καλύψεις-διελεύσεις C αεροσκαφών (pass-to-coverage ratio). Στον προσδιορισμό των διαγραμμάτων έχει συμπεριληφθεί ο αριθμός των καλύψεων-διελεύσεων C για μια 20ετή διάρκεια ζωής του οδοστρώματος με τη χρήση των λόγων του Πίνακα 2.2 για τη μετατροπή διελεύσεων σε καλύψεις-διελεύσεις C (pass-to-coverage ratio).

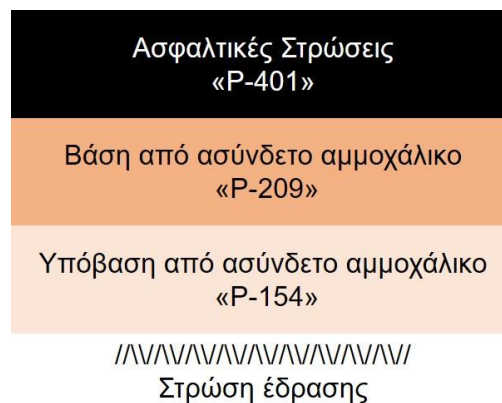
**Πίνακας 2.2 Τιμές λόγων διελεύσεων προς καλύψεις-διελεύσεις C**

Τύπος αεροσκάφους	Λόγος διελεύσεων προς καλύψεις-διελεύσεις C (pass-to-coverage ratio)	
	Εύκαμπτα οδοστρώματα	Δύσκαμπτα οδοστρώματα
Μονού τροχού	5.18	5.18
Διπλού τροχού	3.48	3.48
Διπλού τροχού-διπλού άξονα	1.84	3.68
A300 model B2	1.76	3.50
A300 model B4	1.73	3.45
B747	1.85	3.70
B757	1.94	3.88
B767	1.95	3.90
C-130	2.07	4.15
DC10-10	1.82	3.64
DC10-30	1.69	3.38
L-1011	1.81	3.62

Σημειώνεται ότι είναι εύκολο να παρατηρήσει κανείς τον αριθμό των διελεύσεων (*passes*) ενός αεροσκάφους αλλά ο αριθμός των καλύψεων-διελεύσεων *C* προσδιορίζεται μαθηματικά από τον λόγο των διελεύσεων προς τις καλύψεις-διελεύσεις *C* που έχει καθοριστεί για κάθε αεροσκάφος. Η σχέση αυτή εξαρτάται από το φορτίο του αεροσκάφους, την κατανομή του βάρους, τον τύπο του φορείου και τις αποστάσεις μεταξύ των φορείων. Καθορίζεται με τη χρήση της κανονικής κατανομής και την εφαρμογή στατιστικών μεθόδων.

### **2.2.3 Τυπικά υλικά**

Η ανάπτυξη της εμπειρικής μεθόδου της FAA έχει πραγματοποιηθεί με τη χρήση τυπικών υλικών που πληρούν τις προδιαγραφές της FAA, τα οποία λαμβάνονται υπόψη τόσο στο σχεδιασμό όσο και στην αξιολόγηση ενός οδοστρώματος αεροδρομίου. Η τυπική διατομή ενός εύκαμπτου οδοστρώματος αποτελείται από τη στρώση έδρασης, τη στρώση υπόβασης από ασύνδετο αμμοχάλικο (τυπικό υλικό «P-154»), τη στρώση βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο (τυπικό υλικό «P-209») και από τις ασφαλικές στρώσεις (τυπικό υλικό «P-401»), όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4.



**Εικόνα 2.4 Τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος κατά FAA**

Σημειώνεται ότι η αξιολόγηση ενός εύκαμπτου οδοστρώματος με τη χρήση των αντίστοιχων διαγραμμάτων προϋποθέτει η διατομή του οδοστρώματος να αποτελείται από τα τυπικά υλικά που φαίνονται στην Εικόνα 2.4. Εντούτοις χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά, τα οποία φαίνονται στον Πίνακα 2.3, προδιαγραφές των οποίων παρατίθεται στο αντίστοιχο εγχειρίδιο της μεθόδου (FAA 2014a). Επιπλέον συχνά χρησιμοποιούνται υλικά με βελτιωμένα χαρακτηριστικά σε σχέση με εκείνα των τυπικών υλικών της βάσης (P-209) και της υπόβασης (P-154). Η επίδραση της χρήσης των υπόψη υλικών τόσο κατά το σχεδιασμό όσο και κατά την αξιολόγηση ενός οδοστρώματος λαμβάνεται υπόψη με τη χρήση συντελεστών ισοδυναμίας (Πίνακας 2.4).



Πίνακας 2.3 Υλικά εμπειρικής μεθόδου FAA

Υλικό		Στρώση οδοστρώματος
P-401 - Plant Mix Bituminous Pavements	Θερμό ασφαλτόμιγμα	Αφαλτική Στρώση
P-209 - Crushed Aggregate Base Course	Στρώση από θραυστό αμμοχάλικο	Στρώση Βάσης
P-208 - Aggregate Base Course	Στρώση από ασύνδετο αμμοχάλικο	
P-211 - Lime Rock Base Course	Στρώση από ασβεστόλιθο	
P-304 - Cement Treated Base Course	Στρώση από σταθεροποιημένο με τσιμέντο υλικό	
P-306 - Econocrete Subbase Course	Στρώση από σταθεροποιημένο με τσιμέντο υλικό	
P-154 - Subbase Course	Στρώση από ασύνδετο υλικό	
P-210 - Caliche Base Course	Στρώση από αμμοχάλικο	
P-212 - Shell Base Course	Στρώση από μίγμα αδρανών	
P-213 - Sand Clay Base Course	Στρώση από αργιλικό υλικό	
P-301 - Soil Cement Base Course	Εδαφικό υλικό κατεργασμένο με τσιμέντο	

Πίνακας 2.4 Συντελεστές ισοδυναμίας υλικών FAA (εύκαμπτο οδόστρωμα)

Υλικό	Συντελεστής Ισοδυναμίας
	<b>Για αντικατάσταση τυπικού υλικού Βάσης «P-209»</b>
P-208 - Aggregate Base Course	1.1
P-211 - Lime Rock Base Course	1.0
P-304 - Cement Treated Base Course	1.2-1.6
P-306 - Econocrete Subbase Course	1.2-1.3
P-401 - Plant Mix Bituminous Pavements	1.2-1.8
	<b>Για αντικατάσταση τυπικού υλικού Υπόβασης «P-154»</b>
P-208 - Aggregate Base Course	1.0-1.5
P-209 - Crushed Aggregate Base Course	1.2-1.8
P-211 - Lime Rock Base Course	1.0-1.5
P-304 - Cement Treated Base Course	1.6-2.3
P-306 - Econocrete Subbase Course	1.6-2.3
P-301 - Soil Cement Base Course	1.0-1.5
P-401 - Plant Mix Bituminous Pavements	1.7-2.3

## 2.3 Αναλυτική μέθοδος FAA

Ακολουθώντας τις εξελίξεις στο σχεδιασμό και την αξιολόγηση των οδοστρωμάτων αεροδρομίων αναπτύχθηκε η αναλυτική μορφή της μεθόδου της FAA η οποία βασίζεται στη θεωρία των πολλαπλών επάλληλων στρώσεων για τα εύκαμπτα οδοστρώματα. Η μέθοδος εισήχθη πειραματικά το 2009 (FAA 2009) και έκτοτε ακολούθησαν αρκετές τροποποιήσεις (FAA 2016) που οδήγησαν στη σημερινή μορφή της (FAA 2021). Η μέθοδος αφορά τόσο στο σχεδιασμό νέων οδοστρωμάτων όσο και στην αξιολόγηση υφιστάμενων οδοστρωμάτων και η εφαρμογή της μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της υποστήριξης του Συστήματος FAARFIELD (FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design). Συγκεκριμένα η αρχική αναλυτική μορφή της μεθόδου (FAA 2009) εφαρμόστηκε μέσω του λογισμικού FAARFIELD 1.305 (FAA 2010).

### 2.3.1 Βασικές αρχές

Η αναλυτική μέθοδος της FAA για την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης των εύκαμπτων οδοστρωμάτων βασίζεται στη θεωρία των πολλαπλών ελαστικών στρώσεων λαμβάνοντας υπόψη το πραγματικό σύστημα τροχών των αεροσκαφών. Βασικό κριτήριο για την αξιολόγηση αποτελεί η εκτίμηση της αθροιστικής φθοράς που προκαλούν τα αεροσκάφη που δέχεται το υπό διερεύνηση οδόστρωμα στις κρίσιμες θέσεις αστοχίας του οδοστρώματος.

Για τα εύκαμπτα οδοστρώματα οι κρίσιμες θέσεις αστοχίας είναι: α) ο πυθμένας των ασφαλτικών στρώσεων με ενδεχόμενη αστοχία λόγω κόπωσης του ασφαλτομίγματος από την επαναλαμβανόμενη οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση ( $\epsilon_h$ ) και β) η επιφάνεια της στρώσης έδρασης με ενδεχόμενη αστοχία λόγω παραμενουσών παραμορφώσεων από την κατακόρυφη θλιπτική παραμόρφωση ( $\epsilon_z$ ) (Εικόνα 2.5).



**Εικόνα 2.5 Κρίσιμες θέσεις αστοχίας εύκαμπτου οδοστρώματος**

Η ανάλυση των τάσεων/παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στις κρίσιμες θέσεις αστοχίας από την επιβολή του φορτίου του κάθε αεροσκάφους της σύνθεσης της κυκλοφορίας πραγματοποιείται από το υποπρόγραμμα LEAF. Η φθορά εκφράζεται συναρτήσει του δείκτη CDF (Cumulative Damage Factor), ο οποίος προκύπτει από την αθροιστική φθορά όλων των αεροσκαφών της κυκλοφορίας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.6, για κάθε μία θέση αστοχίας. Στην Εικόνα 2.6 θεωρείται ότι η κυκλοφορία αποτελείται από n διαφορετικούς τύπους αεροσκαφών και η αθροιστική φθορά προκύπτει ως το άθροισμα των επιμέρους φθορών που προκαλεί ο κάθε τύπος αεροσκάφους χωριστά.



$$CDF = \sum_{i=1}^n CDF_i = CDF_1 + CDF_2 + CDF_3 + \dots + CDF_n$$

**Εικόνα 2.6 Αρχή δείκτη αθροιστικής φθοράς CDF**

Ο υπολογισμός της φθοράς (CDF<sub>i</sub>) που προκαλεί ένα αεροσκάφος (i) δίνεται από την εξίσωση

$$CDF_i = \frac{(Ετήσιες απογειώσεις α/φ_i) \times (περίοδος σχεδιασμού σε έτη)}{\left(\frac{P}{C}\right) \times (Καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία)} \quad (Εξ. 2.2)$$

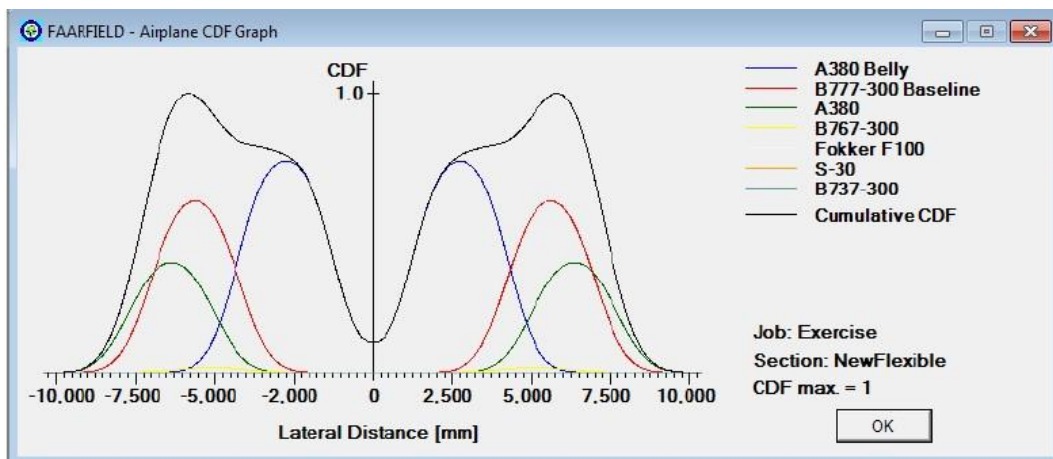
Όπου:

- Ετήσιες απογειώσεις: Προβλεπόμενες ετήσιες αναχωρήσεις κάθε α/φ
- Περίοδος σχεδιασμού σε έτη: Περίοδος σχεδιασμού/αξιολόγησης οδοστρώματος
- P/C: Λόγος των διελεύσεων προς τις καλύψεις-διελεύσεις C (Pass-to-coverage ratio)
- Καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία: Επιτρεπόμενες καλύψεις-διελεύσεις που προκύπτουν από νόμους κόπωσης/αστοχίας υλικών για κάθε κρίσιμη θέση αστοχίας.

Για να μην αστοχήσει κάποια από τις κρίσιμες θέσεις του οδοστρώματος, θα πρέπει να ισχύει η αρχή Miner, δηλαδή η αθροιστική φθορά της υπόψη θέσης να είναι μικρότερη από τη μονάδα (CDF<1). Αντιθέτως, στην περίπτωση που η αθροιστική φθορά είναι μεγαλύτερη ή ίση της μονάδας (CDF≥1) το οδόστρωμα που αξιολογείται δεν επαρκεί ώστε να φέρει την προβλεπόμενη φόρτιση.

Ο δείκτης CDF υπολογίζεται κατά μήκος του οδοστρώματος σε λωρίδες πλάτους 10inches (254 mm) σε συνολικό πλάτος οδοστρώματος 820inches (20828 mm). Ο λόγος των διελεύσεων προς τις καλύψεις-διελεύσεις C (Pass-to-coverage ratio) υπολογίζεται για κάθε λωρίδα με βάση τη θεώρηση ότι οι διελεύσεις του αεροσκάφους ακολουθούν κανονική κατανομή. Ο δείκτης CDF που λαμβάνεται υπόψη κατά την αξιολόγηση του οδοστρώματος είναι ο μέγιστος όσων έχουν υπολογιστεί και για τις 82 λωρίδες του οδοστρώματος.

Μία από τις βασικότερες διαφοροποιήσεις της αναλυτικής μεθόδου της FAA ως προς την εμπειρική μορφή της μεθόδου είναι η κατάργηση της έννοιας του αεροσκάφους σχεδιασμού. Σε αντίθεση με την πρακτική σύμφωνα με την οποία η επίδραση της κυκλοφορίας λαμβάνεται υπόψη μέσω της μετατροπής των διελεύσεων όλων των αεροσκαφών σε ισοδύναμες διελεύσεις του αεροσκάφους σχεδιασμού, η νέα τάση περιλαμβάνει τον υπολογισμό της επίδρασης κάθε αεροσκάφους, μέσω της φθοράς που προκαλεί χωριστά κάθε ένα από αυτά. Στην Εικόνα 2.7 φαίνεται ένα παράδειγμα υπολογισμού της αθροιστικής φθοράς της στρώσης έδρασης ενός οδοστρώματος αεροδρομίου που προκύπτει για μια συγκεκριμένη σύνθεση της κυκλοφορίας.



**Εικόνα 2.7 Αθροιστική φθορά αεροσκαφών (Δείκτης CDF)**

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στην αναλυτική μέθοδο της FAA για την εκτίμηση της φθοράς του οδοστρώματος.

### **2.3.2 Εκτίμηση καλύψεων-διελεύσεων έως την αστοχία**

Η εκτίμηση των επιτρεπόμενων καλύψεων-διελεύσεων έως την αστοχία πραγματοποιείται μέσω των νόμων κόπωσης/αστοχίας των υλικών για την κάθε κρίσιμη θέση αστοχίας του οδοστρώματος. Όσον αφορά στην αστοχία λόγω κόπωσης του ασφαλτομίγματος η μέθοδος της FAA αρχικά υιοθέτησε τον νόμο κόπωσης που ανέπτυξαν οι Heukelom & Klomp (Heukelom & Klomp, 1962) και ο οποίος εκφράζεται μέσω της εξίσωσης:

$$\log_{10}(C) = 2.68 - 5 * \log_{10}(\varepsilon_h) - 2.665 * \log_{10}(E) \quad (\text{Εξ. 2.3})$$

Όπου,

- C: οι επιτρεπόμενες καλύψεις- διελεύσεις έως την αστοχία
- $\varepsilon_h$ : η οριζόντια παραμόρφωση στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων
- E: το μέτρο ελαστικότητας της επιφανειακής ασφαλτικής στρώσης (psi)

Η αστοχία της στρώσης έδρασης λαμβάνεται υπόψη μέσω των σχέσεων:

$$C = \left(\frac{0,004}{\varepsilon_Z}\right)^{8.1}, C \leq 12100 \quad (\text{Εξ.2.4})$$

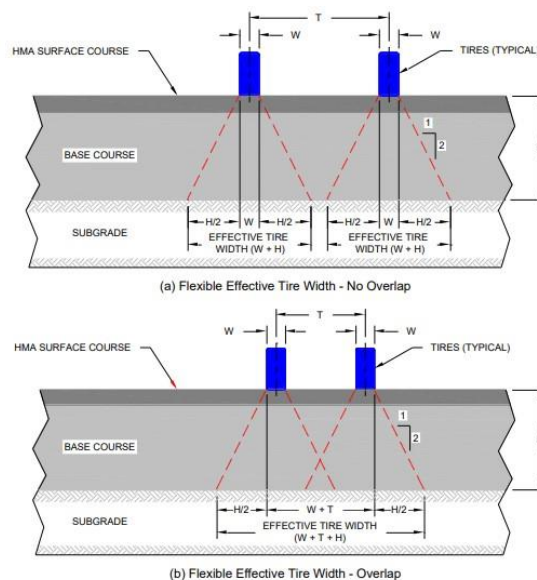
$$C = \left(\frac{0,002428}{\varepsilon_Z}\right)^{14.21}, C > 12100 \quad (\text{Εξ. 2.5})$$

Όπου,

- C: οι επιτρεπόμενες καλύψεις- διελεύσεις έως την αστοχία
- $\varepsilon_Z$ : η κατακόρυφη παραμόρφωση στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης

### 2.3.3 Λόγος P/C (pass-to-coverage)

Σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο της FAA, για τον υπολογισμό του λόγου P/C λαμβάνεται υπόψη το ενεργό πλάτος των ελαστικών (W+H), το οποίο υπολογίζεται τόσο στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης όσο και στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων με κλίση 1:2 (Εικόνα 2.8).



Εικόνα 2.8 Ενεργά πλάτη δύο τροχών για υπολογισμό του λόγου P/C σε εύκαμπτο οδόστρωμα

Για τον υπολογισμό του λόγου P/C ο διάδρομος χωρίζεται σε λωρίδες και υπολογίζεται ο λόγος C/P από την εξίσωση 2.6 (Kawa 2012), ο οποίος ορίζεται ως η πιθανότητα ένα σημείο του ενεργού πλάτους να βρίσκεται στο κέντρο μίας λωρίδας.

$$(C/P)_i = \sum_{k=1}^{N_t} P \left[ \left( x_i - \frac{W}{2} \right) \leq x_k \leq \left( x_i + \frac{W}{2} \right) \right] \quad (\text{Εξ. 2.6})$$

Όπου,

- $N_i$ : ο αριθμός των τροχών του φορείου του αεροσκάφους
- $X_i$ : οριζόντια απόσταση κεντρικού άξονα διαδρόμου από το μέσο της λωρίδας  $i$
- $X_k$ : οριζόντια απόσταση κεντρικού άξονα διαδρόμου από το μέσο του ελαστικού  $k$

### 2.3.4 Χαρακτηριστικά υλικών

Για την αξιολόγηση ενός οδοστρώματος με τη μέθοδο της FAA απαιτείται η γνώση των χαρακτηριστικών των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος και συγκεκριμένα του μέτρου ελαστικότητάς τους. Στον Πίνακα 2.5 φαίνονται οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας των τυπικών υλικών της FAA.

**Πίνακας 2.5 Χαρακτηριστικά υλικών FAA**

Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	
P-401 - Plant Mix Bituminous Pavements – Surface course	Θερμό ασφαλτόμιγμα – Επιφανειακή στρώση	1380
P-403 - Plant Mix Bituminous Pavements – Base course	Θερμό ασφαλτόμιγμα – ασφαλτική βάση	2760
P-209 - Crushed Aggregate Base Course	Στρώση από θραυστό αμμοχάλικο	517
P-208 - Aggregate Base Course	Στρώση από ασύνδετο αμμοχάλικο	517
P-211 - Lime Rock Base Course	Στρώση από ασβεστόλιθο	413
P-154 - Subbase Course	Στρώση από ασύνδετο υλικό	276
P-301 - Soil Cement Base Course	Εδαφικό υλικό κατεργασμένο με τσιμέντο	1724
P-304 - Cement Treated Base Course	Στρώση από σταθεροποιημένο με τσιμέντο υλικό	3447
P-306 - Econocrete Subbase Course	Στρώση από σταθεροποιημένο με τσιμέντο υλικό	4826

Σε περίπτωση χρήσης διαφορετικών υλικών από τα τυπικά υλικά της FAA υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής τους («user defined layers»).



### 2.3.5 Εξέλιξη αναλυτικής μεθόδου FAA

Στην προσπάθεια βελτίωσης της διαδικασίας σχεδιασμού και αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων, η FAA παρουσίασε το 2016 τη νέα εξελιγμένη μορφή της αναλυτικής μεθόδου (FAA 2016), η οποία εφαρμόστηκε μέσω του λογισμικού FAARFIELD 1.42 (FAA 2017). Οι βασικές αρχές για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων παραμένουν κοινές για τις δύο μεθόδους. Παρόλα αυτά, η εξελιγμένη αναλυτική μέθοδος σχεδιασμού της FAA παρουσιάζει και σημαντικές διαφορές σε σχέση με την αρχική έκδοσή της. Η βασικότερη διαφορά έγκειται στην υιοθέτηση διαφορετικού μοντέλου αστοχίας της στρώσης έδρασης καθώς και μοντέλου κόπωσης των ασφαλτικών στρώσεων για τον υπολογισμό της φθοράς του οδοστρώματος στις κρίσιμες θέσεις.

Σημειώνεται ότι η νέα εξελιγμένη έκδοση της μεθόδου της FAA περιλαμβάνει αποτελέσματα τα οποία έχουν επιβεβαιωθεί μέσα από δοκιμές πλήρους κλίμακας που πραγματοποιήθηκαν στην εγκατάσταση NAPTF (National Airport Pavement Test Facility) της FAA. Η υπόψη εγκατάσταση αποτελεί μια καινοτόμο εγκατάσταση που τέθηκε σε λειτουργία το 1999 στο Τεχνικό Ερευνητικό Κέντρο της FAA στο New Jersey των Η.Π.Α. (FAA William J. Hughes Technical Center, Atlantic City) για την προσομοίωση της πραγματικής φόρτισης οδοστρωμάτων αεροδρομίων και την παρακολούθηση της συμπεριφοράς εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων σε πραγματικές συνθήκες φόρτισης (Εικόνα 2.9).



**Εικόνα 2.9 Εγκατάσταση δοκιμών NAPTF της FAA**

Οι δοκιμές στην εγκατάσταση πραγματοποιούνται σε οδοστρώματα με στρώση έδρασης χαμηλής, μεσαίας και υψηλής αντοχής. Κάθε οδοστρωμα υποβάλλεται σε φόρτιση έως την αστοχία του και έπειτα κατασκευάζεται εκ νέου. Το όχημα που πραγματοποιούνται οι δοκιμές

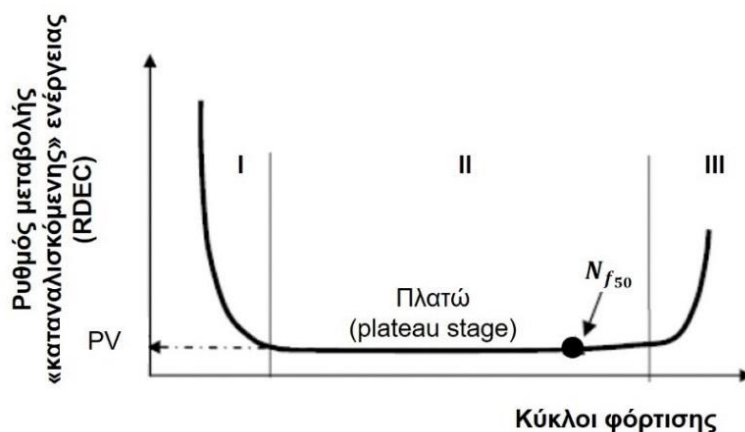
κινείται πάνω σε ράγες και φέρει 2 βαγόνια που μπορούν να προσομοιώσουν μέχρι και 10 τροχούς ανά φορείο με φορτία έως 333.75 kN (75,000 lbs) ανά τροχό. Παράλληλα στατικοί αισθητήρες καταγράφουν τη θερμοκρασία και τα επίπεδα υγρασίας κατά τις δοκιμές φόρτισης ενώ δυναμικοί αισθητήρες καταγράφουν εντατικά μεγέθη, όπως η παραμόρφωση, εξαιτίας της επιβολής του φορτίου.

### 2.3.5.1 Νόμος κόπωσης ασφαλτομιγμάτων

Το νέο μοντέλο αστοχίας ασφαλτικών στρώσεων βασίστηκε σε μια ενεργειακή προσέγγιση για τον υπολογισμό της φθοράς της ασφαλτικής στρώσης. Η προσέγγιση αυτή ονομάζεται RDEC (Ratio of Dissipated Energy Change). Αρχικά, ο λόγος RDEC για έναν κύκλο φόρτισης  $a$  ορίζεται ως η μέση μεταβολή της απώλειας ενέργειας (DE) μεταξύ δύο κύκλων φόρτισης  $a$  και  $b$  προς την απώλεια ενέργειας στον πρώτο κύκλο (NCHRP 9-44, 2008):

$$RDEC_{\alpha} = \frac{DE_{\alpha} - DE_b}{(b - \alpha) \cdot DE_{\alpha}} \quad (\text{Εξ. 2.7})$$

Η γραφική παράσταση του RDEC συναρτήσει των κύκλων φόρτισης για ένα τυπικό ασφαλτόμιγμα φαίνεται στην Εικόνα 2.10. Η «καταναλισκόμενη» ενέργεια που συμβάλλει στη διάδοση της φθοράς στο μίγμα σχηματίζει ένα ευρύ «U», το οποίο μπορεί να χωριστεί σε τρία επιμέρους στάδια. Αρχικά, παρατηρείται σημαντική μείωση της δυσκαμψίας του υλικού (στάδιο I), άρα η ενέργεια που συμβάλλει στη φθορά «καταναλώνεται» με γρηγορότερο ρυθμό. Στο στάδιο αυτό είναι δυνατή η εμφάνιση μίας ρωγμής που σταδιακά διαδίδεται στο υλικό. Κατά συνέπεια, ο ρυθμός μεταβολής της «καταναλισκόμενης» ενέργειας βαίνει σταδιακά μειούμενος.



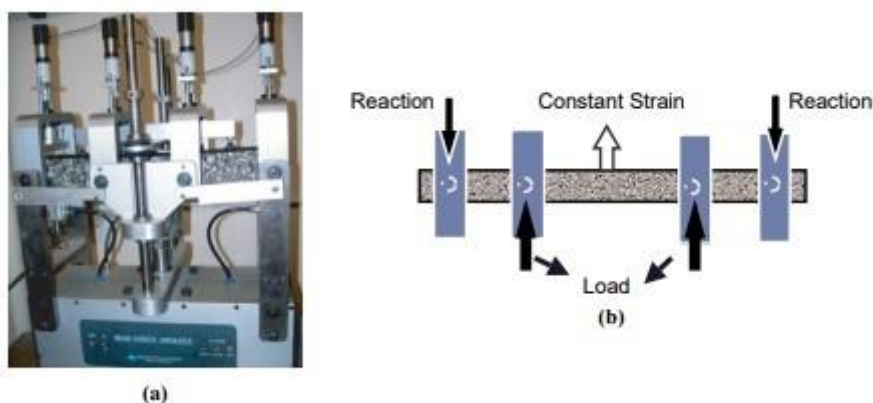
**Εικόνα 2.10 Η έννοια του RDEC στην αξιολόγηση της κόπωσης**

Στο στάδιο II, ο ρυθμός μεταβολής πρακτικά σταθεροποιείται και λαμβάνει μια ελάχιστη τιμή και αυτό υποδεικνύει ότι πλέον η φθορά στο μίγμα διαδίδεται με σταθερό ρυθμό μέσω καλά



σχηματισμένων ρωγμών χωρίς να απαιτείται επιπλέον κατανάλωση ενέργειας. Η ελάχιστη τιμή του RDEC αντιστοιχεί σε μία τιμή που διεθνώς αποδίδεται ως Plateau Value (PV), ενώ η τιμή αυτή παρουσιάζει άριστη συσχέτιση με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης που οδηγούν σε αστοχία. Στο στάδιο III, επέρχεται θραύση του δοκιμίου και ο ρυθμός μεταβολής της καταναλισκόμενης ενέργειας βαίνει αυξητικός.

Η αρχική βαθμονόμηση του νόμου έγινε λαμβάνοντας υπόψη εργαστηριακά αποτελέσματα κόπωσης με τη δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων (standard four-point bending beam fatigue test) (Εικόνα 2.11) σε συνθήκες συχνότητας 10Hz και θερμοκρασίας 20°C σε 74 δοκίμια ασφαλτομίγματος στο Πανεπιστήμιο του Ιλινόι στις ΗΠΑ. Τα μίγματα περιείχαν 4 διαφορετικούς τύπους συνδετικού υλικού, 2 είδη αδρανών (δολομίτης και ασβεστόλιθος) και ποικιλία ογκομετρικών χαρακτηριστικών (Shen et al. 2006, Shen & Carpenter 2007).



**Εικόνα 2.11 α) Συσκευή εργαστηριακής δοκιμής standard four-point bending beam fatigue test, β) σχηματική απεικόνιση σημείων φόρτισης**

Η αντοχή σε κόπωση (κύκλοι  $N_f$ ) συνδέεται με την τιμή του PV μέσω της εξίσωσης 2.8, η οποία βρέθηκε ότι έχει ικανοποιητική συμπεριφορά για πληθώρα συνθηκών στις δοκιμές κόπωσης, δηλαδή καλύπτει τις δοκιμές επιβολής ελεγχόμενης τάσης και παραμόρφωσης, ενώ καλύπτει ένα ευρύ φάσμα συνθηκών θερμοκρασίας, συχνότητας και περιόδων ηρεμίας και είναι ανεξάρτητη από τις ιδιότητες του εκάστοτε μίγματος (Redles et al. 2018, Shen & Carpenter 2007, Carpenter et al. 2003).

$$N_f = 0.4801 \cdot PV^{-0.9007}$$

**(Εξ. 2.8)**

Περαιτέρω, για την εκτίμηση του PV πραγματοποιήθηκε εκτενής στατιστική ανάλυση, στην οποία θεωρήθηκαν ως δείκτες επιρροής στοιχεία δυσκαμψίας και εντατικής καταπόνησης, καθώς και επιμέρους ογκομετρικά χαρακτηριστικά του ασφαλτομίγματος και στοιχεία από την κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών του. Το μοντέλο που προέκυψε (Shen & Carpenter 2007) δίνεται στην εξίσωση:

$$PV = 44.422 \cdot \varepsilon_t^{5.140} \cdot S^{2.993} \cdot VP^{1.850} \cdot GP^{-0.4063} \quad (\text{Εξ. 2.9})$$

Όπου:

- $\varepsilon_t$ : εφελκυστική παραμόρφωση,
- $S$ : η καμπτική αντοχή του ασφαλτομίγματος (MPa),
- $VP$ : ογκομετρική παράμετρος που ορίζεται ως:  $VP = \frac{V_a}{V_a + V_b}$ , με  $V_a, V_b$  να αντιστοιχούν στα κατ' όγκο ποσοστά κενών αέρος και ασφάλτου αντίστοιχα στο μίγμα,
- $GP$ : παράμετρος της κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών του ασφαλτομίγματος που ορίζεται ως:  $GP = \frac{P_{NMS} - P_{PCS}}{P_{200}}$ , με  $P_{NMS}$ : το διερχόμενο ποσοστό από το κόσκινο ανοίγματος ίσο με το ονομαστικό μέγεθος των αδρανών,  $P_{PCS}$ : το διερχόμενο ποσοστό από το κόσκινο ελέγχου (το άνοιγμά του εξαρτάται από το ονομαστικό μέγεθος των αδρανών και ισχύει  $PCS = 0.22 \cdot NMS$ ) και  $P_{200}$ : το διερχόμενο ποσοστό από το κόσκινο ανοίγματος 0.075mm (κόσκινο No. 200).

Για την περίπτωση του τυπικού υλικού της FAA οι παραπάνω παράμετροι λαμβάνουν τις τιμές:  $V_a = 3.5\%$ ,  $V_b = 12.0\%$ ,  $P_{NMS} = 95\%$ ,  $P_{PCS} = 58\%$ ,  $P_{200} = 4.5\%$ ,  $S = 600.000\text{psi}$  (4137MPa).

### 2.3.5.2 Νόμος αστοχίας στρώσης έδρασης

Στην εξελιγμένη αναλυτική μέθοδο της FAA πραγματοποιήθηκε τροποποίηση του μοντέλου που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των καλύψεων-διελεύσεων έως την αστοχία της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος. Ακολουθώντας τη διαδικασία που αναφέρεται στην (Kawa 2017) αναπτύχθηκε η εξίσωση:

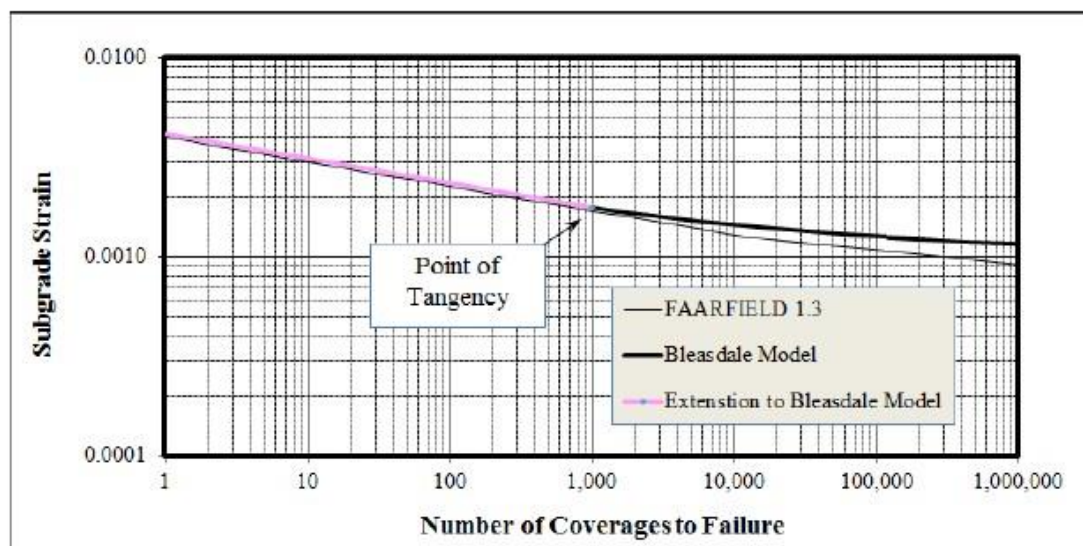
$$\log_{10} C = \left( \frac{1}{-0.1638 + 185.19 \times \varepsilon_z} \right) \quad C > 1000 \quad (\text{Εξ. 2.10})$$

$$C = \left( \frac{0.004141}{\varepsilon_z} \right)^{8.1} \quad C \leq 1000 \quad (\text{Εξ. 2.11})$$

Όπου,

- $C$ : οι καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία της στρώσης έδρασης
- $\varepsilon_z$ : μέγιστη κατακόρυφη παραμόρφωση στην κορυφή της στρώσης έδρασης

Στην Εικόνα 2.12 παρουσιάζεται γραφικά η σύγκριση του μοντέλου Bleasdale με το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην αρχική αναλυτική μέθοδο της FAA.



**Εικόνα 2.12 Σύγκλιση μοντέλων Bleasdale και μοντέλου αρχικής αναλυτικής μεθόδου FAA (Kawa, 2017)**

Στην ίδια Εικόνα φαίνεται ένα σημείο σύγκλισης των ευθειών των δύο μοντέλων το οποίο αντιστοιχεί σε αριθμό καλύψεων-διελεύσεων έως την αστοχία ίσο με 1000. Το γεγονός αυτό εξηγεί τη δυνατότητα χρήσης του αρχικού μοντέλου αστοχίας της στρώσης έδρασης της αναλυτικής μεθόδου στην εξελεγμένη αναλυτική μέθοδο της FAA για διελεύσεις μικρότερες των 1000.

## 2.4 Συλλογή στοιχείων οδοστρώματος

Για την ενεργοποίηση της μεθοδολογίας αξιολόγησης οδοστρωμάτων της FAA και τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος αεροδρομίου απαιτείται η συνεκτίμηση διαφόρων παραμέτρων του οδοστρώματος, όπως είναι τα πάχη των επιμέρους στρώσεων του και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των μιγμάτων.

Οι παραδοσιακές μέθοδοι συλλογής στοιχείων περιλαμβάνουν τη λήψη πυρήνων επιτόπου στο οδόστρωμα και στη συνέχεια την πραγματοποίηση εργαστηριακών δοκιμών. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα πραγματοποίησης δειγματοληπτικών τομών στο οδόστρωμα καθώς και η απόσπαση πλάκας ασφαλτομίγματος με σκοπό τη συλλογή στοιχείων επιτόπου στο οδόστρωμα. Η διαδικασία όμως αυτή, πέρα από το γεγονός ότι παρέχει σημειακή πληροφόρηση για την κατάσταση του οδοστρώματος, παρουσιάζει ορισμένες δυσκολίες στην εφαρμογή, δεδομένου ότι είναι ιδιαιτέρως χρονοβόρα και απαιτεί τη διακοπή της κυκλοφορίας και τη λήψη ειδικών μέτρων ασφαλείας. Το θέμα αυτό γίνεται ακόμα πιο έντονο στην περίπτωση των οδοστρωμάτων αεροδρομίων, όπου στην πράξη είναι εξαιρετικά δύσκολη η αναστολή της λειτουργίας ενός αεροδρομίου λόγω του υψηλού οικονομικού και γενικευμένου κόστους. Σημειώνεται ότι από την παραπάνω διαδικασία, εξαιτίας του περιορισμένου αριθμού

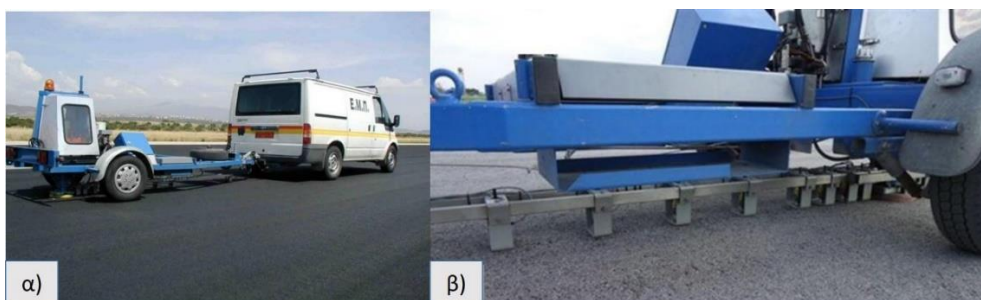
δειγμάτων που συλλέγονται, προκύπτει ένα ανεπαρκές στατιστικό δείγμα για περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση. Προς τούτο η συλλογή στοιχείων μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω μη καταστρεπτικών δοκιμών (Non Destructive Testing: NDT), οι σημαντικότερες εκ των οποίων παρατίθενται στη συνέχεια.

#### 2.4.1 Μη καταστρεπτικές δοκιμές

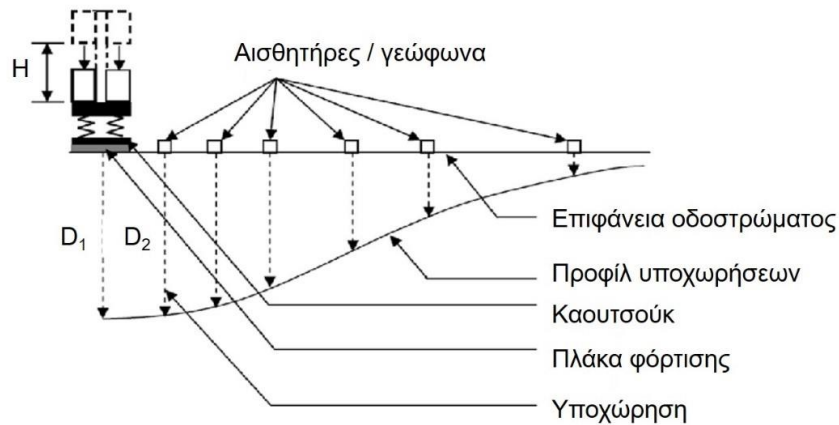
##### 2.4.1.1 Καταγραφές με Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους (FWD)

Το Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους FWD (Falling Weight Deflectometer) (Εικόνα 2.13) χρησιμοποιείται διεθνώς για τη δομική αξιολόγηση οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Το FWD είναι συνήθως ένα ρυμουλκούμενο σύστημα, το οποίο προσομοιώνει τη φόρτιση ενός κινούμενου οχήματος μέσω επιβολής ενός παλμικού φορτίου που εφαρμόζεται στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Η λειτουργία του FWD βασίζεται στην πτώση ενός βάρους από ένα προκαθορισμένο ύψος σε μια χαλύβδινη πλάκα διαμέτρου συνήθως 300mm ή 450mm που βρίσκεται στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Το επιβαλλόμενο φορτίο μπορεί να είναι διαφορετικού μεγέθους ρυθμίζοντας κάθε φορά το ύψος πτώσης, ώστε να είναι δυνατή η προσομοίωση διαφορετικών επιπέδων φορτίων.

Η προσομοίωση της πραγματικής φόρτισης του οδοστρώματος είναι και το μεγαλύτερο πλεονέκτημα εφαρμογής επιτόπου δοκιμών με το FWD. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης που προκαλεί το FWD στο οδόστρωμα καταγράφονται οι ελαστικές υποχωρήσεις κάτω από το φορτίο και σε ορισμένες αποστάσεις από αυτό. Το προφίλ της επιφανειακής υποχώρησης σε κάθε θέση δοκιμής διαμορφώνεται μέσω ειδικών αισθητήρων (γεώφωνα) που βρίσκονται σε καθορισμένες αποστάσεις από το κέντρο της πλάκας φόρτισης. Οι μέγιστες ελαστικές υποχωρήσεις που καταγράφει κάθε γεώφωνο συνθέτουν το τυπικό προφίλ υποχωρήσεων (Εικόνα 2.14). Για μία τυπική διάταξη με εννέα αισθητήρες, οι υποχωρήσεις καταγράφονται σε απόσταση 0, 200, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500 και 1800mm από το κέντρο επιβολής της φόρτισης. Τέτοια είναι και η διάταξη των γεωφώνων του FWD που διαθέτει το Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ.

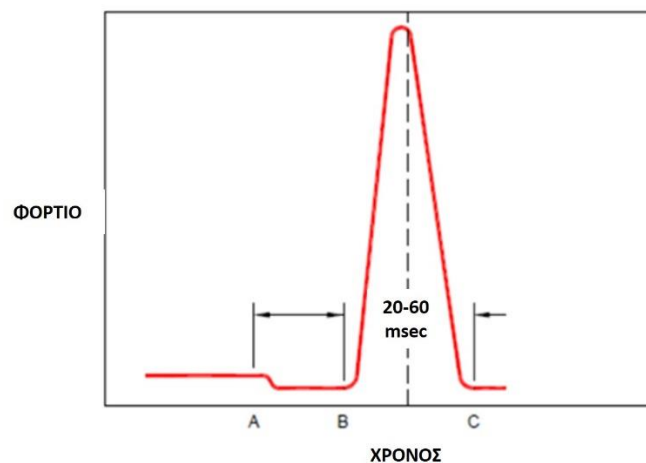


**Εικόνα 2.13 (α) Το σύστημα FWD του ΕΜΠ και (β) διάταξη των γεωφώνων.**



**Εικόνα 2.14** Τυπικό προφίλ υποχωρήσεων FWD

Η διάρκεια της δυναμικής φόρτισης που επιβάλλει το FWD κυμαίνεται από 25-30msec ή 45-60msec (Εικόνα 2.15), ανάλογα με τον τύπο του συστήματος που χρησιμοποιείται. Με αυτόν τον τρόπο, προσομοιάζεται σε μεγάλο βαθμό η πραγματική φόρτιση που υφίσταται το οδόστρωμα από τη διέλευση ενός κινούμενου τροχού. Με αναφορά στην Εικόνα 2.15, ο χρόνος που μεσολαβεί από το σημείο A έως το σημείο B αντιπροσωπεύει το χρόνο που απαιτείται για να ανυψωθεί το βάρος πρόσκρουσης στο επιθυμητό ύψος. Η διάρκεια της πραγματικής φόρτισης αφορά χρονικά στο τμήμα B-C. Καθώς εξελίσσεται η φόρτιση, κάθε γεώφωνο καταγράφει την πλήρη χρονοϊστορία της φόρτισης και της αντίστοιχης υποχώρησης.



**Εικόνα 2.15** Παλμική φόρτιση με σύστημα FWD

Ειδικότερα στα οδοστρώματα αεροδρομίων χρησιμοποιούνται και τα Παραμορφωσίμετρα HWD (Heavy Weight Deflectometer) που επιβάλλουν μεγαλύτερο φορτίο από το FWD. Από σχετικές διερευνήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στις εγκαταστάσεις της FAA (National Airport Pavement Test Facility (NAPTF)) έχει προκύψει ότι υπάρχει μικρή διαφοροποίηση στην απόκριση του οδοστρώματος εξαιτίας της επίδρασης διαφορετικών φορτίων FWD/HWD.

Συνήθως για αεροδρόμια που εξυπηρετούν εμπορικά αεροσκάφη χρησιμοποιείται φορτίο που κυμαίνεται από 20 kips (90 kN) έως 55 kips (250 kN). Το μέγεθος του φορτίου δεν είναι κρίσιμο, υπό την προϋπόθεση ότι οι ελαστικές υποχωρήσεις βρίσκονται εντός του ορίου λειτουργίας του κάθε αισθητήρα. Καθορίζεται με βάση το πάχος των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος, τον τύπο των στρώσεων και τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους.

Παράλληλα με τις καταγραφές των ελαστικών παραμορφώσεων πραγματοποιούνται συστηματικές μετρήσεις θερμοκρασίας και συγκεκριμένα (1) της θερμοκρασίας του αέρα, (2) της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του οδοστρώματος και (3) της θερμοκρασίας στο μέσον του πάχους των ασφαλτικών στρώσεων (Εικόνα 2.16). Η θερμοκρασία έχει επίδραση στη συμπεριφορά των ασφαλτικών στρώσεων λόγω της ιξωδοελαστικής φύσης της ασφάλτου. Κατ' επέκταση η συμπεριφορά του οδοστρώματος επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, γεγονός που αποτυπώνεται μέσω των επιφανειακών υποχωρήσεων που καταγράφουν τα γεώφωνα του FWD. Οι μετρήσεις στο εσωτερικό του οδοστρώματος γίνονται μέσω διάνοιξης οπών στο σώμα του οδοστρώματος.



**Εικόνα 2.16 Μέτρηση θερμοκρασίας: (1) αέρα, (2) επιφάνειας οδοστρώματος, (3) μέσο ασφαλτικών στρώσεων**

Οι ψευδοελαστικές υποχωρήσεις σε συνδυασμό και με άλλα στοιχεία (π.χ. πάχη στρώσεων, αποτελέσματα εξειδικευμένων εργαστηριακών δοκιμών κλπ.) είναι δυνατό να δώσουν μία πλήρη πληροφόρηση για τη δομική κατάσταση των οδοστρωμάτων.

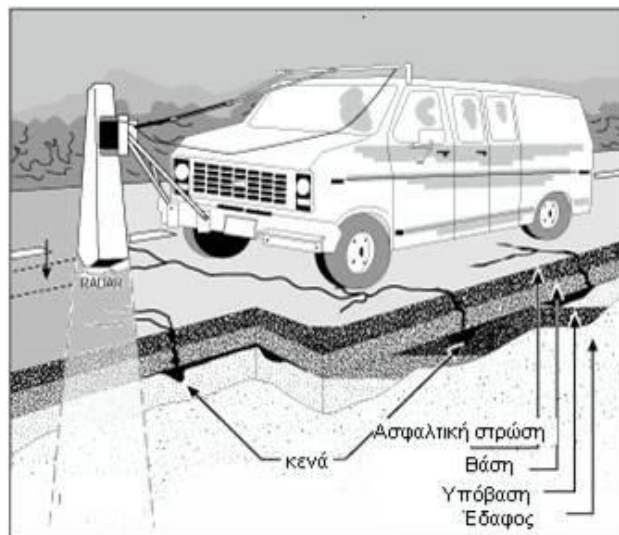
#### 2.4.1.2 Καταγραφές με γεωραντάρ (GPR)

Γεωραντάρ (GPR: Ground Penetrating Radar) είναι ο γενικός όρος που αποδίδεται σε τεχνικές που χρησιμοποιούν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα για την αναγνώριση του εσωτερικού των κατασκευών ή του εδάφους. Στην περίπτωση εφαρμογής της τεχνικής γεωραντάρ στα οδοστρώματα είναι δυνατό να αντληθούν πληροφορίες σχετικά με τη στρωματογραφία, τα



πάχη των στρώσεων, αλλά και με ενδεχόμενες ατέλειες στο εσωτερικό των οδοστρωμάτων που προέρχονται από την ύπαρξη ασυνεχειών, υγρασίας, κενών, κ.α. Η επεξεργασία και ανάλυση των υπόψη καταγραφών πρακτικά οδηγεί στην εκτίμηση των παχών των επιμέρους στρώσεων ανά πολύ μικρές αποστάσεις με σημαντική ακρίβεια. Κατά συνέπεια πλεονεκτεί σε σχέση με τις χρησιμοποιούμενες παραδοσιακές μεθόδους (λήψη πυρήνων) για τον προσδιορισμό των παχών των στρώσεων του οδοστρώματος.

Το σύστημα καταγράφει τον χρόνο που χρειάζονται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα να διαπεράσουν ένα συγκεκριμένο υλικό και να επιστρέψουν στο δέκτη. Για να μεταφραστεί ο χρόνος αυτός σε απόσταση, πρέπει να είναι γνωστή η ταχύτητα των κυμάτων μέσα στα διάφορα υλικά. Η ταχύτητα των κυμάτων μέσα σε ένα υλικό εξαρτάται κυρίως από τη διηλεκτρική σταθερά του υλικού, η οποία όμως είναι δύσκολο να υπολογιστεί θεωρητικά, ειδικά για ανομοιογενή μίγματα όπως το ασφαλτόμιγμα του οποίου η σύσταση είναι διαφορετική ανά στρώση. Το βάθος στο οποίο δύναται να διεισδύσουν οι παλμοί του GPR εξαρτάται από την κεντρική συχνότητα του σήματος και τις ιδιότητες του μέσου διάδοσης (Εικόνα 2.17).



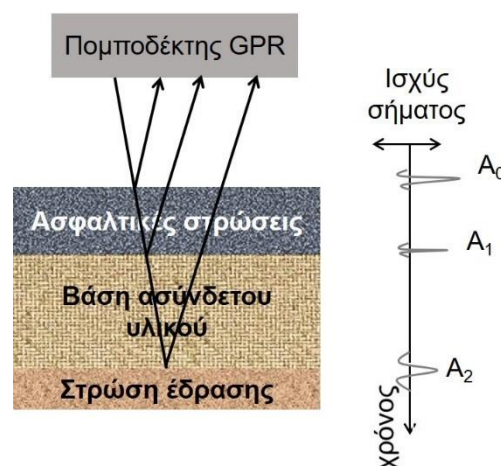
**Εικόνα 2.17 Διερεύνηση στρωματογραφίας οδοστρώματος με σύστημα GPR**

Η λειτουργία του GPR στηρίζεται στη μετάδοση παλμών μέσω δύο κατηγοριών πομπών: α) τους πομπούς που βρίσκονται σε ορισμένη απόσταση από την επιφάνεια ελέγχου (air-coupled antenna) και β) τους πομπούς που βρίσκονται σε επαφή με την επιφάνεια ελέγχου (ground-coupled antenna) (Εικόνα 2.18). Η πρώτη κατηγορία τοποθετείται συνήθως σε ένα όχημα που κινείται με μεγάλη ταχύτητα και καταγράφει μεγάλες περιοχές. Η δεύτερη κατηγορία είναι πιο κατάλληλη για τη διερεύνηση μικρότερων περιοχών σε βάθος.



**Εικόνα 2.18 α) Πομπός σε απόσταση από την επιφάνεια ελέγχου και β) πομπός σε πλήρη επαφή με την επιφάνεια ελέγχου**

Κατά τη μετάδοση των ηλεκτρομαγνητικών παλμών στο οδόστρωμα, η ανίχνευση αλλαγών στις ηλεκτρικές ιδιότητες εντός του μέσου οδηγεί σε μερική ανάκλαση του ηλεκτρομαγνητικού παλμού, ενώ μέρος του αρχικά προσπίπτοντος παλμού συνεχίζει να διαδίδεται στην υποκείμενη στρώση οδοστρώματος. Η διαδικασία διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών παλμών συνεχίζεται, καθώς το μεταδιδόμενο σκέλος του παλμού συναντά προοδευτικά αλλαγές στις ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών του μέσου διάδοσης. Μέσω των χαρακτηριστικών διάδοσης τόσο των μεταδιδόμενων όσο και των ανακλώμενων παλμών, καταγράφονται τα πλάτη των κυμάτων καθώς και ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ της έναρξης της μετάδοσης κύματος και της λήψης του ανακλώμενου κυματισμού από τον πομποδέκτη. Σχηματικά, η λειτουργία ενός συστήματος GPR φαίνεται στην Εικόνα 2.19 για την περίπτωση εφαρμογής σε οδόστρωμα με στατικό πρότυπο τριών στρώσεων.



**Εικόνα 2.19 Σχηματική απεικόνιση παλμών GPR σε οδόστρωμα τριών στρώσεων**



Η επεξεργασία και ανάλυση των στοιχείων που συλλέγονται με το σύστημα γεωραντάρ γίνεται με χρήση κατάλληλων λογισμικών. Σημαντικός παράγοντας κατά τη διαδικασία της ανάλυσης για την ακρίβεια των σχετικών αποτελεσμάτων είναι η εμπειρία του αναλυτή. Γενικά, το υπόψη σύστημα επιτρέπει μια αρκετά ταχεία συλλογή στοιχείων, αλλά η ανάλυση αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία, της οποίας όσο αυξάνεται η ακρίβεια, αυξάνεται και η διάρκεια.

### 2.4.1.3 Δυναμικό Πενετρόμετρο Κώνου (DCP)

Η δοκιμή δυναμικού πενετρόμετρου κώνου (Dynamic Cone Penetrometer: DCP) (Εικόνα 2.20) είναι μία επιτόπου δοκιμή που πραγματοποιείται για την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών στρώσεων από ασύνδετα υλικά (βάσης/ υπόβασης) καθώς και της στρώσης έδρασης. Η διαδικασία της δοκιμής περιγράφεται από την πτώση ενός συγκεκριμένου φορτίου επί ενός εμβόλου που καταλήγει στον κώνο διείδυσης. Το μέγεθος της εισχώρησης του κώνου εντός του εδάφους χαρακτηρίζει τη μηχανική του αντοχή.



**Εικόνα 2.20 Δοκιμή δυναμικού πενετρόμετρου κώνου (Dynamic Cone Penetrometer)**

Ο δείκτης DCP εκφράζεται σε χιλιοστά ανά κτύπο (mm/blow) και έχουν αναπτυχθεί εμπειρικές σχέσεις που συνδέουν τον δείκτη DCP με την τιμή του δείκτη CBR. Επιπλέον, με τη χρήση του DCP μπορεί να γίνει εκτίμηση ενός ενδεικτικού πάχους της στρώσης από ασύνδετα υλικά. Οι βασικές συσχετίσεις του CBR με το DCP φαίνονται στον Πίνακα 2.6.

**Πίνακας 2.6 Συσχέτιση δείκτη DCP και CBR**

Υλικό	Συσχέτιση	Πηγή
Όλα τα εδαφικά υλικά , εκτός από εδάφη CL με CBR<10% και εδάφη CH*	$CBR=292/DCP^{1.12}$ , DCP mm/blow $CBR=292/(DCP \times 25.4)^{1.12}$ , DCP in/blow	ASTM D6951

<b>εδάφη CL** με CBR&lt;10%</b>	CBR=1/(0.017019xDCP) <sup>2</sup> , DCP mm/blow CBR=1/(0.0432283xDCP) <sup>2</sup> , DCP in/blow	ASTM D6951
<b>εδάφη CH</b>	CBR=1/(0.002871xDCP), DCP mm/blow CBR=1/(0.072923xDCP), DCP in/blow	ASTM D6951
<b>Όλα τα συνεκτικά εδάφη (All cohesive soils)</b>	Log (E)=-0.45xLog(DCP)+2.52, DCP mm/blow	Boutet 2007
<b>Όλα τα κοκκώδη εδάφη (All granular soils)</b>	Log (E)=-0.62xLog(DCP)+2.56, DCP mm/blow	Boutet 2007

\*CH: Heavy Clay, \*\*CL: Lean Clay (σύμφωνα με το σύστημα κατάταξης εδαφών Unified Soil Classification System (USCS))

## 2.4.2 Επεξεργασία στοιχείων συλλογής

### 2.4.2.1 Δείκτες υποχωρήσεων

Για την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος κρίνεται απαραίτητος ο καθορισμός ενός ή περισσότερων δεικτών της κατάστασης του οδοστρώματος. Ένας τέτοιος δείκτης είναι ο  $d_0$ , ο οποίος προκύπτει από μετρήσεις που πραγματοποιούνται με το Σύστημα FWD. Η τιμή του δείκτη  $d_0$  εξαρτάται από τον τύπο του οδοστρώματος και διαφέρει ανάλογα με το αν είναι εύκαμπτο, δύσκαμπτο ή ημιάκαμπτο, καθώς και από τη θερμοκρασία, με συνέπεια να παρουσιάζει αυξομειώσεις κατά τη διάρκεια του έτους (εποχιακές διακυμάνσεις). Ο δείκτης  $d_0$  εκφράζει τη συνολική κατάσταση ενός οδοστρώματος από άποψη δομικής αντοχής. Μικρές τιμές του δείκτη υποδηλώνουν ότι το οδόστρωμα είναι ισχυρό. Ανάλογα, μεγάλες τιμές του δείκτη υποδηλώνουν ότι πρόκειται για ένα ασθενές οδόστρωμα.

Οι ελαστικές υποχωρήσεις που καταγράφονται με το σύστημα FWD εξαρτώνται από το φορτίο που εφαρμόζεται στο οδόστρωμα και επηρεάζονται από τη θερμοκρασία των ασφαλικών στρώσεων. Το φορτίο που εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων θεωρείται ως φορτίο αναφοράς ( $L_{norm}$ ). Κατά την εκτέλεση όμως των δοκιμών παρατηρούνται μικρές αποκλίσεις, οι οποίες καταγράφονται και είναι δυνατή η αναγωγή των αποτελεσμάτων στο φορτίο αναφοράς με τη βοήθεια της εξίσωσης:

$$d_{0n} = \frac{L_{norm}}{L_{applied}} d_0 \quad (\text{Εξ. 2.12})$$

Όπου:

- $d_{0n}$ : Αναγωγή  $d_0$  στο φορτίο αναφοράς ( $L_{norm}$ )
- $L_{norm}$ : Φορτίο αναφοράς στο οποίο γίνεται η αναγωγή
- $L_{applied}$ : Φορτίο στο οποίο έχει γίνει η μέτρηση

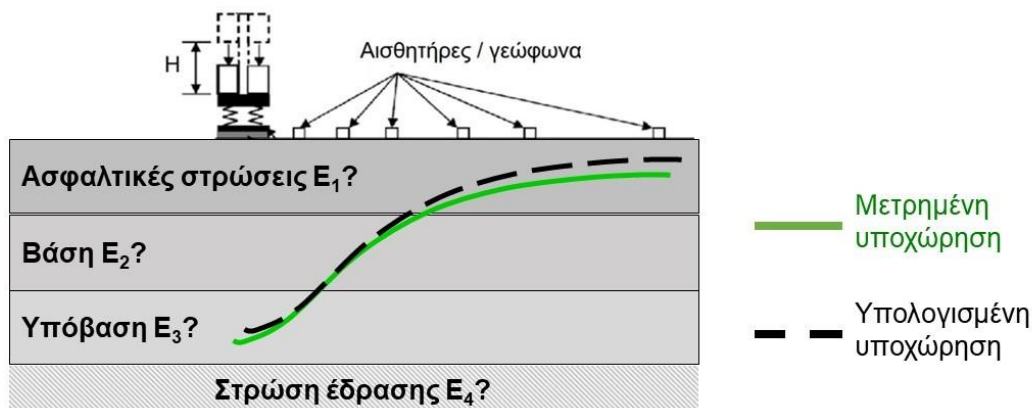
- $d_0$ : Μέτρηση  $d_0$  σε φορτίο  $L_{\text{applied}}$  (ελαστική υποχώρηση κάτω από την πλάκα φόρτισης)

Ο προσδιορισμός του δείκτη  $d_0$  κατά μήκος του οδοστρώματος ενός αεροδρομίου παρέχει χρήσιμη πληροφορία για τη δομική κατάστασή του.

#### 2.4.2.2 Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού (Back-calculation)

Χρησιμοποιώντας τα στοιχεία που προκύπτουν από τις μετρήσεις με το Σύστημα FWD σε συνδυασμό με το σύνολο των στοιχείων που καταγράφονται επί τόπου (πάχη, θερμοκρασίες, κλπ.) είναι δυνατός ο υπολογισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών των επιμέρους στρώσεων ενός οδοστρώματος. Από τις ελαστικές υποχωρήσεις, σε συνδυασμό και με άλλα στοιχεία (π.χ. πάχη στρώσεων) είναι δυνατό να εκτιμηθεί το μέτρο ελαστικότητας των επιμέρους στρώσεων.

Ο υπολογισμός βασίζεται στο προφίλ των ελαστικών υποχωρήσεων και στα πάχη των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος. Συνήθως πραγματοποιείται μία αρχική εκτίμηση των μέτρων ελαστικότητας (seed values) των υλικών με βάση τον τύπο του κάθε υλικού. Για αυτές τις τιμές υπολογίζονται οι ελαστικές υποχωρήσεις που προκαλούνται από το φορτίο του FWD στις αποστάσεις από το κέντρο επιβολής του φορτίου που έχουν γίνει οι καταγραφές. Οι υπολογισμένες υποχωρήσεις συγκρίνονται με τις μετρημένες (Εικόνα 2.21).



**Εικόνα 2.21 Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων ελαστικών υποχωρήσεων**

Στη συνέχεια, μέσω μίας επαναληπτικής διαδικασίας, τα μέτρα ελαστικότητας μεταβάλλονται μέχρι να επιτευχθεί η βέλτιστη δυνατή σύγκλιση μεταξύ των δύο υποχωρήσεων. Η υπόψη διαδικασία, γνωστή ως διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού (back-calculation), είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη, απαιτεί σχετική εξειδίκευση και πραγματοποιείται με χρήση ειδικών λογισμικών. Ειδικότερα για τα οδοστρώματα αεροδρομίων διεθνώς χρησιμοποιούνται πολλά λογισμικά για τον ανάστροφο υπολογισμό των μέτρων ελαστικότητας όπως τα BISDEF,

CHEVDEF, ELSDEF, MODULUS, MICHBAK (FAA 2011) ενώ η FAA έχει αναπτύξει το λογισμικό BAKFAA.

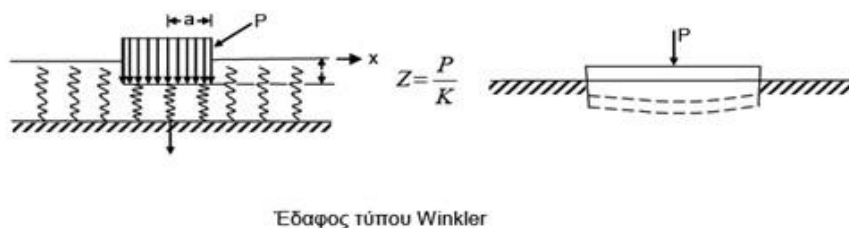
### 3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΥΣΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται η εξέλιξη της μεθοδολογίας αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων που έχει αναπτυχθεί από την FAA και αφορά στα δύσκαμπτα οδοστρώματα. Σημειώνεται ότι η υπόψη διαδικασία πραγματοποιείται μέσω μίας ανάστροφης εφαρμογής των βασικών αρχών σχεδιασμού των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων.

#### 3.1 Εμπειρική μέθοδος FAA

##### 3.1.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Η αξιολόγηση ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος με την εμπειρική μέθοδο πραγματοποιείται με μια σειρά από διαγράμματα τα οποία αποτελούν γραφική επίλυση των εξισώσεων του Westergaard για φόρτιση πλάκας σκυροδέματος στην ακμή της, εδραζόμενης σε έδαφος τύπου Winkler. Η παραδοχή αυτή ισοδυναμεί με έδραση της πλάκας σκυροδέματος σε μία σειρά άπειρων ελατηρίων, κατά την οποία οι αντιδράσεις της υποκείμενης στρώσης είναι ανάλογες των υποχωρήσεων (Εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1 Έδαφος τύπου Winkler

Το 1926, ο Westergaard (Westergaard 1926) παρουσίασε τις πρώτες εξισώσεις υπολογισμού των τάσεων στη γωνία, στην ακμή και στο μέσον της πλάκας σκυροδέματος τις οποίες βελτίωσε το 1929 και το 1947. Οι εξισώσεις Westergaard υπέστησαν ορισμένες τροποποιήσεις από τους Teller και Sutherland (1936-43) μετά από εκτεταμένα πειράματα σε πλάκες κατασκευασμένες στο έδαφος για να ληφθεί υπόψη, με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων από τα πειράματα, το γεγονός ότι οι πλάκες συνήθως δεν βρίσκονται σε όλη την επιφάνεια τους σε πλήρη επαφή με το έδαφος. Έκτοτε υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός εξισώσεων που αποδίδονται στον Westergaard ή τροποποιημένων εξισώσεων Westergaard. Οι εξισώσεις του Westergaard αποτελούν μία πρακτική ημι-αναλυτική μέθοδο υπολογισμού των τάσεων σε πλάκες σκυροδέματος. Οι εξισώσεις για περιπτώσεις φόρτισης στην γωνία, στην ακμή και στο μέσον από φορτίο ενός τροχού με κυκλική επιφάνεια επαφής είναι (Εικόνα 3.2):

**Τάση στο μέσον**

$$\sigma_{\mu} = \left( \frac{0.275Q}{h^2} (1 + \nu) \right) \times \left( \log \frac{Eh^3}{kb^4} - 0.436 \right) \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Εξ. 3.1})$$

**Τάση στην ακμή**

$$\sigma_{\alpha} = \frac{0.529Q}{h^2} \times (1 + 0.54\nu) \left( \log \frac{Eh^3}{kb^4} + \log \frac{b}{1-\nu^2} - 2.484 \right) \quad (\text{Εξ. 3.2})$$

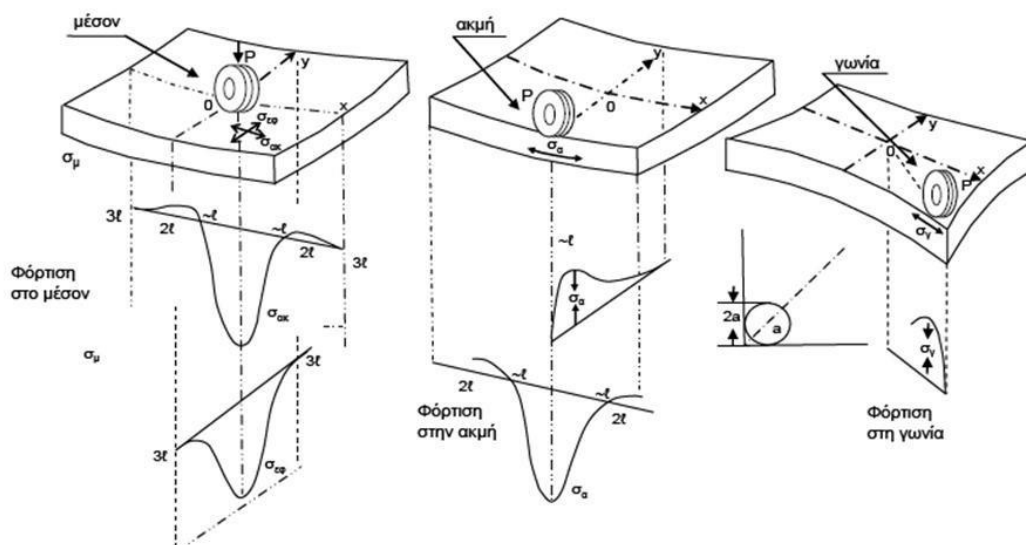
**Τάση στη γωνία**

$$\sigma_{\gamma} = \frac{3Q}{h^2} \left( 1 - \left( \frac{12(1-\nu^2)k}{Eh^3} \right)^{0.15} (a\sqrt{2})^{0.6} \right) \quad (\text{Εξ. 3.3})$$

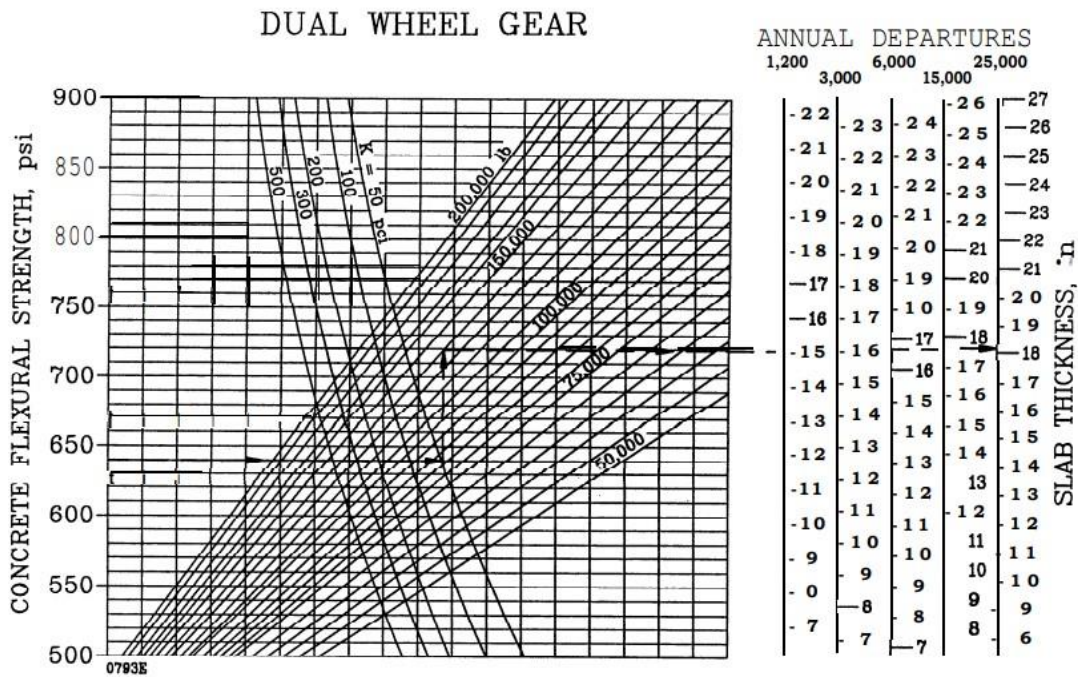
Όπου:

- Q: το φορτίο του τροχού (N)
- ν: ο λόγος του Poisson του σκυροδέματος
- E: το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος (MPa ή N/mm<sup>2</sup>)
- k: το μέτρο αντίδρασης στρώσης έδρασης πλάκας σκυροδέματος (N/mm<sup>3</sup>)
- a: η ακτίνα επαφής του τροχού (mm)
- b: διορθωμένη ακτίνα επαφής φορτίου με τιμή: b=a όταν a>1.724h και b=(1.6a<sup>2</sup>+h<sup>2</sup>)/2-0.675h όταν a<1.724h (mm)
- I είναι η ακτίνα σχετικής ακαμψίας από τη σχέση:

$$I = \left( \frac{Eh^3}{12k(1-\nu^2)} \right)^{1/4} \quad (\text{Εξ. 3.4})$$



**Εικόνα 3.2 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε πλάκα από σκυροδέμα κατά Westergaard**



**Εικόνα 3.3** Διάγραμμα αξιολόγησης οδοστρώματος για τυπικό φορείο διπλού τροχού (FAA, 1995)

Για την αξιολόγηση ενός οδοστρώματος με την εμπειρική μέθοδο της FAA απαιτείται ο προσδιορισμός των παχών των επιμέρους στρώσεων του υφιστάμενου οδοστρώματος μέσω τομών ή μέσω των κατασκευαστικών στοιχείων των διατομών (as-built drawings). Επίσης ο δείκτης αντίδρασης εδάφους καθορίζεται συνήθως επιτόπου μέσω δοκιμών φόρτισης πλάκας (plate bearing test). Τέλος σημαντικό στοιχείο για την αξιολόγηση ενός οδοστρώματος αποτελεί η εκτίμηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος (flexural strength  $R$ ), η οποία πραγματοποιείται μέσω εργαστηριακών δοκιμών. Σημειώνεται ότι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος μπορεί να εκτιμηθεί έμμεσα και από τις εξισώσεις 3.5-3.6:

$$R = 1.02 (f'_t + 200) \quad (\text{Εξ. 3.5})$$

$$R = 9\sqrt{f'_c} \quad (\text{Εξ. 3.6})$$

Όπου

- $R$ : εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος (flexural strength) (psi)
- $f'_t$ : εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη (tensile split strength) (psi)
- $f'_c$ : θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (compressive strength)

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία και με εκτίμηση του αριθμού των ετήσιων αναχωρήσεων των αεροσκαφών που δέχεται το αεροδρόμιο προσδιορίζεται το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο που μπορεί να φέρει το οδόστρωμα.

Το μοντέλο αστοχίας στο οποίο βασίζονται οι διαδικασίες σχεδιασμού και αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων της εμπειρικής μεθόδου περιγράφεται από τις εξισώσεις (Garg et al, 2004):

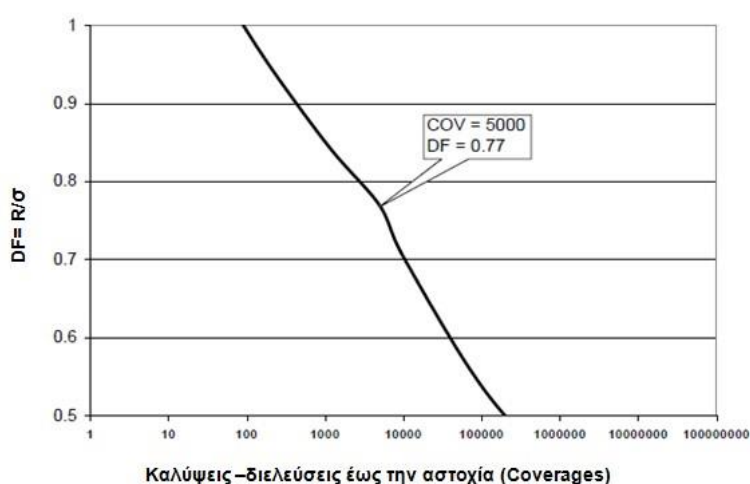
$$C = 5000 \times 10^{\left(\sqrt{\frac{R}{\sigma \times 1,3}} - 1\right) / 0.15603} \quad (C > 5000) \quad (\text{Εξ. 3.7})$$

$$C = 5000 \times 10^{\left(\sqrt{\frac{R}{\sigma \times 1,3}} - 1\right) / 0.07058} \quad (C \leq 5000) \quad (\text{Εξ. 3.8})$$

όπου:

- $\sigma$ : η αναπτυσσόμενη τάση
- $R$ : η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος
- $C$  = οι καλύψεις- διελεύσεις έως την αστοχία

Η αστοχία της πλάκας σκυροδέματος του δύσκαμπτου οδοστρώματος βασίζεται σε μοντέλο «ενός σταδίου», όπου η διάρκεια ζωής του οδοστρώματος εκφράζεται συναρτήσει του αριθμού των καλύψεων-διελεύσεων έως την αστοχία  $C$ . Το μοντέλο αστοχίας αποτυπώνει τη σχέση του συντελεστή σχεδιασμού  $DF$  που ισούται με το λόγο της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος ( $R$ ) προς την αναπτυσσόμενη τάση ( $\sigma$ ) και τροποποιείται για καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία που ξεπερνούν τις 5000, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.4.

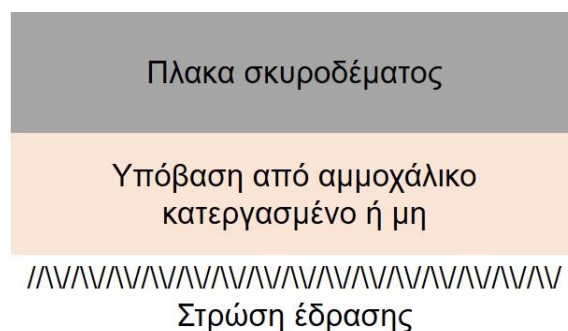


**Εικόνα 3.4 Μοντέλο αστοχίας εμπειρικής μεθόδου ενός σταδίου**



### 3.1.2 Τυπικά υλικά μεθόδου FAA

Η τυπική διατομή ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου αποτελείται από την πλάκα σκυροδέματος, τη στρώση υπόβασης και τη στρώση έδρασης (Εικόνα 3.5). Σύμφωνα με την FAA, η πλάκα σκυροδέματος κατασκευάζεται από το τυπικό υλικό P-501. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα τυπικά υλικά της FAA που χρησιμοποιούνται στις επιμέρους στρώσεις ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος.



Εικόνα 3.5 Τυπική διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος

Πίνακας 3.1 Υλικά εμπειρικής μεθόδου FAA (δύσκαμπτο οδόστρωμα)

Υλικό		Στρώση οδοστρώματος
<b>P-501 – Cement Concrete pavement</b>	Σκυρόδεμα	Πλάκα σκυροδέματος
<b>P-401 - Plant Mix Bituminous Pavements</b>	Θερμό ασφαλτόμιγμα	Στρώση Υπόβασης – σταθεροποιημένο υλικό
<b>P-304 - Cement Treated Base Course</b>	Στρώση από σταθεροποιημένο με τσιμέντο υλικό	
<b>P-306 - Econocrete Subbase Course</b>	Στρώση από σταθεροποιημένο με τσιμέντο υλικό	
<b>P-209 - Crushed Aggregate Base Course</b>	Στρώση από θραυστό αμμοχάλικο	Στρώση Υπόβασης – μη σταθεροποιημένο υλικό
<b>P-208 - Aggregate Base Course</b>	Στρώση από ασύνδετο αμμοχάλικο	
<b>P-211 - Lime Rock Base Course</b>	Στρώση από ασβεστόλιθο	
<b>P-154 - Subbase Course</b>	Στρώση από ασύνδετο υλικό	

Τα υλικά P-401, P-304, P-306 αντιστοιχούν σε στρώσεις από σταθεροποιημένα υλικά και η χρήση τους είναι απαραίτητη εφόσον προβλέπεται κυκλοφορία από αεροσκάφη βάρους μεγαλύτερου από 100,000 lbs (45,400 kg).

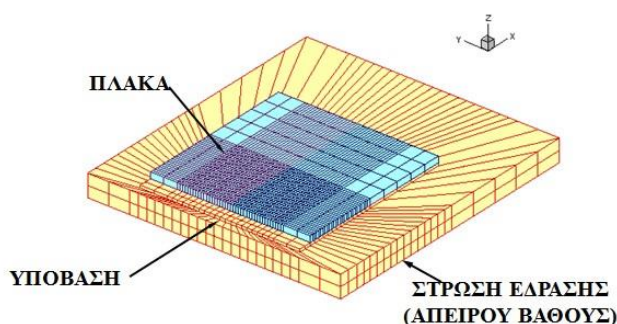
## 3.2 Αναλυτική μέθοδος FAA

Σε αντιστοιχία με τα εύκαμπτα οδοστρώματα, ακολουθώντας τις εξελίξεις στο σχεδιασμό και την αξιολόγηση των οδοστρωμάτων αεροδρομίων αναπτύχθηκε η αναλυτική μορφή της μεθόδου της FAA για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα. Η μέθοδος εισήχθη πειραματικά το 2009 (FAA 2009) και έκτοτε ακολούθησαν αρκετές τροποποιήσεις (FAA 2016) που οδήγησαν στη σημερινή μορφή της (FAA 2021). Η μέθοδος αφορά τόσο στο σχεδιασμό νέων οδοστρωμάτων όσο και στην αξιολόγηση υφιστάμενων δύσκαμπτων οδοστρωμάτων και η εφαρμογή της μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω του Συστήματος FAARFIELD. Συγκεκριμένα και για την περίπτωση των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων η αρχική αναλυτική μορφή της μεθόδου (FAA 2009) εφαρμόστηκε μέσω του λογισμικού FAARFIELD 1.305 (FAA 2010).

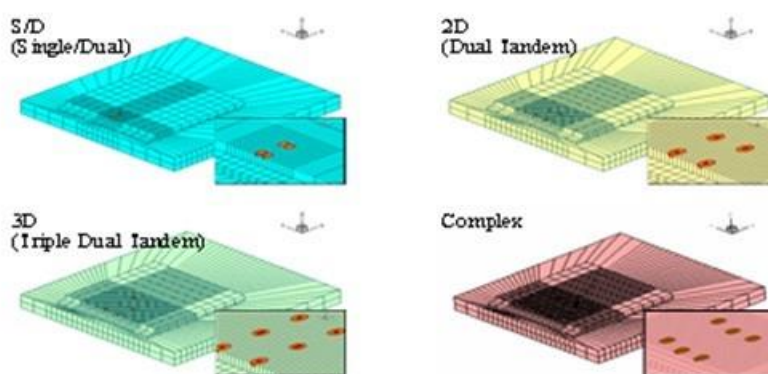
### 3.2.1 Βασικές αρχές

Η αναλυτική μέθοδος της FAA για την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων βασίζεται στη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων (FEM: Finite Element Method) λαμβάνοντας υπόψη το πραγματικό σύστημα τροχών των αεροσκαφών (FAA 2009). Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων θεωρείται ιδιαίτερα ακριβής για τον προσδιορισμό της καταπόνησης που υφίσταται η ακμή της πλάκας σκυροδέματος σε ένα στατικό προσομοίωμα επάλληλων στρώσεων. Επιπλέον θεωρείται κατάλληλη για την προσομοίωση πολύπλοκων διατάξεων φορέων τροχών αεροσκαφών και την απόκριση του οδοστρώματος στη φόρτιση.

Για την ανάλυση ενός οδοστρώματος με τη μέθοδο FEM απαιτείται διακριτοποίηση της δομής όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.6. Ο κώνναβος διακριτοποίησης του δύσκαμπτου οδοστρώματος αποτελείται από την πλάκα σκυροδέματος, τη στρώση υπόβασης και τη στρώση έδρασης που θεωρείται απείρου πάχους στη διαδικασία της ανάλυσης. Παραδείγματα προσομοίωσης φόρτισης διαφορετικών συστημάτων τροχών αεροσκαφών με τη μέθοδο FEM φαίνονται στη Εικόνα 3.7.

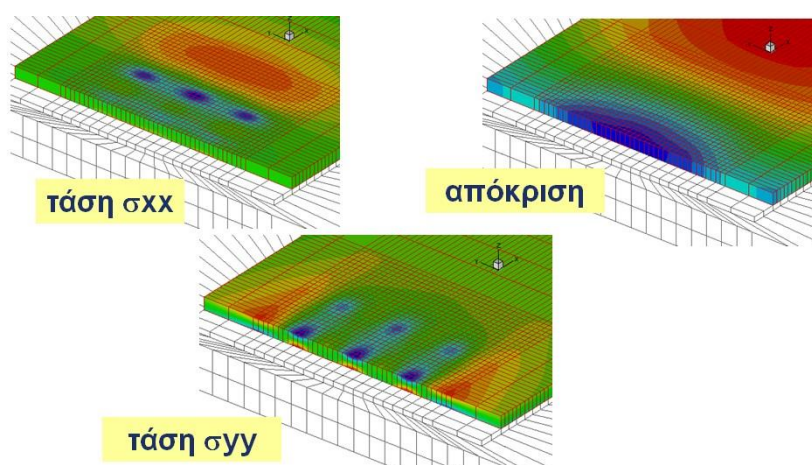


**Εικόνα 3.6 Κώνναβος διακριτοποίησης δύσκαμπτου οδοστρώματος**



**Εικόνα 3.7 Προσομοίωση συστημάτων τροχών αεροσκαφών με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων**

Η ανάλυση των τάσεων που αναπτύσσονται στην πλάκα σκυροδέματος από την επιβολή φόρτισης του κάθε αεροσκάφους της σύνθεσης της κυκλοφορίας πραγματοποιείται από το υποπρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων της FAA NIKE3D (Εικόνα 3.8).



**Εικόνα 3.8 Ανάλυση τάσεων με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων**

Βασικό κριτήριο για την αξιολόγηση αποτελεί η εκτίμηση της αθροιστικής φθοράς που προκαλούν τα αεροσκάφη που δέχεται το υπό διερεύνηση οδόστρωμα στην κρίσιμη θέση αστοχίας του οδοστρώματος, δηλαδή στον πυθμένα της πλάκας σκυροδέματος με ενδεχόμενη αστοχία από την επαναλαμβανόμενη οριζόντια εφελκυστική τάση ( $\sigma_h$ ). Η μέθοδος λαμβάνει υπόψη τη ρηγμάτωση της πλάκας σκυροδέματος, η οποία ελέγχεται με τον περιορισμό των οριζόντιων εφελκυστικών τάσεων στον πυθμένα της πλάκας σκυροδέματος και δεν λαμβάνεται υπόψη ενδεχόμενη αστοχία της στρώσης έδρασης ή της υπόβασης (Εικόνα 3.9).

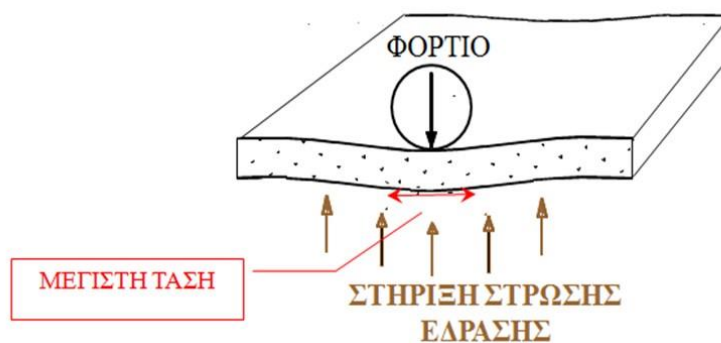


**Εικόνα 3.9 Κρίσιμη θέση αστοχίας δύσκαμπτου οδοστρώματος**

Σε αντιστοιχία με τα εύκαμπτα οδοστρώματα η φθορά εκφράζεται συναρτήσεως του δείκτη αθροιστικής φθοράς (CDF) όλων των αεροσκαφών της σύνθεσης της κυκλοφορίας.

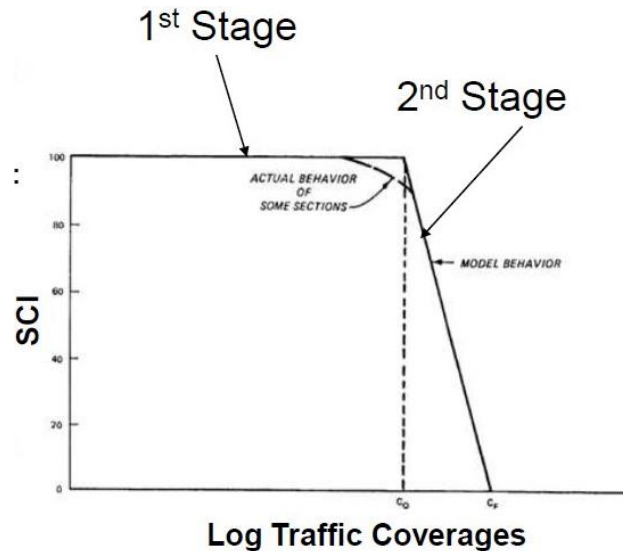
### 3.2.2 Εκτίμηση καλύψεων-διελεύσεων έως την αστοχία

Η εκτίμηση των επιτρεπόμενων καλύψεων-διελεύσεων έως την αστοχία πραγματοποιείται μέσω του μοντέλου αστοχίας της πλάκας σκυροδέματος. Για την αστοχία λαμβάνεται υπόψη η μέγιστη οριζόντια εφελκυστική τάση στην ακμή της πλάκας σκυροδέματος (Εικόνα 3.10). Οι τάσεις στην ακμή της πλάκας σκυροδέματος μειώνονται κατά 25% για να ληφθεί υπόψη η μεταβίβαση φορτίου λόγω των αρμών της πλάκας κατ' αντιστοιχία με την προγενέστερη εμπειρική μέθοδο.



**Εικόνα 3.10 Κρίσιμη θέση αστοχίας δύσκαμπτου οδοστρώματος**

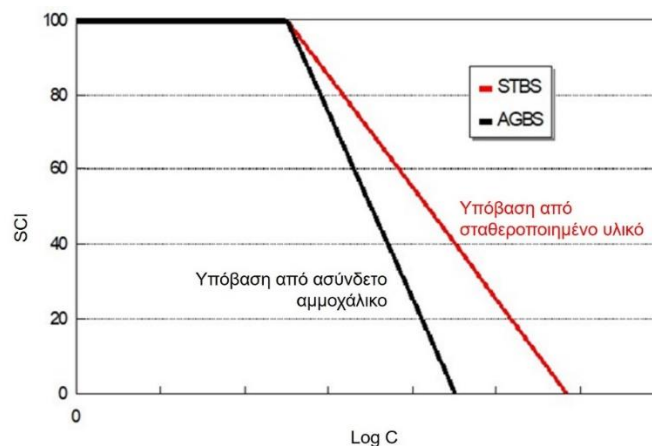
Το 1995 η FAA υιοθετεί μοντέλο αστοχίας «2 σταδίων», με πρώτο στάδιο από την αρηγμάτωση πλάκα έως την ανάπτυξη της πρώτης ρωγμής και δεύτερο στάδιο από την πρώτη διαμπερή ρωγμή έως το πέρας της ζωής του οδοστρώματος. Η αρχική ιδέα ανήκει στον Witczak το 1976 και η διαδικασία ολοκληρωμένα προτάθηκε από τον Rollings το 1988 (Εικόνα 3.11). Το μοντέλο αστοχίας συνέχισε να χρησιμοποιείται στην αναλυτική μέθοδο με κάποιες τροποποιήσεις για τις σταθεροποιημένες βάσεις (Εικόνα 3.12).



**Εικόνα 3.11 Σχέση μεταξύ δείκτη SCI και λογαρίθμου των καλύψεων-διελεύσεων (Rollings 1988)**

Ο Rollings εισήγαγε την έννοια του Δείκτη Δομικής Κατάστασης SCI (Structural Condition Index) ως κριτήριο για την αστοχία του οδοστρώματος, συσχετίζοντας τις καλύψεις – διελεύσεις C με τον δείκτη SCI. Συγκεκριμένα, οι καλύψεις- διελεύσεις  $C_0$  αντιστοιχούν στην εμφάνιση της πρώτης ρωγμής με  $SCI=100$ . Μετά την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής (αρχή δεύτερου σταδίου) ο δείκτης SCI αρχίζει να μειώνεται γραμμικά έως ότου μηδενίζεται για καλύψεις- διελεύσεις  $C_F$  που αντιστοιχούν στην πλήρη αστοχία του δύσκαμπτου οδοστρώματος, όπως διακρίνεται στην Εικόνα 3.11.

Η βελτιστοποίηση του μοντέλου αστοχίας «2 σταδίων» για την ανάπτυξη της νέας αναλυτικής μεθόδου βασίστηκε σε δοκιμές πλήρους κλίμακας που διεξήχθησαν το 2004 στην εγκατάσταση NARTF σε έξι διαφορετικά πειραματικά δύσκαμπτα οδοστρώματα με διαφορετικούς συνδυασμούς υλικού υπόβασης που υποβλήθηκαν σε φόρτιση έως την πλήρη αστοχία.



**Εικόνα 3.12 Μοντέλο αστοχίας αναλυτικής μεθόδου FAA**

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

$$\frac{DF}{F_{CAL}} = \left[ \frac{F'_{S}bd}{\left(1-\frac{SCI}{100}\right)(d-b)+F'_{S}b} \right] \times \log C + \left[ \frac{\left(1-\frac{SCI}{100}\right)(ad-bc)+F'_{S}bc}{\left(1-\frac{SCI}{100}\right)(d-b)+F'_{S}b} \right] \quad (\text{Εξ. 3.9})$$

Όπου

- SCI: Δείκτης δομικής κατάστασης (SCI=80 αντιστοιχεί σε αστοχία του οδοστρώματος)
- DF: Συντελεστής σχεδιασμού με  $DF=R/\sigma$ , όπου R η εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος και  $\sigma$  η αναπτυσσόμενη εφελκυστική τάση
- $F_{CAL}$ : Συντελεστής βαθμονόμησης (calibration factor) με τιμή 1.13
- $F'_s$ : Συντελεστής για σταθεροποιημένη βάση
- Παράμετροι a, b, c, d:  $a=0.5878$ ,  $b=0.2523$ ,  $c=0.7409$ ,  $d=0.2456$

Ο δείκτης SCI προκύπτει από το Δείκτη Κατάστασης Οδοστρώματος PCI (Pavement Condition Index), κατά τον οποίο λαμβάνονται υπόψη συγκεκριμένοι τύποι φθοράς που σχετίζονται με τη φόρτιση του οδοστρώματος. Και οι δύο δείκτες μπορεί να εκτιμηθούν μέσω οπτικής επισκόπησης της επιφανειακής κατάστασης του οδοστρώματος σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D5340-12 (2012). Από τα είδη των φθορών που λαμβάνονται υπόψη στον δείκτη PCI, μόνο έξι είδη συνδέονται με τη δομική κατάσταση του οδοστρώματος και λαμβάνονται υπόψη στον δείκτη SCI (ρωγμές στη γωνία, διαμήκεις – εγκάρσιες- διαγώνιες ρωγμές, τοπικές θραύσεις στις γωνίες, τοπικές θραύσεις στις ακμές, καταρηγματωμένες πλάκες, ρωγμές συρρίκνωσης χαμηλής σοβαρότητας). Συνεπώς η τιμή του SCI είναι πάντα ίση ή μεγαλύτερη της τιμής του PCI σε ένα οδόστρωμα.

Σύμφωνα με το μοντέλο αστοχίας ένα δύσκαμπτο οδόστρωμα θεωρείται πως αστοχεί όταν  $SCI=80$ . Επομένως, οι καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία προκύπτουν για  $SCI=80$  για οποιαδήποτε τιμή του  $DF=R/\sigma$ . Η υπόψη τιμή ισοδυναμεί με το 50% των πλακών σκυροδέματος να παρουσιάζουν φθορά δομικής φύσης.

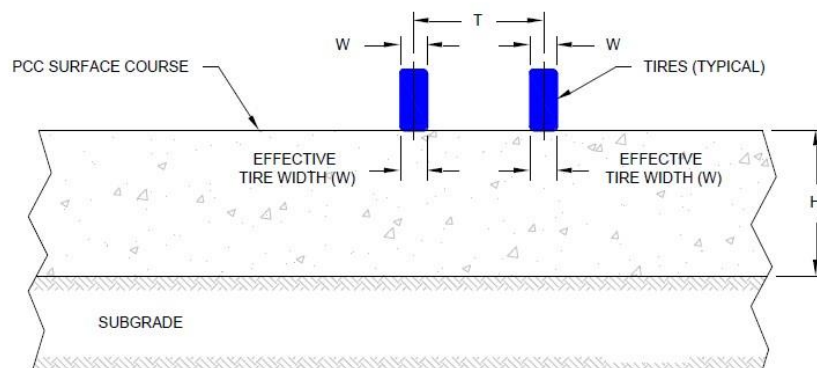
Ο δείκτης  $F'_s$  εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υλικού της υπόβασης και χρησιμοποιείται για την προσαρμογή της κλίσης του φθίνοντος κλάδου του διαγράμματος  $SCI - \log C$  (Εικόνα 3.12), όταν η υπόβαση αποτελείται από σταθεροποιημένο υλικό. Όταν η πλάκα σκυροδέματος εδράζεται σε στρώση από ασύνδετο αμμοχάλικο (τύπου P-209) πάχους 20cm ή σε στρώση από σταθεροποιημένο υλικό πάχους 10 cm (με  $E=500,000\text{psi}$ ), η τιμή του δείκτη είναι 1. Σε περίπτωση χρήσης υλικών με μεγαλύτερο πάχος στρώσης υπόβασης ή με βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά, ο δείκτης  $F'_s$  μειώνεται και ο αριθμός των επιτρεπόμενων καλύψεων

– διελεύσεων αυξάνεται. Με το δείκτη  $F's$  λαμβάνεται υπόψη το γεγονός πως τα δύσκαμπτα οδοστρώματα με σταθεροποιημένες βάσεις παρουσίαζαν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής μετά την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής.

Ο συντελεστής βαθμονόμησης  $F_{CAL}$  προκύπτει από τη σύγκριση του μη βαθμονομημένου μοντέλου αστοχίας με τα αποτελέσματα της εμπειρικής μεθόδου από τα νομογραφήματα, με σκοπό την επίτευξη συμβατότητας μεταξύ των διατομών σχεδιασμού που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους. Αξίζει να σημειωθεί πως δεν πρόκειται για ένα συντελεστή ασφαλείας, αλλά για ένα συντελεστή στάθμισης των αποκλίσεων των αποτελεσμάτων από την προγενέστερη μέθοδο σχεδιασμού.

### 3.2.3 Λόγος P/C (pass-to-coverage)

Σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο της FAA, για τον υπολογισμό του P/C λαμβάνεται υπόψη το ενεργό πλάτος των ελαστικών (effective tire width -  $W$ ) για την εκτίμηση του λόγου P/C. Στα δύσκαμπτα οδοστρώματα, το ενεργό πλάτος του ελαστικού προσδιορίζεται στην επιφάνεια της πλάκας σκυροδέματος και ισούται με το πραγματικό πλάτος του ελαστικού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.13.



Εικόνα 3.13 Ενεργό πλάτος τροχού για υπολογισμό του λόγου P/C σε δύσκαμπτο οδόστρωμα

### 3.2.4 Χαρακτηριστικά υλικών

Όσον αφορά στην πλάκα σκυροδέματος, η FAA ορίζει ως τυπικό υλικό το P-501 που πρόκειται για σκυρόδεμα από τσιμέντο Πόρτλαντ (Portland Cement Concrete Pavement) με μέτρο ελαστικότητας  $E = 27,580 \text{ MPa}$  και δείκτη Poisson  $\nu = 0.15$ . Η επιφάνεια του σκυροδέματος θα πρέπει να παρέχει επαρκή δομική αντοχή στις επαναλαμβανόμενες φορτίσεις από την κυκλοφορία των αεροσκαφών, καλή συμπεριφορά έναντι χημικής διάβρωσης και θερμοκρασιακών μεταβολών καθώς και προστασία από το φαινόμενο της διήθησης του νερού



στη στρώση έδρασης και της άντλησης. Για την στρώση υπόβασης του δύσκαμπτου οδοστρώματος, στην οποία εδράζεται η πλάκα σκυροδέματος, τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι ίδια με τα υλικά του Πίνακα 3.1.

### 3.2.5 Εξέλιξη αναλυτικής μεθόδου FAA

Το μοντέλο αστοχίας της εξελιγμένης αναλυτικής μεθόδου της FAA (FAA 2016) παρουσιάζει την ίδια μορφή με εκείνο που ενσωματώθηκε στην αρχική μορφή της αναλυτικής μεθόδου (FAA 2009). Εντούτοις, με βάση δοκιμές πλήρους κλίμακας στην NARTF έχει βαθμονομηθεί και προσδιορίζεται από τα εξής χαρακτηριστικά:

$$\frac{DF}{F_{CAL}} = \left[ \frac{F'sbd}{\left(1 - \frac{SCI}{100}\right)(d-b) + F'sb} \right] \times \log C + \left[ \frac{\left(1 - \frac{SCI}{100}\right)(ad-bc) + F'sbc}{\left(1 - \frac{SCI}{100}\right)(d-b) + F'sb} \right] \quad (\text{Εξ. 3.10})$$

Όπου

- SCI: Δείκτης δομικής κατάστασης (SCI=80 αντιστοιχεί σε αστοχία του οδοστρώματος)
- DF: Συντελεστής σχεδιασμού με  $DF=R/\sigma$ , όπου R η εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος και  $\sigma$  η αναπτυσσόμενη εφελκυστική τάση
- $F_{CAL}$  : Συντελεστής βαθμονόμησης (calibration factor) με τιμή 1.0
- F's : Συντελεστής για σταθεροποιημένη βάση
- Παράμετροι a, b, c, d: Εξαρτώνται από το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης

Κατά τις δοκιμές πλήρους κλίμακας παρατηρείται σημαντικό ποσοστό διασποράς στα δεδομένα αστοχίας. Λαμβάνοντας υπόψη το 50% και το 85% των περιπτώσεων αστοχίας, προέκυψαν οι παρακάτω συντελεστές του μοντέλου:

**Πίνακας 3.2 Παράμετροι a,b,c,d μοντέλου αστοχίας**

Παράμετρος	50% Failure Envelope	85% Failure Envelope
<b>a</b>	0.760	1.027
<b>b</b>	0.160	0.160
<b>c</b>	0.857	1.100
<b>d</b>	0.160	0.160

Όπως εφαρμόζεται στο FAARFIELD, οι παράμετροι της καμπύλης αστοχίας έχουν προσδιοριστεί ώστε να γίνεται γραμμική μεταφορά από τις τιμές που αντιστοιχούν στο 50% των περιπτώσεων αστοχίας για εδαφικές κατηγορίες χαμηλής φέρουσας ικανότητας (περίπου CBR=3%), στις τιμές που αντιστοιχούν στο 85% των τιμών για εδαφικές κατηγορίες υψηλής φέρουσας ικανότητας (περίπου CBR=10%). Αυτή η μετάβαση αντανακλά το γεγονός ότι τα δύσκαμπτα οδοστρώματα μικρότερου πάχους που εδράζονται σε στρώση έδρασης υψηλής



φέρουσας ικανότητας είναι πιο πιθανό να εμφανίσουν ρωγμές από πάνω προς τα κάτω (ρωγμές στις γωνίες) σε σχέση με εκείνα που εδράζονται σε ασθενή εδάφη. Δεδομένου ότι αυτή η μορφή αστοχίας δεν λαμβάνεται υπόψη στον σχεδιασμό με το λογισμικό FAARFIELD, η χρήση της πιο συντηρητικής καμπύλης αστοχίας (85% των περιπτώσεων αστοχίας) δικαιολογείται για εδαφική κατηγορία υψηλότερης αντοχής. Σημειώνεται ότι οι παράμετροι  $b$  και  $d$  έχουν σταθερές τιμές στο μοντέλο αστοχίας FAARFIELD και δεν είναι συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας.

## **4 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ**

### **4.1 Γενικά στοιχεία**

Η εξυπηρετικότητα ενός αεροδρομίου εξαρτάται από την επάρκεια ορισμένων βασικών υποδομών του, όπως είναι τα οδοστρώματα των διαφόρων καταστρωμάτων που εντοπίζονται σε ένα αεροδρόμιο. Ο προσδιορισμός της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων ενός αεροδρομίου είναι καθοριστικής σημασίας τόσο γιατί επηρεάζει τους τύπους αεροσκαφών που μπορεί να εξυπηρετήσει όσο και γιατί συμβάλλει στη σωστή διαχείριση του αεροδρομίου.

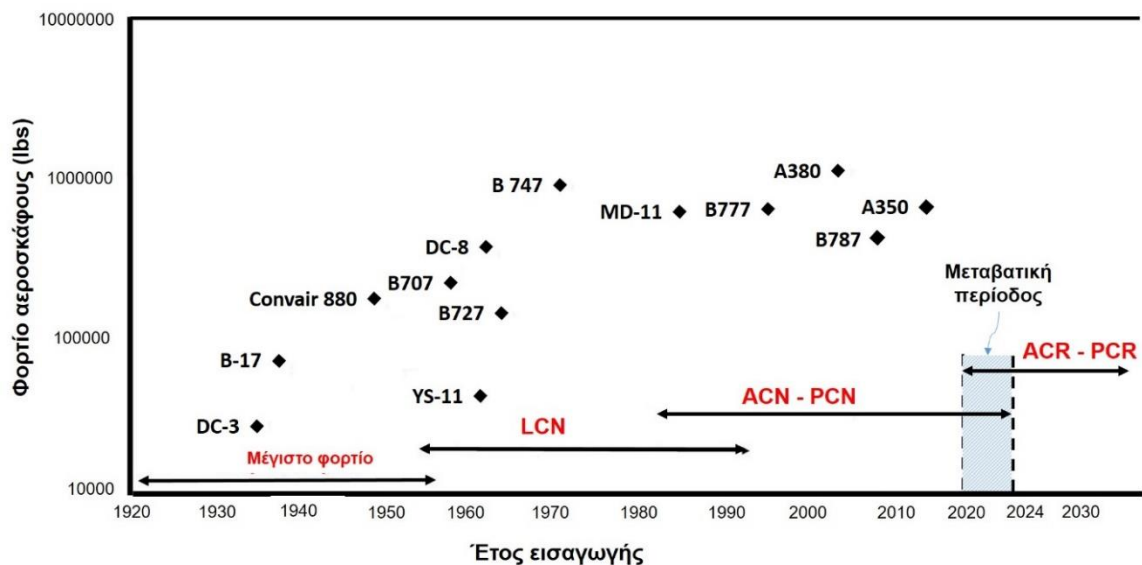
Στην περίπτωση που τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας ενός αεροδρομίου μεταβάλλονται, είτε λόγω αύξησης της μεταφορικής ζήτησης είτε λόγω της εξέλιξης της τεχνολογίας με την εισαγωγή νέων τύπων αεροσκαφών, οι αρχές του αεροδρομίου θα πρέπει να γνωρίζουν την φέρουσα ικανότητα των οδοστρωμάτων, ώστε να μπορούν να αποφανθούν για τη δυνατότητα εξυπηρέτησης της αναμενόμενης κυκλοφορίας. Η πληροφορία αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη σωστή διαχείριση ενός αεροδρομίου, δεδομένου ότι οι παρεμβάσεις σε ένα αεροδρόμιο συνήθως αποτελούν μια διαδικασία σύνθετη και χρονοβόρα που απαιτεί ιδιαίτερα υψηλό κόστος.

Στο πλαίσιο αυτό η υιοθέτηση ενός συστήματος αναφοράς της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων αεροδρομίων, μπορεί να λειτουργήσει υποστηρικτικά στη συνεργασία μεταξύ των διαφόρων μερών (αεροπορική βιομηχανία, τουριστική βιομηχανία, αεροπορικές εταιρείες), αποτελώντας ένα κοινά αποδεκτό και αντιληπτό κώδικα αναφοράς. Για τον έλεγχο επάρκειας της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων έχουν διαχρονικά αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες, οι οποίες χαρακτηρίζαν τη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος, είτε με βάση το μέγιστο βάρος αεροσκάφους που μπορεί να εξυπηρετήσει, είτε με βάση το μέγιστο φορτίο φορείου τροχών που μπορεί να φέρει. Εντούτοις, οι μεθοδολογίες αυτές έχουν εγκαταλειφθεί και στις μέρες μας η δημοσίευση της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων πραγματοποιείται μέσω δεικτών δομικής κατάταξης της φέρουσας ικανότητάς τους σε καθορισμένο σύστημα αναφοράς φορτίων.

Στα τέλη της δεκαετίας 1940-1950 ο ICAO (International Civil Aviation Organization) εισήγαγε τη μέθοδο LCN (Load Classification Number) (ICAO 1965, Αμπακούμκιν 1990), η οποία στα επόμενα χρόνια χρησιμοποιήθηκε στις περισσότερες χώρες του κόσμου. Εντούτοις, η υπόψη μέθοδος παρουσίασε αρκετές αδυναμίες και ελλείψεις (Λοΐζος κ.α. 1998, Loizos and Charonitis 2005). Παράλληλα, η αλματώδης αύξηση των απαιτήσεων του ελέγχου επάρκειας της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων, εξαιτίας της αύξησης της κυκλοφορίας και

των νέων τύπων αεροσκαφών, οδήγησε στην εισαγωγή της μεθόδου ACN-PCN (Aircraft Classification Number- Pavement Classification Number) από τον ICAO (ICAO 1983). Η υπόψη μέθοδος, η οποία στην παρούσα φάση βρίσκεται σε ισχύ, παρουσίασε αρκετές αδυναμίες όσον αφορά στην έκφραση της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

Δεδομένων των αδυναμιών της μεθόδου ACN-PCN καθώς και των γενικότερων εξελίξεων που παρατηρούνται τα τελευταία χρόνια στον τομέα της ανάλυσης οδοστρωμάτων, προέκυψε η ανάγκη βελτίωσης της ισχύουσας μεθόδου κατάταξης. Προς τούτο το 2009, ο ICAO συνέστησε μια ομάδα μελετητών με σκοπό την αναβάθμιση της διεθνούς μεθόδου κατάταξης των οδοστρωμάτων ACN-PCN. Τα αποτελέσματα της σχετικής διερεύνησης οδήγησαν στην ανάπτυξη της μεθόδου ACR-PCR (Aircraft Classification Rating – Pavement Classification Rating) τον Μάρτιο του 2018. Η μέθοδος ACR-PCR αναμένεται να τεθεί σε ισχύ από τις 28 Νοεμβρίου 2024. Συνεπώς το διάστημα μέχρι την πλήρη ισχύ της μεθόδου αποτελεί μία περίοδο προετοιμασίας για τη μεταφορά από τη μέθοδο ACN-PCN στη μέθοδο ACR-PCR.



**Εικόνα 4.1 Εξέλιξη βάρους αεροσκαφών και συστημάτων κατάταξης φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων**

Στην Εικόνα 4.1 φαίνεται η εξέλιξη των συστημάτων κατάταξης της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων συναρτήσει της εξέλιξης του βάρους των αεροσκαφών. Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου γίνεται αναφορά στα υπόψη συστήματα.

## 4.2 Η μέθοδος LCN

Η μέθοδος LCN αναπτύχθηκε από την ανάγκη ύπαρξης ενός απλού συστήματος άμεσης σύγκρισης του φορτίου ενός αεροσκάφους με τη φέρουσα ικανότητα ενός οδοστρώματος.

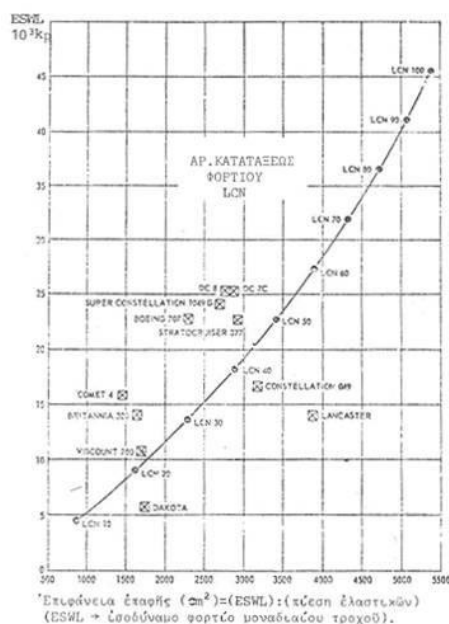
Στηρίζεται στη συσχέτιση ενός φορτίου που προκαλεί αστοχία του οδοστρώματος και της επιφάνειας μέσω της οποίας γίνεται η επιβολή του. Ως φορτίο αστοχίας σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα θεωρήθηκε εκείνο που προκαλεί μια ορισμένη παραμόρφωση. Η ανάπτυξη της μεθόδου βασίστηκε στην εμπειρική σχέση 4.1:

$$\frac{W_1}{W_2} = \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^{0.44} \quad (\text{Εξ. 4.1})$$

όπου:

- $W_1$ : φορτίο που προκαλεί την αστοχία ενός οδοστρώματος όταν εφαρμόζεται μέσω κυκλικής πλάκας επιφάνειας  $A_1$ .
- $W_2 \neq W_1$ : φορτίο που προκαλεί την αστοχία του ίδιου οδοστρώματος όταν εφαρμόζεται μέσω κυκλικής πλάκας επιφάνειας  $A_2$ .

Με χρήση της εξίσωσης 4.1 προέκυψε μια καμπύλη προτύπου κατάταξης φορτίου (Standard load classification curve), η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.2. Τα σημεία καθορισμού της καμπύλης επιλέχθηκαν ώστε η καμπύλη να είναι ομαλή σε ένα διάγραμμα φορτίων-επιφάνειας επαφής.



**Εικόνα 4.2 Πρότυπη καμπύλη κατάταξης φορτίων (Αμπακούμκιν 1990)**

Με τη χρήση αυτής της καμπύλης είναι δυνατό να προσδιοριστεί η φέρουσα ικανότητα ενός οδοστρώματος, ως η δυνατή καταπόνηση χωρίς κίνδυνο αστοχίας, κατά τον εξής τρόπο: Εκτελώντας μια σειρά δοκιμαστικών φορτίσεων με πλάκες διαφορετικής διαμέτρου, χαράσσεται μια καμπύλη επιφάνειας φόρτισης/φορτίου. Εναλλακτικά, μπορεί να σχεδιαστεί η καμπύλη με μια σειρά δοκιμών με πλάκα σταθερής επιφάνειας, υπολογίζοντας στατιστικά το

ακριβές φορτίο αστοχίας και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση 4.1. Η τομή της καμπύλης αυτής με την πρότυπη (Εικόνα 4.2) αντιστοιχεί σε μια τιμή LCN. Ο αριθμός αυτός εκφράζει τη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος.

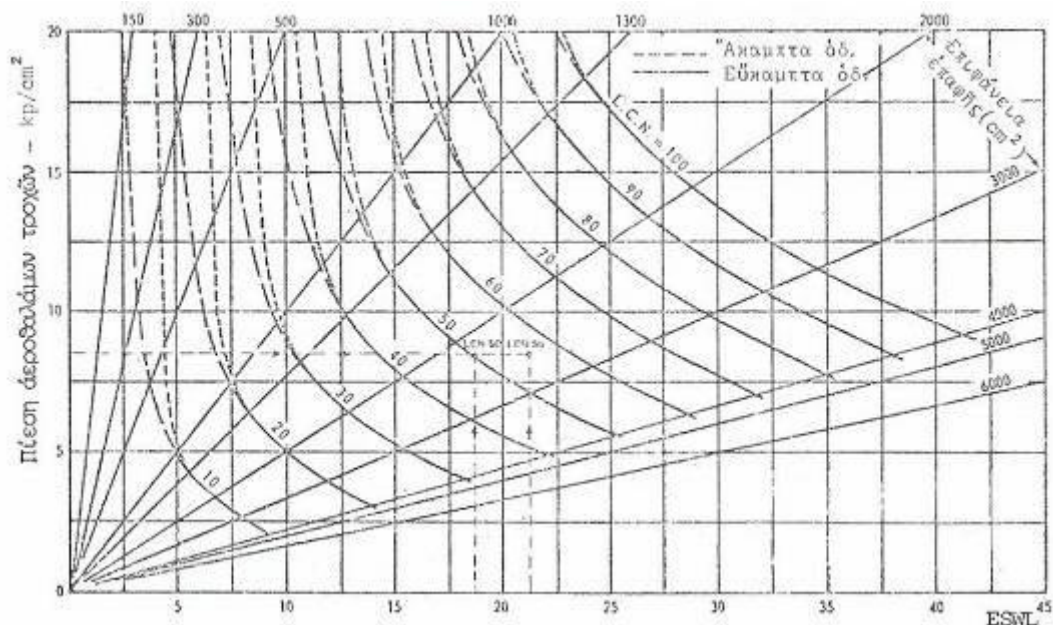
Το επόμενο βήμα της μεθόδου ήταν η συσχέτιση του φορτίου ενός αεροσκάφους με την καμπύλη LCN, οπότε προέκυψε η ανάγκη αναγωγής του πραγματικού συστήματος τροχών του αεροσκάφους σε ένα ισοδύναμο φορτίο, το ισοδύναμο φορτίο μοναδιαίου τροχού ESWL (Equivalent Single Wheel Load). Το ESWL ορίζεται ως το φορτίο ενός μονού τροχού που παράγει το ίδιο κρίσιμο αποτέλεσμα με το πραγματικό σύστημα τροχών του αεροσκάφους σε ένα οδόστρωμα, με πίεση ίση με εκείνη των αεροθαλάμων των τροχών του αεροσκάφους. Με την εισαγωγή του ESWL ήταν εφικτή η άμεση σύγκριση των φορτίων διαφορετικών φορείων αεροσκαφών.

Το ESWL εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος. Το ESWL ενός αεροσκάφους που έχει ένα μονό τροχό σε κάθε φορείο θεωρείται ίσο με το φορτίο του τροχού. Στην περίπτωση που το φορείο του αεροσκάφους έχει περισσότερους του ενός τροχούς, τότε ο προσδιορισμός του ESWL είναι πολύ δυσκολότερος, καθώς η διάταξη μπορεί να δίνει διαφορετικό αποτέλεσμα σε διαφορετικά οδοστρώματα. Τα προβλήματα πολλαπλασιάζονται όταν πρόκειται για εύκαμπτο οδόστρωμα, όπου η ύπαρξη στρώσεων με διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας καθιστά αμφίβολη την ύπαρξη ενός ESWL το οποίο να δίνει κρίσιμο αποτέλεσμα σε όλες τις στρώσεις. Έτσι ειδικά για αυτή την περίπτωση, το ESWL ορίζεται ίσο με το φορτίο εκείνο το οποίο προκαλεί τις ίδιες τάσεις (ή την ίδια παραμόρφωση) με την πραγματική φόρτιση στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος. Σχετικές μελέτες στο παρελθόν έδειξαν ότι η προσέγγιση αυτή μπορεί να έχει ικανοποιητική ακρίβεια στην περίπτωση που η υποχώρηση που προκαλείται στο οδόστρωμα από το φορτίο του μονού τροχού είναι ίση με την αντίστοιχη υποχώρηση που προκαλείται από το πραγματικό σύστημα τροχών.

Έχοντας γνωστό το ESWL ενός αεροσκάφους είναι δυνατό να προσδιοριστεί μια αντίστοιχη τιμή LCN, χρησιμοποιώντας το διάγραμμα της Εικόνα 4.3. Στη συνέχεια ελέγχεται η επάρκεια της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος μέσω της σχέσης 4.2 και σε περίπτωση που η ανισότητα ισχύει το οδόστρωμα επαρκεί να φέρει απεριόριστες διελεύσεις του υπόψη αεροσκάφους.

$$LCN_{\text{οδ/τος}} \geq LCN_{\text{α/φους}}$$

(Εξ. 4.2)



**Εικόνα 4.3 Σχέση LCN, ESWL, πίεσης αεροθαλάμων τροχών και επιφάνειας επαφής με το οδόστρωμα, για εύκαμπτα και δύσκαμπτα οδοστρώματα (Αμπακούμκιν 1990)**

Η μέθοδος LCN, παρόλο που χρησιμοποιήθηκε για αρκετά χρόνια για τη δομική κατάταξη οδοστρωμάτων αεροδρομίων, παρουσίασε ορισμένες αδυναμίες κατά την εφαρμογή της. Μία από αυτές αποτέλεσε η εξάρτηση του ESWL από το πάχος του οδοστρώματος. Επιπλέον το ESWL υπολογίζεται με βάση την παραμόρφωση που προκαλεί το αεροσκάφος στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης και δεν λαμβάνεται υπόψη η επάρκεια της ασφαλικής στρώσης. Εκτός όμως από τις αδυναμίες η υπόψη μέθοδος παρουσίασε και αρκετές δυσκολίες κατά την εφαρμογή της με αποτέλεσμα να εγκαταλειφθεί. Στον ελλαδικό χώρο υπάρχουν πολλά αεροδρόμια στα οποία έχει εφαρμοστεί, όμως τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται εκτενώς η μέθοδος ACN-PCN.

### 4.3 Μέθοδος ACN-PCN

Το 1983 ο ICAO εισήγαγε τη μέθοδο ACN-PCN με στόχο να παρέχει μία διεθνώς αποδεκτή μέθοδο κατάταξης της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Η μέθοδος ACN-PCN δίνει ιδιαίτερη έμφαση στον προσδιορισμό ενός δείκτη που χαρακτηρίζει το φορτίο ενός αεροσκάφους και μικρότερη στην έκφραση της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος, η οποία εκφράζεται συναρτήσει του φορτίου του αεροσκάφους που μπορεί αυτό να εξυπηρετήσει χωρίς περιορισμό διελεύσεων.

#### 4.3.1 Δείκτης ACN (Aircraft Classification Number)

Ο δείκτης ACN (Aircraft Classification Number) είναι ένας αριθμός που εκφράζει τη σχετική επίδραση ενός αεροσκάφους σε ένα οδόστρωμα για μια προκαθορισμένη αντοχή του εδάφους.

Το ACN υπολογίζεται αριθμητικά ως το διπλάσιο φορτίο (εκφρασμένο σε χιλιάδες kg) του μονού τροχού (DSWL: Derived Single Wheel Load) που δρώντας με σταθερή πίεση 1.25 MPa, προκαλεί την ίδια ένταση με το πραγματικό σύστημα τροχών του αεροσκάφους σε οδόστρωμα πάχους ίσο με το πάχος αναφοράς.

Το πάχος αναφοράς για τα εύκαμπτα οδοστρώματα είναι ίσο με το πάχος του οδοστρώματος που επιτρέπει 10,000 καλύψεις-διελεύσεις C (Coverages) του πραγματικού συστήματος τροχών του αεροσκάφους για μια καθορισμένη κατηγορία εδαφικής αντοχής. Η επιλογή των 10,000 καλύψεων διελεύσεων C έγινε από τον ICAO ώστε να εξασφαλιστεί μια ρεαλιστική εκτίμηση της βαριάς φόρτισης από τα διαφορετικά αεροσκάφη που πρέπει να εξυπηρετεί το οδόστρωμα ενός αεροδρομίου. Η ουσιαστική προσφορά του πάχους αναφοράς είναι η απεξάρτηση του δείκτη ACN από το πάχος του εκάστοτε οδοστρώματος μελέτης. Αντίστοιχα στα δύσκαμπτα οδοστρώματα το πάχος αναφοράς είναι ίσο με το πάχος πλάκας σκυροδέματος, η οποία όταν φορτίζεται στο κέντρο της από το πραγματικό σύστημα τροχών του αεροσκάφους, αναπτύσσει στη βάση της εφελκυστική τάση ίση με 2.75 N/mm<sup>2</sup>.

Ο υπολογισμός του πάχους αναφοράς πραγματοποιείται για κάθε μία από τις τέσσερις καθορισμένες κατηγορίες εδαφικής αντοχής, οι οποίες χαρακτηρίζονται από το δείκτη CBR για τα εύκαμπτα οδοστρώματα και το δείκτη αντίδρασης εδάφους k για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα. Οι υπόψη κατηγορίες φαίνονται στους Πίνακες 4.1-4.2:

**Πίνακας 4.1 Κατηγορίες εδαφικής αντοχής για υπολογισμό δείκτη ACN (Εύκαμπτα οδοστρώματα)**

Κατηγορία Εδαφικής Αντοχής	Εύρος τιμών CBR (%)	Χαρακτηριστική τιμή CBR (%)	Κωδικοποίηση
<b>Υψηλή αντοχή</b>	CBR ≥ 13	15	A
<b>Μέτρια αντοχή</b>	8 < CBR < 13	10	B
<b>Χαμηλή αντοχή</b>	4 < CBR ≤ 8	6	C
<b>Πολύ χαμηλή αντοχή</b>	CBR ≤ 4	3	D

**Πίνακας 4.2 Κατηγορίες εδαφικής αντοχής για υπολογισμό δείκτη ACN (Δύσκαμπτα Οδοστρώματα)**

Κατηγορία Εδαφικής Αντοχής	Δείκτης αντίδρασης εδάφους k-rci (MN/m <sup>3</sup> )	Χαρακτηριστική τιμή k-rci (MN/m <sup>3</sup> )	Κωδικοποίηση
<b>Υψηλή αντοχή</b>	k ≥ 442 (≥120)	522.6 (150)	A
<b>Μέτρια αντοχή</b>	221 < k < 442 (60 < k < 120)	294.7 (80)	B
<b>Χαμηλή αντοχή</b>	92 < k ≤ 221 (25 < k ≤ 60)	147.4 (40)	C
<b>Πολύ χαμηλή αντοχή</b>	k ≤ 92 (k ≤ 25)	73.7 (20)	D

Για κάθε μία κατηγορία εδαφικής αντοχής το πάχος αναφοράς είναι διαφορετικό προκαλώντας αντίστοιχη μεταβολή του δείκτη ACN ενός αεροσκάφους. Επιπλέον, ο δείκτης ACN μεταβάλλεται ανάλογα και με το φορτίο που φέρει το αεροσκάφος. Κατά συνέπεια, για κάθε κατηγορία εδαφικής αντοχής συνήθως προσδιορίζεται η τιμή του ACN που αντιστοιχεί στο μέγιστο βάρος του αεροσκάφους καθώς και εκείνη που αντιστοιχεί στην περίπτωση που το αεροσκάφος είναι κενό. Οι δείκτες ACN των περισσότερων αεροσκαφών παρέχονται από τον ICAO (ICAO 1983).

Στην περίπτωση που το ACN δεν είναι γνωστό μπορεί να προσδιοριστεί. Οι κατασκευαστές των αεροσκαφών συνηθίζουν να παρέχουν τα απαιτούμενα πάχη αναφοράς για τις τέσσερις κατηγορίες εδαφικής αντοχής. Για τα εύκαμπτα οδοστρώματα το πάχος αναφοράς υπολογίζονται με χρήση της μεθόδου CBR σύμφωνα με την οποία το απαιτούμενο πάχος στρώσης οδοστρώματος εξαρτάται από τη φέρουσα ικανότητα του υλικού της υποκείμενης στρώσης και το μέγεθος της φόρτισης του οδοστρώματος. Στη συνέχεια η εκτίμηση του DSWL και κατ' επεκταση του ACN πραγματοποιείται μέσω της εξίσωσης 4.3 ή του νομογραφήματος (Εικόνα 4.4):

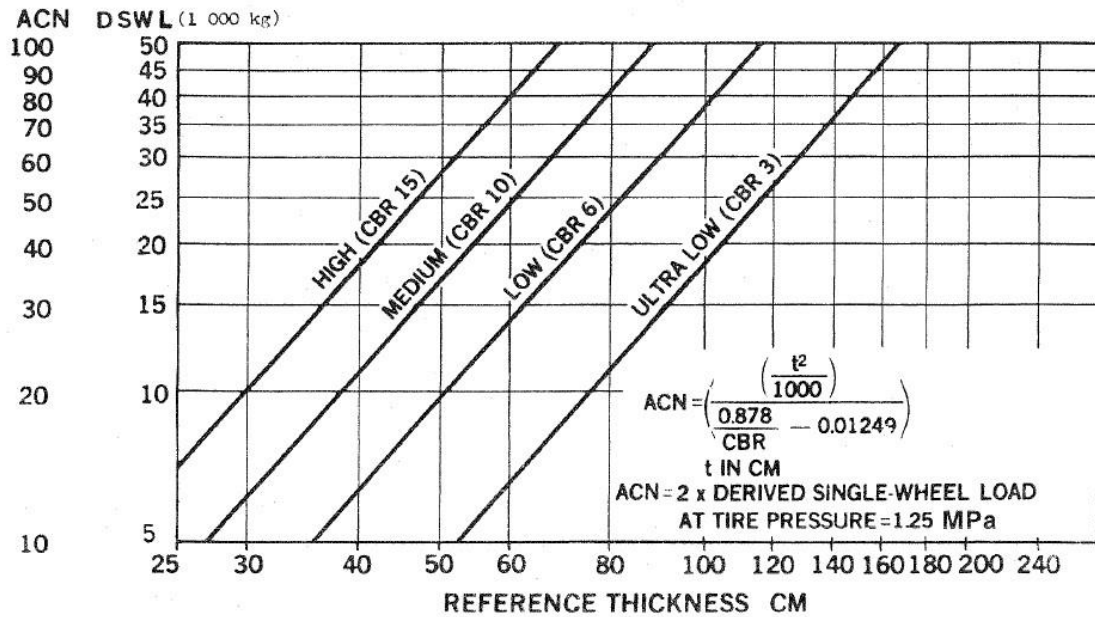
$$t_{αναφ} = \sqrt{\frac{DSWL}{C_1 \times CBR} - \frac{DSWL}{C_2 \times P_s}} \quad (\text{Εξ. 4.3})$$

όπου:

- $t_{αναφ}$ : το πάχος αναφοράς σε cm.
- DSWL: το φορτίο μονού τροχού με πίεση 1.25 MPa.
- CBR: η χαρακτηριστική τιμή αντοχής του εδαφικού υλικού ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκει.
- $P_s$ : Πίεση 1.25 MPa
- $C_1, C_2$ : συντελεστές απόκλισης του Bussinesq με τιμές  $C_1=0.5695$  και  $C_2=32.035$ .

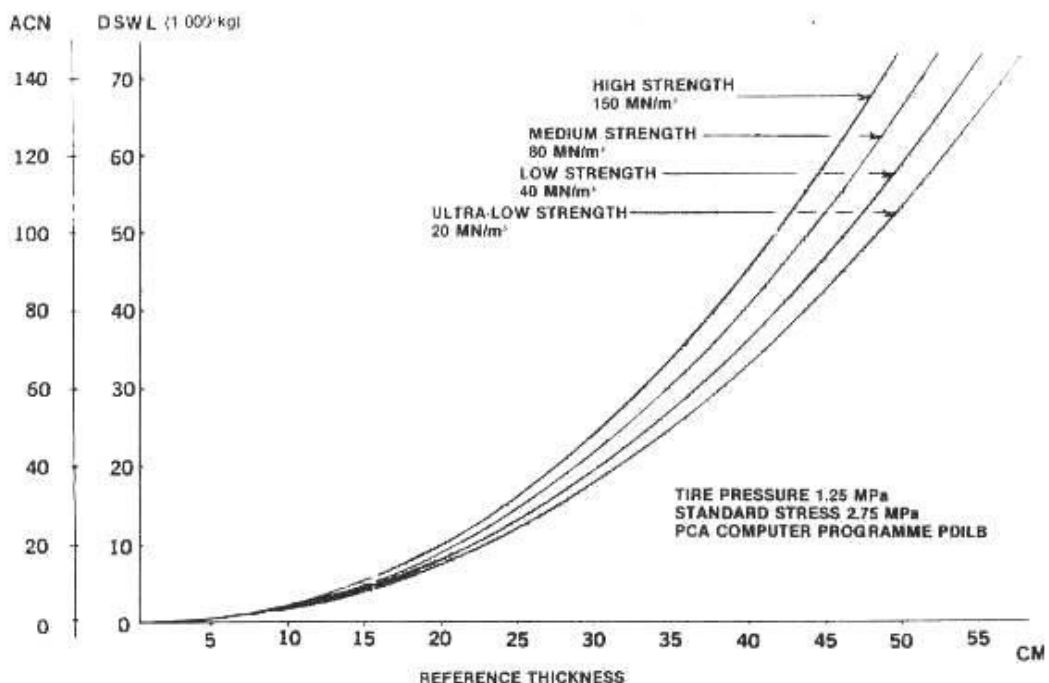
Η χρήση των παραπάνω συντελεστών εξασφαλίζει την ισοδυναμία μεταξύ της επίδρασης του φορτίου όλων των τροχών ενός φορείου και του φορτίου μονού τροχού.





Εικόνα 4.4 Υπολογισμός δείκτη ACN αεροσκαφών με βάση το πάχος αναφοράς σε εύκαμπτα οδοστρώματα (ICAO 1983)

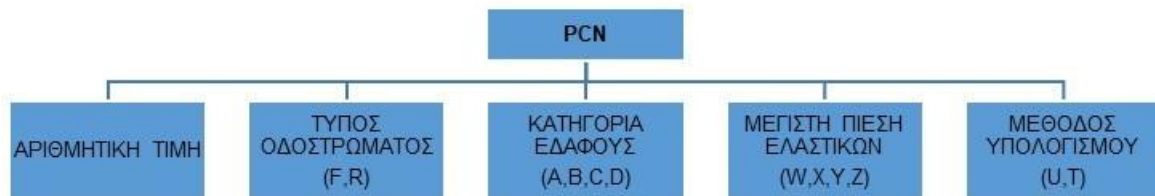
Για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα το πάχος αναφοράς εκτιμάται μέσω της μεθόδου της Portland Cement Association (PCA 1991) και ο υπολογισμός του ACN γίνεται μέσω της Εικόνας 4.5.



Εικόνα 4.5 Υπολογισμός δείκτη ACN αεροσκαφών με βάση το πάχος αναφοράς σε δύσκαμπτα οδοστρώματα (ICAO 1983)

### 4.3.2 Δείκτης PCN (Pavement Classification Number)

Ο δείκτης PCN (Pavement Classification Number) είναι ένας αριθμός που εκφράζει τη φέρουσα ικανότητα ενός οδοστρώματος και ορίζεται ως το ACN του αεροσκάφους που προκαλεί τη μέγιστη ένταση που μπορεί να δεχτεί το οδόστρωμα για απεριόριστο αριθμό διελεύσεων του αεροσκάφους. Η μέθοδος ACN-PCN χρησιμοποιεί πέντε στοιχεία για τον κωδικό έκφρασης του PCN προκειμένου να παρέχεται όλη η απαραίτητη πληροφορία χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν λιγότερους χαρακτήρες (Εικόνα 4.6).



**Εικόνα 4.6 Στοιχεία που αποτελούν τον κωδικό έκφρασης του δείκτη PCN**

Ο διαφορετικός χαρακτηρισμός για κάθε ένα στοιχείο προκύπτει ως εξής:

Τύπος οδοστρώματος: στην περίπτωση που το οδόστρωμα είναι εύκαμπτο χρησιμοποιείται ο χαρακτήρας F (Flexible) ενώ αν αυτό είναι δύσκαμπτο χρησιμοποιείται ο χαρακτήρας R (Rigid).

Κατηγορία εδαφικής αντοχής. Με βάση το δείκτη CBR της στρώσης έδρασης για τα εύκαμπτα οδοστρώματα και το δείκτη αντίδρασης εδάφους  $k$  για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα, το οδόστρωμα κατατάσσεται σε μία από τις κατηγορίες εδαφικής αντοχής (A, B, C, D) που φαίνονται στους Πίνακες 4.1-4.2.

Μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση ελαστικών: Σύμφωνα με τη μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση των αεροθαλάμων των τροχών το οδόστρωμα μπορεί να καταταχτεί σε μία από τις παρακάτω κατηγορίες (Πίνακας 4.3):

**Πίνακας 4.3 Κατηγορίες πίεσης ελαστικών μεθόδου ACN-PCN**

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

Μεθοδολογία υπολογισμού: Στην περίπτωση που υπάρχει εμπειρία μακράς χρήσης του αεροδρομίου από συγκεκριμένους τύπους αεροσκαφών το PCN μπορεί να προσδιοριστεί

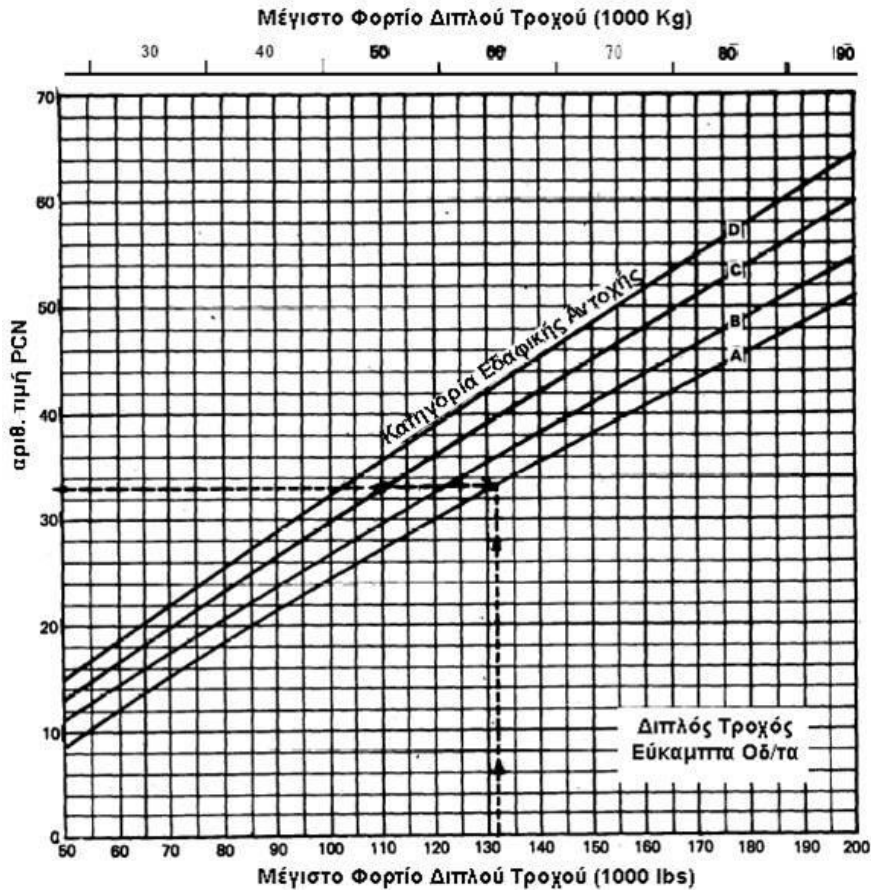
εμπειρικά και ο αντίστοιχος κωδικός είναι U (Using aircraft method). Αντίθετα αν ο προσδιορισμός του PCN έχει γίνει με κάποια υπολογιστική μέθοδο ο αντίστοιχος κωδικός είναι T (Technical evaluation method).

Όσον αφορά στην αριθμητική τιμή του PCN, ο ICAO δεν προτείνει κάποια συγκεκριμένη μεθοδολογία προσδιορισμού του, επιτρέποντας στις αρχές ενός αεροδρομίου να επιλέγουν εκείνη που θεωρούν πιο κατάλληλη. Ανατρέχοντας στη διεθνή βιβλιογραφία διαπιστώνεται η ύπαρξη διαφόρων μεθόδων. Η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται στην ευρέως διαδεδομένη και χρησιμοποιούμενη μέθοδο της FAA.

### **4.3.3 Εκτίμηση δείκτη PCN με τη μέθοδο της FAA**

#### *4.3.3.1 Αρχική μορφή μεθόδου*

Η αρχική μορφή της μεθόδου της FAA για τη δημοσίευση της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων αεροδρομίων μέσω του δείκτη PCN αναπτύχθηκε το 1983 (FAA 1983). Βασικό κριτήριο προσδιορισμού του υπόψη δείκτη αποτέλεσε η εκτίμηση του μέγιστου φορτίου που μπορεί να φέρει ένα οδόστρωμα κατά τη διάρκεια της ζωής του. Για τα νέα οδοστρώματα το φορτίο αυτό θεωρήθηκε ίσο με το μέγιστο φορτίο ανά σύστημα τροχών για το οποίο σχεδιάζεται ένα οδόστρωμα ενώ για τα υφιστάμενα οδοστρώματα χρησιμοποιήθηκε το αντίστοιχο μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο ανά σύστημα τροχών. Στη δεύτερη περίπτωση το φορτίο υπολογίζεται με βάση αναλύσεις επιτόπου μετρήσεων και καταγραφών σε συνδυασμό με διαδικασίες ανάστροφου υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος. Στο πλαίσιο αυτό αναπτύχθηκαν κατάλληλα διαγράμματα για τα διάφορα συστήματα τροχών των αεροσκαφών που χρησιμοποιούν ένα οδόστρωμα με τη βοήθεια των οποίων μπορούσε να προσδιοριστεί ο δείκτης PCN τόσο για νέα όσο και για υφιστάμενα εύκαμπτα και δύσκαμπτα οδοστρώματα. Στην Εικόνα 4.7 παρατίθεται το διάγραμμα υπολογισμού του δείκτη PCN εύκαμπτου οδοστρώματος για χρήση από αεροσκάφη με φορείο διπλού τροχού. Σημειώνεται ότι απαραίτητο στοιχείο για την κατάταξη της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος μέσω του δείκτη PCN αποτελεί η κατηγορία της εδαφικής αντοχής, η οποία προσδιορίζεται μέσω του δείκτη CBR για τα εύκαμπτα οδοστρώματα ή μέσω του δείκτη αντίδρασης εδάφους  $k$  για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα.



**Εικόνα 4.7 Υπολογισμός δείκτη PCN εύκαμπτου οδοστρώματος για χρήση από αεροσκάφη με φορτίο διπλού τροχού**

#### 4.3.3.2 Ισχύουσα μέθοδος

Ακολουθώντας τις εξελίξεις στον τομέα της κατάταξης οδοστρωμάτων αεροδρομίων, η FAA τροποποίησε και βελτίωσε την αρχική διαδικασία εκτίμησης του δείκτη PCN των οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Η τελική μορφή της μεθόδου, η οποία βρίσκεται σε ισχύ, ολοκληρώθηκε το 2014 (FAA 2014β). Η εφαρμογή της μεθόδου πραγματοποιείται μέσω της χρήσης του λογισμικού COMFAA 3.0, το οποίο διαθέτει μια αυτοματοποιημένη διαδικασία υπολογισμού του δείκτη PCN. Το υπόψη λογισμικό περιλαμβάνει μια εκτενή βάση δεδομένων με αναλυτικά στοιχεία εμπορικών και στρατιωτικών αεροσκαφών που επιχειρούν σε αεροδρόμια, ενώ υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης και στοιχείων νέων αεροσκαφών. Τα στοιχεία αυτά είναι απαραίτητα στην εκτίμηση του δείκτη PCN ενός οδοστρώματος.

Για τον υπολογισμό της αριθμητικής τιμής του δείκτη PCN ενός εύκαμπτου οδοστρώματος λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα στοιχεία: η σύνθεση της κυκλοφορίας που δέχεται το οδόστρωμα (τύποι αεροσκαφών και ετήσιες διελεύσεις), η κατηγορία της εδαφικής αντοχής (μέσω του δείκτη CBR) και το «πάχος αξιολόγησης» (evaluation thickness) του οδοστρώματος.

Το «πάχος αξιολόγησης» είναι διαφορετικό από το υφιστάμενο πάχος του εκάστοτε οδοστρώματος για το οποίο γίνεται η εκτίμηση του δείκτη PCN. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με την FAA, η υφιστάμενη διατομή του οδοστρώματος μετατρέπεται σε μία διατομή αναφοράς (Reference section) για την εκτίμηση του PCN. Η υπόψη διατομή περιλαμβάνει ασφαλικές στρώσεις και στρώση βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο (με CBR=80%) συγκεκριμένου πάχους και στρώση υπόβασης από ασύνδετο αμμοχάλικο (με CBR=20%) μεταβλητού πάχους.

Με βάση το σύστημα τροχών των αεροσκαφών που δέχεται ένα οδόστρωμα ορίζονται τα πάχη των ασφαλικών στρώσεων και της στρώσης βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο της διατομής αναφοράς (Πίνακας 4.4). Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση που όλα τα αεροσκάφη της σύνθεσης της κυκλοφορίας διαθέτουν λιγότερους από τέσσερις τροχούς σε ένα κύριο φορείο, η διατομή αναφοράς περιλαμβάνει ασφαλικές στρώσεις του τυπικού υλικού P-401 με πάχος 3 inches και βάση από θραυστό αμμοχάλικο του τυπικού υλικού P-209 με πάχος 6 inches. Στην αντίθετη περίπτωση τα αντίστοιχα πάχη των στρώσεων της διατομής είναι 5 inches και 8 inches αντίστοιχα.

**Πίνακας 4.4 Πάχη στρώσεων διατομής αναφοράς με βάση τη διάταξη τροχών των αεροσκαφών (FAA 2014b)**

Στρώση διατομής αναφοράς	Πάχη επιμέρους στρώσεων διατομής αναφοράς (inches)	
	< 4 τροχοί σε κύριο φορείο	≥ 4 τροχοί σε κύριο φορείο
<b>Ασφαλικές στρώσεις (Υλικό P-401)</b>	3	5
<b>Βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο (Υλικό P-209)</b>	6	8

Στην περίπτωση που το οδόστρωμα διαθέτει πλεόνασμα πάχους ασφαλικών στρώσεων και στρώσης βάσης ή στρώσεις από βελτιωμένα υλικά, πραγματοποιείται μετατροπή του σε πάχος υπόβασης με χρήση κατάλληλων συντελεστών ισοδυναμίας (Πίνακας 4.5) και προκύπτει το «πάχος αξιολόγησης».

**Πίνακας 4.5 Εύρος τιμών συντελεστών ισοδυναμίας στρώσεων**

Υλικό	Περιγραφή	Μετατροπή σε P-209) / (Προτεινόμενη τιμή)	Μετατροπή σε P-154 / (Προτεινόμενη Τιμή)
<b>P-401</b>	Plant Mix Bituminous Pavements (HMA) - Θερμό ασφαλτόμιγμα	1.2 έως 1.6 / (1.6)	1.7 έως 2.3 / (2.3)
<b>P-403</b>	Plant Mix Bituminous Pavements (HMA) - Θερμό ασφαλτόμιγμα	1.2 έως 1.6 / (1.6)	1.7 έως 2.3 / (2.3)
<b>P-306</b>	Econocrete subbase course (ESC) - Σταθεροποιημένη υπόβαση από	1.2 έως 1.6 / (1.6)	1.6 έως 2.3 / (1.6)

<b>P-304</b>	Cement Treated Base Coures (CTB) - Σταθεροποιημένη με τσιμέντο βάση	1.2 έως 1.6 / (1.2)	1.6 έως 2.3 / (1.6)
<b>P-209</b>	Crushed Aggregate Base Course - Βάση από θραυστό αμμοχάλικο	1.0	1.2 έως 1.6 / (1.4)
<b>P-208</b>	Aggregate Base Course - Βάση από αμμοχάλικο	1.0	1.0 έως 1.5 / (1.2)
<b>P-211</b>	Limerock Base Course - Βάση από ασβεστόλιθο	1.0	1.0 έως 1.5 / (1.2)
<b>P-301</b>	Soil-Cement Base Course – Εδαφικό υλικό με τσιμέντο	-	1.0 έως 1.5 / (1.2)
<b>P-501</b>	Portland Cement Concrete (PCC) – Σκυρόδεμα	Μετατροπή σε P-401: 2.2 έως 2.5 / (2.5)	

Για να διευκολυνθεί η διαδικασία εκτίμησης του δείκτη PCN, η FAA έχει αναπτύξει μια εφαρμογή που ενσωματώνει τη διαδικασία που παρουσιάστηκε παραπάνω για τον προσδιορισμό του «πάχους αξιολόγησης» του οδοστρώματος.

Για τον προσδιορισμό του δείκτη PCN ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος απαιτείται η εκτίμηση του δείκτη αντίδρασης εδάφους  $k$ , του πάχους της πλάκας σκυροδέματος και της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Ο δείκτης  $k$  αφορά στο υλικό που βρίσκεται ακριβώς κάτω από την πλάκα σκυροδέματος. Αρχικά πραγματοποιείται εκτίμηση του δείκτη  $k$  της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος, ο οποίος στη συνέχεια διορθώνεται λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη βελτιωμένων υλικών που παρεμβάλλονται μεταξύ της πλάκας σκυροδέματος και της στρώσης έδρασης.

Για την εκτίμηση του δείκτη PCN λαμβάνεται υπόψη η συνδυαστική επίδραση των διαφόρων αεροσκαφών της σύνθεσης της κυκλοφορίας ενός αεροδρομίου στο οδόστρωμα. Το παραπάνω πραγματοποιείται μέσω του δείκτη αθροιστικής φθοράς CDF (Cumulative Damage Factor). Πιο συγκεκριμένα, μέσω της αθροιστικής φθοράς όλων των αεροσκαφών και του αριθμού των επιτρεπόμενων καλύψεων-διελεύσεων κάθε αεροσκάφους, είναι δυνατή η μετατροπή του συνόλου της κυκλοφορίας σε ισοδύναμη κυκλοφορία ενός μόνο αεροσκάφους (κρίσιμο αεροσκάφος). Το αεροσκάφος αυτό μπορεί να είναι οποιοδήποτε αεροσκάφος της σύνθεσης της κυκλοφορίας, συνεπώς η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται για όλα τα αεροσκάφη που πρόκειται να δεχτεί το οδόστρωμα.

Ο δείκτης CDF προκύπτει από τον λόγο των προβλεπόμενων καλύψεων-διελεύσεων ενός αεροσκάφους για την περίοδο αξιολόγησης προς τον αριθμό των επιτρεπόμενων καλύψεων-διελεύσεων του ίδιου αεροσκάφους έως την αστοχία. Σημειώνεται ότι ο αριθμός των επιτρεπόμενων καλύψεων-διελεύσεων έως την αστοχία προκύπτει για ένα εύκαμπτο οδόστρωμα με βάση τα διαγράμματα της εμπειρικής μεθόδου της FAA που βασίζονται στη μέθοδο CBR. Μέσω του προσδιορισμού της ισοδύναμης κυκλοφορίας γίνεται εκτίμηση του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου του κάθε αεροσκάφους και κατ' επέκταση του αντίστοιχου

ACN. Στη συνέχεια, από τις υπολογιζόμενες ACN τιμές, επιλέγεται εκείνη που θεωρείται αντιπροσωπευτική για το οδόστρωμα και ορίζεται ως η τελική τιμή του δείκτη PCN του οδοστρώματος (FAA 2014b).

Στη συνέχεια παρατίθεται η βασική αρχή εκτίμησης της συνδυαστικής επίδρασης των διαφόρων αεροσκαφών. Ο δείκτης CDF που προκύπτει από τις καλύψεις-διελεύσεις του αεροσκάφους προς μετατροπή δίνεται από την εξίσωση 4.4 ενώ ο δείκτης CDF που προκύπτει από τις ισοδύναμες καλύψεις-διελεύσεις του κρίσιμου αεροσκάφους δίνεται από την εξίσωση 4.5:

$$CDF_{CNV} = \frac{C_{CNV}}{C_{CNVF}} = \frac{\text{καλύψεις-διελεύσεις αεροσκάφους προς μετατροπή}}{\text{καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία από το φορτίο του αεροσκάφους προς μετατροπή}} \quad (\text{Εξ. 4.4})$$

$$CDF_{CRTE} = \frac{C_{CRTE}}{C_{CRTEF}} = \frac{\text{ισοδύναμες καλύψεις-διελεύσεις κρίσιμου αεροσκάφους}}{\text{καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία από το φορτίο του κρίσιμου αεροσκάφους}} \quad (\text{Εξ. 4.5})$$

Δεδομένου ότι ο δείκτης CDF αποτελεί έκφραση της διάρκειας ζωής του οδοστρώματος, ο δείκτης CDF για το αντίστοιχο κρίσιμο αεροσκάφος ισούται με το δείκτη CDF του αεροσκάφους μετατροπής.

$$\text{Δηλαδή: } \frac{C_{CNV}}{C_{CNVF}} = \frac{C_{CRTE}}{C_{CRTEF}} \text{ και } C_{CRTE} = \frac{C_{CRTEF}}{C_{CNVF}} C_{CNV} \quad (\text{Εξ. 4.6})$$

$$\text{Όμως: } TC_{CNV} = PC_{CNV} \times C_{CNV} \text{ και } TC_{CRTE} = PC_{CRTE} \times C_{CRTE} \quad (\text{Εξ. 4.7})$$

Όπου:

- $TC_{CNV}$ : ο αριθμός των κύκλων κυκλοφορίας του αεροσκάφους προς μετατροπή
- $TC_{CRTE}$ : ο αριθμός των ισοδύναμων κύκλων κυκλοφορίας του αεροσκάφους προς μετατροπή ως προς τον αριθμό των κύκλων κυκλοφορίας του κρίσιμου αεροσκάφους
- $PC_{CNV}$ : ο λόγος των διελεύσεων προς τις καλύψεις-διελεύσεις του αεροσκάφους προς μετατροπή
- $PC_{CRTE}$ : ο λόγος των διελεύσεων προς τις καλύψεις-διελεύσεις του κρίσιμου αεροσκάφους

Επομένως, οι ισοδύναμοι κύκλοι κυκλοφορίας του κρίσιμου αεροσκάφους προκύπτουν από τη σχέση:

$$TC_{CRTE} = \frac{PC_{CRTE}}{PC_{CNV}} \frac{C_{CRTEF}}{C_{CNVF}} TC_{CNV} \quad (\text{Εξ. 4.8})$$

$$C_{CRTEI} = C_{CRTEF} \times CDF_{CNVI} \quad (\text{Εξ. 4.9})$$

Όπου:

- $C_{CRTEI}$ : ο αριθμός των ισοδύναμων καλύψεων-διελεύσεων του νιοστού αεροσκάφους του συνόλου της κυκλοφορίας, συμπεριλαμβανομένου του κρίσιμου αεροσκάφους
- $CDF_{CNVI}$ : ο δείκτης CDF του νιοστού αεροσκάφους του συνόλου της κυκλοφορίας, συμπεριλαμβανομένου του κρίσιμου αεροσκάφους

Αθροίζοντας το σύνολο των αεροσκαφών της σύνθεσης της κυκλοφορίας, προκύπτει ο συνολικός αριθμός των ισοδύναμων καλύψεων-διελεύσεων του κρίσιμου αεροσκάφους  $C_{CRTETotal}$  από την Εξίσωση 4.10, όπου  $N$ : ο συνολικός αριθμός των αεροσκαφών της σύνθεσης, συμπεριλαμβανομένου του κρίσιμου αεροσκάφους.

$$C_{CRTETotal} = \sum_{I=1}^N C_{CRTEI} = \sum_{I=1}^N C_{CRTF} \times CDF_{CNVI} = C_{CRTF} \sum_{I=1}^N CDF_{CNVI} \quad (\text{Εξ. 4.10})$$

Ο δείκτης αθροιστικής φθοράς της σύνθεσης της κυκλοφορίας,  $CDF_T$ , προκύπτει από τον λόγο του συνολικού αριθμού ισοδύναμων καλύψεων-διελεύσεων του κρίσιμου αεροσκάφους προς τον αριθμό των καλύψεων-διελεύσεων του κρίσιμου αεροσκάφους έως την αστοχία (εξίσωση 4.11).

$$CDF_T = \frac{C_{CRTETotal}}{C_{CRTF}} = \sum_{I=1}^N CDF_{CNVI} \quad (\text{Εξ. 4.11})$$

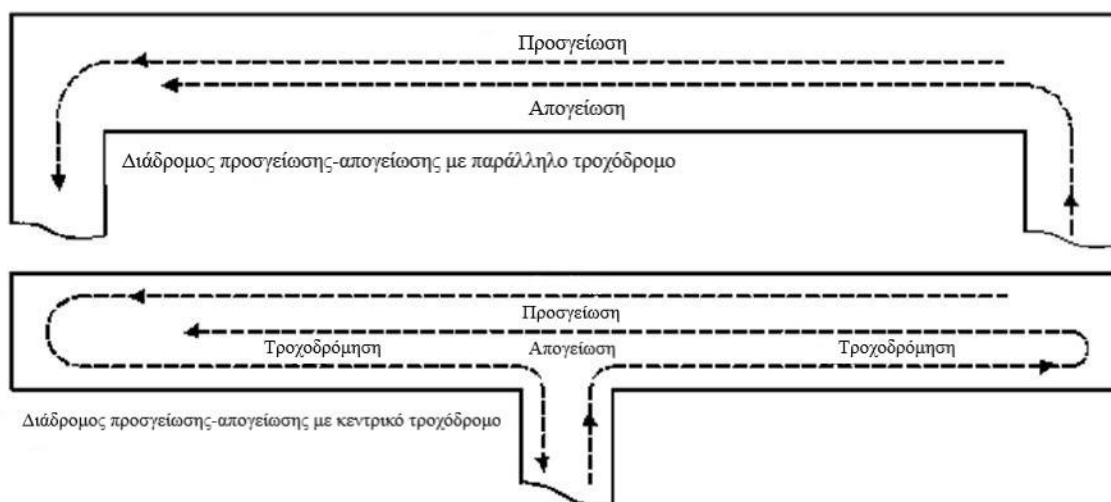
Συνεπώς, ο δείκτης CDF της σύνθεσης της κυκλοφορίας είναι, εξ' ορισμού, το άθροισμα των δεικτών CDF των επιμέρους αεροσκαφών της σύνθεσης της κυκλοφορίας, συμπεριλαμβανομένου του δείκτη CDF του κρίσιμου αεροσκάφους.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να γίνει αναφορά στην έννοια των διελεύσεων (passes) και του κύκλου κυκλοφορίας (TC: traffic cycle) ενός αεροσκάφους που αναφέρθηκε παραπάνω. Ένα αεροσκάφος προσεγγίζει ένα αεροδρόμιο με μικρότερη ποσότητα καυσίμων από εκείνη που διέθετε κατά την απογείωσή του. Κατά συνέπεια η καταπόνηση του οδοστρώματος από το φορτίο του αεροσκάφους θεωρείται μικρότερη κατά την προσγείωση εξαιτίας του μικρότερου φορτίου του αεροσκάφους και της ανυψωτικής ικανότητας των φτερών του. Για τον λόγο αυτό η FAA λαμβάνει υπόψη μόνο τις απογειώσεις στον σχεδιασμό/αξιολόγηση οδοστρωμάτων. Ωστόσο εάν δεν πραγματοποιείται ανεφοδιασμός καυσίμων στο αεροδρόμιο, το φορτίο κατά την προσγείωση θα είναι το ίδιο με το φορτίο κατά την απογείωση (αγνοώντας τις αλλαγές στο επιβατικό και εμπορευματικό φορτίο) και τότε και η προσγείωση θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον κύκλο φόρτισης του οδοστρώματος. Ανεξαρτήτως της μεθόδου υπολογισμού των τάσεων των φορτίων κάθε κύκλος κυκλοφορίας αποτελείται από μια απογείωση και μια προσγείωση του ίδιου αεροσκάφους.

Μια διέλευση (pass) αποτελεί μια κίνηση του αεροσκάφους κατά μήκος του διαδρόμου Π/Α. Ενδέχεται να είναι μια άφιξη, μια αναχώρηση ή μια τροχοδρόμηση. Στην Εικόνα 4.8



παρουσιάζονται τυπικές διατάξεις διαδρόμων Π/Α, οι οποίοι έχουν είτε παράλληλο είτε κεντρικό τροχόδρομο. Στην περίπτωση παράλληλου τροχόδρομου απαιτείται η χρήση ενός μικρού τμήματος του διαδρόμου Π/Α για τροχοδρόμηση. Αντιθέτως, η ύπαρξη κεντρικού τροχόδρομου απαιτεί τη χρήση μεγάλου μέρους του διαδρόμου Π/Α για τροχοδρόμηση.



**Εικόνα 4.8 Κατανομή κίνησης αεροσκαφών (FAA 2014β)**

Στην περίπτωση παράλληλου τροχόδρομου προκύπτουν δύο πιθανές συνθήκες φόρτισης, για τις οποίες γίνεται η παραδοχή πως ο αριθμός των επιβατών όσο και το φορτίο των εμπορευμάτων είναι περίπου τα ίδια κατά τις διαδικασίες της προσγείωσης και της απογείωσης:

- Στην περίπτωση που στο αεροδρόμιο πραγματοποιείται ανεφοδιασμός με καύσιμα στο αεροσκάφος, τότε ο κύκλος κυκλοφορίας αποτελείται από μια μόνο διέλευση, καθώς η φόρτιση του οδοστρώματος λόγω προσγείωσης του αεροσκάφους είναι απομειωμένη. Κατά συνέπεια λαμβάνεται υπόψη μόνο η απογείωση του αεροσκάφους και ο λόγος διελεύσεις προς κύκλους κυκλοφορίας ισούται με τη μονάδα ( $P/TC=1$ ).
- Στην περίπτωση που στο αεροδρόμιο δεν πραγματοποιείται ανεφοδιασμός με καύσιμα στο αεροσκάφος, τότε λαμβάνεται υπόψη τόσο η απογείωση όσο και η προσγείωση και ο κύκλος κυκλοφορίας αποτελείται από δύο διελεύσεις, οι οποίες προκαλούν ίσες τάσεις. Ο λόγος διελεύσεις προς κύκλους κυκλοφορίας ισούται με δύο ( $P/TC=2$ ).

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

- Στην περίπτωση που στο αεροδρόμιο πραγματοποιείται ανεφοδιασμός με καύσιμα στο αεροσκάφος λαμβάνεται υπόψη τόσο η απογείωση όσο και η τροχοδρόμηση για

απογείωση, καθώς αποτέλεσμα των δύο αυτών κινήσεων είναι η μέγιστη φόρτιση του οδοστρώματος. Η διαδικασία της προσγείωσης μπορεί να αγνοηθεί σε αυτή την περίπτωση. Ο λόγος διελεύσεις προς κύκλους κυκλοφορίας ισούται με δύο ( $P/TC=2$ ).

- Στην περίπτωση που στο αεροδρόμιο δεν πραγματοποιείται ανεφοδιασμός με καύσιμα στο αεροσκάφος τότε λαμβάνεται υπόψη η προσγείωση, η απογείωση και η τροχοδρόμηση του αεροσκάφους. Κατά συνέπεια ο κύκλος κυκλοφορίας αποτελείται από τρεις διελεύσεις του αεροσκάφους και ο λόγος διελεύσεις προς κύκλους κυκλοφορίας ισούται με τρία ( $P/TC=3$ ).

Σημειώνεται ότι για την εκτίμηση της ισοδύναμης κυκλοφορίας στην οποία βασίζεται ο προσδιορισμός του δείκτη PCN απαιτείται και ο λόγος κύκλοι κυκλοφορίας προς καλύψεις-διελεύσεις ( $TC/C$ ). Η εξίσωση 4.12 δίνει τη δυνατότητα αναγωγής του λόγου  $P/C$  στον λόγο ( $TC/C$ ) λαμβάνοντας υπόψη τον λόγο διελεύσεων προς κύκλους κυκλοφορίας ( $P/TC$ ).

$$TC/C = P/C \div P/TC \quad (\text{Εξ. 4.12})$$

Όπου TC: Κύκλοι κυκλοφορίας, C: Καλύψεις-διελεύσεις, P: Διελεύσεις

Σημειώνεται ότι το λογισμικό COMFAA 3.0, εκτός από τον υπολογισμό του δείκτη PCN ενός οδοστρώματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εκτίμηση των τιμών ACN διαφόρων τύπων αεροσκαφών, σύμφωνα με τις συνθήκες που ορίζονται από τον ICAO. Στο πλαίσιο υπολογισμού των τιμών ACN ενός αεροσκάφους, πραγματοποιείται και υπολογισμός του απαιτούμενου πάχους αναφοράς σύμφωνα με τις συνθήκες που ορίζει ο ICAO για την εκτίμηση του δείκτη ACN. Το υπόψη πάχος οδοστρώματος δεν σχετίζεται με τις διαδικασίες σχεδιασμού νέων οδοστρωμάτων που διαθέτει η FAA.

#### 4.4.4 Έλεγχος δομικής επάρκειας οδοστρώματος

Η δομική επάρκεια ενός οδοστρώματος μπορεί να ελεγχθεί μέσω της ανισότητας:

$$PCN_{\text{οδ/τος}} \geq ACN_{\text{α/φους}} \quad (\text{Εξ. 4.13})$$

Αν η ανισότητα ισχύει τότε οι αρχές του αεροδρομίου μπορούν να επιτρέψουν τη χρήση του από το αεροσκάφος καθώς η φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος είναι επαρκής και θεωρείται ότι δεν υπάρχει κίνδυνος αστοχίας. Στην αντίθετη περίπτωση το οδοστρώμα δεν μπορεί να παραλάβει το φορτίο του υπόψη αεροσκάφους (η αστοχία είναι πιθανή), οπότε καλό είναι να μην επιτραπεί η χρήση του αεροδρομίου.

#### 4.3.4 Υπερφόρτωση οδοστρωμάτων

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

Δεδομένου ότι στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπάρχουν συστηματικές αναλύσεις για τις ακριβείς επιπτώσεις της υπερφόρτωσης, στην πράξη μπορούν να χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες οδηγίες που παρέχονται από τον ICAO:

- Περιστασιακές κινήσεις αεροσκαφών με ACN κατά 10% μεγαλύτερο από το PCN ευκάμπτου οδοστρώματος δεν αναμένεται να προκαλέσουν φθορά μείζονος σημασίας στο οδόστρωμα.
- Περιστασιακές κινήσεις αεροσκαφών με ACN κατά 5% μεγαλύτερο από το PCN δύσκαμπτου οδοστρώματος δεν αναμένεται να προκαλέσουν φθορά μείζονος σημασίας στο οδόστρωμα.
- Ο ετήσιος αριθμός των κινήσεων των υπέρβαρων αεροσκαφών δεν πρέπει να υπερβαίνει το 5% των συνολικών ετήσιων κινήσεων που εξυπηρετεί το οδόστρωμα. Δεν υπάρχει ακριβής οδηγία για την επιλογή του αριθμού των κινήσεων που αντιπροσωπεύει το ποσοστό 5%. Η FAA συνιστά τη χρήση 500 καλύψεων-διελεύσεων αεροσκαφών με  $ACN=1.1 \times PCN$  για εύκαμπτα οδοστρώματα και  $ACN=1.05 \times PCN$  για δύσκαμπτα οδοστρώματα. Η επιλογή των 500 διελεύσεων βασίζεται στη θεώρηση ότι το PCN αντιστοιχεί σε 10,000 καλύψεις-διελεύσεις ενός αεροσκάφους και ότι  $ACN=PCN$  για  $CDF=1$ .
- Η υπερφόρτωση των οδοστρωμάτων πρέπει να απαγορεύεται σε οδοστρώματα που εμφανίζουν ενδείξεις φθοράς, καθώς και κατά τα διαστήματα που το οδόστρωμα είναι περισσότερο ευάλωτο λόγω των συνθηκών που επικρατούν (παγετός, μείωση αντοχής ασύνδετων υλικών λόγω υδάτων, εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες κλπ).
- Σε οδοστρώματα που πραγματοποιείται εξυπηρέτηση υπέρβαρων αεροσκαφών είναι αναγκαίο να πραγματοποιούνται τακτικοί προληπτικοί έλεγχοι ώστε να αποφευχθεί η πιθανότητα εμφάνισης εκτεταμένων φθορών, σημαντικής μείωσης της εναπομένουσας ζωής και υπερβολικής αύξησης των απαιτήσεων συντήρησης ή αποκατάστασής τους.

## 4.4 Μέθοδος ACR-PCR

Η μέθοδος ACR-PCR βασίζεται στη Θεωρία Πολλαπλών Ελαστικών Στρώσεων (LEA: Layered Elastic Analysis), σύμφωνα με την οποία το οδόστρωμα αποτελείται από στρώσεις ομογενείς, ελαστικές και ισότροπες, οι οποίες χαρακτηρίζονται από το μέτρο ελαστικότητας (E) και το λόγο του Poisson ( $\nu$ ). Κάθε στρώση θεωρείται ότι εκτείνεται στο άπειρο στην οριζόντια διεύθυνση ενώ διαθέτει πεπερασμένο πάχος. Η στρώση έδρασης εκτείνεται κατακόρυφα στο άπειρο και θεωρείται ότι αποτελεί ελαστικό ημίχωρο. Λόγω της γραμμικής ελαστικής φύσης του μοντέλου, τα μεμονωμένα φορτία τροχών μπορούν να αθροιστούν ώστε να ληφθεί υπόψη η συνδυαστική επίδραση φορέων αεροσκαφών που διαθέτουν πολλαπλούς τροχούς.

### 4.4.1 Δείκτης ACR (Aircraft Classification Rating)

Ο δείκτης ACR (Aircraft Classification Rating), σε αντιστοιχία με τον δείκτη ACN, είναι ένας αριθμός ο οποίος εκφράζει τη σχετική επίδραση ενός αεροσκάφους σε ένα οδόστρωμα για μια προκαθορισμένη αντοχή του εδάφους. Αριθμητικά προσδιορίζεται ως το διπλάσιο φορτίο (σε εκατοντάδες Kgr) του μονού τροχού (DSWL: Derived Single Wheel Load), ο οποίος έχει πίεση 1.50 MPa (218psi) και προκαλεί την ίδια ένταση με το πραγματικό σύστημα τροχών του αεροσκάφους σε ένα οδόστρωμα πάχους ίσο με το πάχος αναφοράς. Το πάχος αναφοράς για εύκαμπτα οδοστρώματα είναι ίσο με το πάχος του οδοστρώματος το οποίο επιτρέπει 36,500 καλύψεις-διελεύσεις C του πραγματικού συστήματος τροχών του αεροσκάφους για μια συγκεκριμένη κατηγορία εδαφικής αντοχής. Ο υπολογισμός του δείκτη ACR πραγματοποιείται για κάθε μια από τις τέσσερις κατηγορίες εδαφικής αντοχής και για δεδομένο φορτίο αεροσκάφους.

Η μέθοδος ACR-PCR υιοθετεί τέσσερις κατηγορίες εδαφικής αντοχής για εύκαμπτα και για δύσκαμπτα οδοστρώματα. Ο χαρακτηρισμός της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης πραγματοποιείται μέσω του μέτρου ελαστικότητας (E) της στρώσης έδρασης (Πίνακας 4.6).

**Πίνακας 4.6 Κατηγορίες εδαφικής αντοχής για τον υπολογισμό του δείκτη ACR**

Κατηγορία Εδαφικής Αντοχής	Χαρακτηριστική τιμή E psi (MPa)	Αντιπροσωπεύει τιμές E psi (MPa)	Κωδικοποίηση
<b>Υψηλή</b>	29008 (200)	$E \geq 21756$ ( $E \geq 150$ )	A
<b>Μέτρια</b>	17405 (120)	$14504 \leq E < 21756$ ( $100 \leq E < 150$ )	B
<b>Χαμηλή</b>	11603 (80)	$8702 \leq E < 14504$ ( $60 \leq E < 100$ )	C
<b>Πολύ χαμηλή</b>	7252 (50)	$E < 8702$ ( $E < 60$ )	D

Δεδομένου ότι η μέθοδος ACR-PCR πρέπει να καλύψει ένα μεγάλο πλήθος διαφορετικών τύπων αεροσκαφών με διαφορετικά φορτία, ορίστηκαν διαφορετικές διατομές οδοστρωμάτων

αναφοράς, ώστε να προσδιορίζεται το κατάλληλο πάχος αναφοράς για κάθε μία από τις κατηγορίες εδαφικής αντοχής και για την ποικιλία των φορτίων των αεροσκαφών. Ο προσδιορισμός του πάχους αναφοράς για τον υπολογισμό του δείκτη ACR σε εύκαμπτα οδοστρώματα περιλαμβάνει τον καθορισμό των υλικών και των βασικών χαρακτηριστικών των επιμέρους στρώσεων. Κάθε στρώση χαρακτηρίζεται από το μέτρο ελαστικότητας E, τον λόγο Poisson  $\nu$  και το πάχος της. Λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές της θεωρίας ελαστικών στρώσεων θεωρείται ότι υπάρχει πλήρης συνεργασία μεταξύ των στρώσεων του οδοστρώματος. Ανάλογα με το σύστημα τροχών του αεροσκάφους ορίστηκαν δύο διατομές του οδοστρώματος αναφοράς (Πίνακες 4.7-4.8).

**Πίνακας 4.7 Διατομή οδοστρώματος αναφοράς για υπολογισμό δείκτη ACR για εύκαμπτα οδοστρώματα (Αεροσκάφη με  $\leq 2$  τροχούς σε όλα τα κύρια φορεία)**

Στρώση	Πάχος στρώσεων inch (mm)	Μέτρο ελαστικότητας psi (MPa)	Λόγος Poisson
<b>Επιφανειακή στρώση (ασφαλτόμιγμα)</b>	3 (76)	200,000 (1,379)	0.35
<b>Βάση από θραυστό αμμοχάλικο</b>	μεταβλητό	Εβασης=f (t, Εεδρ)	0.35
<b>Στρώση έδρασης</b>	άπειρο	Εεδρ= f(κατ.εδαφ.αντοχής)	0.35

**Πίνακας 4.8 Διατομή οδοστρώματος αναφοράς για υπολογισμό δείκτη ACR για εύκαμπτα οδοστρώματα (Αεροσκάφη με  $>2$  τροχούς σε ένα τουλάχιστον κύριο φορείο)**

Στρώση	Πάχος στρώσεων inch (mm)	Μέτρο ελαστικότητας psi (MPa)	Λόγος Poisson
<b>Επιφανειακή στρώση (ασφαλτόμιγμα)</b>	5 (127)	200,000 (1,379)	0.35
<b>Βάση από θραυστό αμμοχάλικο</b>	μεταβλητό	Εβασης=f (t, Εεδρ)	0.35
<b>Στρώση έδρασης</b>	άπειρο	Εεδρ= f(κατ.εδαφ.αντοχής)	0.35

Οι υπόψη διατομές περιλαμβάνουν μια στρώση μεταβλητού πάχους πάνω από την στρώση έδρασης, η οποία αντιστοιχεί σε μία βάση από θραυστό αμμοχάλικο. Το μέτρο ελαστικότητας της υπόψη στρώσης αποτελεί συνάρτηση του πάχους της και του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης. Στην περίπτωση που το πάχος της βάσης  $t_b$  είναι μεγαλύτερο ή ίσο με 15 in (381 mm), η υπόψη στρώση υποδιαιρείται σε υπο-στρώσεις με πλήθος N:

$$N = \text{int}\left(\frac{t_B}{254} + 0.5\right), \quad (\text{Εξ. 4.14})$$

όπου  $t_B$ : το πάχος της βάσης (mm) και η συνάρτηση  $\text{int}$ . επιστρέφει το ακέραιο μέρος (στρογγυλοποίηση στον μικρότερο ακέραιο αριθμό). Γενικά οι  $N$  υπο-στρώσεις δεν έχουν ίσα επιμέρους πάχη. Το πάχος της τελευταίας,  $N-1$  υπό-στρώσης είναι 10 in (254 mm) και το πάχος της πρώτης υπό-στρώσης είναι  $t_B - (N-1) \times 10$  in (254 mm).

Για κάθε υπό-στρώση καθορίζεται ένα μέτρο ελαστικότητας μέσω της σχέσης 4.15 ξεκινώντας από την τελευταία υπό-στρώση.

$$E_n = E_{n-1} \times \{1 + [\log_{10}(t_n) - \log_{10}(25.4)] \times (c - d [\log_{10}(E_{n-1}) + \log_{10}(145.037)])\} \quad (\text{Εξ. 4.15})$$

Όπου:

- $E_n$ : το μέτρο ελαστικότητας της υπόψη υπό-στρώσης (MPa)
- $E_{n-1}$ : το μέτρο ελαστικότητας της υποκείμενης υπό-στρώσης ή το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης εάν η υπόψη υπό-στρώση είναι η τελευταία
- $t_n$ : το πάχος της υπόψη υπό-στρώσης (mm)
- $c = 10.52$  (σταθερά)
- $d = 2.0$  (σταθερά)

Η παραπάνω διαδικασία τροποποιείται για την εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας των δύο ανώτερων υπο-στρώσεων. Στην περίπτωση αυτή το πάχος της πρώτης υπό-στρώσης (υπό-στρώση  $N$ ) κυμαίνεται μεταξύ 5-10 in (127-254 mm) και το πάχος όλων των κάτω υπο-στρώσεων (υπο-στρώσεις από 1 έως  $N-1$ ) είναι 10 in (254 mm). Αρχικά υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας  $E$  για την υπό-στρώση  $N$ , για υποτιθέμενο πάχος  $t_n$  της πρώτης υπό-στρώσης ίσο με 10 in (254 mm). Στη συνέχεια υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας της υπό-στρώσης  $N-1$  (δηλαδή της υπό-στρώσης ακριβώς κάτω από την  $N$  υπό-στρώση) για  $t_n = 20$  in (508 mm) -  $t_N$ , όπου  $t_N$  είναι το πραγματικό πάχος της  $N$  υπό-στρώσης (mm).

Ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας της υπό-στρώσης  $N$  προκύπτει με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των μέτρων ελαστικότητας  $E_{N-1}$  και  $E_{254}$ :

$$E_N = E_{N-1} + t_N \times \frac{E_{254} - E_{N-1}}{254} \quad (\text{Εξ. 4.16})$$

Για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα το πάχος αναφοράς είναι ίσο με το πάχος πλάκας σκυροδέματος, η οποία όταν φορτίζεται στο κέντρο της από το πραγματικό σύστημα τροχών του αεροσκάφους, αναπτύσσει στη βάση της οριζόντια εφελκυστική τάση ίση με 2.75 MPa. Ο υπολογισμός του δείκτη ACR πραγματοποιείται για κάθε μια από τις τέσσερις κατηγορίες

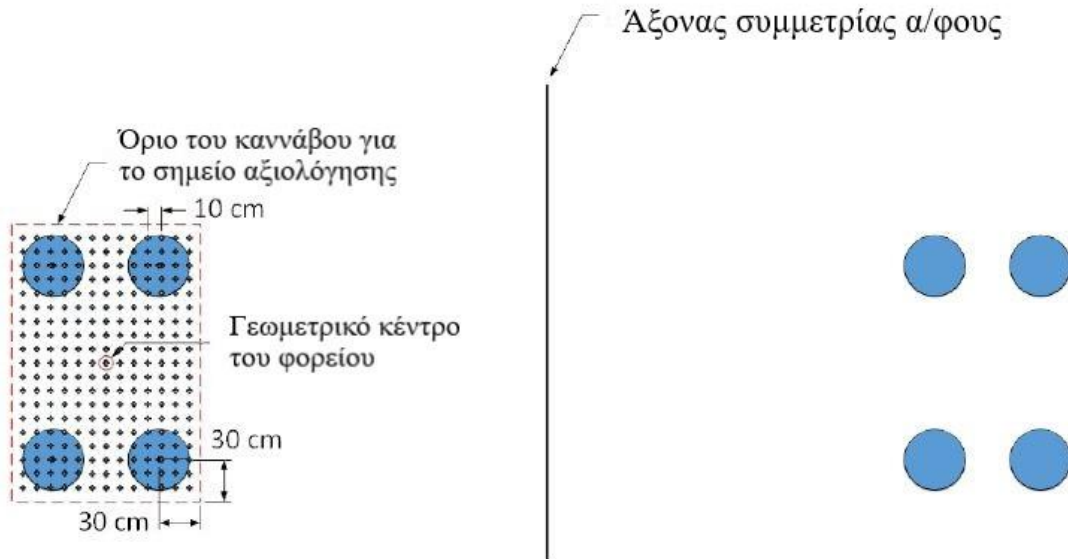
εδαφικής αντοχής και για δεδομένο φορτίο αεροσκάφους. Τα χαρακτηριστικά της διατομής αναφοράς φαίνονται στον Πίνακα 4.9.

**Πίνακας 4.9 Διατομή οδοστρώματος αναφοράς για υπολογισμό δείκτη ACR για δύσκαμπτα οδοστρώματα**

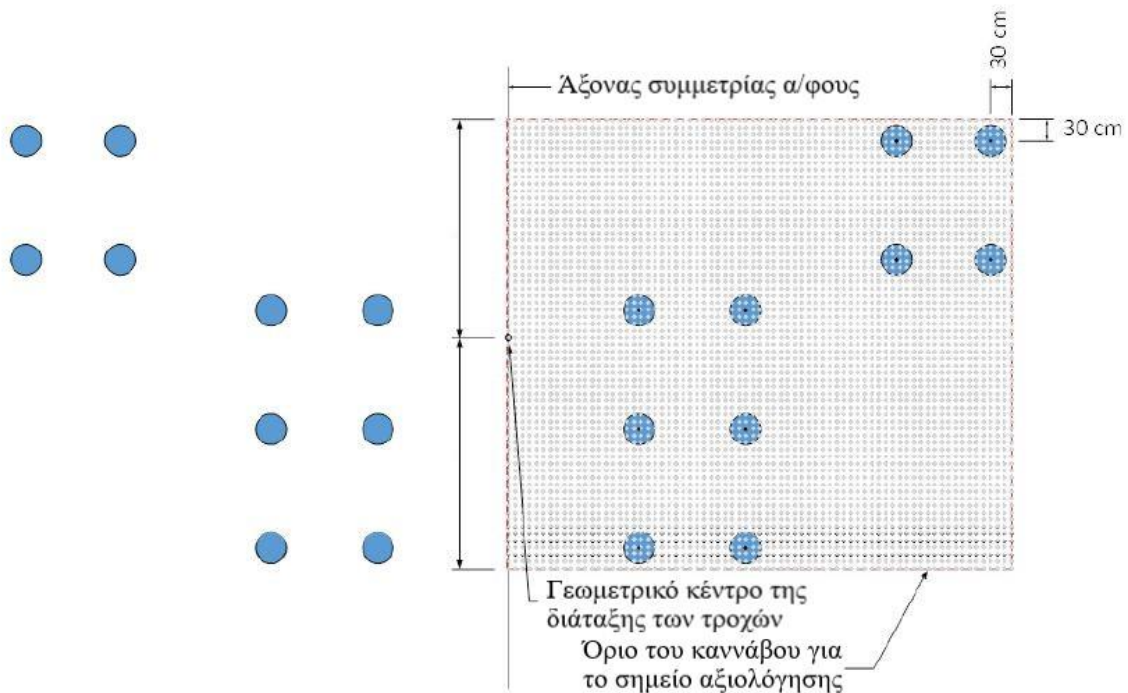
Στρώση	Πάχος στρώσεων inch (mm)	Μέτρο ελαστικότητας psi (MPa)	Λόγος Poisson
<b>Επιφανειακή στρώση PCC (Σκυρόδεμα)</b>	μεταβλητό	4,000,000 (27 579)	0.15
<b>Βάση από θραυστό αμμοχάλικο</b>	7.9 (200)	72,519 (500)	0.35
<b>Στρώση έδρασης</b>	άπειρο	Εεδρ= f(κατ.εδαφ.αντοχής)	0.40

Σημειώνεται ότι η FAA έχει αναπτύξει την εφαρμογή ICAO-ACR 1.3 για την εκτίμηση των τιμών ACR των αεροσκαφών με βάση τις προδιαγραφές που ορίζονται από το ICAO. Ειδικότερα για την εκτίμηση του δείκτη ACR ενός αεροσκάφους για ένα εύκαμπτο οδόστρωμα υπολογίζεται η μέγιστη κατακόρυφη παραμόρφωση στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης. Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται σε συγκεκριμένα σημεία (evaluation points), τα οποία εξαρτώνται από τη γεωμετρία των φορέων των τροχών του αεροσκάφους. Τα σημεία αυτά τοποθετούνται ακριβώς κάτω από το κέντρο των τροχών του κάθε αεροσκάφους ή σε ορθογώνιο καννάβο σημείων ανά 10 cm.

Πιο συγκεκριμένα για απλές διατάξεις τροχών που αποτελούνται από δύο φορεία τροχών, το κέντρο του καννάβου ταυτίζεται με το γεωμετρικό κέντρο του φορείου, ενώ τα όρια του καννάβου εκτείνονται σε απόσταση 30 cm από το κέντρο του κάθε τροχού (Εικόνα 4.9). Για πολυπλοκότερες διατάξεις τροχών, οι οποίες περιλαμβάνουν πάνω από δύο φορεία τροχών, το κέντρο του καννάβου ταυτίζεται με το γεωμετρικό κέντρο ολόκληρου του συστήματος τροχών του αεροσκάφους. Ομοίως, τα όρια του καννάβου εκτείνονται σε απόσταση 30 cm από το κέντρο του κάθε εξωτερικού τροχού (Εικόνα 4.10).



**Εικόνα 4.9 Καθορισμός πλέγματος για τα σημεία υπολογισμού των παραμορφώσεων για απλή διάταξη τροχών αεροσκάφους**



**Εικόνα 4.10 Καθορισμός πλέγματος για τα σημεία υπολογισμού των παραμορφώσεων για σύνθετη διάταξη τροχών αεροσκάφους**

Επιλέγοντας την κατάλληλη διατομή του οδοστρώματος αναφοράς και λαμβάνοντας υπόψη τα σημεία υπολογισμού των παραμορφώσεων υπολογίζεται η τιμή του πάχους  $t$  της βάσης με κριτήριο σχεδιασμού η φθορά στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης να είναι ίση με τη μονάδα. Το συνολικό πάχος του οδοστρώματος αναφοράς αποτελεί το απαιτούμενο πάχος για τον υπολογισμό του δείκτη ACR.



#### 4.4.2 Δείκτης PCR (Pavement Classification Rating)

Ο δείκτης PCR εκφράζει τη φέρουσα ικανότητα ενός οδοστρώματος η οποία προσδιορίζεται ως προς το φορτίο του αεροσκάφους που μπορεί να δεχθεί χωρίς περιορισμό. Ο όρος απεριόριστες διελεύσεις στον ορισμό του PCR δεν σημαίνει άπειρες. Αναφέρεται στη σχέση του δείκτη PCR με το δείκτη ACR του αεροσκάφους. Στην περίπτωση που ο δείκτης ACR ενός αεροσκάφους είναι μικρότερος από το δείκτη PCR ενός οδοστρώματος επιτρέπεται στο υπόψη αεροσκάφος να επιχειρεί χωρίς περιορισμό βάρους. Ο όρος απεριόριστες διελεύσεις δεν λαμβάνει υπόψη τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος. Η δημοσιευμένη τιμή του δείκτη PCR πρέπει να ανταποκρίνεται στην επάρκεια του οδοστρώματος να φέρει την τρέχουσα και τη μελλοντική κυκλοφορία και θα πρέπει να επαναξιολογηθεί εάν η κυκλοφορία αλλάξει σημαντικά. Μια σημαντική μεταβολή στην κυκλοφορία αντιστοιχεί στην εισαγωγή ενός νέου τύπου αεροσκάφους ή σε μια αύξηση στα τρέχοντα επίπεδα κυκλοφορίας αεροσκαφών που δεν ελήφθησαν υπόψη στην αρχική ανάλυση του PCR.

Ο δείκτης PCR καθορίζεται από τις ίδιες παραμέτρους που περιλαμβάνονται στην κωδικοποίηση του δείκτη PCN: την αριθμητική τιμή, τον τύπο του οδοστρώματος, την κατηγορία της εδαφικής αντοχής, τη μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση των ελαστικών και τη μεθοδολογία υπολογισμού. Η αντίστοιχη κωδικοποίηση φαίνεται στον Πίνακα 4.10.

**Πίνακας 4.10 Στοιχεία έκφρασης του δείκτη PCR - Κωδικοποίηση**

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

#### 4.4.1 Εκτίμηση δείκτη PCR με τη μέθοδο της FAA

##### 4.4.1.1 Υπολογισμός PCR μέσω εμπειρίας μακράς χρήσης του αεροδρομίου – Using Aircraft Method

Η εμπειρική μέθοδος υπολογισμού του δείκτη PCR χρησιμοποιείται όταν υπάρχει περιορισμένη διαθέσιμη πληροφορία σχετικά με την κυκλοφορία που δέχεται το οδόστρωμα καθώς και με τα χαρακτηριστικά των στρώσεών του. Αρχικά προσδιορίζεται ο τύπος του οδοστρώματος (εύκαμπτο F ή δύσκαμπτο R) και καθορίζεται η κατηγορία εδαφικής αντοχής ανάλογα με τα διαθέσιμα στοιχεία. Σε περίπτωση έλλειψης διαθέσιμων στοιχείων μπορεί να

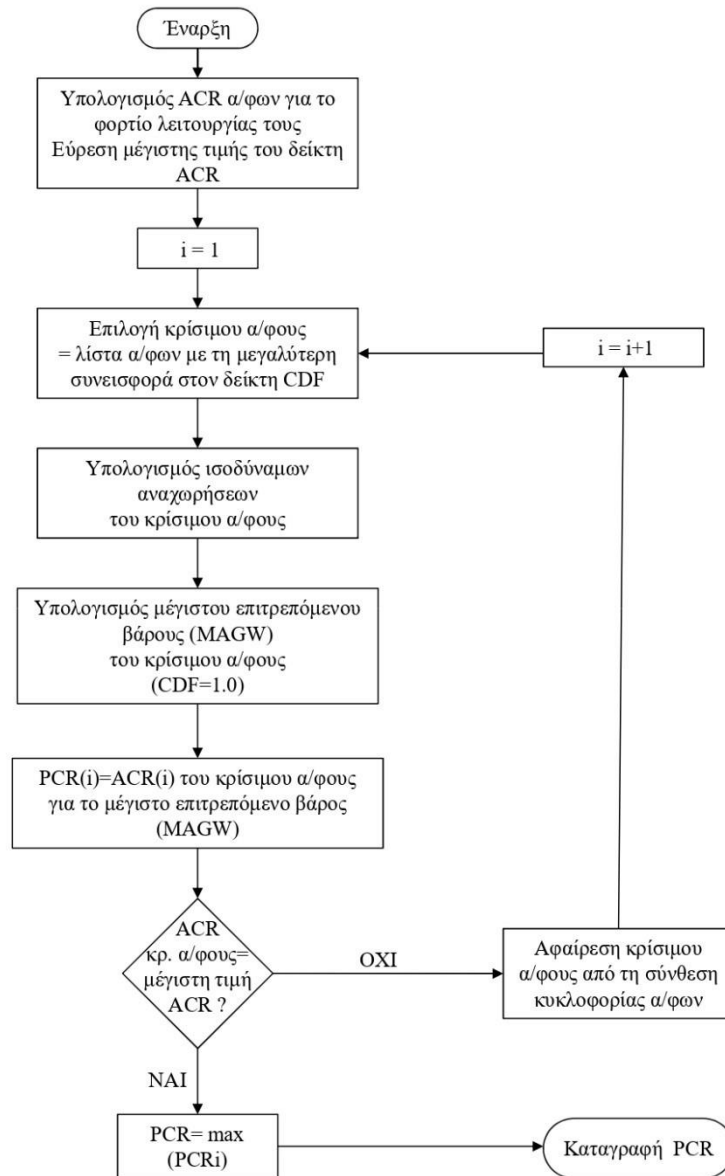
γίνει παραδοχή Μέτριας (B) κατηγορίας εδαφικής αντοχής. Στη συνέχεια καθορίζεται το αεροσκάφος με τη μέγιστη τιμή του δείκτη ACR από όλους τους τύπους αεροσκαφών της σύνθεσης για τον τύπο του οδοστρώματος και την κατηγορία εδαφικής αντοχής που προσδιορίστηκε. Ως τιμή του δείκτη PCR καθορίζεται η τιμή του δείκτη ACR του αεροσκάφους με τη μέγιστη τιμή του δείκτη ACR, το οποίο χρησιμοποιεί «συστηματικά» το οδόστρωμα. Σημειώνεται ότι, σύμφωνα με τη FAA, ένα αεροσκάφος θεωρείται πως κάνει «συστηματική χρήση» του οδοστρώματος όταν για την περίοδο σχεδιασμού του οδοστρώματος (20 έτη) οι ετήσιες καλύψεις-διελεύσεις C του αεροσκάφους υπερβαίνουν τις 250. Κατόπιν προσδιορίζεται η κατηγορία της μέγιστης επιτρεπόμενης πίεσης των ελαστικών η οποία πρέπει να αντιπροσωπεύει την μέγιστη πίεση ελαστικών που δέχεται το οδόστρωμα από τον στόλο των αεροσκαφών (FAA 2020, FAA 2022).

#### 4.4.1.2 Υπολογισμός PCR μέσω υπολογιστικής διαδικασίας αξιολόγησης – *Technical Evaluation Method*

Για τον προσδιορισμό της τιμής του δείκτη PCR ενός οδοστρώματος απαιτούνται στοιχεία της σύνθεσης της κυκλοφορίας, τα πάχη και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος καθώς και τα στοιχεία της στρώσης έδρασής του. Η διαδικασία υπολογισμού του δείκτη PCR ενός οδοστρώματος βασίζεται στον προσδιορισμό του δείκτη ACR ενός αεροσκάφους της σύνθεσης της κυκλοφορίας. Πιο συγκεκριμένα το σύνολο των αεροσκαφών της σύνθεσης της κυκλοφορίας μετατρέπεται σε ισοδύναμη κυκλοφορία ενός κρίσιμου αεροσκάφους, ή αλλιώς του αεροσκάφους αναφοράς, το οποίο έχοντας το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο προκαλεί φθορά στη στρώση έδρασης του οδοστρώματος προς αξιολόγηση ίση με τη μονάδα ( $CDF_{\text{subgrade}}=1$ ). Η διαδικασία (Εικόνα 4.11) περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. Συλλογή στοιχείων οδοστρώματος προς αξιολόγηση (πάχη και μέτρα ελαστικότητας στρώσεων, υφιστάμενη ή προβλεπόμενη κυκλοφορία αεροσκαφών).
2. Καθορισμός της σύνθεσης της κυκλοφορίας βάσει των τύπων των αεροσκαφών, του αριθμού των ετήσιων απογειώσεων και του βάρους των αεροσκαφών που αναμένεται να εξυπηρετηθούν από το οδόστρωμα κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τις παραδοχές της FAA, οι διελεύσεις των αεροσκαφών ακολουθούν κανονική κατανομή, με τυπική απόκλιση  $s=30,54$  inches (776 mm), ανεξαρτήτως του τύπου του αεροσκάφους.
3. Υπολογισμός του δείκτη ACR για κάθε τύπο αεροσκάφους της σύνθεσης της κυκλοφορίας και καταγραφή της μεγαλύτερης τιμής των υπόψη δεικτών ACR.

4. Υπολογισμός της μέγιστης τιμής του δείκτη αθροιστικής φθοράς της στρώσης έδρασης ( $CDF_{subgrade}$ ) για τη σύνθεση της κυκλοφορίας αεροσκαφών. Σημειώνεται ότι ο υπολογισμός του CDF πραγματοποιείται σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας το οποίο ελήφθη υπόψη κατά τον σχεδιασμό του οδοστρώματος.
5. Επιλογή του αεροσκάφους με τη μεγαλύτερη συνεισφορά στο δείκτη  $CDF_{subgrade}$  και ορισμός του ως κρίσιμο αεροσκάφος. Απαλοιφή όλων των υπόλοιπων αεροσκαφών της σύνθεσης της κυκλοφορίας.
6. Προσαρμογή των ετήσιων απογειώσεων του κρίσιμου αεροσκάφους ώστε η φθορά που προκαλεί να είναι ίση με την μέγιστη τιμή του δείκτη  $CDF_{subgrade}$  της σύνθεσης της κυκλοφορίας αεροσκαφών, όπως αυτή υπολογίστηκε στο βήμα 4.
7. Προσαρμογή του φορτίου του κρίσιμου αεροσκάφους, ώστε να προκαλείται φθορά στο οδόστρωμα ίση με τη μονάδα ( $CDF_{subgrade}=1$ ) για τον αριθμό των ετήσιων απογειώσεων που υπολογίστηκαν στο βήμα 6. Το φορτίο αυτό αποτελεί το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο του κρίσιμου αεροσκάφους MAGW (Maximum Gross Weight).
8. Υπολογισμός του δείκτη ACR για το κρίσιμο αεροσκάφος και για το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο (MAGW). Η τιμή του δείκτη ACR καταγράφεται ως τιμή για τον δείκτη PCR(i).
9. Στην περίπτωση που η υπολογισθείσα τιμή ACR του κρίσιμου αεροσκάφους για το MAGW ταυτίζεται με τη μέγιστη τιμή του δείκτη ACR για το ίδιο αεροσκάφος (με το φορτίο λειτουργίας), η οποία υπολογίστηκε στο βήμα 3, η τιμή αυτή καταγράφεται ως τιμή του δείκτη PCR του οδοστρώματος.
10. Στην αντίθετη περίπτωση απαλείφεται το κρίσιμο αεροσκάφος από τη σύνθεση των αεροσκαφών και δημιουργείται ένα απομειωμένο σύνολο αεροσκαφών.
11. Υπολογισμός της μέγιστης τιμής του  $CDF_{subgrade}$  για την απομειωμένη σύνθεση αεροσκαφών και επιλογή νέου κρίσιμου αεροσκάφους.
12. Επανάληψη των βημάτων 5-9 για το νέο κρίσιμο αεροσκάφος. Στο βήμα 6, χρησιμοποιείται η μέγιστη τιμή του  $CDF_{subgrade}$ , η οποία αναφέρεται στην αρχική σύνθεση της κυκλοφορίας αεροσκαφών, προκειμένου να υπολογιστούν οι ισοδύναμες ετήσιες απογειώσεις για την απομειωμένη σύνθεση αεροσκαφών.
13. Ως τιμή του δείκτη PCR του οδοστρώματος ορίζεται η μέγιστη τιμή των δεικτών PCR(i) της παραπάνω επαναληπτικής διαδικασίας.



**Εικόνα 4.11** Διάγραμμα ροής διαδικασίας υπολογισμού δείκτη PCR (FAA 2020, FAA 2022)

Ο προσδιορισμός του δείκτη PCR μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της πρόσφατης έκδοσης του λογισμικού FAARFIELD (FAARFIELD 2.0) το οποίο αποτελεί το βασικό εργαλείο της μεθόδου της FAA για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

#### 4.4.2 Έλεγχος δομικής επάρκειας οδοστρώματος

Η βασική συνθήκη ελέγχου της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος με τη μέθοδο ACR-PCR είναι αντίστοιχη εκείνης της μεθόδου ACN-PCN. Συνεπώς, η δομική επάρκεια ενός οδοστρώματος μπορεί να ελεγχθεί μέσω της ανισότητας:

$$PCR_{οδ/τος} \geq ACR_{α/φους}$$

(Εξ. 4.17)

Αν η ανισότητα ισχύει τότε οι αρχές του αεροδρομίου μπορούν να επιτρέψουν τη χρήση του από το αεροσκάφος καθώς η φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος είναι επαρκής και θεωρείται ότι δεν υπάρχει κίνδυνος αστοχίας. Στην αντίθετη περίπτωση το οδόστρωμα δεν μπορεί να παραλάβει το φορτίο του υπόψη αεροσκάφους με ασφάλεια και ενδεχομένως να επιβληθούν περιορισμοί στο αεροσκάφος, όσον αφορά στην ελάττωση του επιτρεπόμενου φορτίου ή/και μείωση του αριθμού των διελεύσεων.

#### **4.4.3 Υπερφόρτωση οδοστρωμάτων**

Σχετικά με τον έλεγχο υπερφόρτωσης ενός οδοστρώματος με βάση τη μέθοδο ACR-PCR ισχύουν όσα έχουν αναφερθεί στο κεφάλαιο 4.3.4. και αφορούν στη μέθοδο ACN-PCN. Μοναδική διαφοροποίηση των κριτηρίων υπερφόρτωσης αφορά στην περίπτωση των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων για τα οποία το ποσοστό υπέρβασης του δείκτη ACR ως προς το δείκτη PCR έχει τροποποιηθεί (από 5% σε 10%). Ειδικότερα θεωρείται ότι περιστασιακές κινήσεις αεροσκαφών με ACR κατά 10% μεγαλύτερο από το PCR ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος γενικά δεν αναμένεται να προκαλέσουν φθορά μείζονος σημασίας στο οδόστρωμα.

## **5 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΘΕΩΡΗΣΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ**

### **5.1 Γενική περιγραφή**

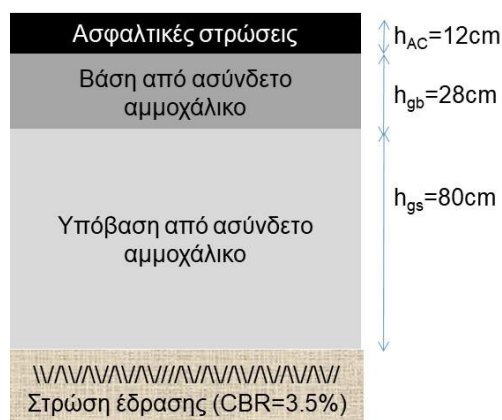
Αρχικό σκέλος της παρούσας έρευνας αποτέλεσε η διερεύνηση των επιπτώσεων της μετάβασης από τις εμπειρικές διαδικασίες αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων στις αναλυτικές διαδικασίες. Το αντικείμενο αυτό θεωρείται ότι παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον δεδομένου ότι συχνά προκύπτει η ανάγκη αξιολόγησης ενός οδοστρώματος, το οποίο έχει σχεδιαστεί με προγενέστερες εμπειρικές μεθοδολογίες σχεδιασμού, αξιοποιώντας σύγχρονες αναλυτικές διαδικασίες αξιολόγησης που έχουν αναπτυχθεί. Προς τούτο πραγματοποιήθηκε έλεγχος επάρκειας (verification) διατομής σχεδιασμού εύκαμπτου οδοστρώματος διαδρόμου Π/Α αεροσκαφών χρησιμοποιώντας την αρχική αναλυτική μέθοδο της FAA που εισήχθη το 2009 και εφαρμόζεται μέσω του λογισμικού FAARFIELD 1.305 (FAARFIELD 2010). Η υπόψη διατομή είχε αρχικά σχεδιαστεί με βάση την εμπειρική μέθοδο της FAA (FAA 1995).

Κατά τον έλεγχο επάρκειας της διατομής σχεδιασμού διερευνήθηκε η επίδραση των θεωρήσεων των μηχανικών χαρακτηριστικών των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος στην αξιολόγηση της δομικής κατάστασής του. Αρχικά πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της θεώρησης της συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων που θεωρείται βασικό στοιχείο για την αξιολόγηση. Δεδομένου ότι η υπόψη μεθοδολογία που έχει αναπτυχθεί από την FAA εφαρμόζεται σε διεθνές επίπεδο, όπου υπάρχουν περιοχές που παρουσιάζουν διαφορετικές συνθήκες από αυτές που υιοθετήθηκαν κατά την ανάπτυξη της μεθόδου, στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης εξετάστηκε και η επίδραση της θεώρησης διαφορετικών νόμων κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων στη συμπεριφορά του οδοστρώματος. Κατόπιν διερευνήθηκε η επίδραση της μεταβολής των μηχανικών χαρακτηριστικών των στρώσεων από ασύνδετα αμμοχάλικα. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε και τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια (Loizos et al. 2017b).

### **5.2 Συλλογή στοιχείων**

Για τις ανάγκες της παρούσας διερεύνησης αξιοποιήθηκαν στοιχεία ενός περιφερειακού αεροδρομίου του ελλαδικού χώρου τα οποία διατέθηκαν από τις αρχές του αεροδρομίου. Πιο συγκεκριμένα, περιλάμβαναν τους τύπους των αεροσκαφών που επρόκειτο να χρησιμοποιήσουν το οδόστρωμα του διαδρόμου Π/Α αεροσκαφών για μια περίοδο σχεδιασμού 20 ετών καθώς και τις ετήσιες αναχωρήσεις του καθενός. Το οδόστρωμα αναμενόταν να εξυπηρετεί κινήσεις τριών τύπων αεροσκαφών, με διαφορετικά συστήματα

τροχών. Επιπλέον δόθηκε η διατομή σχεδιασμού του οδοστρώματος όπως είχε προκύψει από την εφαρμογή της εμπειρικής μεθόδου της FAA καθώς και ο δείκτης CBR της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος (Εικόνα 5.1).

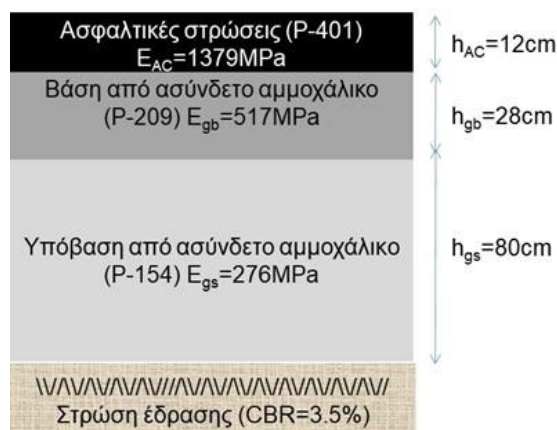


**Εικόνα 5.1 Διατομή σχεδιασμού εύκαμπτου οδοστρώματος διαδρόμου Π/Α**

Το οδόστρωμα αποτελείται από ασφαλτικές στρώσεις πάχους 12cm, βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο πάχους 28cm, υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο πάχους 80cm και τη στρώση έδρασης.

### 5.3 Αξιολόγηση διατομής οδοστρώματος με την αναλυτική μέθοδο FAA

Για την αξιολόγηση της διατομής μελέτης χρησιμοποιήθηκαν τα επιμέρους πάχη των στρώσεων του οδοστρώματος και τα στοιχεία της κυκλοφορίας. Όσον αφορά στα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών των επιμέρους στρώσεων, τόσο για τις ασφαλτικές στρώσεις όσο και για τις στρώσεις βάσης και υπόβασης από ασύνδετο αμμοχάλικο, χρησιμοποιήθηκαν αρχικά τα τυπικά υλικά της FAA, τα οποία χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες τιμές του μέτρου ελαστικότητας. Πιο συγκεκριμένα, για τις ασφαλτικές στρώσεις χρησιμοποιήθηκε το τυπικό υλικό P-401 με μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $E_{AC}=1379\text{ MPa}$ . Όσον αφορά στη στρώση της βάσης επιλέχθηκε το τυπικό υλικό P-209 με  $E_{gb}=517\text{ MPa}$  και για τη στρώση της υπόβασης επιλέχθηκε το υλικό P-154 με  $E_{gs}=276\text{ MPa}$  (Εικόνα 5.2).



**Εικόνα 5.2 Στοιχεία διατομής οδοστρώματος (θεώρηση τυπικών υλικών της FAA)**

Η διατομή σχεδιασμού ελέγχθηκε έναντι κόπωσης των ασφαλτικών στρώσεων και έναντι αστοχίας της στρώσης έδρασης μέσω του δείκτη αθροιστικής φθοράς CDF που αποτελεί το βασικό κριτήριο αξιολόγησης ενός οδοστρώματος με τη μέθοδο της FAA. Από τη σχετική διαδικασία προέκυψε για τη στρώση έδρασης  $CDF_{\text{subgrade}}=0.60$  ενώ ο δείκτης φθοράς των ασφαλτικών στρώσεων ήταν  $CDF_{AC}=2.05$ . Σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο της FAA, για τη συγκεκριμένη κυκλοφορία η στρώση έδρασης θεωρείται δομικά επαρκής ενώ αναμένεται αστοχία των ασφαλτικών στρώσεων πριν την ολοκλήρωση της περιόδου σχεδιασμού.

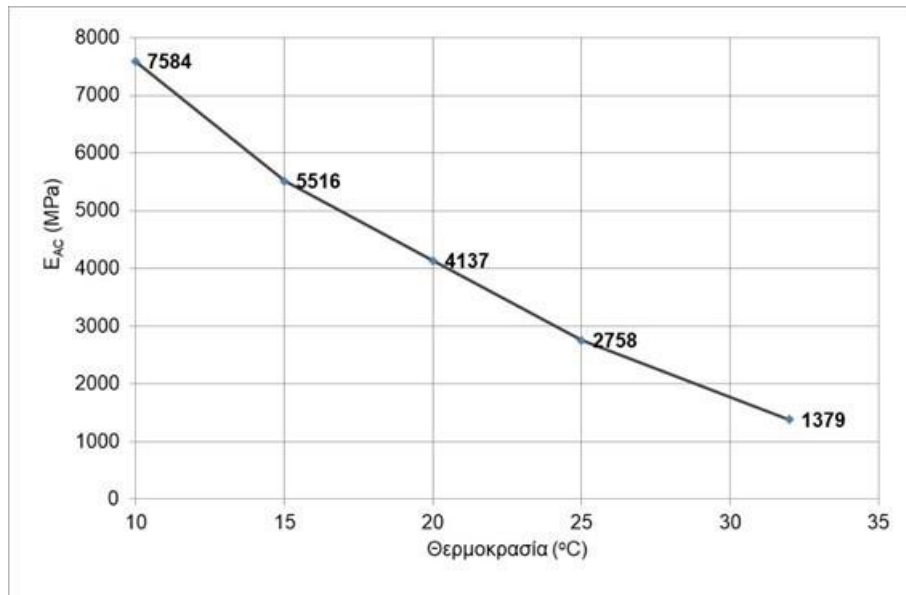
Ωστόσο, η σταθερή τιμή του μέτρου ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων που έχει οριστεί από την FAA ίση με  $E_{AC}=1379\text{ MPa}$  μπορεί να θεωρηθεί ιδιαίτερος χαμηλή για τα συμβατικά ασφαλτομίγματα. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο της FAA, η υπόψη τιμή έχει επιλεγεί ακολουθώντας μία συντηρητική θεώρηση και αντιστοιχεί σε θερμοκρασία ίση με  $32^{\circ}\text{C}$ . Για το λόγο αυτό πιστεύεται ότι θα πρέπει να ληφθεί υπόψη μια υψηλότερη τιμή του μέτρου ελαστικότητας, η οποία να ανταποκρίνεται στην κοινή πρακτική. Σύμφωνα με τη διαδικασία που εφαρμόζεται μέσω του FAARFIELD, η μεταβολή του  $E_{AC}$  συναρτήσει της θερμοκρασίας μπορεί να εκτιμηθεί μέσω της εξίσωσης 5.1 (Witczak 1989):

$$\log_{10}(E_{AC}) = 1.53658 - 0.006447 \times T - 0.00007404 \times T^2 \quad (\text{Εξ. 5.1})$$

όπου  $E_{AC}$ : το μέτρο ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος ( $10^5\text{psi}$ ) και  $T$ : θερμοκρασία ασφάλτου (Fahrenheit)

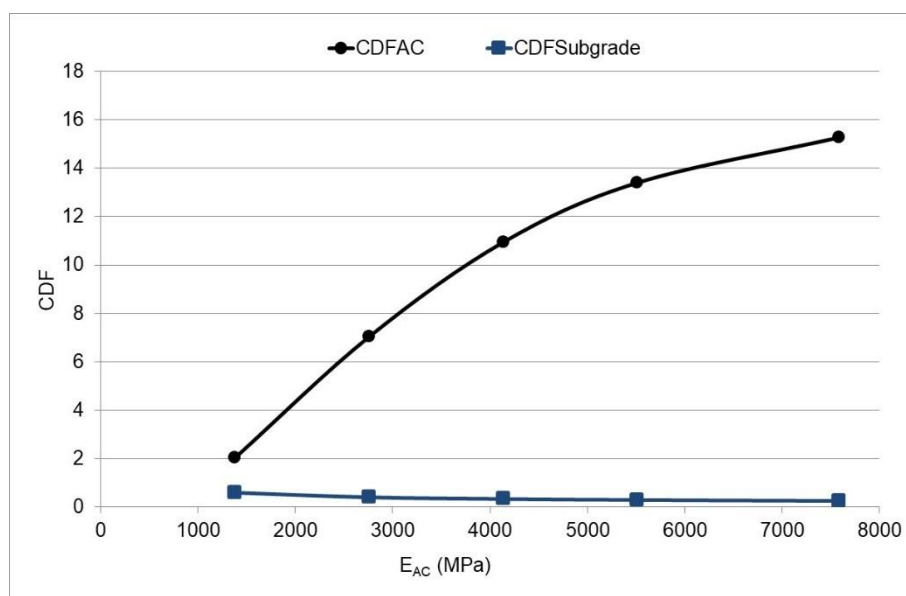
Μια γραφική απεικόνιση της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων συναρτήσει της θερμοκρασίας φαίνεται στην Εικόνα 5.3, όπου σημειώνονται οι τιμές που αντιστοιχούν σε θερμοκρασία  $10^{\circ}\text{C}$ ,  $15^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$  και  $32^{\circ}\text{C}$ .





**Εικόνα 5.3 Μεταβολή  $E_{AC}$  με θερμοκρασία**

Οι τιμές του  $E_{AC}$  που αντιστοιχούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από την οριζόμενη από την FAA χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της διατομής σχεδιασμού. Τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.4. Εφόσον οι τιμές του  $E_{AC}$  που χρησιμοποιούνται είναι μεγαλύτερες από την προεπιλεγμένη τιμή του FAARFIELD, θα ήταν αναμενόμενο το οδόστρωμα να παρουσιάζει χαμηλότερο δείκτη φθοράς ( $CDF_{AC} < 2.05$ ). Εντούτοις, η χρήση υλικών με βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά δείχνει να προκαλεί αύξηση του δείκτη  $CDF_{AC}$ . Από την ίδια Εικόνα προκύπτει επίσης ότι η χρήση βελτιωμένων υλικών έχει προκαλέσει μείωση της φθοράς της στρώσης έδρασης  $CDF_{subgrade}$ , όπως ήταν αναμενόμενο.



**Εικόνα 5.4 Επίδραση  $E_{AC}$  σε δείκτη CDF**

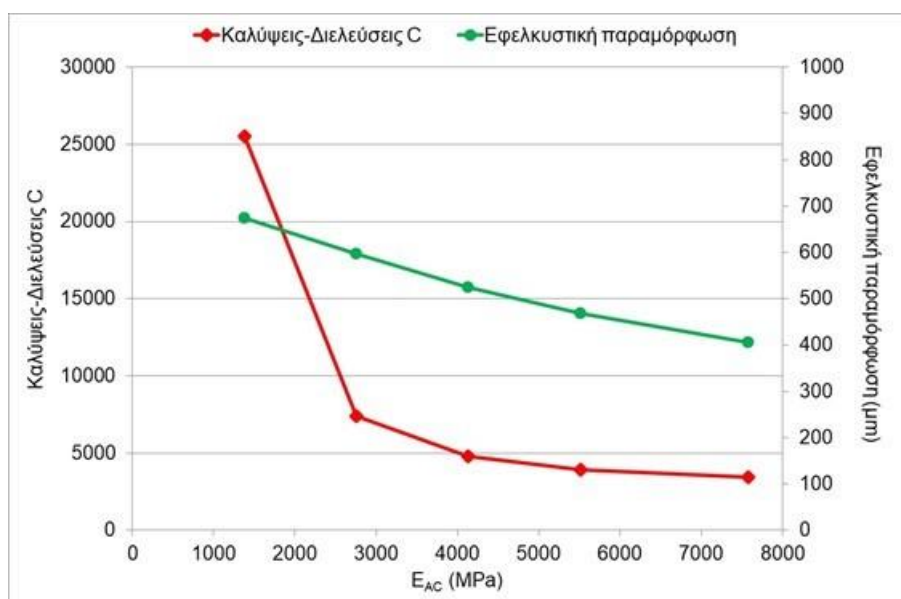
Προκειμένου να διερευνηθεί περαιτέρω η επίδραση της μεταβολής του  $E_{AC}$  στη φθορά των ασφαλικών στρώσεων, εξετάστηκαν οι παράμετροι που καθορίζουν την τιμή του δείκτη  $CDF_{AC}$ . Υπενθυμίζεται ότι ο δείκτης  $CDF$  ορίζεται ως ο λόγος των προβλεπόμενων προς τις επιτρεπόμενες διελεύσεις των αεροσκαφών. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία της FAA, ο αριθμός των επιτρεπόμενων καλύψεων-διελεύσεων έως την αστοχία προσδιορίζεται μέσω του νόμου κόπωσης των Heukelom & Klomp (εξίσωση 5.2):

$$\log_{10}(C) = 2.68 - 5 \times \log_{10}(\epsilon_h) - 2.665 \times \log_{10}(E_{AC}) \quad (\text{Εξ. 5.2})$$

Όπου  $C$ : ο επιτρεπόμενος αριθμός καλύψεων-διελεύσεων έως την αστοχία,  $\epsilon_h$ : η οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων και  $E_{AC}$ : το μέτρο ελαστικότητας των ασφαλικών στρώσεων.

Προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά του νόμου κόπωσης της εξίσωσης 5.2, ελήφθη υπόψη η απόκριση του οδοστρώματος (strain response analysis) εξαιτίας της μεταβολής του  $E_{AC}$ . Πιο συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν οι κρίσιμες οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα LEAF, το οποίο είναι ένα υπολογιστικό πρόγραμμα που βασίζεται στη θεωρία των ελαστικών στρώσεων και εκτελείται μέσω του FAARFIELD. Για την ανάλυση ελήφθη υπόψη ένα από τα τρία αεροσκάφη του αναμενόμενου κυκλοφοριακού φόρτου, δηλαδή ένα αεροσκάφος μονού τροχού, με μεικτό βάρος ίσο με 30800kg. Το υπόψη αεροσκάφος θεωρήθηκε αντιπροσωπευτικό της αναμενόμενης κυκλοφορίας για την ανάλυση, δεδομένου ότι συνέβαλε σε ποσοστό 99% στον συνολικό δείκτη αθροιστικής φθοράς  $CDF_{AC}$ . Τα αποτελέσματα της ανάλυσης φαίνονται στην Εικόνα 5.5 όπου παρατηρείται ότι η αύξηση του  $E_{AC}$  οδήγησε σε μείωση των αναπτυσσόμενων εφελκυστικών παραμορφώσεων, όπως ήταν αναμενόμενο.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε εκτίμηση των καλύψεων-διελεύσεων  $C$  έως την αστοχία των ασφαλικών στρώσεων μέσω της εξίσωσης 5.2, με βάση τις υπολογισμένες παραμορφώσεις και τις αντίστοιχες τιμές του  $E_{AC}$ . Τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται επίσης στην Εικόνα 5.5, όπου παρατηρείται ότι η αύξηση του  $E_{AC}$  οδηγεί σε μείωση των καλύψεων-διελεύσεων  $C$  έως την αστοχία, γεγονός που δεν μπορεί να θεωρηθεί λογικό, δεδομένου ότι η χρήση υλικών με καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά αναμένεται να συμβάλει υπέρ της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος.



**Εικόνα 5.5 Επίδραση μεταβολής  $E_{AC}$  σε παραμορφώσεις και καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία**

Δεδομένου ότι η φθορά των ασφαλτικών στρώσεων  $CDF_{AC}$  βασίζεται στο νόμο κόπωσης, διαφαίνεται ότι το μοντέλο που έχει ενσωματωθεί στο υπόψη λογισμικό μπορεί να προκαλεί αυτό το φαινόμενο στην περίπτωση διαφορετικών θεωρήσεων των υλικών. Ωστόσο, διεθνώς έχουν αναπτυχθεί αρκετά μοντέλα για τον χαρακτηρισμό της συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων. Για το λόγο αυτό, στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας χρησιμοποιήθηκαν και άλλοι νόμοι κόπωσης, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση διαφόρων θεωρήσεων στις διαδικασίες αξιολόγησης ενός οδοστρώματος.

### 5.3.1 Επίδραση μεταβολής νόμου κόπωσης ασφαλτομιγμάτων

Για τη διερεύνηση της επίδρασης της μεταβολής του νόμου κόπωσης ασφαλτομιγμάτων στη φθορά των ασφαλτικών στρώσεων επιλέχθηκαν τα μοντέλα των εξισώσεων 5.3-5.5. Σημειώνεται ότι δεδομένου ότι το λογισμικό FAARFIELD δεν παρέχει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης άλλων μοντέλων αστοχίας για την πραγματοποίηση της ανάλυσης, η υπόψη ανάλυση πραγματοποιήθηκε «χειροκίνητα». Πιο συγκεκριμένα, οι οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις ( $\varepsilon_h$ ) που αναπτύχθηκαν στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας το λογισμικό LEAF και εισήχθησαν στα μοντέλα αστοχίας για την εκτίμηση των καλύψεων-διελεύσεων έως την αστοχία. Λαμβάνοντας επίσης υπόψη τον λόγο P/C που παρέχεται από το FAARFIELD, υπολογίστηκε η τιμή  $CDF_{AC}$ .

Νόμος κόπωσης Shell (Huang 1993):

$$C = 0.0685 \times \varepsilon_h^{-5.671} \times E_{AC}^{-2.363} \quad (\text{Εξ. 5.3})$$

Νόμος κόπωσης Transport and Road Research Laboratory (TRRL) (Powell et al. 1984):

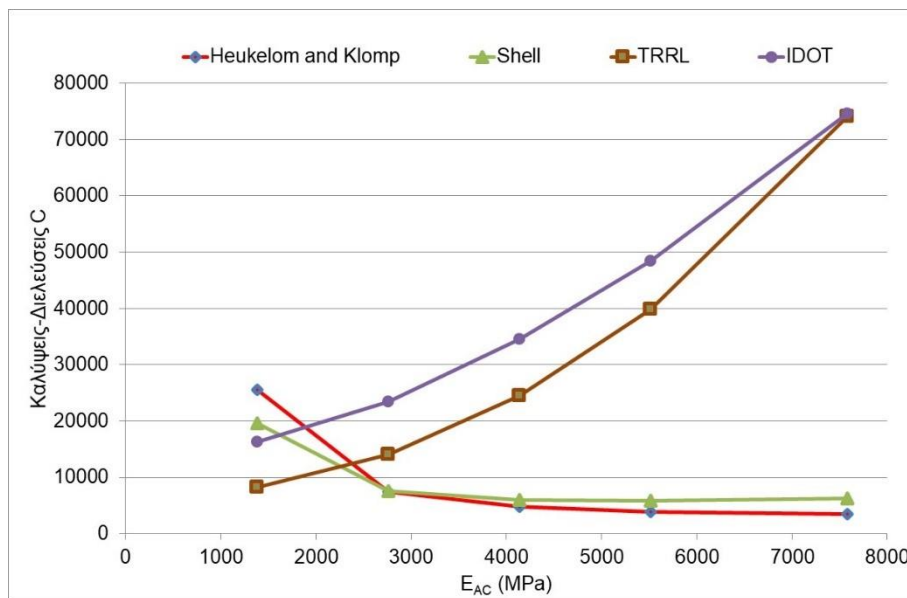
$$C = 1.66 \times 10^{-10} \times \varepsilon_h^{-4.32} \quad (\text{Εξ. 5.4})$$

Νόμος κόπωσης Illinois Department of Transportation (IDOT) (Thompson 1999):

$$C = 5 \times 10^{-6} \times \varepsilon_h^{-3} \quad (\text{Εξ. 5.5})$$

Όπου C: καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία,  $\varepsilon_h$ : η οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων και  $E_{AC}$ : το μέτρο ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων

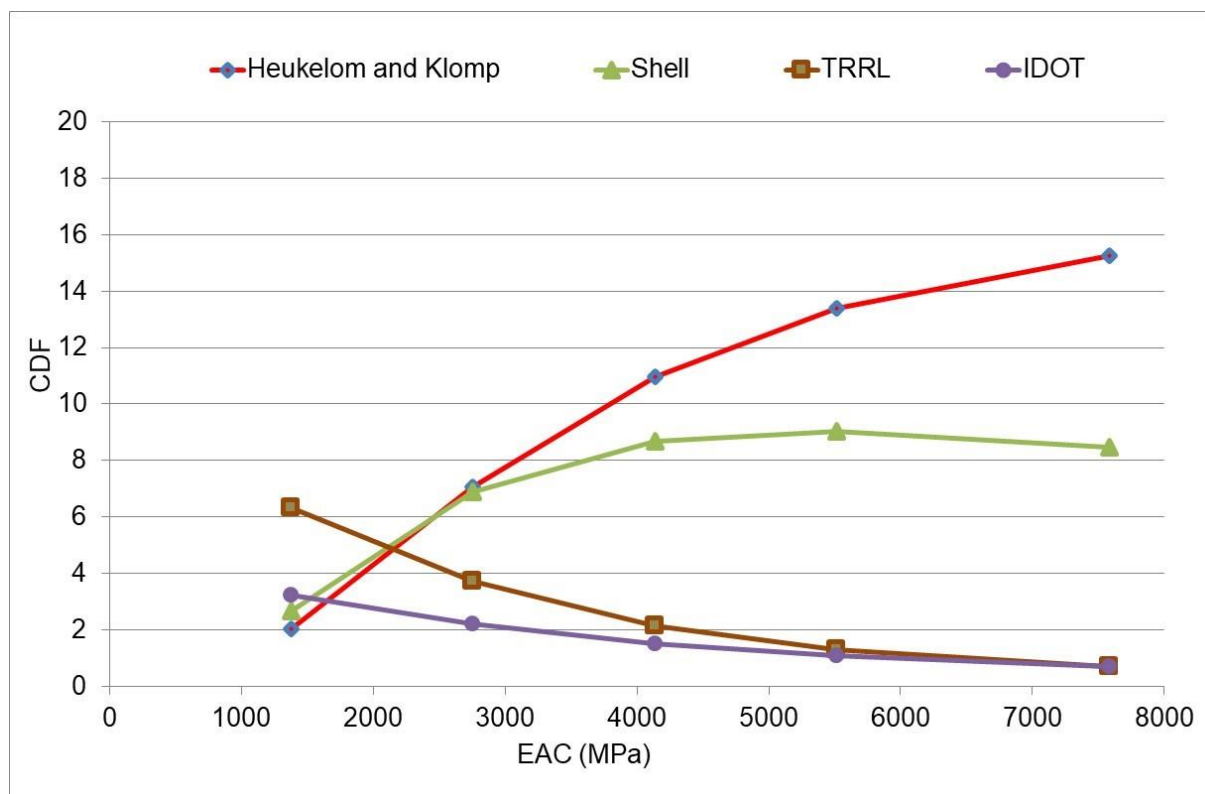
Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της χρήσης διαφορετικών νόμων κόπωσης στην αξιολόγηση της διατομής σχεδιασμού του οδοστρώματος υπολογίστηκαν οι καλύψεις-διελεύσεις C έως την αστοχία (Εικόνα 5.6). Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι η μεταβολή του  $E_{AC}$  επηρεάζει με ένα μη αναμενόμενο τρόπο τον αριθμό των καλύψεων-διελεύσεων έως την αστοχία που προκύπτουν από τους νόμους κόπωσης «Heukelom & Klomp» και «Shell». Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση του  $E_{AC}$  προκαλεί μείωση των καλύψεων-διελεύσεων έως την αστοχία. Παρατηρείται ότι και στους δύο νόμους εκτός από τις παραμορφώσεις λαμβάνεται υπόψη και το  $E_{AC}$ . Συνεπώς η συνδυαστική επίδραση τους πιστεύεται ότι προκαλεί αυτές τις αποκλίσεις.



**Εικόνα 5.6 Επίδραση  $E_{AC}$  στις καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία για διάφορους νόμους κόπωσης**

Για τις υπολογιζόμενες καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία εκτιμήθηκε επίσης ο δείκτης  $CDF_{AC}$  και τα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 5.7. Από τη σχετική ανάλυση προκύπτει

ότι η αύξηση του  $E_{AC}$  προκαλεί αντίστοιχη αύξηση του δείκτη  $CDF_{AC}$  που προκύπτει από τους νόμους κόπωσης «Heukelom & Klomp» και «Shell».



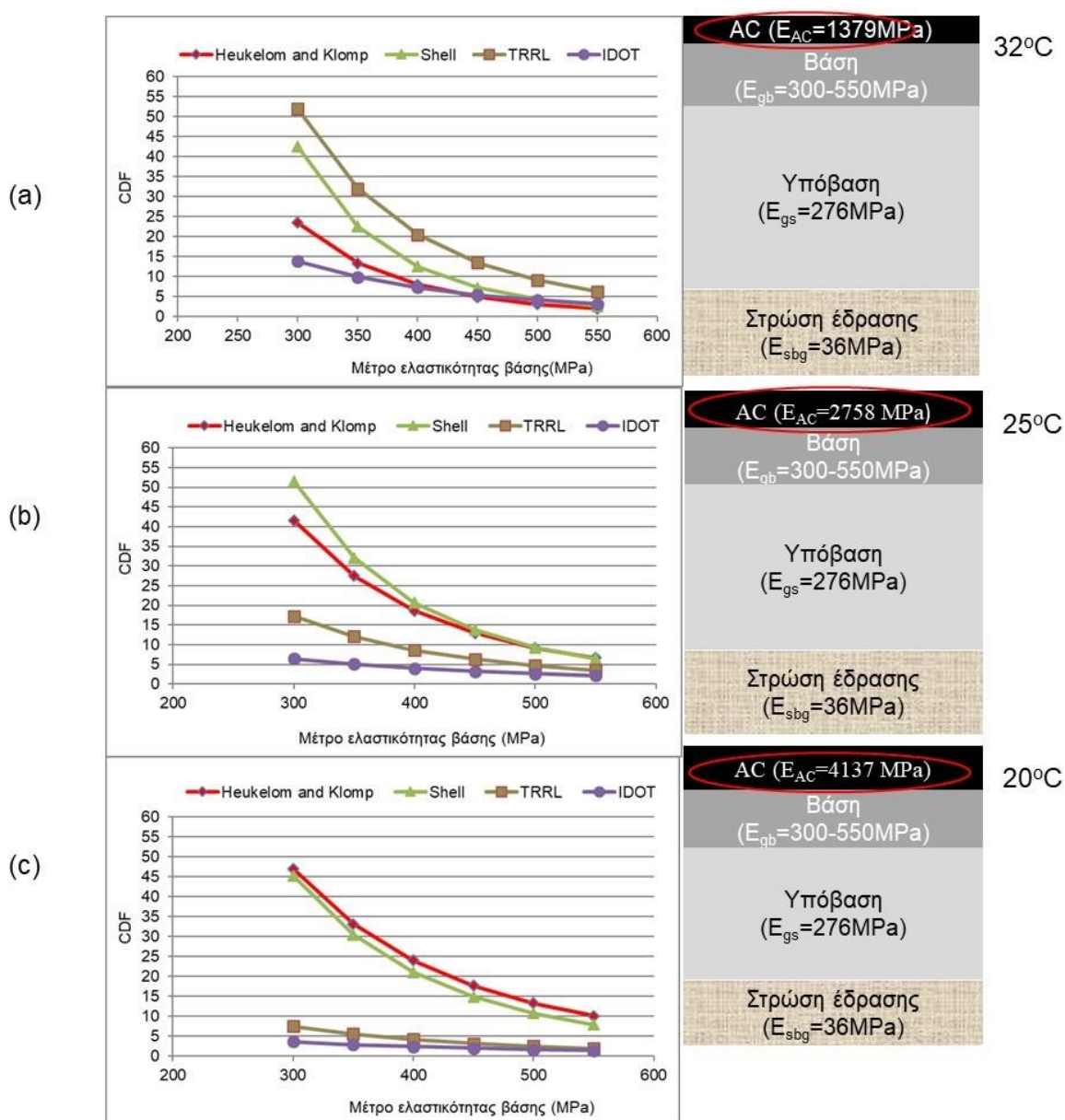
**Εικόνα 5.7 Επίδραση  $E_{AC}$  σε  $CDF_{AC}$  για διάφορους νόμους κόπωσης**

Η τάση μεταβολής της φθοράς εξαιτίας της αύξησης του  $E_{AC}$  και της χρήσης διαφορετικών νόμων κόπωσης διερευνήθηκε περαιτέρω λαμβάνοντας υπόψη και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των στρώσεων από ασύνδετο αμμοχάλικο. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε σχετική ανάλυση ευαισθησίας η οποία παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

### **5.3.2 Επίδραση μεταβολής μέτρου ελαστικότητας στρώσης βάσης από ασύνδετα αμμοχάλικα**

Στο πλαίσιο της περαιτέρω διερεύνησης της επίδρασης διαφορετικών νόμων κόπωσης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας του δείκτη  $CDF_{AC}$  με βάση τη μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν οι διατομές που φαίνονται στην Εικόνα 5.8. Για την ανάλυση θεωρήθηκαν τιμές του μέτρου ελαστικότητας της βάσης που κυμαίνονταν από 300 MPa έως 550 MPa, αντιπροσωπευτικές των υλικών που χρησιμοποιούνται συνήθως. Επιπλέον, η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για θερμοκρασία 32°C, 25°C και 20°C ώστε να ληφθεί υπόψη και η επίδραση της θερμοκρασίας στις τιμές του  $E_{AC}$ .

Από την ανάλυση προκύπτει ότι η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας της βάσης προκαλεί μείωση του δείκτη  $CDF_{AC}$  για όλους τους νόμους κόπωσης, γεγονός που θεωρείται λογικό. Αντίστοιχη τάση παρατηρήθηκε και κατά τον υπολογισμό των καλύψεων-διελεύσεων έως την αστοχία για όλους τους νόμους κόπωσης, ο οποίος πραγματοποιήθηκε κατά το ενδιάμεσο στάδιο προσδιορισμού του  $CDF_{AC}$ . Σε όλες τις περιπτώσεις η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας της βάσης προκάλεσε αύξηση των καλύψεων-διελεύσεων έως την αστοχία. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι οι διακυμάνσεις που παρουσιάζονται στη συμπεριφορά του μοντέλου «Heukelom & Klomp» προκαλούνται λόγω της συνδυαστικής επίδρασης των παραμορφώσεων και του  $E_{AC}$  στις καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία. Ωστόσο, σε περιπτώσεις που το  $E_{AC}$  διατηρείται σταθερό οι υπόψη διακυμάνσεις εξαλείφονται.



**Εικόνα 5.8 Επίδραση μεταβολής μέτρου ελαστικότητας βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο στο δείκτη  $CDF_{AC}$  για θερμοκρασίες 32°C, 25°C και 20°C**

Από την Εικόνα 5.8 προκύπτει ότι η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών νόμων κόπωσης μειώνεται για τιμές του μέτρου ελαστικότητας της βάσης περίπου ίσου με 550 MPa. Επιπλέον, η αύξηση του  $E_{AC}$  οδηγεί σε σύγκλιση των αποτελεσμάτων των νόμων κόπωσης «Heukelom & Klomp» και «Shell» καθώς και σε σύγκλιση των αποτελεσμάτων των νόμων κόπωσης «TRRL» και «IDOT» (Εικόνα 5.8c).

#### 5.4 Σχόλια- Παρατηρήσεις

Από την παρούσα διερεύνηση προκύπτει ότι η θεώρηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών των επιμέρους στρώσεων ενός οδοστρώματος επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αξιολόγηση μιας διατομής. Προς τούτο πιστεύεται ότι ο όσο το δυνατόν ακριβέστερος προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών που χρησιμοποιούνται σε μία χώρα μπορεί να συμβάλει σε μία πιο ορθολογική θεώρηση της συμπεριφοράς των υλικών στο πλαίσιο της αξιολόγησης του οδοστρώματος. Επιπλέον πολύ σημαντική είναι και η θεώρηση της συμπεριφοράς ενός υλικού μέσω του προσδιορισμού του μοντέλου αστοχίας. Το συμπέρασμα αυτό προέκυψε από τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας του δείκτη CDF των ασφαλτικών στρώσεων χρησιμοποιώντας μοντέλα αστοχίας από τη διεθνή εμπειρία και πρακτική.

Η παραπάνω προκαταρκτική διερεύνηση θα μπορούσε να είναι χρήσιμη στο πλαίσιο της αξιολόγησης της φέρουσας ικανότητας ενός νέου οδοστρώματος για τη διασφάλιση της ποιότητάς του (Quality Control and Quality Assurance (QC/QA)). Σε αυτή την περίπτωση ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών του οδοστρώματος μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω επιτόπου μετρήσεων με συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών (Non Destructive Testing (NDT)). Σχετική διαδικασία προσδιορισμού της επιτόπου κατάστασης ενός οδοστρώματος αεροδρομίου παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο κατά το οποίο η ανάλυση επεκτείνεται λαμβάνοντας υπόψη και την εξέλιξη της αναλυτικής μεθόδου της FAA κυρίως όσον αφορά στη μεταβολή του νόμου κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων.

## **6 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ ΤΗΣ FAA**

---

### **6.1 Γενική περιγραφή**

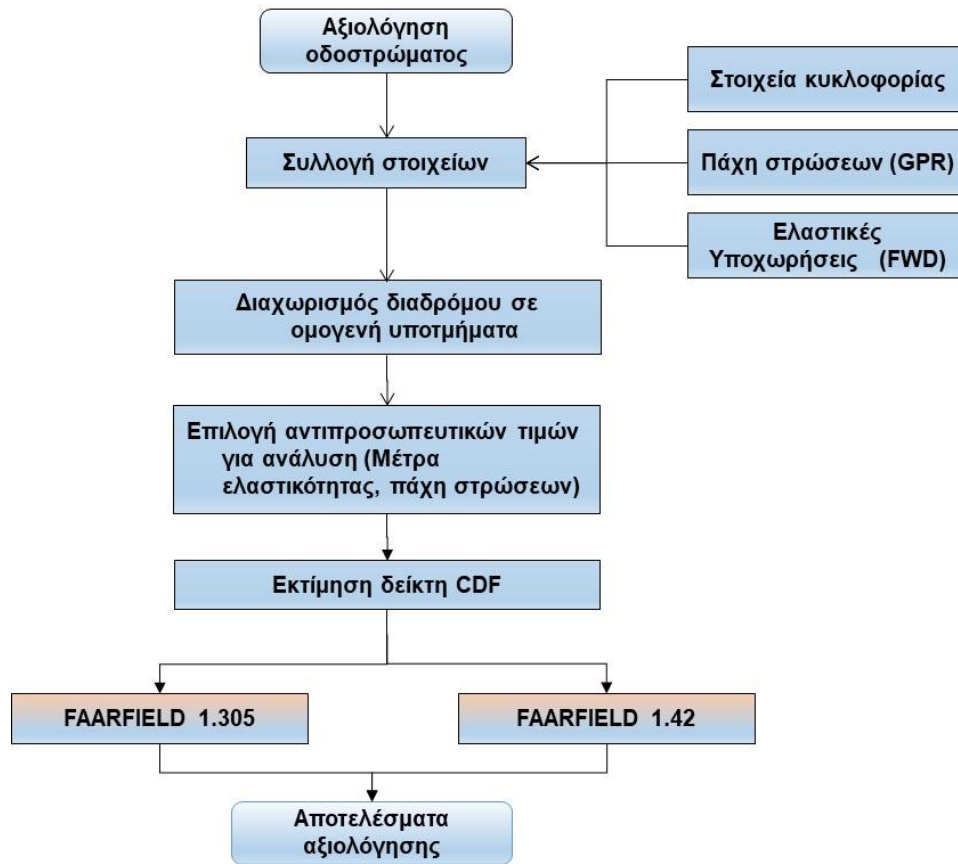
Με πρωταρχικό στόχο την περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης της θεώρηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος στις διαδικασίες αξιολόγησης υφιστάμενων οδοστρωμάτων, πραγματοποιήθηκε πείραμα πεδίου για την καταγραφή της επιτόπου κατάστασης του οδοστρώματος του διαδρόμου Π/Α αεροσκαφών του αεροδρομίου που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 5.

Η διαδικασία αξιολόγησης οδοστρωμάτων που παρουσιάζεται στην παρούσα διερεύνηση βασίζεται στη χρήση μη καταστρεπτικών δοκιμών για την εκτίμηση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος με βάση τη διεθνή εμπειρία και πρακτική (FAA 2011). Για την αξιολόγηση του οδοστρώματος απαιτούνται στοιχεία όπως: κυκλοφοριακά δεδομένα, πάχη στρώσεων οδοστρώματος και στοιχεία ελαστικών υποχωρήσεων. Τα κυκλοφοριακά στοιχεία συνήθως λαμβάνονται από τις αρχές του αεροδρομίου, ενώ τα στοιχεία του οδοστρώματος λαμβάνονται με χρήση μη καταστρεπτικών δοκιμών. Τα πάχη των στρώσεων προσδιορίζονται μέσω ανάλυσης των καταγραφών που συλλέγονται μέσω του (GPR) και οι ελαστικές υποχωρήσεις με μετρήσεις με το (FWD).

Τα παραπάνω στοιχεία συνδυάζονται για τον υπολογισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος, τα οποία είναι κρίσιμα στοιχεία για την αξιολόγηση του οδοστρώματος. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την αξιολόγηση της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος, η οποία βασίζεται στις οδηγίες της FAA (FAA 2011), φαίνεται στην Εικόνα 6.1.

Δεδομένου ότι κατά τη χρονική περίοδο εκπόνησης της παρούσας διερεύνησης τέθηκε σε εφαρμογή η εξελιγμένη αναλυτική διαδικασία αξιολόγησης οδοστρωμάτων της FAA (FAA 2016), η ανάλυση πραγματοποιήθηκε και για τις δύο αναλυτικές μεθοδολογίες (FAARFIELD 1.305 και FAARFIELD 1.42). Η σχετική διερεύνηση, εκτός άλλων, στοχεύει στην ανάδειξη της επίδρασης της εξέλιξης της αναλυτικής μεθόδου της FAA στην αξιολόγηση οδοστρωμάτων αεροδρομίων (Loizos et al. 2019).





**Εικόνα 6.1 Μεθοδολογία αξιολόγησης οδοστρώματος**

## 6.2 Συλλογή στοιχείων

Τα κυκλοφοριακά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση του οδοστρώματος του διαδρόμου Π/Α αεροσκαφών του αεροδρομίου δόθηκαν από τις αρχές του αεροδρομίου. Πιο συγκεκριμένα, περιλάμβαναν τους τύπους των αεροσκαφών που επρόκειτο να χρησιμοποιήσουν το οδόστρωμα του διαδρόμου Π/Α αεροσκαφών για μια περίοδο σχεδιασμού 20 ετών καθώς και τις ετήσιες αναχωρήσεις του καθενός. Το οδόστρωμα αναμενόταν να εξυπηρετεί κινήσεις τριών τύπων αεροσκαφών, με διαφορετικά συστήματα τροχών.

Για την προσδιορισμό της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με το παραμορφοσίμετρο πίπτοντος βάρους (FDW) και με το γεωραντάρ (GPR) (Εικόνα 6.2). Για τις μετρήσεις με το FWD χρησιμοποιήθηκε πλάκα διαμέτρου 30cm και φορτίο ίσο με 100kN. Οι ελαστικές υποχωρήσεις καταγράφηκαν σε εννέα γεώφωνα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ανά 50m εκατέρωθεν του κεντρικού άξονα του διαδρόμου Π/Α αεροσκαφών και σε αποστάσεις 2m και 15m, καθώς η υπόψη περιοχή θεωρήθηκε ότι φέρει το μεγαλύτερο μέρος της κυκλοφορίας των αεροσκαφών και παρουσιάζει τη μεγαλύτερη καταπόνηση.



**Εικόνα 6.2 Μετρήσεις FWD και GPR στο διάδρομο Π/Α αεροσκαφών**

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων FWD πραγματοποιήθηκαν καταγραφές της θερμοκρασίας στο μέσο του πάχους των ασφαλτικών στρώσεων, στοιχεία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση. Οι μετρήσεις με το γεωραντάρ GPR πραγματοποιήθηκαν στα ίδια τέσσερα ίχνη καταγραφών με το FWD, χρησιμοποιώντας δύο κεραίες 1000MHz και 400MHz για την παροχή των απαιτούμενων δεδομένων (Εικόνα 6.2) .

### 6.3 Επεξεργασία στοιχείων συλλογής

#### 6.3.1 Διατομή οδοστρώματος

Από την ανάλυση των δεδομένων συλλογής με το GPR με τη χρήση εξειδικευμένου λογισμικού προέκυψε το πάχος των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος για κάθε θέση μέτρησης με το FWD. Η διατομή του οδοστρώματος αποτελούνταν από ασφαλτικές στρώσεις, βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο, υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο και τη στρώση έδρασης (Εικόνα 6.3).



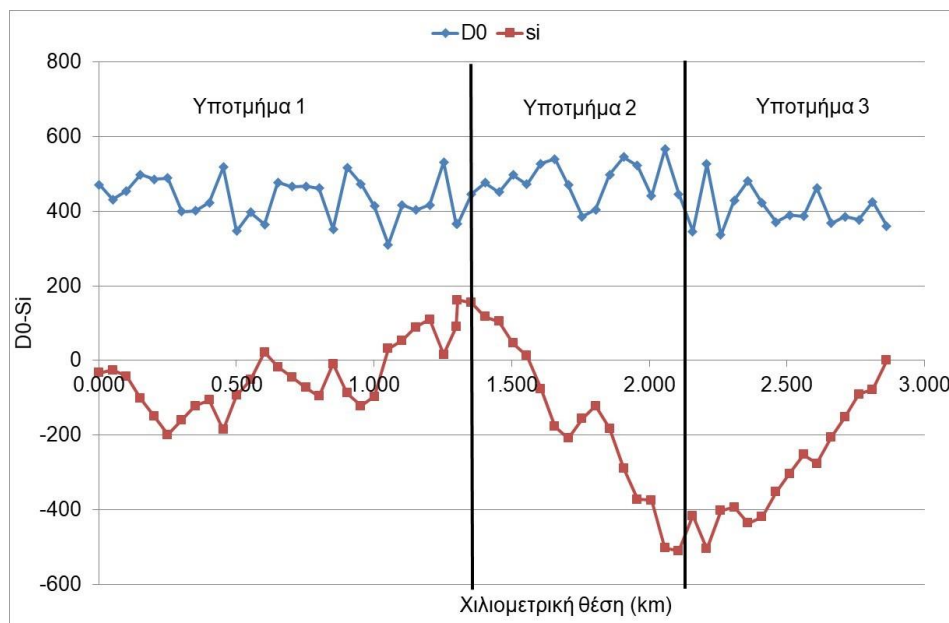
**Εικόνα 6.3 Διατομή οδοστρώματος**

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν αναλύθηκαν περαιτέρω προκειμένου να εκτιμηθεί η δομική κατάσταση του οδοστρώματος ακολουθώντας τη διαδικασία που αναφέρθηκε παραπάνω.

### 6.3.2 Διαχωρισμός σε ομογενή υποτμήματα

Αρχικά το οδόστρωμα του διαδρόμου χωρίστηκε σε ομοιογενή υποτμήματα με βάση τα στοιχεία των ελαστικών υποχωρήσεων και συγκεκριμένα τον δείκτη  $D_0$ . Ο δείκτης  $D_0$  αντιστοιχεί στη μέγιστη ελαστική υποχώρηση που καταγράφεται στο κέντρο επιβολής του φορτίου και αντιπροσωπεύει τη συνολική κατάσταση του οδοστρώματος. Για την εκτίμηση του υπόψη δείκτη, πραγματοποιήθηκε αναγωγή των μετρημένων ελαστικών υποχωρήσεων στο φορτίο της δοκιμής 100kN και σε θερμοκρασία αναφοράς ίση με 20°C, χρησιμοποιώντας κατάλληλους συντελεστές αναγωγής από τη διεθνή πρακτική (COST 336, 1998). Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη δεδομένου ότι η συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία και το φορτίο επιβολής.

Για τον διαχωρισμό του διαδρόμου σε ομογενή υποτμήματα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των Αθροιστικών Αποκλίσεων (Cumsum: Cumulative Sums). Η υπόψη μέθοδος απαιτεί την γραφική παράσταση των αποκλίσεων από τον μέσο όρο μιας παραμέτρου και γίνεται διαχωρισμός του τμήματος σε ομογενή υποτμήματα, με βάση την κλίση του γραφήματος. Ωστόσο, η διαφορά μεταξύ δύο γειτονικών τμημάτων μπορεί να μην είναι σημαντική και η στατιστική διαφορά γειτονικών τμημάτων μπορεί να ελεγχθεί με το t-test. Για κάθε υποτμήμα υπολογίζεται ο αριθμός των μετρήσεων, ο μέσος όρος, η διάμεσος και η διακύμανση. Με την εκτίμηση της σταθμισμένης διακύμανσης δύο γειτονικών υποτμημάτων, μπορεί να προσδιοριστεί η ομοιογένειά τους. Στην Εικόνα 6.4 φαίνεται η εφαρμογή της μεθόδου των αθροιστικών αποκλίσεων (Cumsum) για τον διαχωρισμό ενός ίχνους μετρήσεων με το FWD σε τρία ομογενή υποτμήματα.

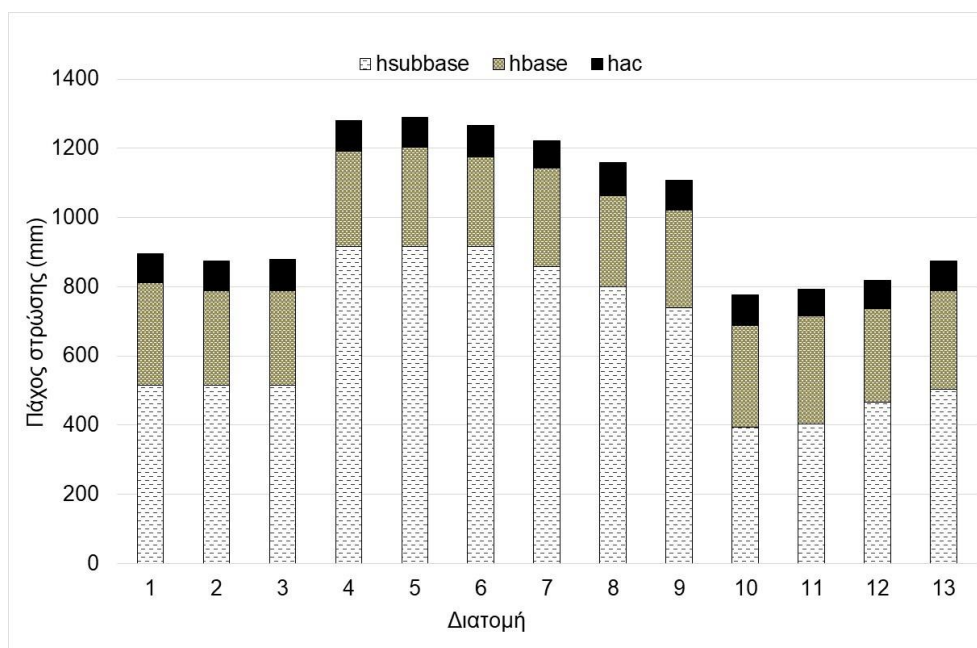


**Εικόνα 6.4 Διαχωρισμός ίχνους διαδρόμου σε ομογενή υποτμήματα**

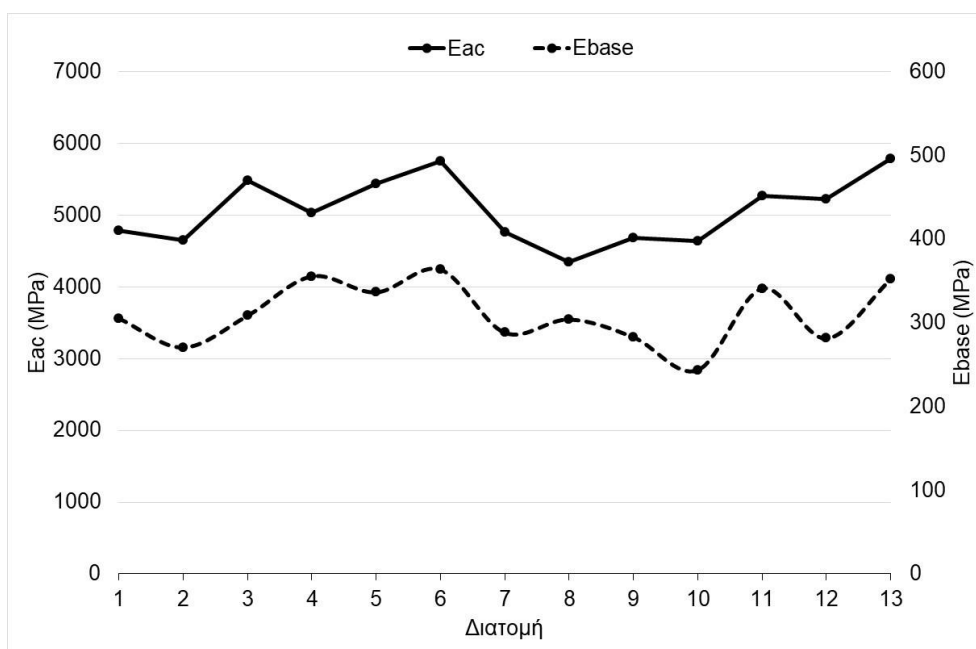
Από την εφαρμογή της υπόψη μεθόδου στο σύνολο των ιχνών καταγραφής του διαδρόμου προέκυψαν συνολικά 13 υποτομήματα.

### 6.3.3 Εκτίμηση μηχανικών χαρακτηριστικών οδοστρώματος και φθοράς

Σε κάθε ένα ομογενές υποτομήμα επιλέχθηκαν χαρακτηριστικές τιμές των παχών και των μέτρων ελαστικότητας των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος. Ως χαρακτηριστική τιμή ελήφθη ο μέσος όρος μείον μία τυπική απόκλιση με βάση σχετική σύσταση της FAA. Στην Εικόνα 6.5 φαίνονται τα πάχη των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος και στην Εικόνα 6.6 τα μέτρα ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων και της στρώσης βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο, όπως προέκυψαν από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού. Παρατηρείται ότι οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων κυμάνθηκαν περίπου στο εύρος 4300-5700MPa, που διαφέρουν από την αρκετά συντηρητική επιλογή της τιμής  $E_{ac}=1379\text{MPa}$  του τυπικού υλικού της FAA.



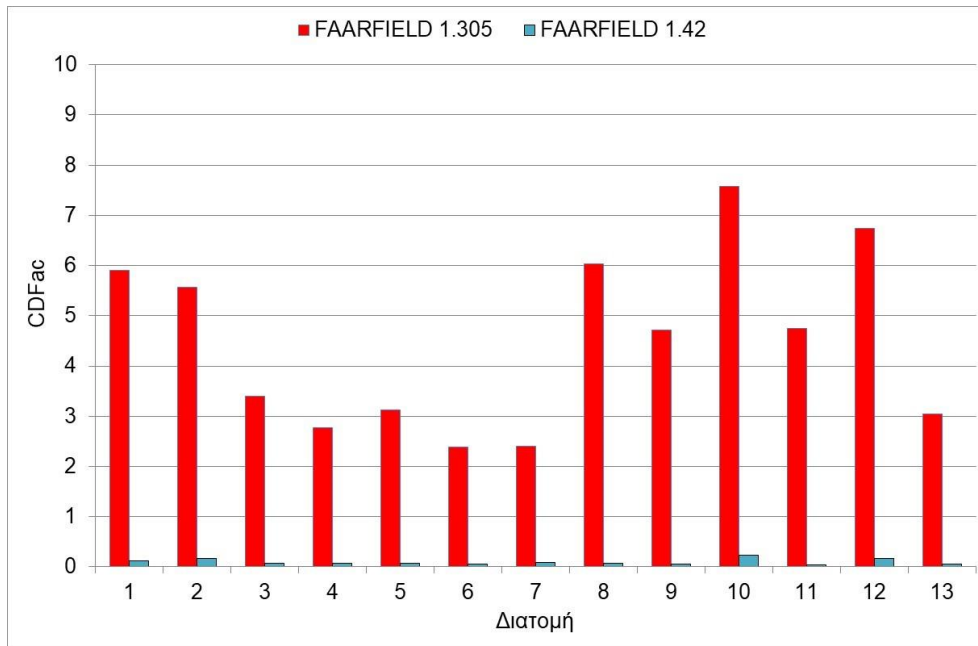
**Εικόνα 6.5 Πάχη στρώσεων αντιπροσωπευτικών διατομών**



**Εικόνα 6.6 Μέτρα ελαστικότητας στρώσεων αντιπροσωπευτικών διατομών**

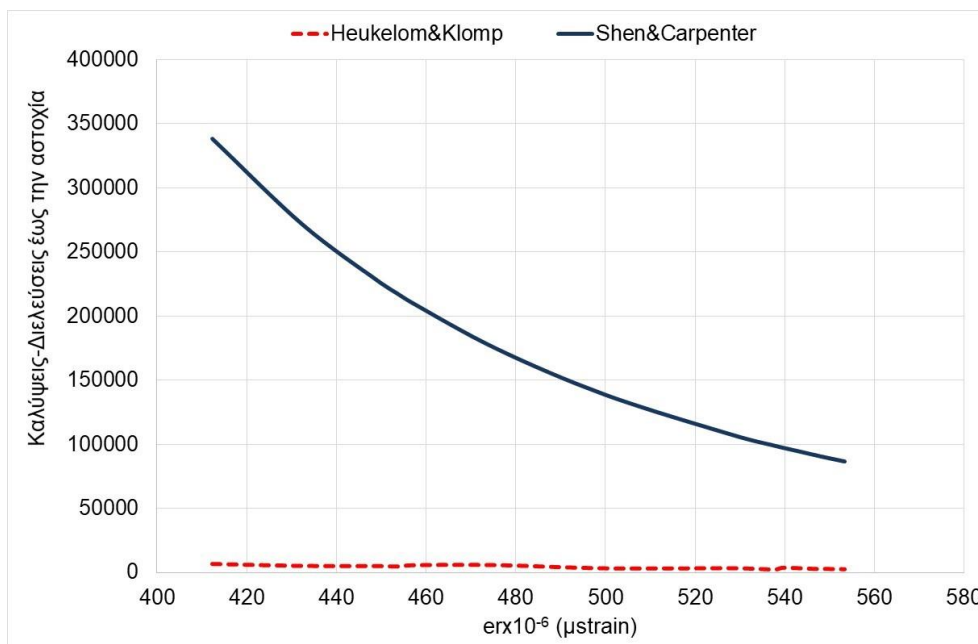
Η αξιολόγηση του οδοστρώματος πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το λογισμικό FAARFIELD. Δεδομένου ότι η παρούσα διερεύνηση πραγματοποιήθηκε σε ένα μεταβατικό στάδιο εξέλιξης της μεθοδολογίας της FAA, η σχετική ανάλυση πραγματοποιήθηκε τόσο με την ισχύουσα μεθοδολογία και το λογισμικό FAARFIELD 1.305 (FAARFIELD 2010) όσο και με την επικαιροποιημένη διαδικασία που εισήχθη σε πιλοτική φάση εφαρμογής το 2017 μέσω του λογισμικού FAARFIELD 1.42 (FAARFIELD 2017). Το υφιστάμενο οδόστρωμα ελέγχθηκε τόσο έναντι αστοχίας των ασφαλτικών στρώσεων όσο και έναντι αστοχίας της στρώσης έδρασης μέσω του δείκτη φθοράς CDF που περιλαμβάνεται στις διαδικασίες αξιολόγησης οδοστρωμάτων της FAA.

Από την παραπάνω εφαρμογή προέκυψε ότι ο δείκτης φθοράς της στρώσης έδρασης είναι  $CDF_{\text{subgrade}}=0$  για όλες τις διατομές και για τα δύο εργαλεία υπολογισμού, επομένως η στρώση έδρασης θεωρήθηκε δομικά επαρκής. Όσον αφορά στο δείκτη φθοράς των ασφαλτικών στρώσεων  $CDF_{\text{ac}}$ , τα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 6.7. Σύμφωνα με τη σχετική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με το FAARFIELD 1.305, όλα τα υπομήματα παρουσίασαν  $CDF_{\text{ac}}>1$ , που σημαίνει ότι το οδόστρωμα αναμένεται να αστοχήσει πριν το τέλος της περιόδου σχεδιασμού. Ωστόσο, σύμφωνα με την αξιολόγηση που πραγματοποιήθηκε με το FAARFIELD 1.42, όλες οι διατομές παρουσίασαν  $CDF_{\text{ac}}<1$ , που σημαίνει ότι είναι δομικά επαρκείς.



**Εικόνα 6.7 Αποτελέσματα CDFac**

Από την Εικόνα 6.7 παρατηρείται μεγάλη διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων από τη χρήση της εξελιγμένης αναλυτικής διαδικασίας (FAARFIELD 1.42). Το γεγονός αυτό οφείλεται στον διαφορετικό νόμο κόπωσης των «Shen & Carpenter» που έχει ενσωματωθεί στο λογισμικό FAARFIELD 1.42, σε σχέση με τον νόμο κόπωσης των «Heukelom & Klomp» που περιλαμβάνεται στην αρχική αναλυτική διαδικασία αξιολόγησης οδοστρωμάτων (FAARFIELD 1.305).

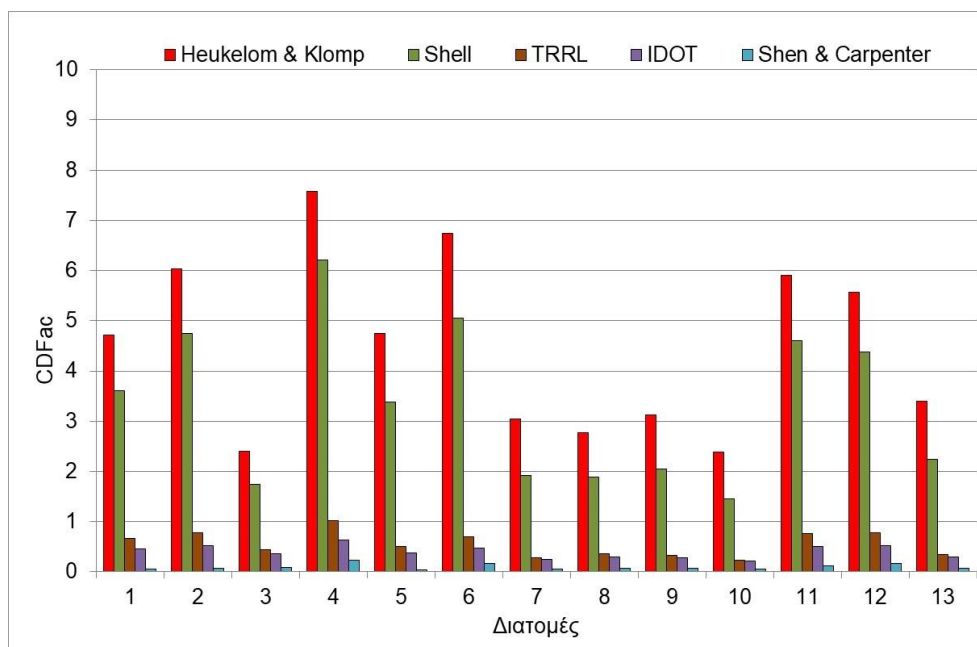


**Εικόνα 6.8 Καλύψεις-διελεύσεις έως την αστοχία για νόμους κόπωσης ασφαλτομιγμάτων**

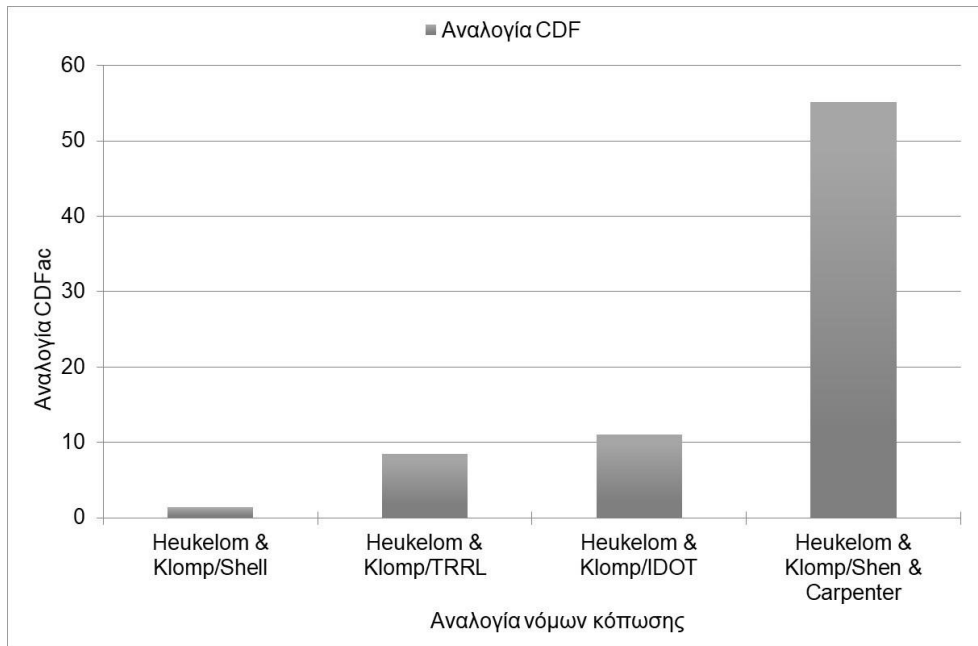
Στην Εικόνα 6.8 φαίνεται η μεταβολή των καλύψεων-διελεύσεων έως την αστοχία συναρτήσει της αναπτυσσόμενης οριζόντιας εφελκυστικής παραμόρφωσης στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων για τους δύο νόμους κόπωσης. Παρατηρείται ότι ο νόμος κόπωσης των «Heukelom & Klomp» επιτρέπει σημαντικά μικρότερο αριθμό διελεύσεων από το νόμο κόπωσης των «Shen & Carpenter» γεγονός το οποίο εξηγεί την διαφοροποίηση των φθορών που φαίνονται στην Εικόνα 6.7.

### 6.3.4 Επίδραση νόμων κόπωσης ασφαλτομιγμάτων

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο νόμος κόπωσης των «Heukelom & Klomp» που είχε ενσωματωθεί στην αρχική αναλυτική διαδικασία αξιολόγησης οδοστρωμάτων της FAA είναι ιδιαίτερα συντηρητικός. Στη συνέχεια διερευνήθηκε η επίδραση της θεώρησης διαφορετικών νόμων στο δείκτη φθοράς των ασφαλικών στρώσεων  $CDF_{ac}$ . Από την Εικόνα 6.9 παρατηρείται ότι ο νόμος του «Shell» προσεγγίζει τα αποτελέσματα του νόμου «Heukelom & Klomp» ενώ ο νόμος των «Shen & Carpenter» οδηγεί στο μεγαλύτερο αριθμό επιτρεπόμενων καλύψεων-διελεύσεων  $C$  έως την αστοχία. Με στόχο την ποσοτικοποίηση των διαφορών των νόμων κόπωσης όσον αφορά στη φθορά των ασφαλικών στρώσεων πραγματοποιήθηκε εκτίμηση του μέσου λόγου των φθορών των αντίστοιχων νόμων ως προς το νόμο των «Heukelom & Klomp» και τα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 6.10.



Εικόνα 6.9 Επίδραση νόμων κόπωσης ασφαλτομιγμάτων στη φθορά



**Εικόνα 6.10 Αναλογία φθορών διαφόρων νόμων κόπωσης ως προς το νόμο των «Heukelom & Klomp»**

Από την αναλογία των φθορών των νόμων κόπωσης προκύπτει ότι η φθορά που προέκυψε από το νόμο των «Heukelom & Klomp» που είχε αρχικά ενσωματωθεί στην αναλυτική διαδικασία της FAA είναι σχεδόν 50 φορές μεγαλύτερη της φθοράς που προκύπτει από το νόμο των «Shen & Carpenter» που τον αντικατέστησε.

#### 6.4 Σχόλια- Παρατηρήσεις

Από την παρούσα ανάλυση προέκυψε ότι η επιλογή της διαδικασίας αξιολόγησης ενός οδοστρώματος αεροδρομίου μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στο αποτέλεσμα της διερεύνησης και συνεπώς στη διαχείριση του οδοστρώματος του αεροδρομίου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην εξέλιξη του νόμου κόπωσης που περιγράφει τη συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων, το οποίο είναι ένα από τα βασικά κριτήρια αξιολόγησης. Η παρούσα μελέτη δείχνει ότι ο πιο πρόσφατος νόμος κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων είναι λιγότερο συντηρητικός από τον προηγούμενο και μπορεί να επηρεάσει τη λήψη αποφάσεων από τις αρχές του αεροδρομίου όσον αφορά στη διαχείριση του οδοστρώματος του αεροδρομίου.

Η παρούσα έρευνα οδηγεί επίσης στο συμπέρασμα ότι η συστηματική εφαρμογή της αρχικής αναλυτικής προσέγγισης αξιολόγησης που χρησιμοποιήθηκε για περίπου οκτώ χρόνια μέσω του FAARFIELD 1.305 μπορεί να οδήγησε σε στρατηγικές διαχείρισης οδοστρώματος αεροδρομίων που λειτουργούσαν υπέρ της ασφάλειας της συμπεριφοράς του οδοστρώματος.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις αποκτούν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τις αρχές ενός αεροδρομίου αν αναλογιστεί κανείς ότι ο σχεδιασμός του υπόψη οδοστρώματος είχε πραγματοποιηθεί με



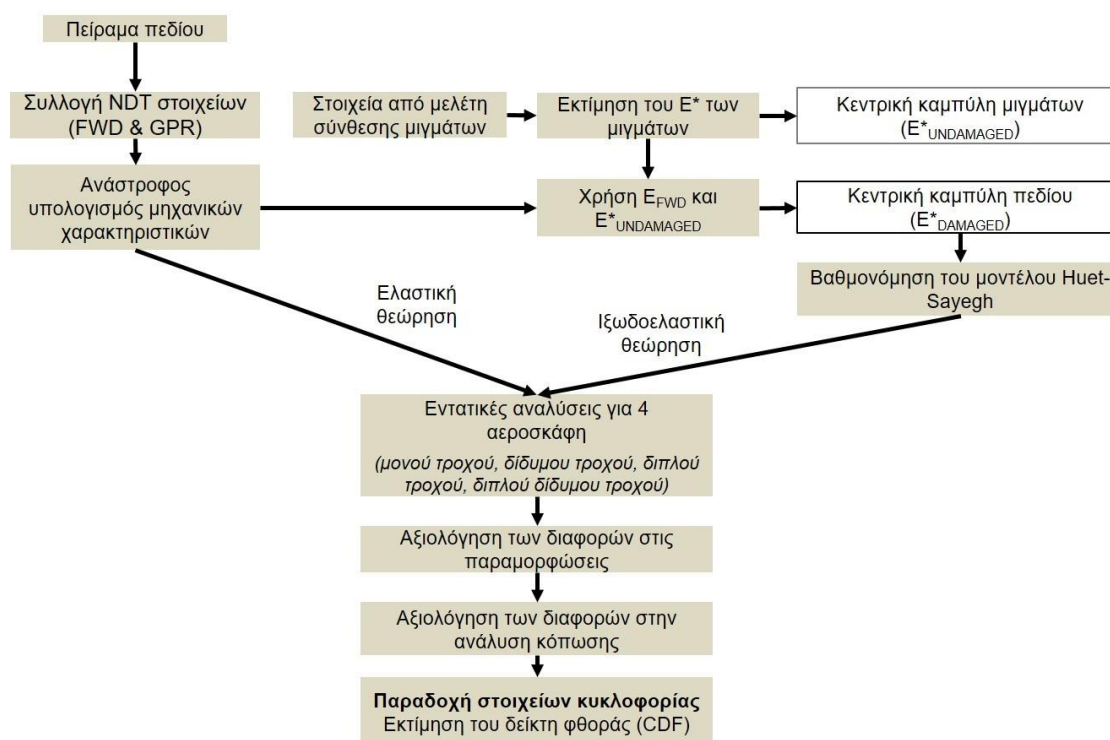
βάση την εμπειρική μέθοδο της FAA και συχνά προκύπτει η ανάγκη αξιολόγησης τέτοιων οδοστρωμάτων αξιοποιώντας τις νέες εξελιγμένες αναλυτικές διαδικασίες αξιολόγησης που έχουν αναπτυχθεί.

Σημειώνεται ότι μέσω της χρήσης των μη καταστρεπτικών δοκιμών και της σχετικής ανάλυσης είναι δυνατός ο ακριβέστερος προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος, τα οποία αποτελούν απαραίτητο στοιχείο για την ορθή αξιολόγηση ενός οδοστρώματος. Εντούτοις, ακόμα και οι πιο εξελιγμένες διαδικασίες αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων στην παρούσα φάση βασίζονται στην ελαστική θεώρηση της συμπεριφοράς των ασφαλτικών στρώσεων. Προς τούτο στην συνέχεια διερευνάται η επίδραση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων στην αξιολόγηση οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

## 7 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΙΞΩΔΟΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

### 7.1 Γενικά στοιχεία

Στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης εξετάστηκε η επίδραση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων στην αξιολόγηση οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Αξίζει να αναφερθεί ότι μέχρι στιγμής οι μεθοδολογίες αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων που έχουν αναπτυχθεί διεθνώς δεν περιλαμβάνουν τη συγκεκριμένη θεώρηση. Προς τούτο η παρούσα διερεύνηση επικεντρώθηκε στην οργάνωση ενός μεθοδολογικού πειράματος, το οποίο περιέχει κυρίως στοιχεία πεδίου, προκειμένου να συνδυαστούν υπάρχοντα εργαλεία ανάλυσης για την αξιολόγηση οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Στόχος της παραπάνω διαδικασίας αποτέλεσε ο έλεγχος της επίδρασης της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων στη λήψη αποφάσεων στο πλαίσιο της αξιολόγησης και της διαχείρισης της συντήρησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Στην Εικόνα 7.1 παρουσιάζεται το σύνολο της ερευνητικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε.



**Εικόνα 7.1 Σύνοψη ερευνητικής διαδικασίας για την αξιολόγησης του οδοστρώματος**

Για τον προσδιορισμό της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος είναι απαραίτητη η εκτίμηση του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος  $E^*$ . Αρχικά πραγματοποιήθηκε υπολογισμός των παραμορφώσεων τόσο με την ελαστική όσο και με την

ιξωδοελαστική θεώρηση της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος. Κατόπιν πραγματοποιήθηκε εκτίμηση της φθοράς των ασφαλτικών στρώσεων του οδοστρώματος, δεδομένου ότι η διαχείριση της συντήρησης ενός οδοστρώματος και οι τυχόν παρεμβάσεις είναι περισσότερο βιώσιμο να περιορίζονται στο άνω τμήμα του οδοστρώματος που περιλαμβάνει μέρος ή και το σύνολο των ασφαλτικών στρώσεων. Αυτό είναι ακόμη πιο επιτακτικό στην περίπτωση οδοστρωμάτων αεροδρομίων, λόγω των αναμενόμενων επιπτώσεων από μία ενδεχόμενη προσωρινή αναστολή λειτουργίας ενός αεροδρομίου (Gkyrtis et al. 2021a).

## 7.2 Συλλογή στοιχείων

Για τις ανάγκες της παρούσας διερεύνησης αξιοποιήθηκαν στοιχεία ενός περιφερειακού αεροδρομίου του ελλαδικού χώρου που αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ. Το πείραμα πεδίου περιλάμβανε στοιχεία συλλογής με συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών (FWD και GRP) για την εκτίμηση των ελαστικών υποχωρήσεων και των παχών των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος. Επιπλέον ήταν διαθέσιμα στοιχεία της μελέτης του οδοστρώματος, όπως για παράδειγμα η διατομή του οδοστρώματος που φαίνεται στην Εικόνα 7.2.



**Εικόνα 7.2** Τυπική διατομή οδοστρώματος διαδρόμου Π/Α

Σχετικά με τη θεωρούμενη φόρτιση, επιλέχτηκε ένας μικτός στόλος αεροσκαφών, συμπεριλαμβανομένων τόσο πολιτικών όσο και στρατιωτικών αεροσκαφών. Τα θεωρούμενα αεροσκάφη διέθεταν διαφορετικές διατάξεις τροχών, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η πιθανώς διαφορετική συμβολή των επιμέρους αεροσκαφών στην απόκριση του οδοστρώματος. Τα επιμέρους χαρακτηριστικά των αεροσκαφών και της διάταξης των τροχών τους φαίνονται στον Πίνακα 7.1.

**Πίνακας 7.1 Χαρακτηριστικά αεροσκαφών**

Αεροσκάφος	Σύστημα τροχών	Βάρος (ton)	Ετήσιες αναχωρήσεις
<b>A320-200</b>	Διπλός τροχός	78.400	2000
<b>B757-300</b>	Διπλός δίδυμος τροχός	124.058	2000
<b>C-130</b>	Δίδυμος τροχός	70.307	1000
<b>F-16C</b>	Μονός τροχός	19.187	4000

Ο μικτός στόλος που θεωρήθηκε μπορεί πρακτικά να αντιστοιχηθεί στους τύπους των αεροσκαφών που μπορεί να δεχθεί ένα περιφερειακό και τουριστικό αεροδρόμιο της χώρας μας.

### 7.3 Ανάλυση στοιχείων

Κατά τη θεώρηση της ελαστικής συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων πραγματοποιήθηκε ανάστροφος υπολογισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών του οδοστρώματος αξιοποιώντας τα στοιχεία καταγραφής των μη καταστρεπτικών δοκιμών. Προς τούτο χρησιμοποιήθηκε η πιο πρόσφατη έκδοση του λογισμικού BAKFAA 3.3.0. (2020) το οποίο έχει αναπτυχθεί από την FAA (FAA 2011). Κατόπιν επιλέχθηκαν 15 χαρακτηριστικές διατομές του διαδρόμου προς περαιτέρω ανάλυση. Αρχικά πραγματοποιήθηκε εκτίμηση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων με το λογισμικό ViscoRoute και κατόπιν αξιολογήθηκε η φθορά των ασφαλικών στρώσεων με βάση τις αρχές της FAA (FAA 2021).

Για τη θεώρηση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς ασφαλτομιγμάτων εκτιμήθηκε η τιμή του δυναμικού μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων ακολουθώντας σχετική διαδικασία που προβλέπεται από τον MEPDG. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος πρόβλεψης του Witczak (NCHRP 1-37A) για την εκτίμηση της πρόβλεψης του  $E^*$  των ασφαλτομιγμάτων λαμβάνοντας υπόψη τα ογκομετρικά στοιχεία και τα στοιχεία της κοκκομετρικής διαβάθμισης της σύνθεσης των ασφαλτομιγμάτων. Μέσω του αλγορίθμου εκτιμάται η κεντρική καμπύλη που αντιστοιχεί στο  $E_{undamaged}^*$  για το μίγμα της κάθε στρώσης. Η μαθηματική έκφραση του αλγορίθμου του Witczak δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\begin{aligned} \log E^* &= 3.750063 + 0.02932\rho_{200} - 0.001767\rho_{200}^2 - 0.002841\rho_4 - 0.058097V_a \\ &- 0.802208 \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \\ &+ \frac{3.871977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38} - 0.000017\rho_{38}^2 + 0.00547\rho_{34}}{1 + \exp(-0.603313 - 0.313351 \log f - 0.393532 \log \eta)} \end{aligned} \quad (\text{Εξ. 7.1})$$

Όπου:

- $E^*$  (psi): το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας
- $\eta$  ( $10^6$ poise): το ιξώδες του συνδετικού υλικού εκφρασμένο σε λογαριθμική κλίμακα ως:  $\log(\log\eta)=A+VTS \cdot \log T_R$ . Το ιξώδες εκτιμάται σε cP, ενώ η θερμοκρασία εκφράζεται σε βαθμούς Rankine. Οι όροι A και VTS αντιστοιχούν σε συντελεστές παλινδρόμησης που υπολογίζονται όταν είναι γνωστές οι θεμελιώδεις ιδιότητες του συνδετικού υλικού (πχ βαθμός διείδυσης και θερμοκρασία μάλθωσης). για τα μίγματα της ασφαλτικής βάσης και της επιφανειακής στρώσης, χρησιμοποιήθηκε άσφαλτος βαθμού διείδυσης 50/70. Εργαστηριακοί έλεγχοι ανέδειξαν δείκτη διείδυσης ίσο με 58PEN και θερμοκρασία μάλθωσης ίση με 53°C. Η διείδυση μετατράπηκε σε ιξώδες σύμφωνα με τη σχέση που πρότειναν οι Mirza και Witczak (1995), ενώ από πειραματικές έρευνες θεωρήθηκε ότι τιμή ιξώδους ίσης με 13000P αντιστοιχεί στη θερμοκρασία μάλθωσης
- $f$  (Hz): συχνότητα φόρτισης, που λήφθηκε ίση με τις αντίστοιχες τιμές που προτείνονται από το πρότυπο του AASHTO για τη διενέργεια της εργαστηριακής δοκιμής, δηλαδή 0.1, 0.5, 1, 5, 10 και 25Hz
- $V_a$  και  $V_{b-eff}$  (%): κενά αέρα και ενεργό ποσοστό ασφάλτου (κατ' όγκο ασφαλτομίγματος)
- $\rho_{34}$ ,  $\rho_{38}$  και  $\rho_4$  (%): αθροιστικά ποσοστά αδρανών ασφαλτομίγματος συγκρατούμενα στα κόσκινα 3/4 ιντσών (ή 19 mm), 3/8 ιντσών (ή 9.5 mm) και No.4 (ή 4.75 mm) αντίστοιχα
- $\rho_{200}$  (%): διερχόμενο ποσοστό από το κόσκινο No.200 (ή 0.075 mm)

Έχοντας το  $E^*$  του κάθε μίγματος, δηλαδή το  $E_{AC-base}^*$  για το μίγμα της ασφαλτικής βάσης και το  $E_{AC-surface}^*$  για το μίγμα της επιφανειακής στρώσης, χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση 7.2 προκειμένου να υπολογιστεί το σύνθετο μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος, ώστε να ανταποκρίνεται στο σύνολο του πάχους των ασφαλτικών στρώσεων ( $h_{AC-total}$ ). Ο υπολογισμός έγινε λαμβάνοντας υπόψη τα μεμονωμένα πάχη της ασφαλτικής βάσης  $h_{AC-base}$  και της επιφανειακής στρώσης ( $h_{AC-surface}$ ) σε κάθε θέση.

$$E_{composite}^* = \frac{h_{AC-base}}{h_{AC-total}} \sqrt[3]{E_{AC-base}^*} + \frac{h_{AC-surface}}{h_{AC-total}} \sqrt[3]{E_{AC-surface}^*} \quad (\text{Εξ. 7.2})$$

Στη συνέχεια, ακολουθεί η βαθμονόμηση της σιγμοειδούς συνάρτησης (Pellinen et al. 2004) προκειμένου να υπάρχει για κάθε θέση αναφοράς η καμπύλη που αντιστοιχεί στο  $E_{undamaged}^*$ . Σε κάθε θέση, η θερμοκρασία αναφοράς επιλέχθηκε ίση με τη θερμοκρασία που μετρήθηκε στο μέσο της ασφαλτικής βάσης στο πείραμα πεδίου. Για το διαχωρισμό της  $E_{undamaged}^*$  από

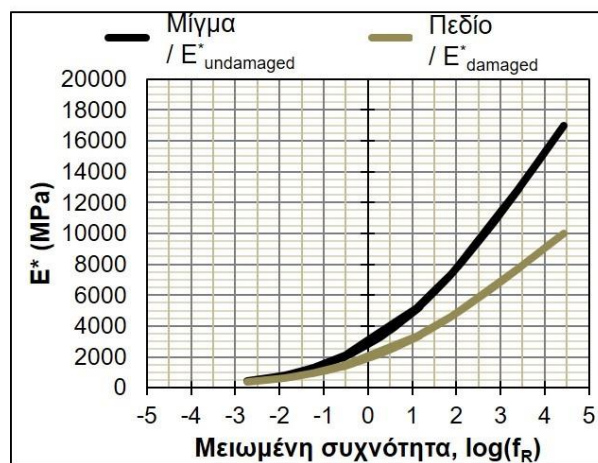
την καμπύλη του  $E^*$  που αντιστοιχεί στις συνθήκες πεδίου ( $E_{damaged}^*$ ), εκτιμάται ένας συντελεστής επιτόπου φθοράς ( $d$ ) ως εξής:

$$d = 1 - \frac{E_{FWD}}{E_{undamaged}^*} \quad (\text{Εξ. 7.3})$$

όπου:

- $E_{FWD}$ : το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας που εκτιμάται μέσω των στοιχείων πεδίου (FWD),
- $E_{undamaged}^*$ : το δυναμικό μέτρο δυσκαμψίας που αντιστοιχεί στο μίγμα για τη θερμοκρασία που έχει μετρηθεί στο μέσο της ασφαλτικής βάσης και τη συχνότητα φόρτισης του FWD ( $f_{FWD}$ ), ίσης με 18Hz με βάση τη χρονοϊστορία φόρτισης του FWD (Crow 1998).

Για να προκύψει σε κάθε θέση η κεντρική καμπύλη των συνθηκών πεδίου ( $E_{damaged}^*$ ), η παράμετρος  $\alpha$  της σιγμοειδούς συνάρτησης αντικαθίσταται από την παράμετρο  $\alpha' = \alpha \cdot (1 - d)$ . Για όλες τις θέσεις ελέγχου, διαπιστώθηκε ότι  $E_{FWD} < E_{undamaged}^*$ , επομένως  $\frac{E_{FWD}}{E_{undamaged}^*} < 1 \rightarrow 1 - d < 1$  και άρα  $\alpha' < \alpha$ . Κατά συνέπεια, η κεντρική καμπύλη σε κάθε θέση ελέγχου μετατοπίζεται προς τα κάτω προκειμένου να αντανakλά τις συνθήκες πεδίου. Ένα παράδειγμα δύο κεντρικών καμπυλών που αντιστοιχούν σε συνθήκες μίγματος ( $E_{undamaged}^*$ ) και σε συνθήκες πεδίου ( $E_{damaged}^*$ ) για μία συγκεκριμένη θέση ελέγχου φαίνεται στην Εικόνα 7.3.



**Εικόνα 7.3 Αρχική και μετασχηματισμένη κεντρική καμπύλη**

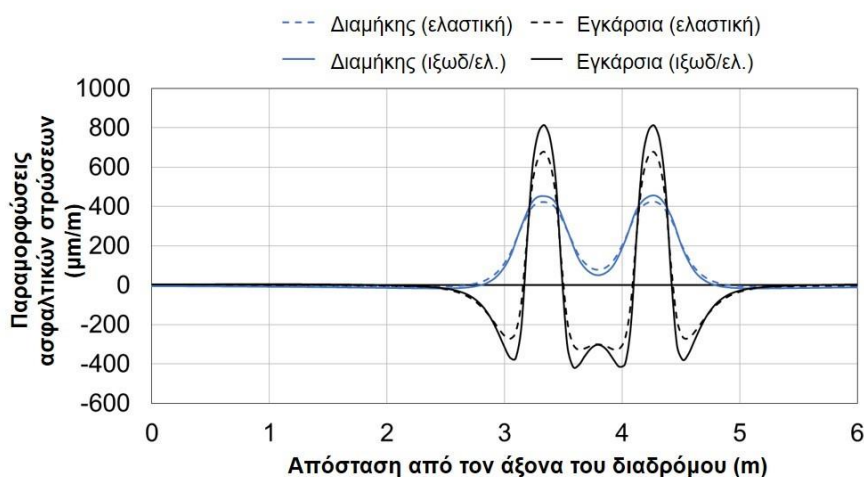
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις εντατικής κατάστασης θεωρώντας ιξωδοελαστική συμπεριφορά ασφαλτομίγματος. Η θερμοκρασία ανάλυσης σε κάθε θέση ελέγχου αντιστοιχούσε στη μέτρηση που έγινε στο πείραμα πεδίου. Ως ταχύτητα φόρτισης λήφθηκε μια ενδεικτική τιμή 100km/h, θεωρώντας ότι αυτή αντιστοιχεί σε μία μέση συνθήκη κίνησης αεροσκαφών σε διάδρομο Π/Α αεροσκαφών. Παρά ταύτα, λόγω του μεγάλου εύρους ταχύτητας που αναπτύσσουν τα αεροσκάφη ελέγχθηκε συμπληρωματικά η δυναμική

απόκριση του οδοστρώματος για ένα μεγαλύτερο εύρος ταχυτήτων (50, 150, 200 και 250km/h). Η παραμετρική αυτή διερεύνηση λαμβάνοντας υπόψη και τις δύο θεωρήσεις επιτρέπει την πληρέστερη αξιολόγηση των διαφορών μεταξύ των δύο θεωρήσεων. Κατόπιν, με βάση τις παραπάνω θεωρήσεις πραγματοποιήθηκε υπολογισμός των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων με το λογισμικό ViscoRoute και κατόπιν αξιολογήθηκε η φθορά των ασφαλτικών στρώσεων με βάση τις αρχές της FAA (FAA 2021), σε αντιστοιχία με την ελαστική θεώρηση.

## 7.4 Αποτελέσματα

### 7.4.1 Παραμορφώσεις

Για κάθε μία από τις 15 διατομές και για κάθε τύπο αεροσκάφους πραγματοποιήθηκε εκτίμηση των οριζόντιων παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων. Στην Εικόνα 7.4 παρατίθενται ενδεικτικά οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται από τη φόρτιση του αεροσκάφους A320-200, όπου παρουσιάζονται τόσο οι διαμήκεις παραμορφώσεις όσο και οι εγκάρσιες σύμφωνα και με τις δύο θεωρήσεις. Το προφίλ των παραμορφώσεων αντιστοιχεί μόνο στο δεξί σύστημα τροχών, υποθέτοντας ότι απόσταση ίση με μηδέν (στον οριζόντιο άξονα) αντιστοιχεί στον άξονα του διαδρόμου κίνησης.

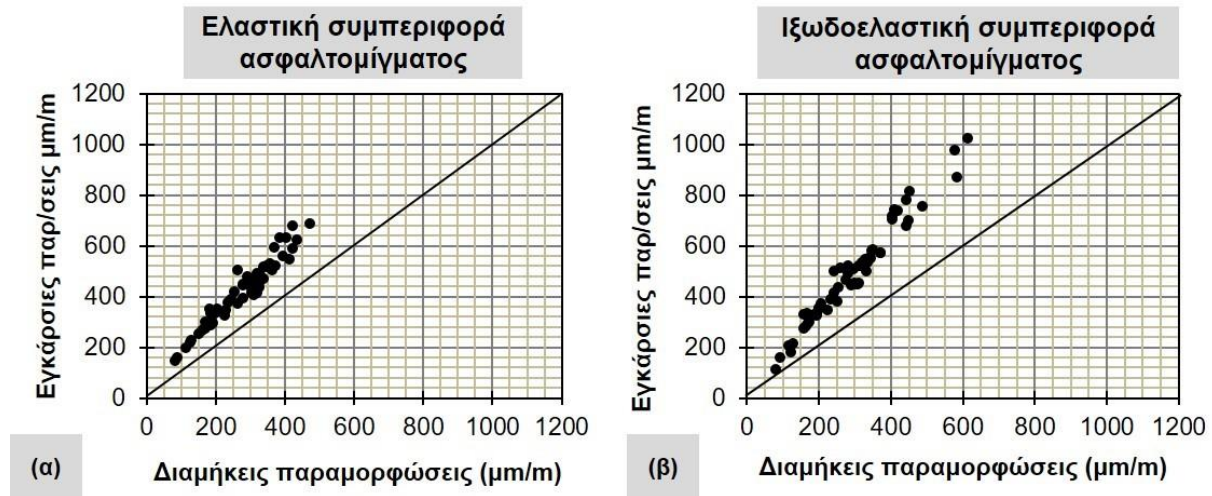


**Εικόνα 7.4 Προφίλ οριζόντιων παραμορφώσεων στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων για ελαστική και ιξωδοελαστική συμπεριφορά ασφαλτομιγμάτων.**

Από το υπόψη παράδειγμα προκύπτει ότι οι μέγιστες οριζόντιες παραμορφώσεις είναι οι εγκάρσιες και για τις δύο παραδοχές συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων. Αντίστοιχη παρατήρηση προέκυψε και για τα υπόλοιπα συστήματα τροχών, ανεξάρτητα από τη θεωρούμενη συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων (Εικόνα 7.5), κάτι το οποίο είναι σε



συμφωνία με προγενέστερα ευρήματα συναφών μελετών (Wang et al. 2020). Κατά συνέπεια, οι εγκάρσιες παραμορφώσεις ελήφθησαν υπόψη στην ανάλυση υπέρ της ασφάλειας.

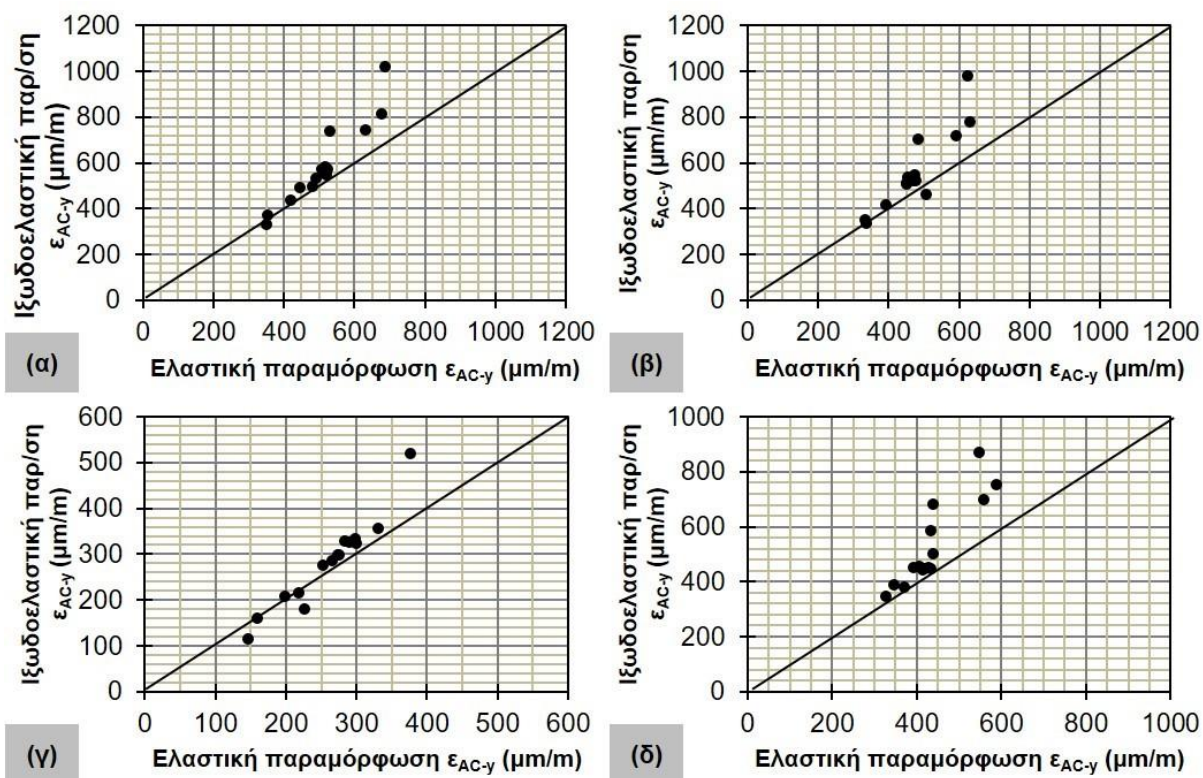


**Εικόνα 7.5 Σύγκριση εγκάρσιων και διαμηκών παραμορφώσεων για (α) ελαστική συμπεριφορά ασφαλτομίγματος και (β) ιξωδοελαστική συμπεριφορά ασφαλτομίγματος.**

Στην Εικόνα 7.6 παρουσιάζεται σύγκριση μεταξύ των μέγιστων τιμών της εγκάρσιας παραμόρφωσης στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων λαμβάνοντας υπόψη τόσο την ελαστική όσο και τη ιξωδοελαστική συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος. Διαφαίνεται ότι οι παραμορφώσεις μέσω της ιξωδοελαστικής ανάλυσης είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες της ελαστικής για όλα τα θεωρούμενα αεροσκάφη, εκτός από ορισμένες θέσεις ελέγχου όπου η απόκριση οδοστρώματος διαφοροποιείται (κυρίως για το αεροσκάφος C-130). Εστιάζοντας στις θέσεις αυτές, παρατηρήθηκε ότι το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης του ασύνδετου υλικού της βάσης ήταν υψηλότερης τάξης μεγέθους από ότι στις υπόλοιπες, γεγονός που ενδέχεται να έχει επίδραση στον τρόπο απόκρισης του οδοστρώματος σε συνδυασμό με τη διάταξη και το σύστημα των τροχών του αεροσκάφους C-130 (δίδυμος τροχός).

Οι τιμές των παραμορφώσεων που προέκυψαν από τις δύο θεωρήσεις ελέγχθηκαν ως προς τη σημαντικότητα των διαφορών τους μέσω ελέγχου t-test. Σύμφωνα με τη μηδενική υπόθεση, η διαφορά των παραμορφώσεων από τις δύο θεωρήσεις θεωρείται ως μη σημαντική για επίπεδο εμπιστοσύνης ίσο με 95%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2 απ' όπου προκύπτει ότι η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται για όλα τα αεροσκάφη εκτός από το C-130. Κατά συνέπεια, προκύπτει ότι η θεώρηση συμπεριφοράς ασφαλτομίγματος έχει σημαντική επίδραση στις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις για την περίπτωση της αρχικά θεωρούμενης ταχύτητας των 100km/h.



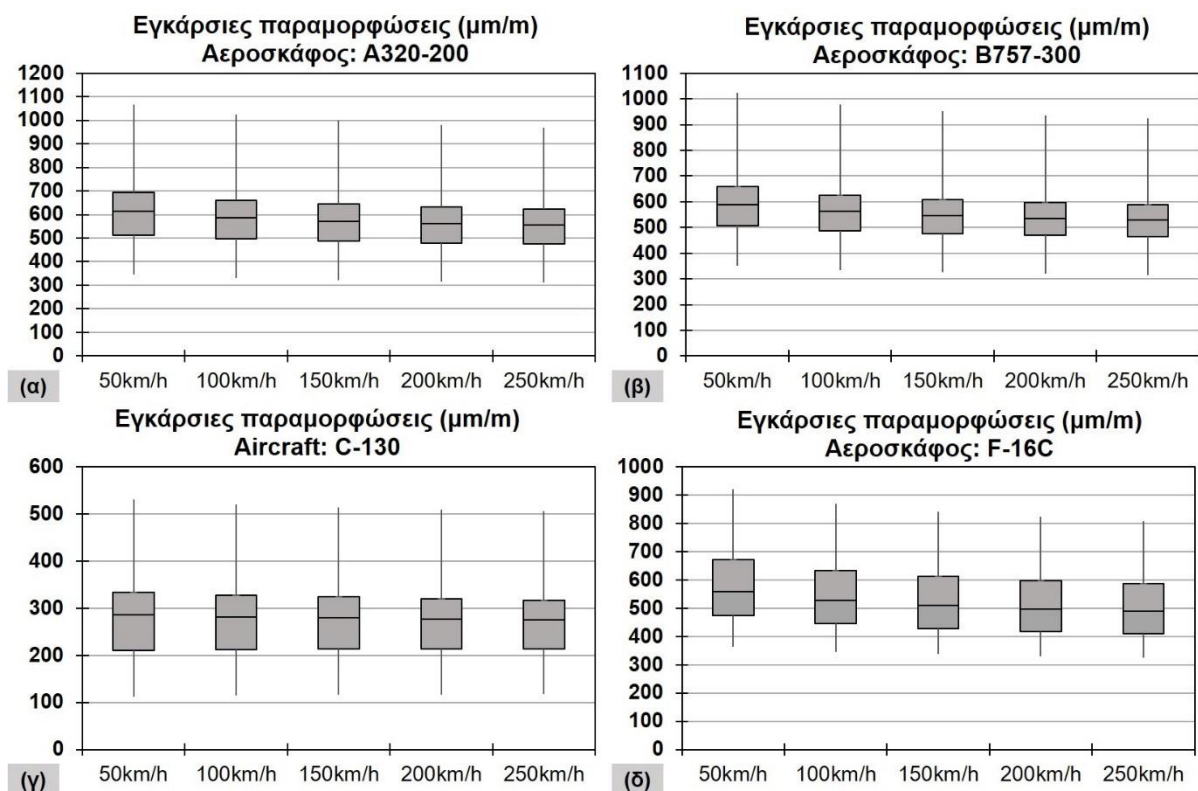


**Εικόνα 7.6 Σύγκριση παραμορφώσεων για θεώρηση ελαστικής και ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς ασφαλτομίγματος για φόρτιση αεροσκάφους (α) A320-200, (β) B757-300, (γ) C-130 και (δ) F-16C**

**Πίνακας 7.2 Έλεγχοι t-test για τις κρίσιμες παραμορφώσεις στις ασφαλτικές στρώσεις**

Τύπος αεροσκάφους	Παραμορφώσεις στις ασφαλτικές στρώσεις		
	t <sub>stat</sub>	t <sub>crit</sub>	Null hypothesis: ε <sub>AC-EL</sub> = ε <sub>AC-VISCO</sub>
<b>A320-200</b>	-3.31	2.14	<b>Reject</b>
<b>B757-300</b>	-3.41	2.14	<b>Reject</b>
<b>C-130</b>	-2.04	2.14	<b>Accept</b>
<b>F-16C</b>	-3.78	2.14	<b>Reject</b>

Η παραπάνω ανάλυση επεκτάθηκε λαμβάνοντας υπόψη όλες τις ταχύτητες (50, 100, 150, 200, 250km/h) και τα αποτελέσματα της ιξωδοελαστικής θεώρησης παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.7. Παρατηρείται ότι η προοδευτική αύξηση της ταχύτητας κατά 50km/h οδήγησε σε μείωση των παραμορφώσεων κατά ένα μέσο ποσοστό 3.9%, 2.4%, 1.7% και 1.3% λαμβάνοντας υπόψη όλα τα αεροσκάφη.



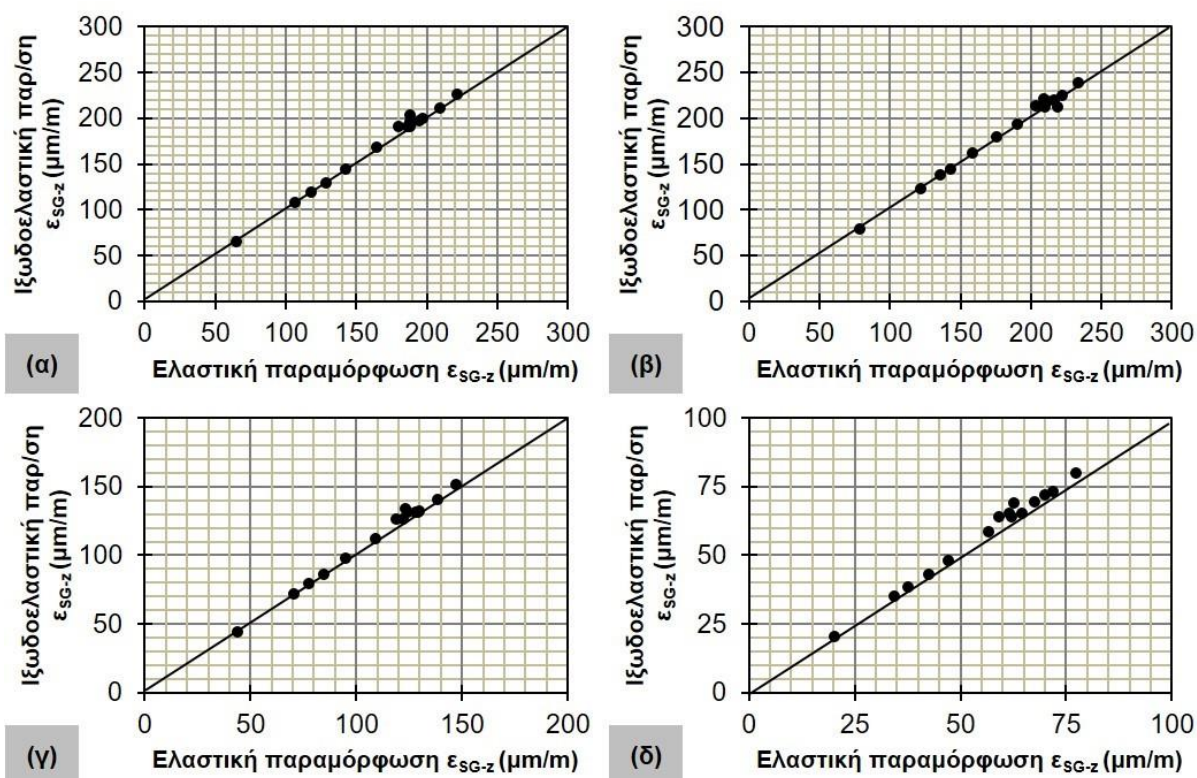
**Εικόνα 7.7 Παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων για θεώρηση ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς ασφαλτομίγματος για διαφορετικές ταχύτητες για τα αεροσκάφη (α) A320-200, (β) B757-300, (γ) C-130 και (δ) F-16C**

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε έλεγχος t-test και για τις παραμορφώσεις που προσδιορίστηκαν από τις δύο θεωρήσεις και για τις επιπλέον ταχύτητες και τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 7.3. Οι διαφορές μεταξύ ελαστικών και ιξωδοελαστικών παραμορφώσεων φαίνεται να είναι στατιστικά σημαντικές για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% εκτός από το αεροσκάφος C-130. Επιπλέον παρατηρείται μια μικρή τάση σύγκλισης μεταξύ ελαστικών και ιξωδοελαστικών παραμορφώσεων στις πολύ υψηλές ταχύτητες για το αεροσκάφος A320-200.

**Πίνακας 7.3 Σύγκριση ελαστικών και ιξωδοελαστικών παραμορφώσεων για διαφορετικές ταχύτητες (έλεγχος t-test με  $t_{crit}=2.14$  κα μηδενική υπόθεση  $\epsilon_{EL}=\epsilon_{VISCO}$ )**

Ταχύτητα	A320-200	B757-300	C-130	F-16C
50km/h	$t_{stat} = 4.11$ , <b>Reject</b>	$t_{stat} = 4.15$ , <b>Reject</b>	$t_{stat} = 2.21$ , <b>Reject</b>	$t_{stat} = 4.74$ , <b>Reject</b>
100km/h	$t_{stat} = 3.31$ , <b>Reject</b>	$t_{stat} = 3.41$ , <b>Reject</b>	$t_{stat} = 2.04$ , <b>Accept</b>	$t_{stat} = 3.78$ , <b>Reject</b>
150km/h	$t_{stat} = 2.78$ , <b>Reject</b>	$t_{stat} = 2.93$ , <b>Reject</b>	$t_{stat} = 1.87$ , <b>Accept</b>	$t_{stat} = 3.19$ , <b>Reject</b>
200km/h	$t_{stat} = 2.39$ , <b>Reject</b>	$t_{stat} = 2.57$ , <b>Reject</b>	$t_{stat} = 1.72$ , <b>Accept</b>	$t_{stat} = 2.76$ , <b>Reject</b>
250km/h	$t_{stat} = 2.09$ , <b>Accept</b>	$t_{stat} = 2.28$ , <b>Reject</b>	$t_{stat} = 1.61$ , <b>Accept</b>	$t_{stat} = 2.42$ , <b>Reject</b>

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε υπολογισμός των κατακόρυφων θλιπτικών παραμορφώσεων στην κορυφή της στρώσης έδρασης με τις δύο θεωρήσεις και προέκυψαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στην Εικόνα 7.8.

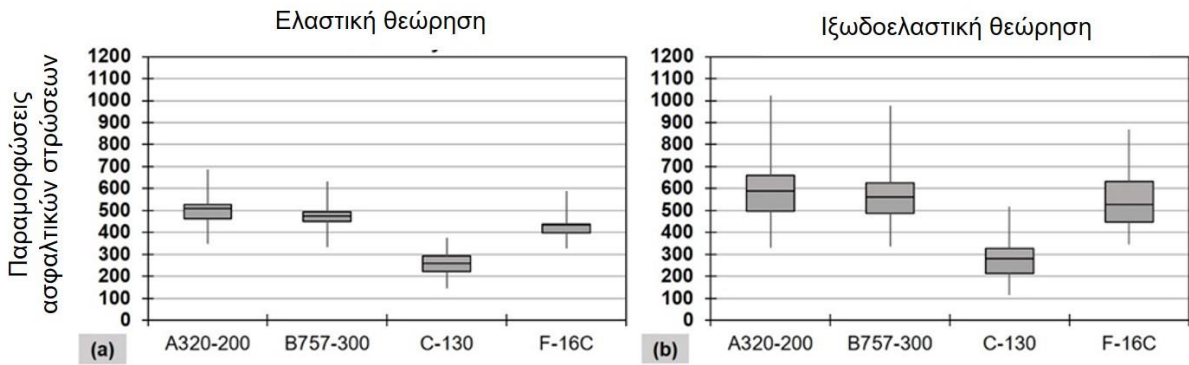


**Εικόνα 7.8 Κατακόρυφες παραμορφώσεις στην κορυφή της στρώσης έδρασης για θεώρηση ελαστικής και ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς ασφαλτομίγματος για φόρτιση αεροσκάφους (α) A320-200, (β) B757-300, (γ) C-130 και (δ) F-16C**

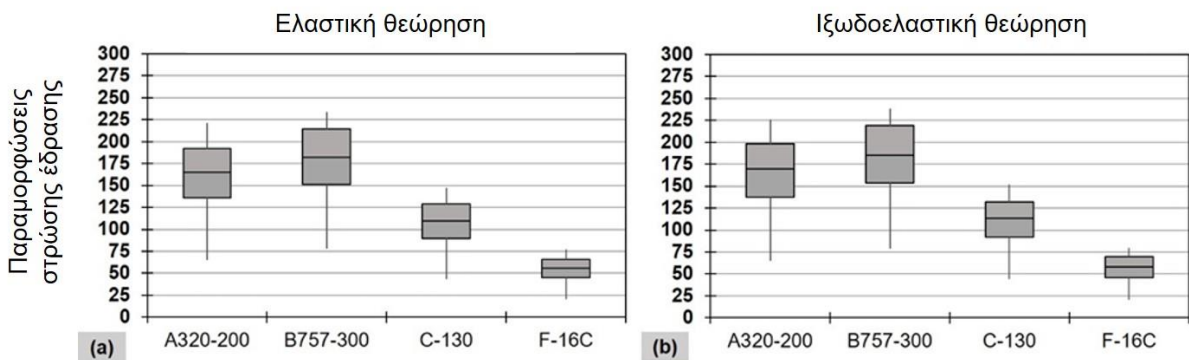
Για όλα τα αεροσκάφη προκύπτει ότι οι κατακόρυφες παραμορφώσεις που υπολογίστηκαν σύμφωνα με τη θεώρηση ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς ασφαλτομιγμάτων είναι περίπου ίσες ή ακόμη και υψηλότερες από αυτές που υπολογίστηκαν μέσω της ελαστικής θεώρησης. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι οι διαφορές στις κατακόρυφες παραμορφώσεις είναι στατιστικά σημαντικές για όλα τα αεροσκάφη που εξετάστηκαν. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι η επίδραση της θεώρησης της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος είναι καθοριστική και για τις δύο κρίσιμες θέσεις ενός οδοστρώματος αεροδρομίου, επηρεάζοντας και τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη στη στρώση έδρασης παρά το μεγάλο βάθος υπολογισμού από την επιφάνεια του οδοστρώματος.

Στις Εικόνες 7.9-7.10 φαίνεται το εύρος των παραμορφώσεων στις δύο κρίσιμες θέσεις αστοχίας για τις δύο θεωρήσεις συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων με στόχο την ποιοτική αξιολόγηση της απόκρισης του οδοστρώματος στη φόρτιση των διαφορετικών αεροσκαφών. Παρατηρείται ότι το αεροσκάφος A320-200 φαίνεται να είναι δυσμενέστερο από άποψη φόρτισης για την κρίσιμη θέση που εντοπίζεται στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων, ενώ το B757-300 φαίνεται να είναι κρίσιμο για την απόκριση της στρώσης έδρασης. Παρατηρείται ότι κάθε αεροσκάφος μπορεί να επιδρά με διαφορετικό τρόπο στις κρίσιμες μορφές αστοχίας ενός οδοστρώματος.





**Εικόνα 7.9** Θηκογράμματα εγκάρσιων παραμορφώσεων στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων για θεωρία (α) ελαστικής και (β) ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς ασφαλτομίγματος.

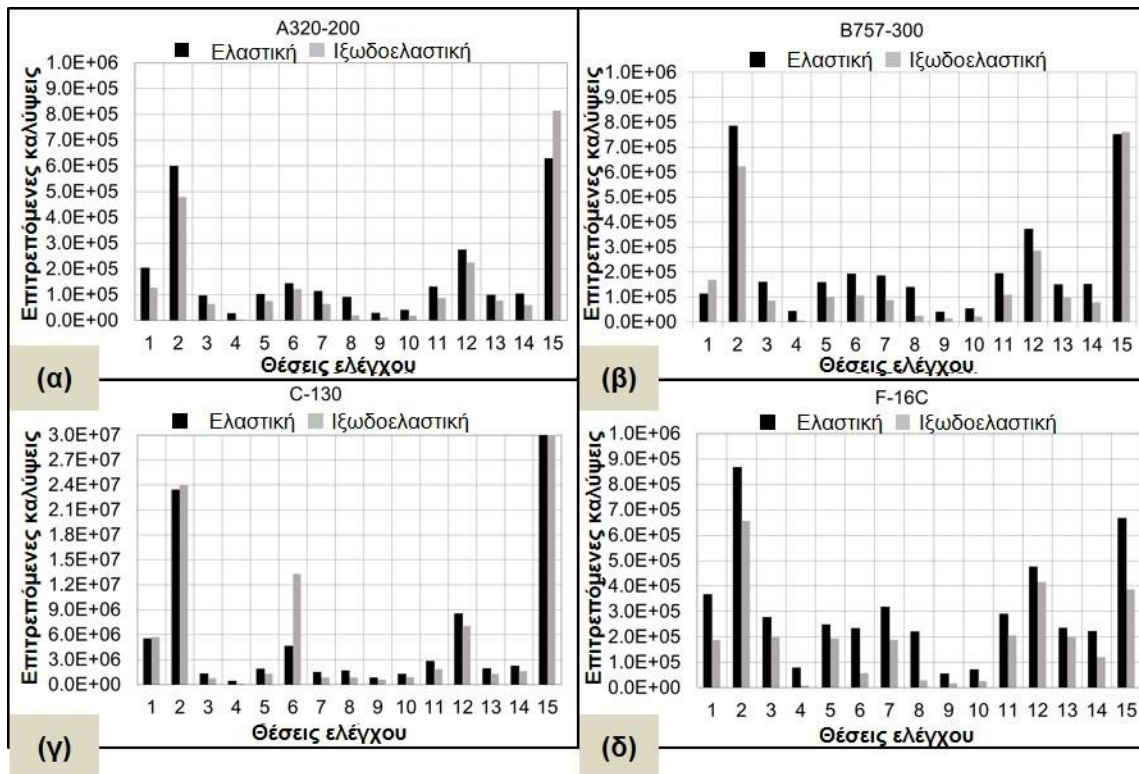


**Εικόνα 7.10:** Θηκογράμματα κατακόρυφων παραμορφώσεων στην κορυφή της στρώσης έδρασης για θεωρία (α) ελαστικής και (β) ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς ασφαλτομίγματος.

#### 7.4.2 Φθορά έναντι κόπωσης

Στη συνέχεια διερευνήθηκε η επίδραση των διαφοροποιήσεων των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων εξαιτίας των δύο θεωρήσεων στη φθορά λόγω κόπωσης των ασφαλτικών στρώσεων. Προς τούτο ελήφθησαν υπόψη οι βασικές αρχές της FAA (FAA 2020, FAA 2022) για την αξιολόγηση οδοστρωμάτων αεροδρομίων, σύμφωνα με τις οποίες η ανάλυση σε κόπωση ασφαλτομιγμάτων πραγματοποιείται με την ενεργειακή προσέγγιση (RDEC) και το νόμο κόπωσης των «Shen & Carpenter». Στην παρούσα έρευνα πραγματοποιήθηκε εκτίμηση των επιτρεπόμενων καλύψεων-διελεύσεων έως την αστοχία για τις δεκαπέντε διατομές που επιλέχθηκαν για την ανάλυση, λαμβάνοντας υπόψη τις δύο θεωρήσεις συμπεριφοράς ασφαλτομιγμάτων (ελαστικής και ιξωδοελαστικής). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.11, όπου παρατηρείται ότι ο αριθμός των επιτρεπόμενων καλύψεων-διελεύσεων έως την αστοχία που προκύπτει από την ιξωδοελαστική θεωρία είναι χαμηλότερος από εκείνον που αντιστοιχεί στην ελαστική θεωρία για όλα τα αεροσκάφη. Ως εκ τούτου, η υπόθεση για ιξωδοελαστική συμπεριφορά ασφαλτομίγματος εμφανίζεται να οδηγεί σε πιο συντηρητικά

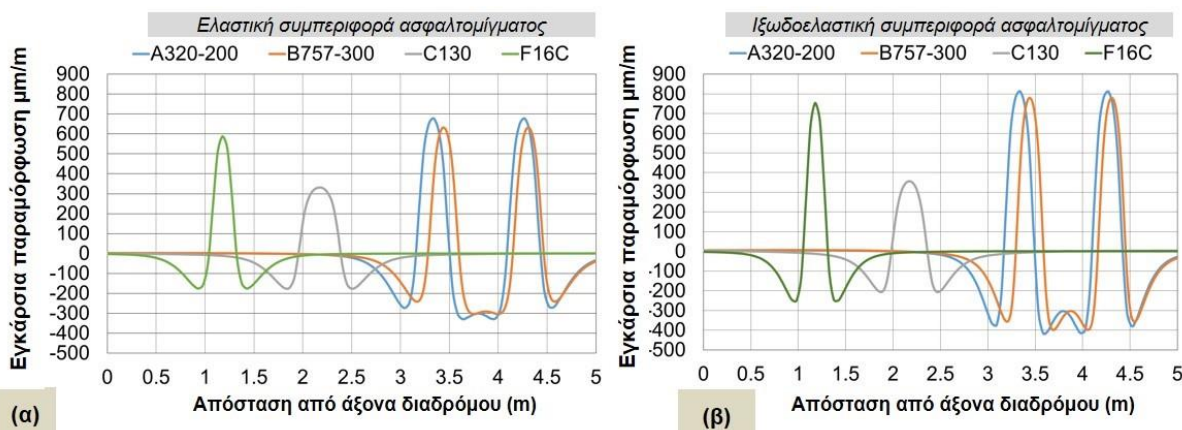
αποτελέσματα όσον αφορά στην κόπωση, στοιχείο που μπορεί να επηρεάζει τη λήψη αποφάσεων στο πλαίσιο της διαχείρισης οδοστρωμάτων αεροδρομίου.



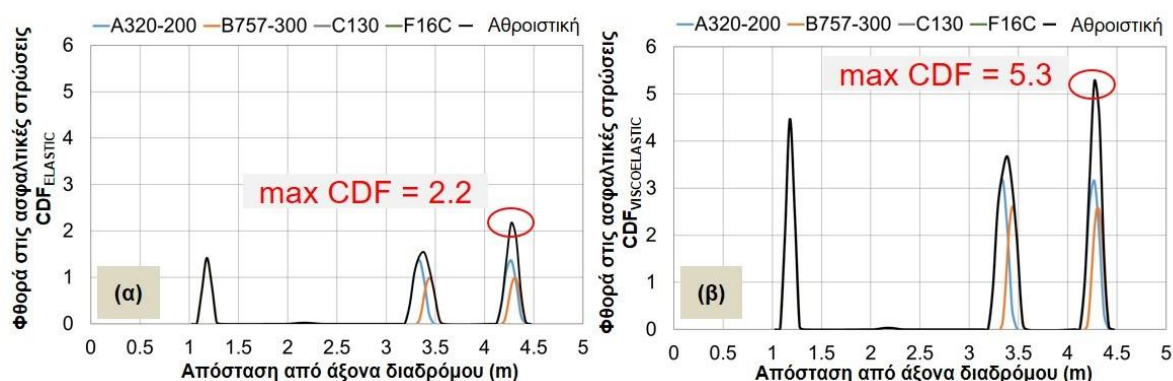
**Εικόνα 7.11 Σύγκριση επιτρεπόμενων καλύψεων έναντι αστοχίας σε κόπωση για τις περιπτώσεις φόρτισης με τα αεροσκάφη (α) A320-200, (β) B757-300, (γ) C-130 και (δ) F-16C.**

Μεμονωμένα διαφορετικά αποτελέσματα παρατηρούνται σε ορισμένες θέσεις ελέγχου, όπου είχε διαφοροποιηθεί και η εντατική καταπόνηση του οδοστρώματος, κυρίως για το αεροσκάφος C-130.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της φθοράς του οδοστρώματος με έμφαση στις ασφαλικές στρώσεις. Ειδικότερα, υπολογίστηκε ο δείκτης  $CDF_{ac}$  για τις δύο θεωρήσεις συμπεριφοράς ασφαλτομιγμάτων. Ο λόγος P/C για κάθε αεροσκάφος θεωρήθηκε συντηρητικά ίσος με τη μονάδα. Το προφίλ των παραμορφώσεων ενδεικτικά για τη θέση ελέγχου στην οποία έγινε η υπόψη διερεύνηση φαίνεται στην Εικόνα 7.12, όπου έχει ληφθεί υπόψη η καταπόνηση από το σύνολο των αεροσκαφών. Ο υπολογισμός του δείκτη  $CDF_{ac}$  φαίνεται στην Εικόνα 7.13, τόσο για τις μεμονωμένες τιμές  $CDF_{ac}$  του κάθε αεροσκαφούς, όσο και για την αθροιστική φθορά που προκύπτει από το συνδυασμό της καταπόνησης που προκαλούν συνδυαστικά τα αεροσκάφη.



Εικόνα 7.12 Κατανομή εγκάρσιων παραμορφώσεων στη θέση ελέγχου για τον υπολογισμό της φθοράς: (α) θεώρηση ελαστικής συμπεριφοράς ασφαλτομίγματος και (β) θεώρηση ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς ασφαλτομίγματος.



Εικόνα 7.13: Φθορά οδοστρώματος λόγω κόπωσης: (α) ελαστική συμπεριφορά ασφαλτομίγματος και (β) ιξωδοελαστική συμπεριφορά ασφαλτομίγματος

Παρατηρείται ότι η θεωρούμενη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος έχει σημαντική επίδραση στην εκτίμηση της φθοράς του οδοστρώματος μέσω του δείκτη CDF. Ειδικότερα, η μέγιστη αθροιστική φθορά που προέκυψε από την ελαστική ανάλυση ήταν  $CDF_{ELASTIC}=2.2$ , ενώ ο αντίστοιχος δείκτης που προέκυψε από την ιξωδοελαστική ανάλυση είχε σχεδόν διπλάσια τιμή και συγκεκριμένα  $CDF_{VISCOELASTIC}=5.3$ . Έχοντας υπόψη ότι ο δείκτης CDF αποτελεί ένδειξη της υπολειπόμενης διάρκειας ζωής ενός οδοστρώματος αεροδρομίου, η παρούσα διερεύνηση αναδεικνύει την σημασία των παραδοχών ανάλυσης, και συγκεκριμένα της συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος, στο αποτέλεσμα της αξιολόγησης ενός οδοστρώματος αεροδρομίου.

## 7.5 Σχόλια - παρατηρήσεις

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η επίδραση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων είναι σημαντική για την αξιολόγηση της εντατικής καταπόνησης στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων ενός οδοστρώματος. Τα παρόντα ευρήματα

υποδεικνύουν την ανάγκη αναθεώρησης του συμβατικού τρόπου αξιολόγησης των οδοστρωμάτων αεροδρομίων, καθώς η συνήθης θεώρηση της ελαστικής συμπεριφοράς των υλικών που υιοθετείται μέχρι στιγμής από την FAA, εμφανίζεται ευμενέστερη ως προς την αναπτυσσόμενη εντατική κατάσταση των οδοστρωμάτων. Ειδικότερα, διαφαίνεται επάρκεια της υπόψη θεώρησης σε πολύ μεγάλες ταχύτητες κίνησης αεροσκαφών. Ωστόσο, οι ανάγκες συντήρησης-αποκατάστασης ενδεχομένως να είναι εντονότερες σε περιοχές κίνησης των αεροσκαφών με χαμηλότερες-ενδιάμεσες ταχύτητες. Το γεγονός αυτό μπορεί να επηρεάσει τη λήψη αποφάσεων για τη διαχείριση των οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

## **8 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΠΕΡΦΟΡΤΩΣΗΣ ΕΥΚΑΜΠΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟΥ ΜΕ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ**

### **8.1 Γενική περιγραφή**

Στο πλαίσιο της διερεύνησης της επίδρασης της εξέλιξης των μεθοδολογιών αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων διερευνήθηκαν και θέματα που αφορούν στον έλεγχο της επάρκειας της φέρουσας ικανότητας υφιστάμενων οδοστρωμάτων αεροδρομίων στα οποία παρατηρούνται φαινόμενα υπερφόρτωσης (overloading), γεγονός το οποίο είναι πολύ σημαντικό για την ορθή λειτουργία ενός αεροδρομίου. Σημειώνεται ότι μέχρι στιγμής, η πάγια τακτική αξιολόγησης περιστατικών υπερφόρτωσης οδοστρωμάτων αεροδρομίων, πραγματοποιείται με τη βοήθεια συστημάτων κατάταξης σε καθορισμένο σύστημα αναφοράς φορτίων, όπως είναι η επίσημη μέθοδος κατάταξης ACN-PCN, η οποία βασίζεται σε εμπειρικές μεθοδολογίες ανάλυσης οδοστρωμάτων. Στο πλαίσιο αυτό, στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται διερεύνηση των κριτηρίων υπερφόρτωσης του ICAO, μέσω της εφαρμογής των εξελιγμένων μεθοδολογιών αξιολόγησης οδοστρώματος αεροδρομίων της FAA.

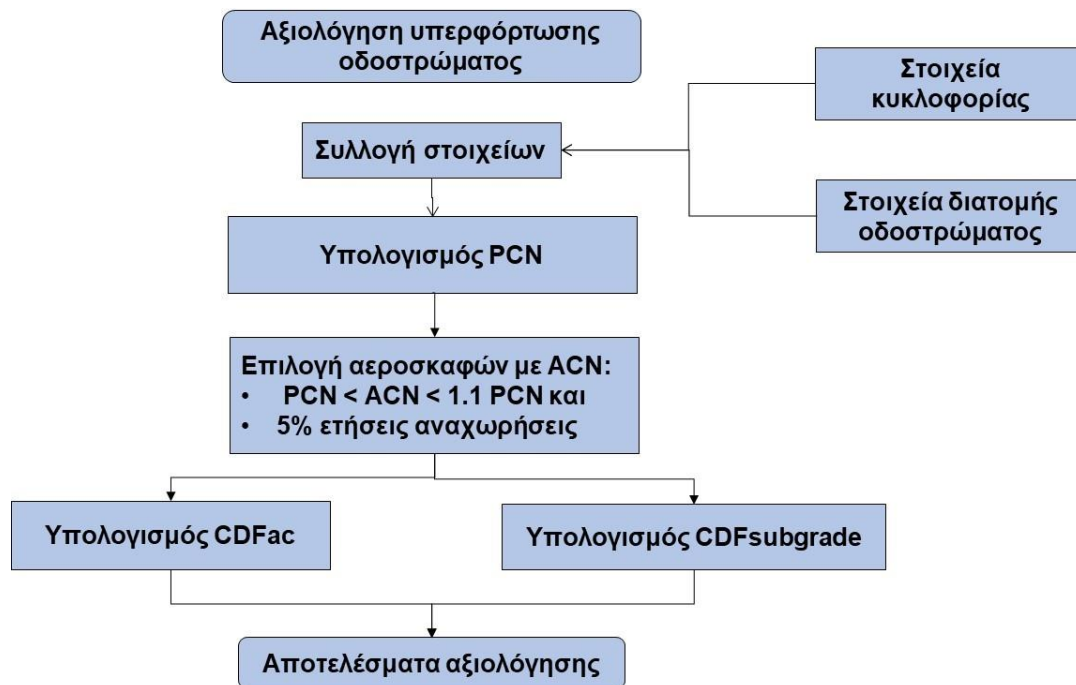
Για το σκοπό αυτό πραγματοποιείται εφαρμογή του ισχύοντος συστήματος κατάταξης της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACN-PCN σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα διαδρόμου Π/Α αεροσκαφών περιφερειακού αεροδρομίου. Η διαδικασία που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του δείκτη PCN είναι αυτή που αναπτύχθηκε από την FAA (FAA 2014b). Στη συνέχεια, τα κριτήρια υπερφόρτωσης του ICAO διερευνήθηκαν με εφαρμογή της εξελιγμένης αναλυτικής διαδικασίας αξιολόγησης που αναπτύχθηκε από την FAA (FAA 2016), η οποία εφαρμόζεται μέσω του εργαλείου (FAARFIELD 1.42) (FAARFIELD 2017).

Σύμφωνα με τον ICAO (ICAO 1983), η υπερφόρτωση ενός οδοστρώματος αεροδρομίου μπορεί να προκληθεί είτε από την επιβολή πολύ μεγάλων φορτίων είτε από αύξηση της συχνότητας φόρτισης ή και τα δύο. Η επιβολή φορτίων μεγαλύτερων από εκείνα που έχουν ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό οδηγεί σε μείωση της διάρκειας ζωής του οδοστρώματος. Ένα οδόστρωμα μπορεί συνήθως να αντέξει ένα συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων φορτίων κατά τη διάρκεια της ζωής του. Συνεπώς, συνήθως γίνεται αποδεκτή μια μικρή υπερφόρτωση του οδοστρώματος, όταν κρίνεται σκόπιμο, με περιορισμένη μόνο απώλεια στη διάρκεια ζωής του και σχετικά μικρή επιτάχυνση της φθοράς του οδοστρώματος. Υπενθυμίζεται ότι για τις συνθήκες της υπερφόρτωσης ενός εύκαμπτου οδοστρώματος, ο ICAO προτείνει τα ακόλουθα κριτήρια τα οποία στηρίζονται στις βασικές αρχές της μεθόδου ACN-PCN:



- (i) Περιστασιακές κινήσεις αεροσκαφών με ACN κατά 10% μεγαλύτερο από το PCN ευκάμπτου οδοστρώματος δεν αναμένεται να προκαλέσουν φθορά μείζονος σημασίας στο οδόστρωμα.
- (ii) Ο ετήσιος αριθμός των κινήσεων των υπέρβαρων αεροσκαφών δεν πρέπει να υπερβαίνει το 5% των συνολικών ετήσιων κινήσεων που εξυπηρετεί το οδόστρωμα. Δεν υπάρχει ακριβής οδηγία για την επιλογή του αριθμού των κινήσεων που αντιπροσωπεύει το ποσοστό 5%.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε φαίνεται στην Εικόνα 8.1. Αρχικά πραγματοποιήθηκε συλλογή των στοιχείων του οδοστρώματος και των στοιχείων κυκλοφορίας που δέχεται το αεροδρόμιο, με βάση τα οποία προσδιορίστηκε ο δείκτης PCN του οδοστρώματος.

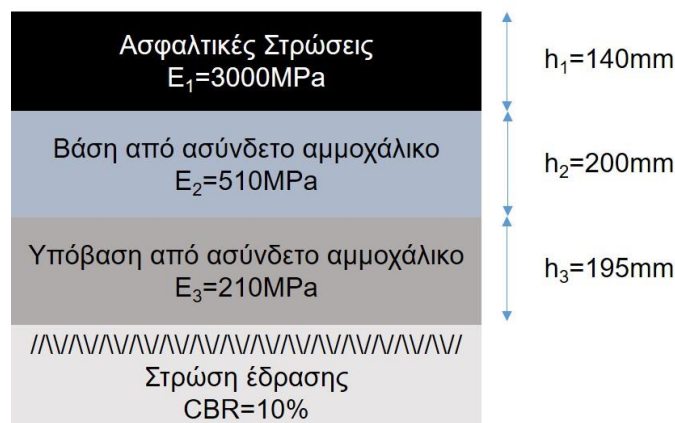


**Εικόνα 8.1 Μεθοδολογία αξιολόγησης κριτηρίου υπερφόρτωσης**

Για τη διερεύνηση του κριτηρίου υπερφόρτωσης του ICAO επιλέχθηκαν αεροσκάφη με τιμές ACN μεγαλύτερες από το PCN του οδοστρώματος, αλλά χωρίς να υπερβαίνουν το PCN περισσότερο από 10%. Κάθε αεροσκάφος προστέθηκε ξεχωριστά στη σύνθεση της κυκλοφορίας θεωρώντας ότι εφαρμόζει περίπου 5% των συνολικών ετήσιων αναχωρήσεων που πραγματοποιούνται στο αεροδρόμιο. Η επίδρασή του στο οδόστρωμα εξετάστηκε μέσω του υπολογισμού της φθοράς (Loizos et al. 2021).

## 8.2 Συλλογή στοιχείων

Στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης τα απαιτούμενα στοιχεία ανακτήθηκαν από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ. Η διατομή του οδοστρώματος αποτελείται από ασφαλτικές στρώσεις πάχους 140mm, βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο πάχους 200mm, στρώση υπόβασης από ασύνδετο αμμοχάλικο πάχους 195mm και τη στρώση έδρασης. Στην Εικόνα 8.2 φαίνονται τα πάχη και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος.



**Εικόνα 8.2 Διατομή οδοστρώματος διαδρόμου Π/Α αεροσκαφών**

Πιο συγκεκριμένα, συγκεντρώθηκαν δεδομένα κυκλοφορίας σχετικά με τους τύπους των αεροσκαφών που αναμενόταν να χρησιμοποιήσουν το εύκαμπτο οδόστρωμα του διαδρόμου για μια 20ετή περίοδο σχεδιασμού και ο αριθμός των ετήσιων απογειώσεων του καθενός. Το αεροδρόμιο εξυπηρετεί κινήσεις τριών διαφορετικών τύπων αεροσκαφών, που έχουν την ίδια διάταξη συστήματος προσγείωσης (διπλοί τροχοί). Για την ανάλυση ελήφθη υπόψη ένα από τα τρία αεροσκάφη της κυκλοφορίας, το οποίο είναι το αεροσκάφος A320-200 με περίπου 5000 ετήσιες αναχωρήσεις. Τα άλλα δύο ελαφρά αεροσκάφη είχαν αμελητέα επίδραση στη φθορά του οδοστρώματος και ως εκ τούτου η θεώρηση της συνεισφοράς τους στις συνολικές ετήσιες απογειώσεις του αεροδρομίου θα μπορούσε να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα της ανάλυσης όσον αφορά στα κριτήρια της υπερφόρτωσης. Τα παραπάνω στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του δείκτη PCN του οδοστρώματος.

## 8.3 Ανάλυση στοιχείων

### 8.3.1 Επίδραση υπερφόρτωσης στη φθορά

Αρχικά ο δείκτης PCN προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας τη διαδικασία που παρέχεται από την FAA (FAA 2014b) και προέκυψε η κωδικοποίηση 47/F/B/W/T. Μετά τον προσδιορισμό του

PCN, εκτιμήθηκε η φθορά που αναπτύσσεται στο οδόστρωμα μέσω του δείκτη CDF. Το υπόψη οδόστρωμα ελέγχθηκε έναντι αστοχίας των ασφαλικών στρώσεων και της στρώσης έδρασης χρησιμοποιώντας τη διαδικασία που εφαρμόστηκε στο FAARFIELD 1.42. Από την παραπάνω υλοποίηση προέκυψε ότι ο δείκτης CDF της στρώσης έδρασης ήταν ίσος με  $CDF_{\text{subgrade}}=0.38$  και των ασφαλικών στρώσεων ίσος με  $CDF_{\text{ac}}=0.19$ . Σύμφωνα με τη σχετική αξιολόγηση η διατομή παρουσίαζε  $CDF < 1$ , που σημαίνει ότι ήταν δομικά επαρκής.

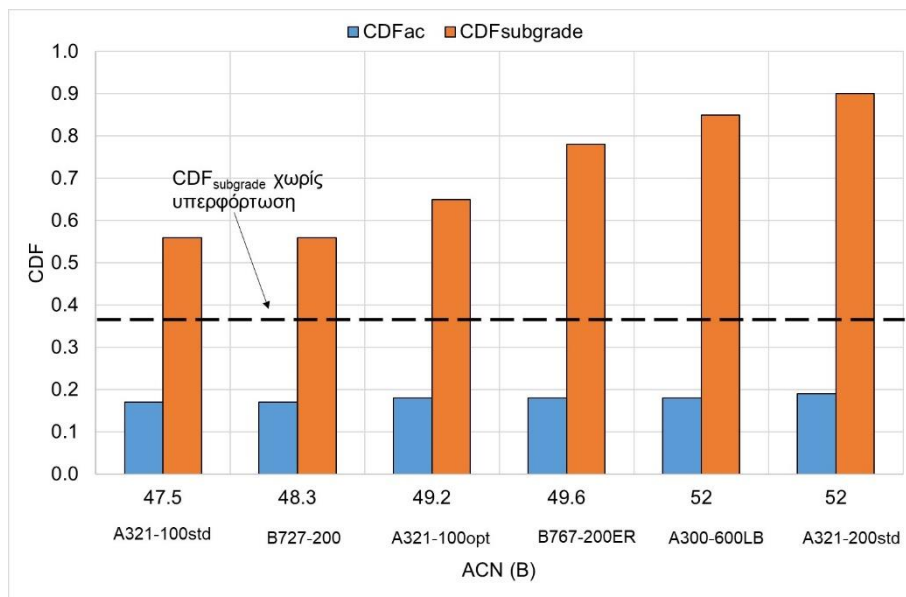
Για τη διερεύνηση των κριτηρίων υπερφόρτωσης του ICAO επιλέχθηκαν έξι αεροσκάφη με τιμές ACN στο εύρος  $PCN < ACN < 1.1PCN$  για την εδαφική κατηγορία B, δηλαδή στο εύρος 47-52. Για κάθε αεροσκάφος θεωρήθηκε ότι εκτελούσε περίπου 5% των συνολικών ετήσιων απογειώσεων των αεροσκαφών του αεροδρομίου (250 ετήσιες απογειώσεις/αναχωρήσεις). Οι τιμές ACN για κάθε αεροσκάφος παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.1 όπως έχουν προκύψει από τη χρήση του λογισμικού COMFAA 3.0.

**Πίνακας 8.1 Τιμές ACN αεροσκαφών**

Τύπος αεροσκάφους	ACN (A)	ACN (B)	ACN (C)	ACN (D)
<b>A321-100std</b>	45.2	<b>47.5</b>	53.1	58.9
<b>B727-200BASIC</b>	45.8	<b>48.3</b>	55.0	60.1
<b>A321-100opt</b>	46.7	<b>49.2</b>	54.7	60.5
<b>B767-200 ER</b>	44.9	<b>49.6</b>	59.8	80.2
<b>A300-600 LB</b>	46.9	<b>52.0</b>	63.0	81.2
<b>A321-200std</b>	49.4	<b>52.0</b>	57.6	63.2

Κάθε αεροσκάφος προστέθηκε ξεχωριστά στην υπάρχουσα κυκλοφορία του αεροδρομίου και διερευνήθηκε η επίδρασή του στη φθορά του οδοστρώματος χρησιμοποιώντας την αναλυτική μέθοδο της FAA. Τα αποτελέσματα της σχετικής διερεύνησης παρουσιάζονται στην Εικόνα 8.3, όπου φαίνεται ότι η φθορά των ασφαλικών στρώσεων  $CDF_{\text{ac}}$  επηρεάζεται ελάχιστα από την προσθήκη ενός νέου αεροσκάφους στη σύνθεση της κυκλοφορίας.

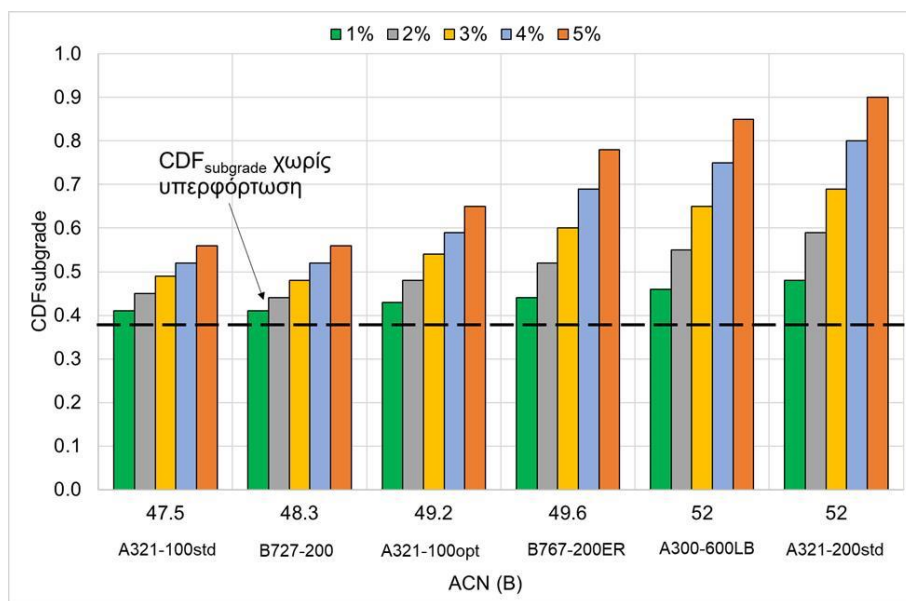
Εντούτοις, η φθορά της στρώσης έδρασης  $CDF_{\text{subgrade}}$  επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την υπερφόρτωση. Παρόλο που το οδόστρωμα παραμένει δομικά επαρκές ( $CDF < 1$ ), παρατηρείται σημαντική αύξηση του δείκτη  $CDF_{\text{subgrade}}$ , η οποία κυμαίνεται από 40% έως 130%. Η ανάλυση δείχνει ότι η συνήθης πρακτική που χρησιμοποιείται για την υπερφόρτωση μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της διάρκειας ζωής του οδοστρώματος.



**Εικόνα 8.3 Επίδραση υπερφόρτωσης στη φθορά**

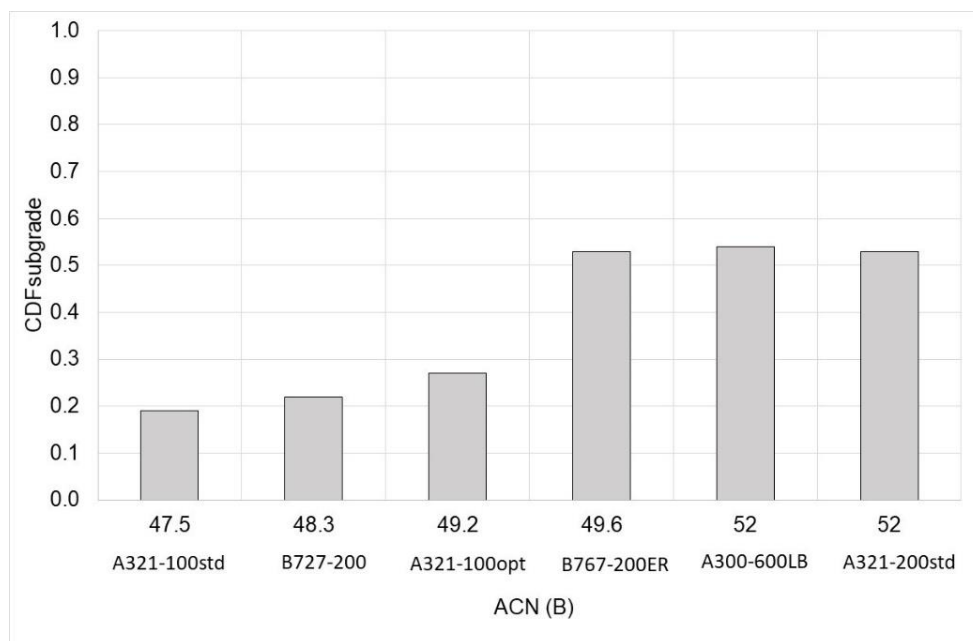
### 8.3.1 Επίδραση μεταβολής ποσοστού ετήσιων διελεύσεων στη φθορά

Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της υπερφόρτωσης στο δείκτη  $CDF_{subgrade}$  πραγματοποιήθηκε εκτίμηση του για ποσοστά ετήσιων απογειώσεων που κυμαίνονται από 1% έως 5%. Τα αποτελέσματα της σχετικής ανάλυσης παρουσιάζονται στην Εικόνα 8.4 όπου φαίνεται ότι όταν οι ετήσιες απογειώσεις του αεροσκάφους που προκαλεί υπερφόρτωση περιορίζονται στο 1%, η αύξηση του δείκτη  $CDF_{subgrade}$  περιορίζεται σε ένα εύρος από 10% έως 25%.



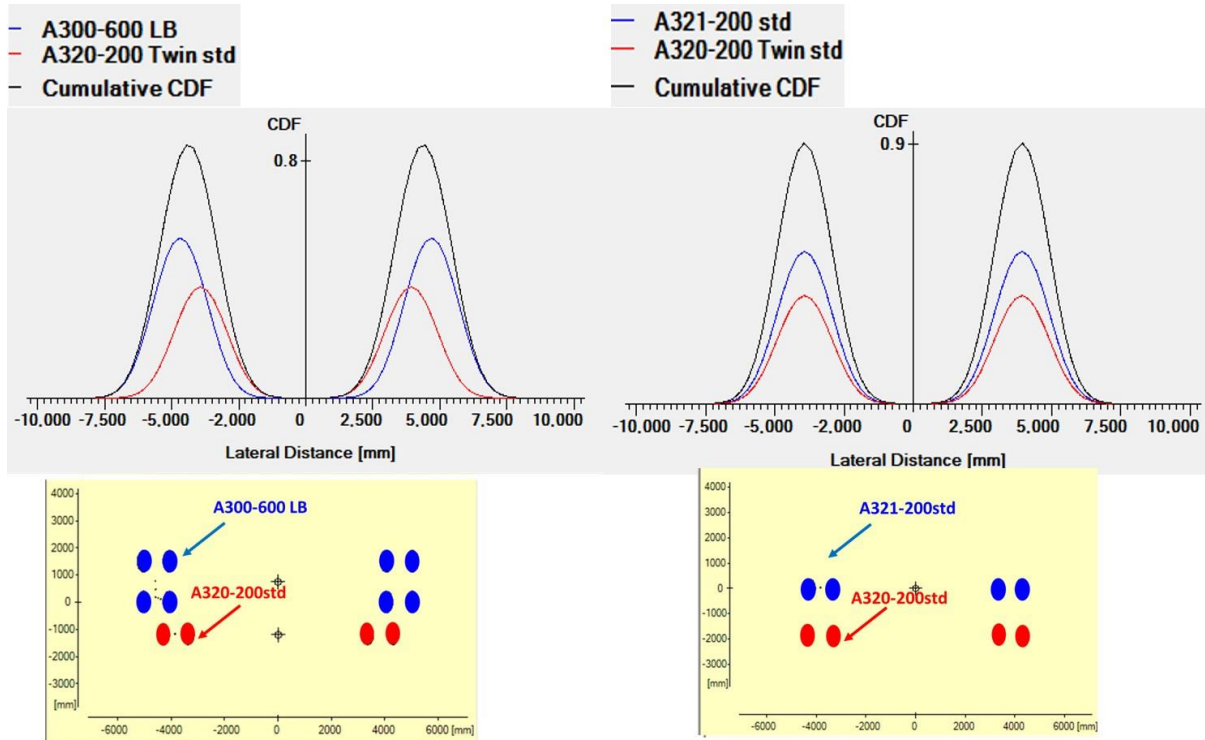
**Εικόνα 8.4 Επίδραση της υπερφόρτωσης στη φθορά για διαφορετικά ποσοστά ετήσιων απογειώσεων**

Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι αεροσκάφη με την ίδια τιμή ACN, όπως το A300-600LB και το A321-200std, που αναμένεται να προκαλούν την ίδια επιπόνηση στο οδόστρωμα, όταν προστίθενται στη σύνθεση της κυκλοφορίας οδηγούν σε διαφορετικές συνολικές τιμές του δείκτη  $CDF_{subgrade}$ . Για το λόγο αυτό εκτιμήθηκε η επιμέρους φθορά του κάθε αεροσκάφους και τα σχετικά αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 8.5.



**Εικόνα 8.5 Επιμέρους φθορά αεροσκαφών  $CDF_{subgrade}$**

Στην Εικόνα 8.5 παρατηρείται ότι η μεμονωμένη φθορά αυτών των αεροσκαφών είναι η ίδια, αλλά όταν αναμιγνύονται με άλλα αεροσκάφη, η συνεισφορά τους στο συνολικό δείκτη  $CDF_{subgrade}$  μπορεί να είναι διαφορετική. Αυτό απεικονίζεται καλύτερα στην Εικόνα 8.6, όπου φαίνεται ότι η συνεισφορά αεροσκαφών με ίδια τιμή ACN και ίδια φθορά στο συνολικό δείκτη  $CDF_{subgrade}$  εξαρτάται από τη σύνθεση της κυκλοφορίας και από τα χαρακτηριστικά των συστημάτων προσγείωσης των αεροσκαφών.



**Εικόνα 8.6 Συνεισφορά αεροσκαφών με ίδιο ACN και ίδια φθορά στον συνολικό δείκτη  $CDF_{subgrade}$**

Η συνεισφορά αεροσκαφών με την ίδια τιμή ACN στο συνολικό δείκτη  $CDF_{subgrade}$  με διαφορετικό τρόπο αποτελεί ένα θέμα που δεν μπορεί να αναδειχθεί κατά την εφαρμογή των κριτηρίων υπερφόρτωσης του ICAO, το οποίο βασίζεται στη μέθοδο ACN-PCN. Επομένως, το κριτήριο της υπερφόρτωσης προτείνεται να χρησιμοποιείται με προσοχή στην παρούσα φάση.

#### 8.4 Σχόλια-παρατηρήσεις

Από την παρούσα διερεύνηση προέκυψε ότι η εφαρμογή του εμπειρικού κριτηρίου υπερφόρτωσης του ICAO μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της φθοράς του οδοστρώματος, όσον αφορά στη συμπεριφορά της στρώσης έδρασης. Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της εναπομένουσας διάρκειας ζωής του οδοστρώματος. Αντιθέτως, η φθορά των ασφαλτικών στρώσεων δεν φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά για τη συγκεκριμένη περίπτωση που εξετάστηκε.

Επιπλέον προέκυψε ότι αεροσκάφη με ίδιες τιμές ACN παρουσίαζαν διαφορετική επίδραση στη συνολική φθορά της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος. Για αυτό το λόγο πιστεύεται ότι το ισχύον κριτήριο της υπερφόρτωσης θα πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις απουσίας αναλυτικών διαδικασιών αξιολόγησης για την εκτίμησης της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος. Η παραπάνω παρατήρηση αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον αν

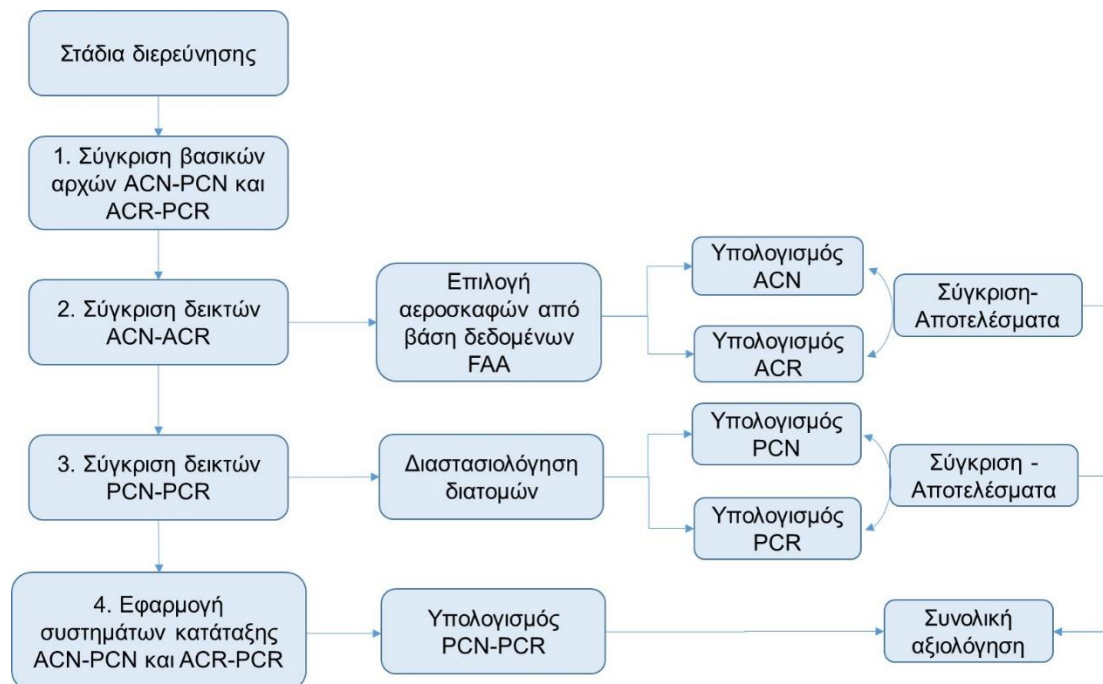
αναλογιστεί κανείς και τη διαφοροποίηση των τιμών PCN που προκύπτουν από την εφαρμογή διαφορετικών διαδικασιών που έχουν αναπτυχθεί παγκοσμίως.

Σημειώνεται ότι δεδομένου ότι η παρούσα χρονική περίοδος συμπίπτει με τη μετάβαση από το ισχύον σύστημα κατάταξης ACN-PCN στο επικαιροποιημένο σύστημα ACR-PCR, πιστεύεται ότι η παρούσα διερεύνηση είναι χρήσιμη για την παρούσα χρονική περίοδο. Πλην όμως κρίνεται σκόπιμη η αξιολόγηση της επικαιροποιημένης διαδικασίας κατάταξης της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACR-PCR και η σύγκρισή της με την ισχύουσα πρακτική. Σχετική προκαταρκτική διερεύνηση παρατίθεται στο κεφάλαιο 9.

## 9 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ ACR-PCR

### 9.1 Γενικά στοιχεία

Στο πλαίσιο της προκαταρκτικής διερεύνησης της επίδρασης της εισαγωγής της μεθόδου κατάταξης της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACR-PCR ακολουθήθηκε η διαδικασία που φαίνεται στην Εικόνα 9.1. Αρχικά πραγματοποιήθηκε σύγκριση των βασικών αρχών των δύο συστημάτων αναφοράς ACN-PCN και ACR-PCR που έχουν αναφερθεί στα κεφάλαια 4.3 και 4.4. Στη συνέχεια με αναφορά στα εύκαμπτα οδοστρώματα πραγματοποιείται σύγκριση των αριθμητικών τιμών των δεικτών ACN και ACR για πληθώρα αεροσκαφών που επιλέχθηκαν από τη βάση δεδομένων της FAA προκειμένου να διερευνηθεί η πιθανή συσχέτιση μεταξύ τους. Το επόμενο στάδιο της έρευνας περιλαμβάνει την εκτίμηση των δεικτών PCN και PCR 28 διατομών εύκαμπτων οδοστρωμάτων, οι οποίες σχεδιάστηκαν χρησιμοποιώντας την πιο πρόσφατη μεθοδολογία διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων της FAA (FAA 2021) για το ίδιο σενάριο κυκλοφορίας (Armeni and Loizos 2022). Η ανάλυση επεκτάθηκε λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικά σενάρια κυκλοφορίας που αντιστοιχούν σε αερολιμένες του ελλαδικού χώρου. Ακολουθεί διερεύνηση της επίδρασης της μεταβολής του σεναρίου της κυκλοφορίας στην εκτίμηση του δείκτη PCR για μία ενδεικτική διατομή.



Εικόνα 9.1 Στάδια διερεύνησης



Αναφορικά με τα δύσκαμπτα οδοστρώματα πραγματοποιείται σύγκριση των αριθμητικών τιμών των δεικτών ACN και ACR για πληθώρα αεροσκαφών που επιλέχθηκαν από τη βάση δεδομένων της FAA προκειμένου να διερευνηθεί η πιθανή συσχέτιση μεταξύ τους. Κατόπιν πραγματοποιείται εκτίμηση των δεικτών PCN και PCR περίπου 20 διατομών, οι οποίες σχεδιάστηκαν χρησιμοποιώντας την πιο πρόσφατη μεθοδολογία διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων της FAA (FAA 2021) για το ίδιο σενάριο κυκλοφορίας. Ακολουθεί διερεύνηση της επίδρασης της θεώρησης της κυκλοφορίας στην εκτίμηση του δείκτη PCR για μία ενδεικτική διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικά σενάρια κυκλοφορίας που αντιστοιχούν σε αερολιμένες του ελλαδικού χώρου.

## 9.2 Σύγκριση βασικών αρχών μεθόδων κατάταξης ACN-PCN και ACR-PCR

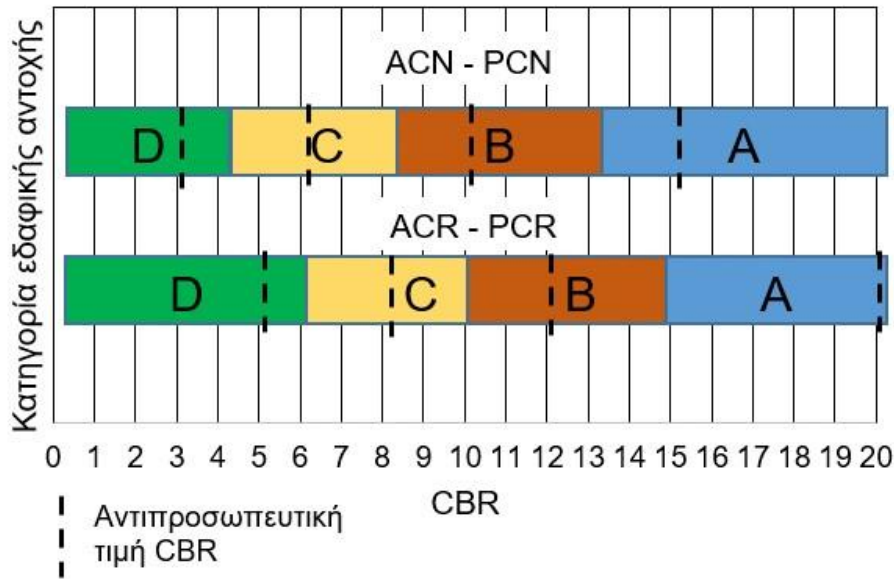
Από τη σύγκριση των δύο συστημάτων προκύπτει ότι και τα δύο συστήματα διαθέτουν την ίδια βασική συνθήκη ελέγχου της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Εντούτοις παρουσιάζουν αρκετές διαφορές όσον αφορά στις βασικές αρχές τους.

### 9.2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

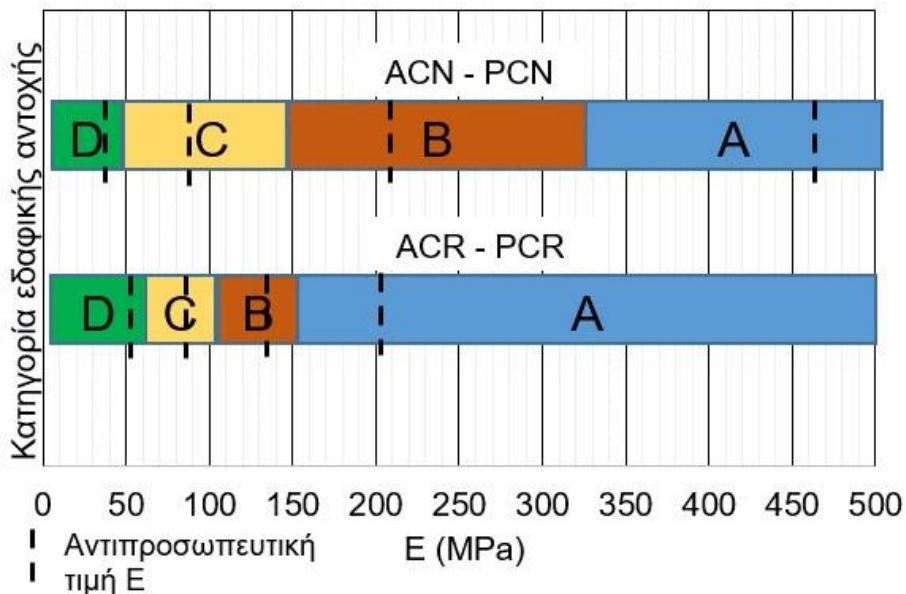
Βασική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο συστημάτων κατάταξης αποτελεί το θεωρητικό υπόβαθρο της κάθε μεθόδου. Πιο συγκεκριμένα η μέθοδος ACN-PCN βασίζεται στην εμπειρική μέθοδο CBR για τα εύκαμπτα οδοστρώματα, ενώ για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα βασίζεται στη μέθοδο του Westergaard. Αντίστοιχα η μέθοδος ACR-PCR βασίζεται στη θεωρία των πολλαπλών ελαστικών στρώσεων για τα εύκαμπτα οδοστρώματα και ειδικά για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα ο υπολογισμός των κρίσιμων τάσεων στον πυθμένα της πλάκας σκυροδέματος βασίζεται στη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων.

### 9.2.2 Κατηγορία εδαφικής αντοχής

Στη μέθοδο ACN-PCN η κατηγορία εδαφικής αντοχής καθορίζεται με βάση την τιμή του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης για τα εύκαμπτα οδοστρώματα και το δείκτη αντίδρασης εδάφους  $k$  για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων. Αντίστοιχα, στη μέθοδο ACR-PCR η κατηγορία εδαφικής αντοχής καθορίζεται με βάση την τιμή του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης ( $E$ ) και προτείνεται κοινή κατηγοριοποίηση τόσο για τα εύκαμπτα όσο και για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων (A: Υψηλή με  $E \geq 150\text{MPa}$ , B: Μεσαία με  $150\text{MPa} < E < 100\text{MPa}$ , C: Χαμηλή με  $60\text{MPa} \leq E < 100\text{MPa}$  και D: Πολύ χαμηλή με  $E < 60\text{MPa}$ ). Σύγκριση των κατηγοριών εδαφικής αντοχής για τα εύκαμπτα οδοστρώματα φαίνεται στην Εικόνα 9.2 και για τα δύσκαμπτα στην Εικόνα 9.3. Η αντιπροσωπευτική τιμή κάθε κατηγορίας σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή.



**Εικόνα 9.2** Κατηγορίες εδαφικής αντοχής συστημάτων ACN-PCN και ACR-PCR ως προς το δείκτη CBR (Εύκαμπτα Οδοστρώματα)



**Εικόνα 9.3** Κατηγορίες εδαφικής αντοχής συστημάτων ACN-PCN και ACR-PCR ως προς το E (Δύσκαμπτα Οδοστρώματα)

Σημειώνεται ότι για λόγους σύγκρισης, στην Εικόνα 9.2 οι τιμές του δείκτη CBR για την κατηγοριοποίηση του συστήματος ACR-PCR έχουν προκύψει μέσω της εξίσωσης 9.1 (FAA 2021) που δίνει τη συσχέτιση του δείκτη CBR με το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης E.

$$E = 1500 \times CBR \quad (\text{Εξ. 9.1})$$

Όπου E: το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης (psi).

Επιπλέον στην Εικόνα 9.3 οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης E για την κατηγοριοποίηση του συστήματος ACN-PCN έχουν προκύψει μέσω της εξίσωσης 9.2 (FAA 2021) που δίνει τη συσχέτιση του δείκτη αντίδρασης εδάφους k με το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης E.

$$E = 20.15 \times k^{1.284} \quad (\text{Εξ. 9.2})$$

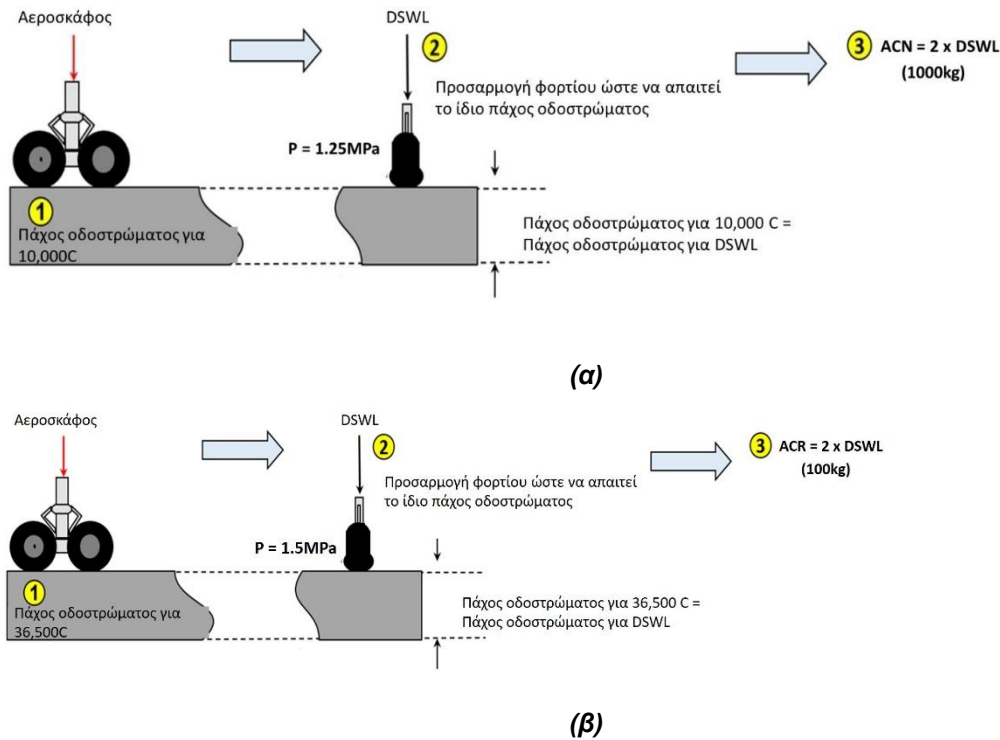
Όπου E: το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης (psi) και k: δείκτης αντίδρασης εδάφους (pci)

### 9.2.3 Προσδιορισμός δεικτών ACN και ACR

Μία επιπλέον βασική διαφοροποίηση των δύο συστημάτων κατάταξης αφορά στον ορισμό των δεικτών ACN και ACR. Οι δύο δείκτες βασίζονται στο ισοδύναμο φορτίο μονού τροχού (DSWL), το οποίο στην περίπτωση του δείκτη ACN έχει σταθερή πίεση ίση με 1.25 MPa ενώ στην περίπτωση του δείκτη ACR η πίεση ισούται με 1.5MPa.

Επιπλέον για τον υπολογισμό του δείκτη ACN το πάχος αναφοράς για τα εύκαμπτα οδοστρώματα είναι ίσο με το συμβατικό πάχος του οδοστρώματος, το οποίο επιτρέπει 10,000 καλύψεις-διελεύσεις C του πραγματικού συστήματος τροχών του αεροσκάφους για μια συγκεκριμένη κατηγορία εδαφικής αντοχής. Αντίστοιχα για την εκτίμηση του δείκτη ACR το πάχος αναφοράς επιτρέπει 36,500 καλύψεις-διελεύσεις C του πραγματικού συστήματος τροχών του αεροσκάφους για μια συγκεκριμένη κατηγορία εδαφικής αντοχής (Εικόνα 9.4). Για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα το πάχος αναφοράς είναι ανεξάρητο από τον αριθμό των καλύψεων-διελεύσεων C. Αντιστοιχεί στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος που απαιτείται ώστε η οριζόντια τάση που αναπτύσσεται στον πυθμένα της να είναι ίση με 2.75 MPa.

Για την περίπτωση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, ο υπολογισμός του πάχους αναφοράς για το δείκτη ACN πραγματοποιείται μέσω της μεθόδου CBR ενώ για τον δείκτη ACR μέσω της θεωρίας των πολλαπλών ελαστικών στρώσεων. Επιπλέον η τυπική διατομή του πάχους αναφοράς διαφοροποιείται στα δύο συστήματα. Για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα ο υπολογισμός του ACN βασίζεται στον υπολογισμό των τάσεων μέσω εφαρμογής των εξισώσεων του Westergaard.



**Εικόνα 9.4 Διαδικασία υπολογισμού του δείκτη α) ACN και β) ACR σε εύκαμπτα οδοστρώματα αεροδρομίων**

Ο υπολογισμός των δεικτών ACN και PCN πραγματοποιείται μέσω του λογισμικού COMFAA 3.0. Για τον υπολογισμό του δείκτη ACR χρησιμοποιείται το λογισμικό ICAO-ACR 1.3, ενώ για τον υπολογισμό του δείκτη PCR χρησιμοποιείται το λογισμικό σχεδιασμού και αξιολόγησης οδοστρωμάτων FAARFIELD 2.0.

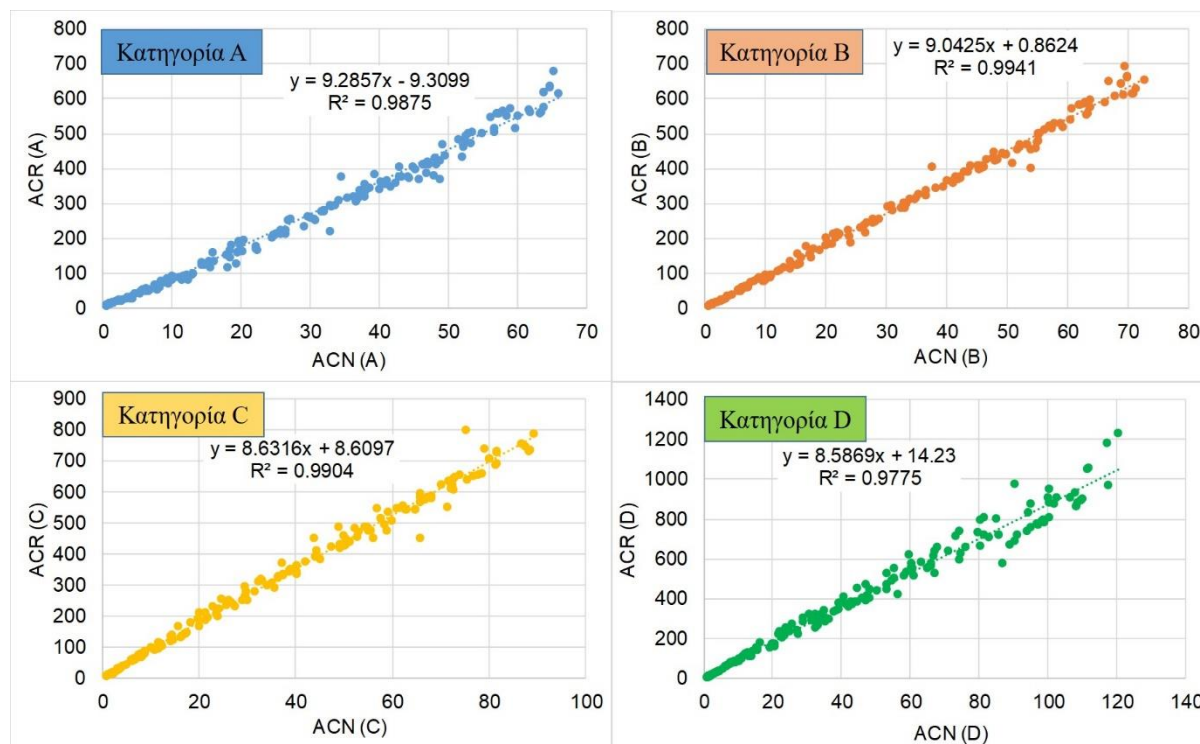
Σε γενικές γραμμές ισχύουν οι ίδιες οδηγίες για την περίπτωση υπερφόρτωσης των οδοστρωμάτων και για τις δύο μεθόδους δομικής κατάταξης οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Ωστόσο για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα το ποσοστό υπερφόρτωσης για τον δείκτη PCR έχει αυξηθεί στο 10% σε σχέση με το αντίστοιχο ποσοστό που ίσχυε για τον δείκτη PCN (5%).

### 9.3 Εύκαμπτα Οδοστρώματα

#### 9.3.1 Σύγκριση δεικτών ACN-ACR

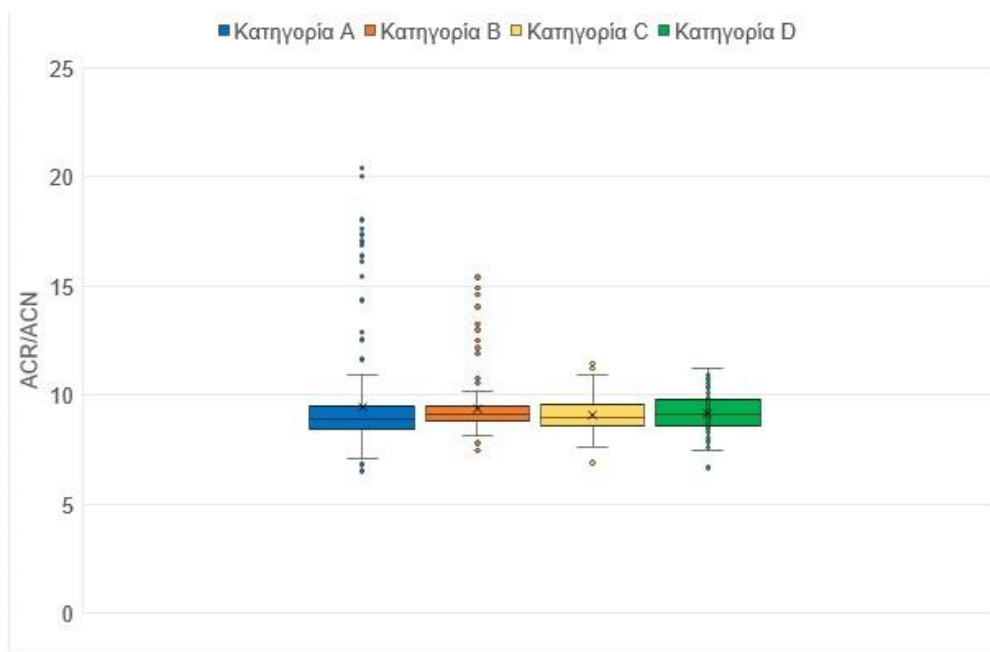
Προκειμένου να διερευνηθεί πιθανή συσχέτιση μεταξύ του δείκτη ACN και ACR ενός αεροσκάφους, επιλέχθηκαν 170 αεροσκάφη με διαφορετικά συστήματα διάταξης τροχών από τη βάση δεδομένων της FAA. Οι τιμές του δείκτη ACN κάθε αεροσκάφους υπολογίστηκαν για τις τέσσερις κατηγορίες εδαφικής αντοχής (A, B, C και D) χρησιμοποιώντας το λογισμικό COMFAA 3.0 που αναπτύχθηκε από την FAA (FAA 2014). Στη συνέχεια, για τα ίδια αεροσκάφη υπολογίστηκε η τιμή ACR χρησιμοποιώντας το λογισμικό ICAO-ACR 1.32 (FAA 2021). Τα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 9.5, στην οποία παρατίθεται και ο

συντελεστής συσχέτισης  $R^2$  για κάθε εδαφική κατηγορία. Από τη σχετική ανάλυση προέκυψε ότι υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των τιμών ACN και ACR για όλες τις κατηγορίες εδαφικής αντοχής, καθώς ο δείκτης  $R^2$  κυμαίνεται από 0.97 έως 0.99.



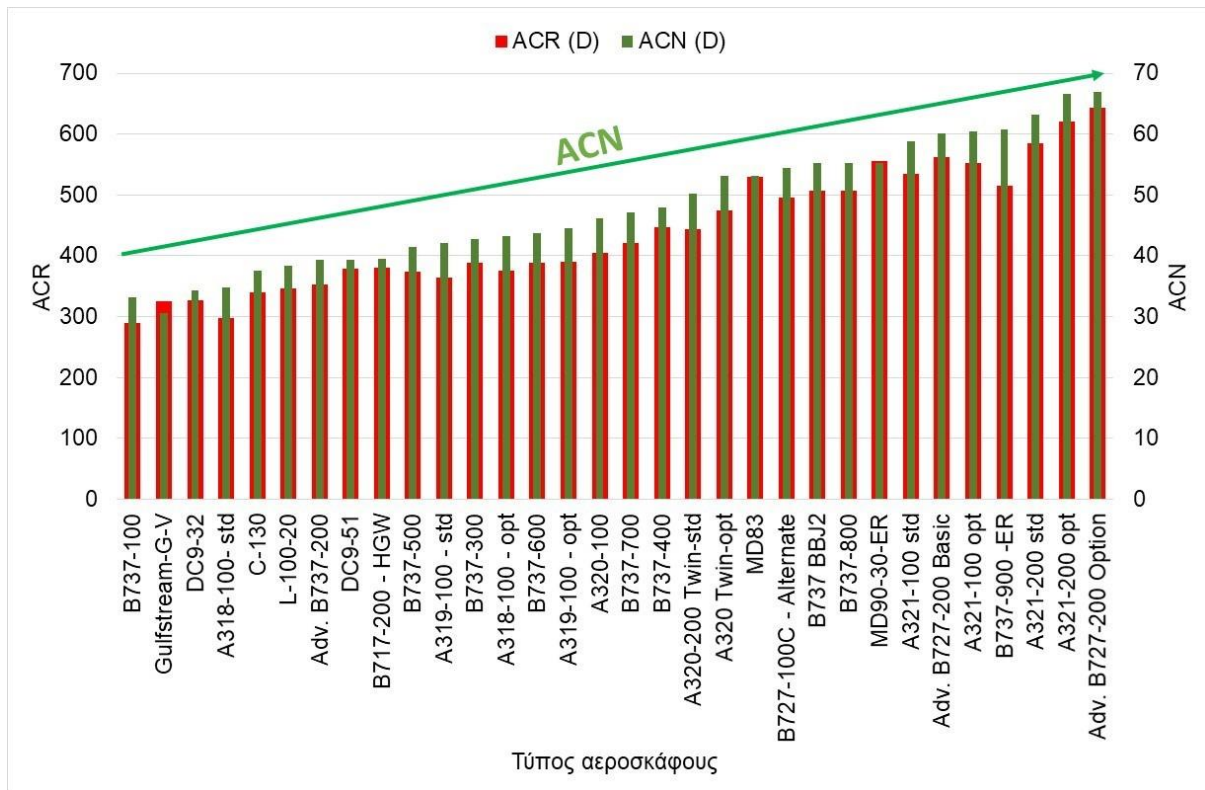
**Εικόνα 9.5 Συσχέτιση δεικτών ACN και ACR για εδαφική κατηγορία: (α) Α, (β) Β, (γ) C και (δ) D (εύκαμπτα οδοστρώματα).**

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο λόγος των δύο δεικτών ACR/ACN για τα ίδια 170 αεροσκάφη που χρησιμοποιήθηκαν στην παραπάνω ανάλυση για κάθε κατηγορία εδαφικής αντοχής. Ο δείκτης ACR έχει δομηθεί ώστε να είναι περίπου 10 φορές μεγαλύτερος από το δείκτη ACN, για την αποφυγή ενδεχόμενων προβλημάτων κατά την εφαρμογή του επικαιροποιημένου συστήματος ACR-PCR (White 2022, Sun et al. 2022). Η κατανομή του λόγου ACR/ACN για κάθε κατηγορία εδαφικής αντοχής παρουσιάζεται στην Εικόνα 9.6 με τη μορφή θηκογράμματος, όπου η ενδιάμεση γραμμή αναφέρεται στη μέση τιμή. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αναλογία των δύο δεικτών δεν είναι σταθερή για κάθε κατηγορία εδαφικής αντοχής και στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μικρότερη από 10. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις όπου ο δείκτης ACR μπορεί να είναι ακόμη και είκοσι φορές μεγαλύτερος από το δείκτη ACN, όπως παρατηρείται στην περίπτωση κατηγορίας εδαφικής αντοχής Α. Αυτές οι αποκλίσεις εντοπίστηκαν σε πολύ ελαφριά αεροσκάφη.

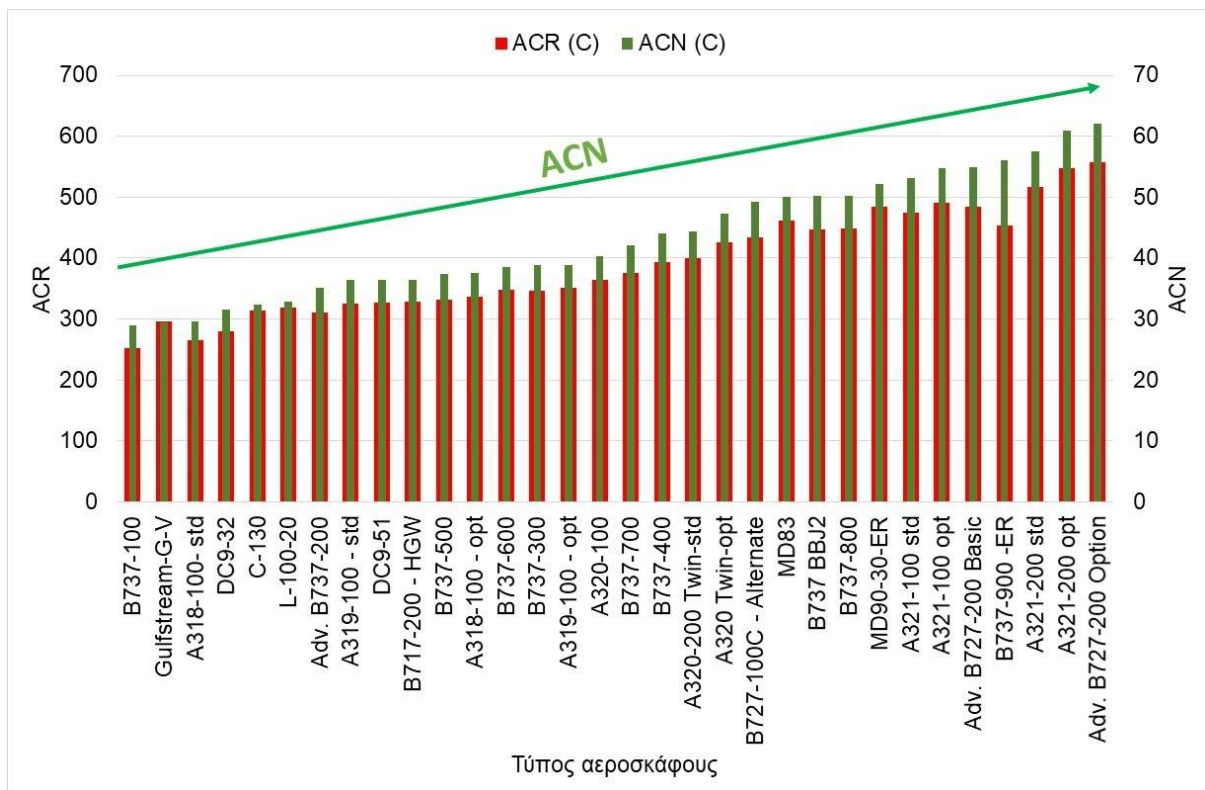


**Εικόνα 9.6 Λόγος ACR/ACN (εύκαμπτα οδοστρώματα)**

Προκειμένου να γίνει μια πιο ενδελεχής διερεύνηση της σχέσης μεταξύ των δεικτών ACN και ACR, επιλέχθηκαν 32 αεροσκάφη από τη βάση δεδομένων της FAA που έχουν την ίδια διάταξη τροχών στο σύστημα προσγείωσης (διπλοί τροχοί). Οι τιμές ACN και ACR για κάθε κατηγορία εδαφικής αντοχής παρουσιάζονται στις Εικόνες 9.7-9.10, απ' όπου προκύπτει ότι η διακύμανση των τιμών του δείκτη ACN δεν ακολουθεί τη διακύμανση των τιμών του δείκτη ACR.

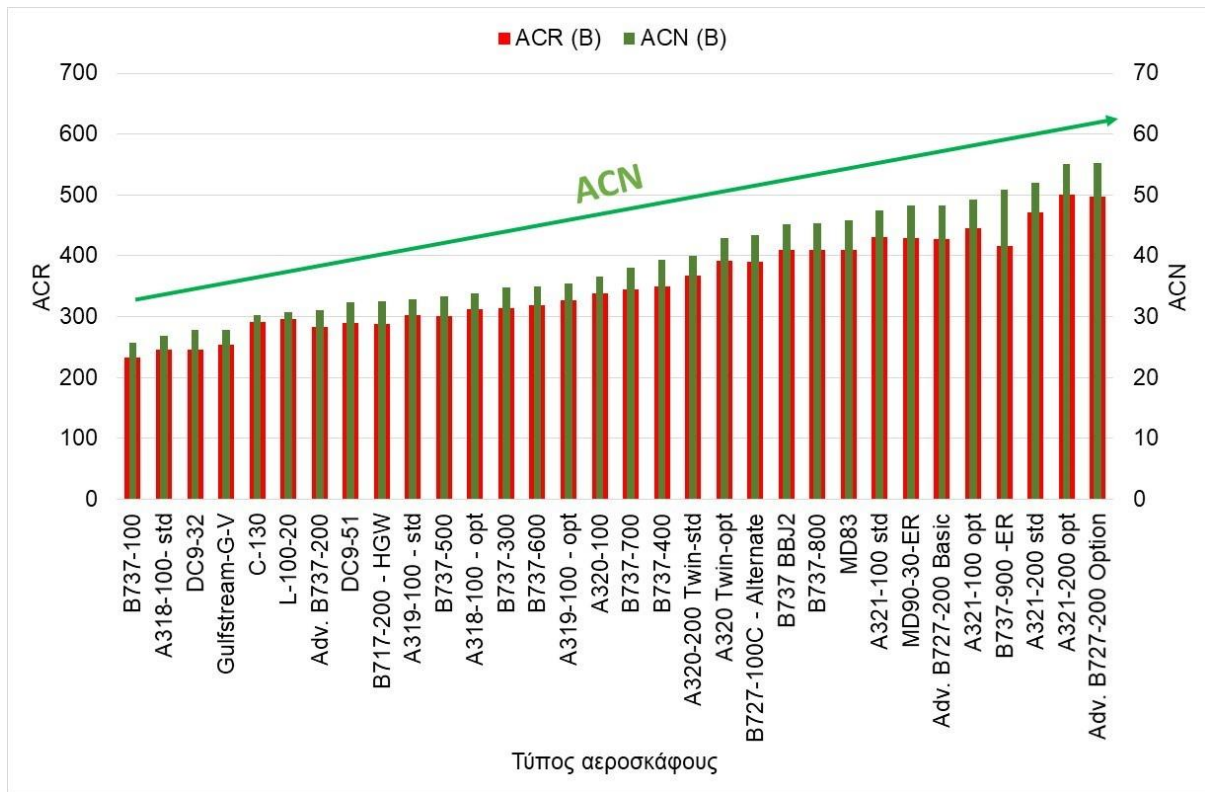


Εικόνα 9.7 Σύγκριση δεικτών ACN και ACR αεροσκαφών με διάταξη διπλών τροχών για εδαφική κατηγορία D

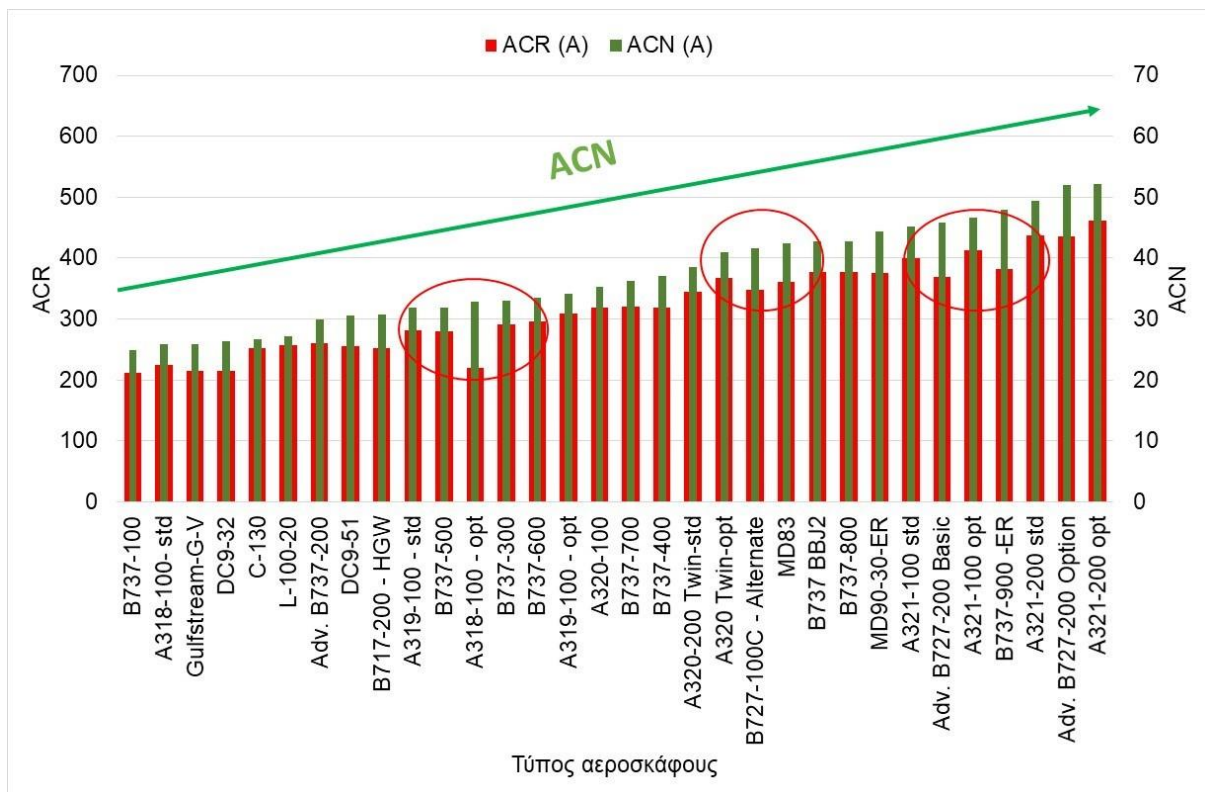


Εικόνα 9.8 Σύγκριση δεικτών ACN και ACR αεροσκαφών με διάταξη διπλών τροχών για εδαφική κατηγορία C





**Εικόνα 9.9 Σύγκριση δεικτών ACN και ACR αεροσκαφών με διάταξη διπλών τροχών για εδαφική κατηγορία Β**

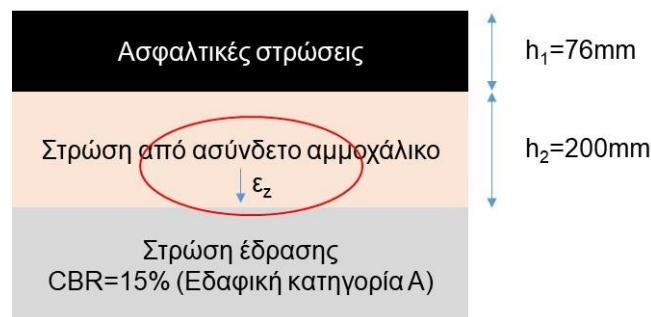


**Εικόνα 9.10 Σύγκριση δεικτών ACN και ACR αεροσκαφών με διάταξη διπλών τροχών για εδαφική κατηγορία Α**



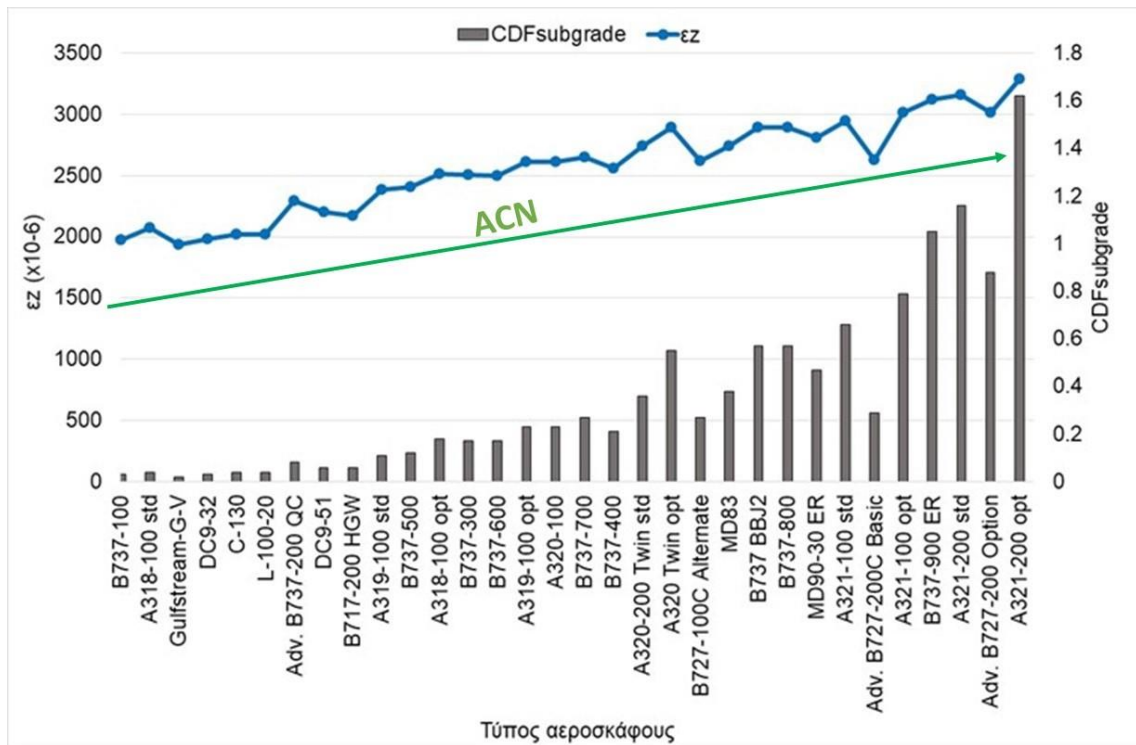
Στη συνέχεια επιλέχθηκαν οι τιμές των δεικτών ACN και ACR που εκτιμήθηκαν για την κατηγορία εδαφικής αντοχής A για περαιτέρω ανάλυση. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 9.10, ενώ η τιμή του δείκτη ACN των αεροσκαφών αυξάνεται, ο δείκτης ACR παρουσιάζει αρκετές διακυμάνσεις. Ωστόσο, δεν πρέπει να παραβλεφθεί το γεγονός ότι ο δείκτης ACN είναι ένας δείκτης που εκφράζει τη σχετική επίδραση ενός αεροσκάφους σε ένα οδόστρωμα και ως εκ τούτου οι διακυμάνσεις αυτές οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η σχετική επίδραση ορισμένων αεροσκαφών μεταβάλλεται κατά την εφαρμογή του επικαιροποιημένου συστήματος ACR-PCR. Για παράδειγμα η τιμή του δείκτη ACN του αεροσκάφους A321-100 είναι μικρότερη από την τιμή του δείκτη ACN του αεροσκάφους B737-900, ενώ αντιθέτως η τιμή του δείκτη ACR του αεροσκάφους A321-100 είναι μεγαλύτερη από την τιμή ACR του αεροσκάφους B737-900.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις οδήγησαν στη διερεύνηση της επίδρασης των αεροσκαφών στο οδόστρωμα μέσω της απόκρισης του οδοστρώματος. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκε μία θεωρητική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος, η οποία διέθετε τα ίδια χαρακτηριστικά με εκείνα της διατομής αναφοράς που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του δείκτη ACR (Εικόνα 9.11). Σημειώνεται ότι για τους σκοπούς της ανάλυσης, το πάχος της στρώσης από ασύνδετο αμμοχάλικο, το οποίο μεταβάλλεται κατά τον υπολογισμό του ACR, θεωρήθηκε σταθερό και ίσο με 200mm.

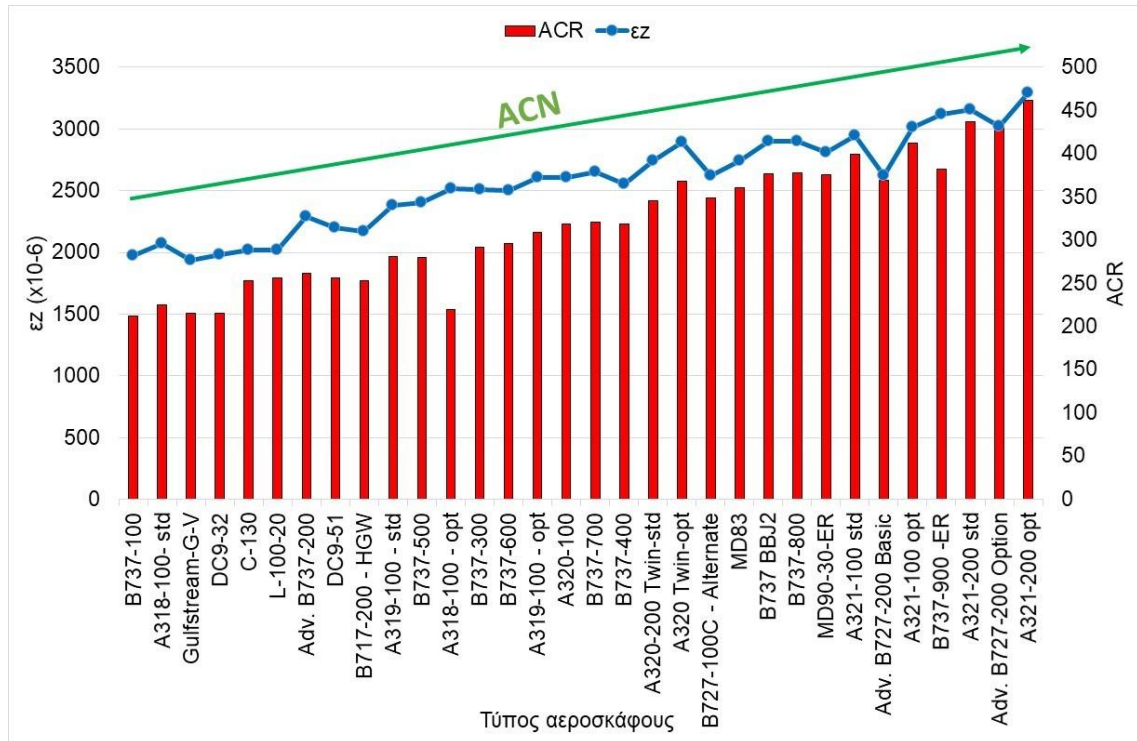


**Εικόνα 9.11 Διατομή οδοστρώματος για ανάλυση συμπεριφοράς οδοστρώματος (pavement response analysis)**

Για κάθε αεροσκάφος υπολογίστηκε η κατακόρυφη θλιπτική παραμόρφωση που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος καθώς και η αντίστοιχη φθορά ( $CDF_{subgrade}$ ) που προκαλείται από 1 ετήσια αναχώρηση, χρησιμοποιώντας την πιο πρόσφατη διαδικασία ανάλυσης οδοστρώματος που αναπτύχθηκε από την FAA (FAA 2021). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 9.12, όπου παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται ο δείκτης ACN του αεροσκάφους, παρατηρείται μία διακύμανση της κατακόρυφης παραμόρφωσης η οποία ακολουθεί τη μεταβολή της φθοράς της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος ( $CDF_{subgrade}$ ). Η διακύμανση αυτή φαίνεται να ακολουθεί σε γενικές γραμμές τη διακύμανση των τιμών ACR των αεροσκαφών όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 9.13.

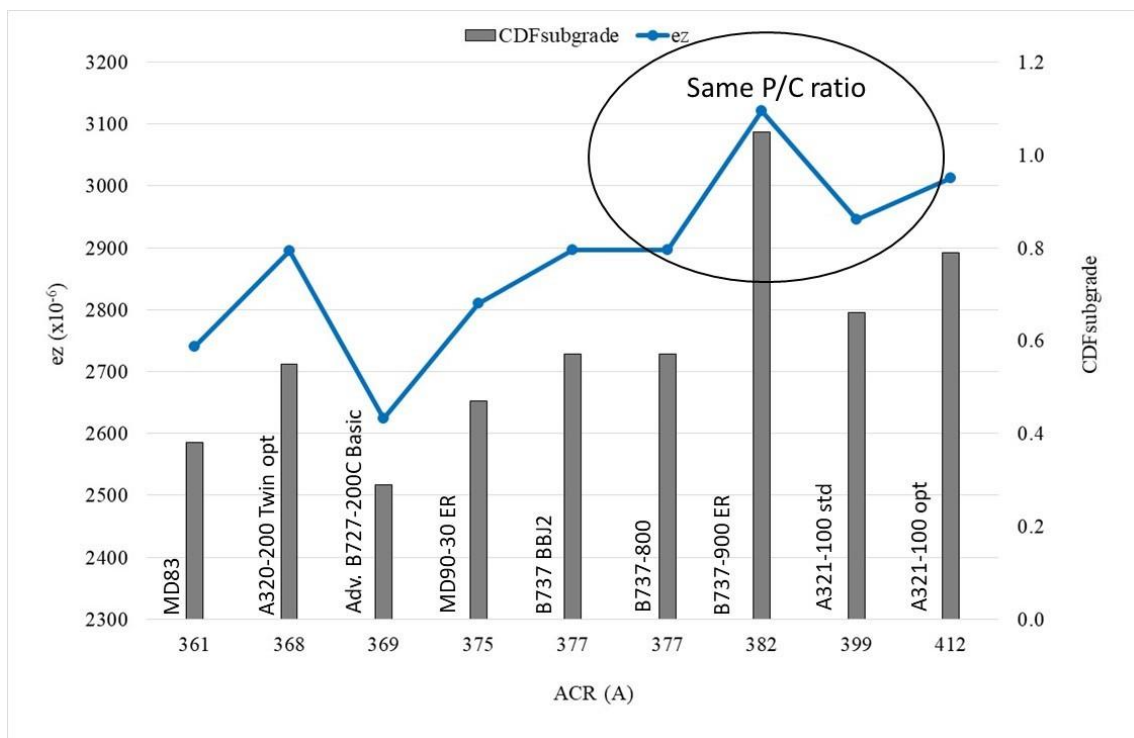


Εικόνα 9.12 Μεταβολή της κατακόρυφης παραμόρφωσης (ez) και της φθοράς της στρώσης έδρασης (CDFsubgrade) αυξανόμενου του δείκτη ACN



Εικόνα 9.13 Μεταβολή της κατακόρυφης παραμόρφωσης (ez) και του δείκτη ACR αυξανόμενου του δείκτη ACN

Ωστόσο, οι παραπάνω γενικές παρατηρήσεις δεν ισχύουν για όλα τα αεροσκάφη που εξετάστηκαν. Παρατηρώντας την Εικόνα 9.13 προκύπτει ότι η μεταβολή του δείκτη ACR δεν ακολουθεί αυστηρά τη μεταβολή της κατακόρυφης παραμόρφωσης. Στην Εικόνα 9.14 φαίνεται για 9 αεροσκάφη η κατακόρυφη παραμόρφωση και η φθορά της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος αυξανόμενου του δείκτη ACR. Παρατηρείται ότι αεροσκάφη με υψηλότερες τιμές ACR μπορεί να προκαλέσουν μικρότερη φθορά στο οδόστρωμα. Για παράδειγμα το αεροσκάφος A321-100opt που έχει ACR=412 για την κατηγορία εδαφικής αντοχής A, παρουσιάζει χαμηλότερο δείκτη φθοράς ( $CDF_{subgrade}$ ) σε σχέση με το αεροσκάφος B737-900 που έχει ACR=382 για την ίδια κατηγορία εδαφικής αντοχής. Δεδομένου ότι τα υπόψη αεροσκάφη παρουσιάζουν τον ίδιο λόγο P/C (pass-to-coverage ratio) και τον ίδιο αριθμό ετήσιων αναχωρήσεων, η φθορά τους επηρεάζεται κυρίως από την κατακόρυφη παραμόρφωση στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης. Επομένως, προκύπτει το συμπέρασμα ότι εξακολουθούν να υπάρχουν ασυνέπειες στην εφαρμογή του συστήματος ACR-PCR, όσον αφορά στον δείκτη ACR.



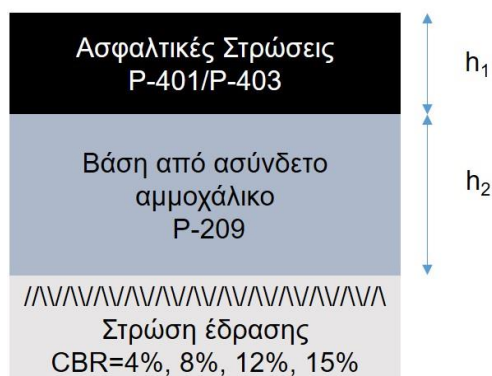
**Εικόνα 9.14 Μεταβολή της κατακόρυφης παραμόρφωσης (ez) και της φθοράς της στρώσης έδρασης ( $CDF_{subgrade}$ ) αυξανόμενου του δείκτη ACR**

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ενδεχομένως απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση προκειμένου να βελτιωθεί το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του δείκτη ACR. Επιπλέον, αν και φαίνεται ότι υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των δεικτών ACN και ACR, προτείνεται ο δείκτης ACR να εκτιμάται ανεξάρτητα από τον δείκτη ACN.

### 9.3.2 Σύγκριση δεικτών PCN-PCR

#### 9.3.2.1 Εκτίμηση δεικτών PCN-PCR για σταθερή κυκλοφορία σε διατομές με $CDF_{subgrade}=1$

Για τη σύγκριση των δεικτών PCN-PCR αρχικά σχεδιάστηκαν 28 διατομές εύκαμπτου οδοστρώματος χρησιμοποιώντας την πιο πρόσφατη αναλυτική μεθοδολογία διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων της FAA (FAA 2021) μέσω του αντίστοιχου λογισμικού (FAARFIELD 2.0). Η τυπική διατομή οδοστρώματος που χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό αποτελείται από ασφαλτικές στρώσεις (τυπικό υλικό FAA P-401), στρώση βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο (τυπικό υλικό της FAA P-209) και τη στρώση έδρασης με CBR = 4%, 8%, 12%, 15% (Εικόνα 9.15). Λόγω της τροποποίησης των ορίων των κατηγοριών εδαφικής αντοχής κατά το επικαιροποιημένο σύστημα ACR-PCR, η επιλογή των τιμών CBR της στρώσης έδρασης έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε το CBR να ανήκει στην ίδια κατηγορία εδαφικής αντοχής (CBR = 4% (D), 8% (C), 12% (B), 15% (A)) ανεξάρτητα από το σύστημα κατάταξης (ACN-PCN και ACR-PCR). Για κάθε κατηγορία εδαφικής αντοχής σχεδιάστηκαν επτά διατομές, θεωρώντας ότι το πάχος των ασφαλτικών στρώσεων ισούται με  $h_1=100\text{mm}$ ,  $120\text{mm}$ ,  $150\text{mm}$ ,  $180\text{mm}$ ,  $200\text{mm}$ ,  $250\text{mm}$ ,  $280\text{mm}$  και υπολογίζοντας το πάχος της βάσης ώστε να ισχύει  $CDF_{subgrade}=1$ . Η σύνθεση της κυκλοφορίας που ελήφθη υπόψη στο σχεδιασμό φαίνεται στον Πίνακα 9.1 ενώ τα χαρακτηριστικά των αεροσκαφών ανακτήθηκαν από τη βάση δεδομένων της FAA. Τα πάχη των επιμέρους στρώσεων των διατομών σχεδιασμού φαίνονται στην Εικόνα 9.16.

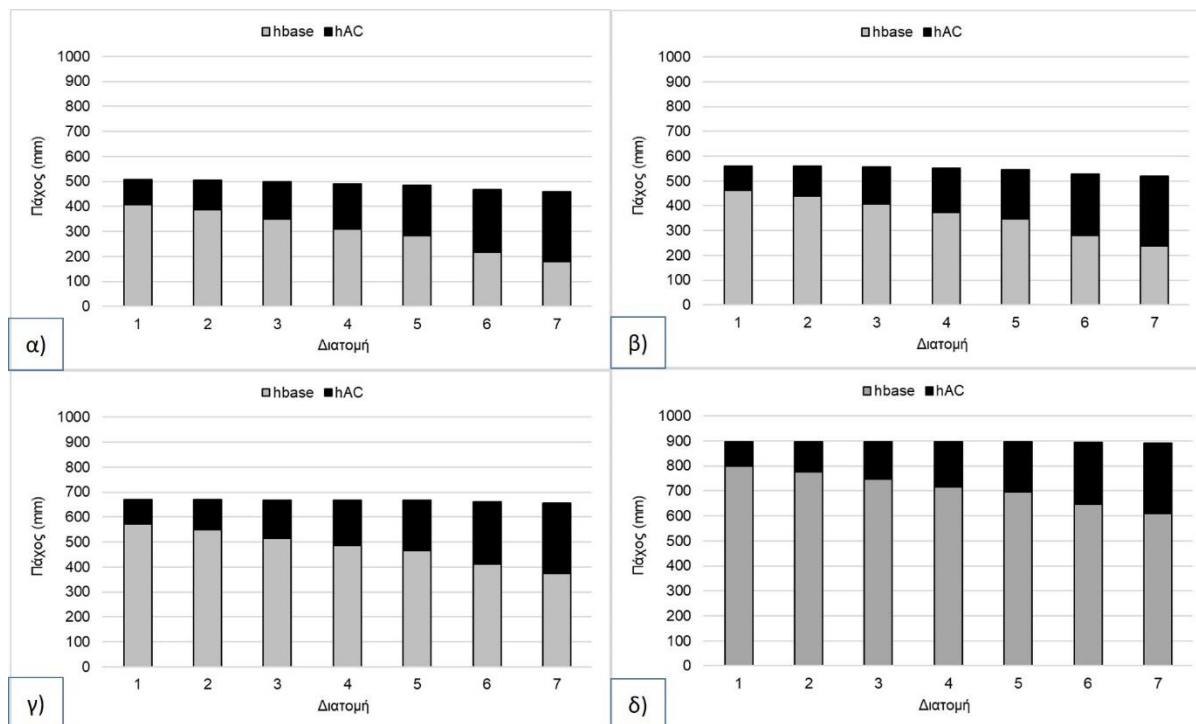


Εικόνα 9.15 Διατομή οδοστρώματος

Πίνακας 9.1 Σύσταση κυκλοφορίας και χαρακτηριστικά αεροσκαφών

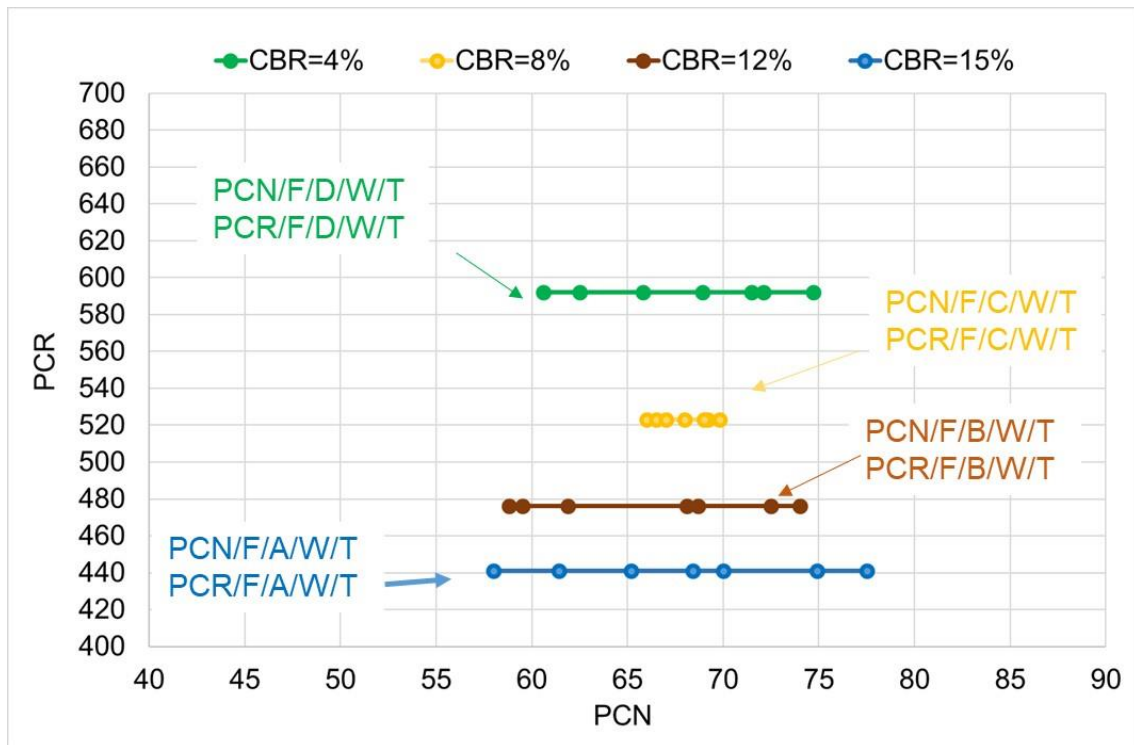
Τύπος αεροσκάφους	Ετήσιες αναχωρήσεις	Βάρος αεροσκάφους (tns)	Πίεση ελαστικών (KPa)
<b>B717-200 HGW</b>	275	55.338	1.131
<b>B737-300</b>	518	63.503	1.386

<b>B737-700</b>	498	70.307	1.358
<b>B737-800</b>	12739	79.243	1.407
<b>A319-100std</b>	1116	64.400	1.190
<b>A321-100std</b>	2068	83.400	1.360
<b>A321-200std</b>	532	89.400	1.462
<b>A320-200 twin std</b>	10238	73.900	1.380



**Εικόνα 9.16 Πάχη διατομών για κατηγορία εδαφικής αντοχής: (α) A, (β) B, (γ) C and (δ) D.**

Στη συνέχεια, οι δείκτες PCN και PCR για κάθε διατομή εκτιμήθηκαν με βάση τις διαδικασίες που παρουσιάζονται στις (FAA 2014) και (FAA 2020, FAA 2022) αντίστοιχα και τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 9.17. Από την ανάλυση προκύπτει ότι ο δείκτης PCR παραμένει σταθερός για τις διατομές που διαθέτουν την ίδια φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης και για τις οποίες ισχύει  $CDF_{subgrade}=1$ , ενώ το PCN διέφερε σημαντικά. Παρατηρείται επίσης ότι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των δεικτών PCN και PCR για τη συγκεκριμένη ανάλυση. Επιπλέον, παρατηρείται ότι διατομές οδοστρώματος με διαφορετικές τιμές PCN και κατά συνέπεια διαφορετική αντοχή παρουσιάζουν ίδια φέρουσα ικανότητα με βάση το επικαιροποιημένο σύστημα αναφοράς ACR-PCR. Το γεγονός αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στη βασική αρχή εκτίμησης του δείκτη PCN, η οποία ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της διατομής του οδοστρώματος και τα στοιχεία της κυκλοφορίας μπορεί να οδηγήσει σε υψηλές τιμές του PCN που υπερεκτιμούν τη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος.

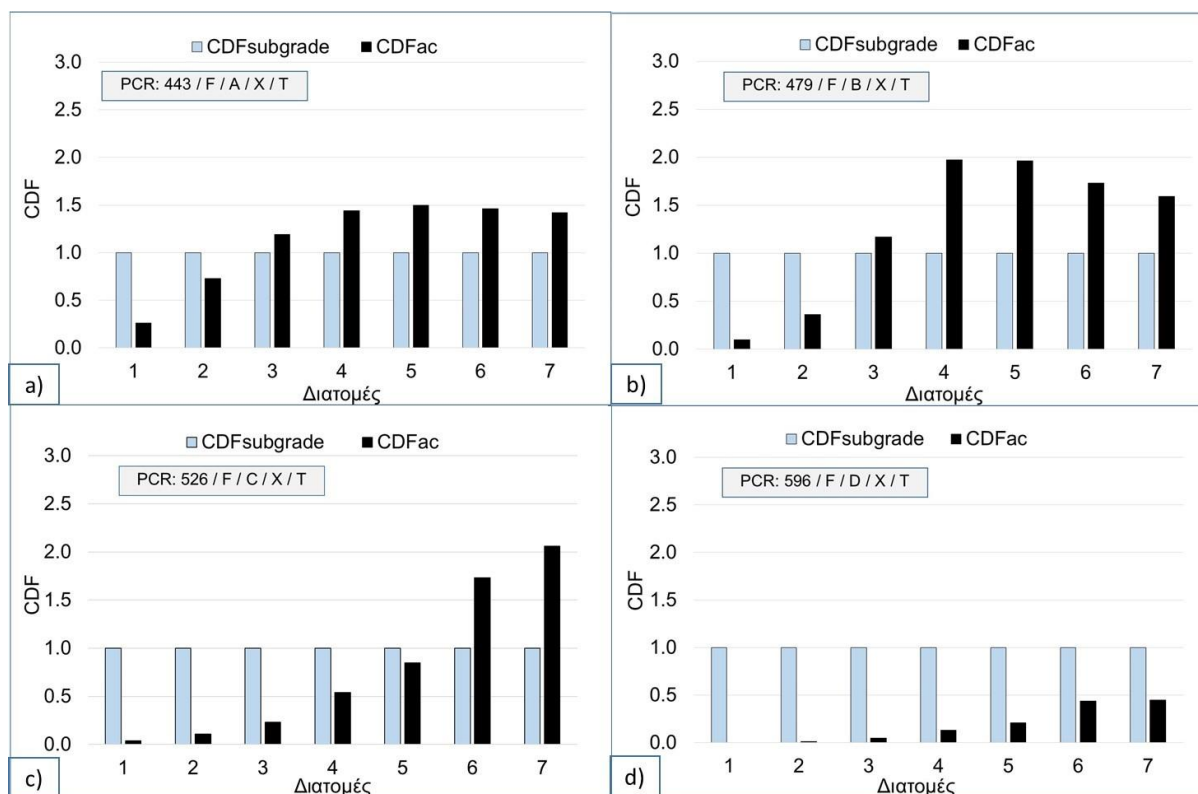


**Εικόνα 9.17 Σύγκριση PCN και PCR (εύκαμπτα οδοστρώματα)**

Δεδομένου ότι παρατηρήθηκε ότι ο δείκτης PCR παρέμεινε σταθερός για διατομές με την ίδια φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης και για  $CDF_{\text{subgrade}}=1$ , στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε εκτίμηση του δείκτη φθοράς των ασφαλτικών στρώσεων ( $CDF_{\text{ac}}$ ) για κάθε διατομή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 9.18.

Από την ανάλυση προκύπτει ότι δεδομένου ότι η μέθοδος ACR-PCR βασίζεται στην αστοχία της στρώσης έδρασης, ενδέχεται να υπάρχουν διατομές που διαθέτουν τον ίδιο δείκτη PCR, και κατά συνέπεια αναφέρουν την ίδια αντοχή, αλλά παρόλα αυτά παρουσιάζουν είτε  $CDF_{\text{ac}} < 1$  είτε  $CDF_{\text{ac}} > 1$ . Κατά συνέπεια, η διακύμανση της φθοράς των ασφαλτικών στρώσεων δεν μπορεί να απεικονιστεί μέσω του συστήματος ACR-PCR. Για το λόγο αυτό πιστεύεται ότι το επικαιροποιημένο σύστημα αναφοράς της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος δεν μπορεί να αναδείξει αυτή τη διαφοροποίηση.





**Εικόνα 9.18 Δείκτες CDFsubgrade, CDFac και PCR για διατομές με κατηγορία εδαφικής αντοχής: (α) A, (β) B, (γ) C and (δ) D**

Ωστόσο, πιστεύεται ότι πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην αστοχία των ασφαλτικών στρώσεων, καθώς είναι πιο βιώσιμο οι όποιες παρεμβάσεις να περιορίζονται εντός των ανώτερων ασφαλτικών στρώσεων. Έχοντας υπόψη ότι οι δείκτες CDF υποδεικνύουν ανάγκες συντήρησης ή αποκατάστασης, μπορεί κανείς να παρατηρήσει τη σημασία της λεπτομερούς αξιολόγησης του οδοστρώματος ενός αεροδρομίου. Το θέμα αυτό θεωρείται καθοριστικό στο πλαίσιο της λήψης αποφάσεων όσον αφορά στη διαχείριση οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

### 9.3.2.2 Εκτίμηση δεικτών PCN-PCR για διαφορετικά σενάρια κυκλοφορίας

Δεδομένου ότι η παραπάνω ανάλυση πραγματοποιήθηκε για την ίδια κυκλοφορία κρίθηκε σκόπιμο να επεκταθεί λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικά σενάρια κυκλοφορίας. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη ότι η φθορά των ασφαλτικών στρώσεων είναι πολύ σημαντική για τη συμπεριφορά και τη διαχείριση της συντήρησης ενός εύκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου, στην παρούσα διερεύνηση θεωρήθηκε και αυτή η μορφή αστοχίας κατά τον σχεδιασμό. Προς τούτο πραγματοποιήθηκε διαστασιολόγηση διατομών εύκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου ώστε τόσο η φθορά της στρώσης έδρασης όσο και η φθορά των ασφαλτικών στρώσεων να είναι μικρότερη της μονάδας, με τη φθορά των ασφαλτικών στρώσεων να είναι μεγαλύτερη της φθοράς της στρώσης έδρασης, όπου αυτό ήταν εφικτό. Για τον σχεδιασμό των διατομών ελήφθησαν υπόψη 13 σενάρια κυκλοφορίας, τα οποία αντιστοιχούν σε

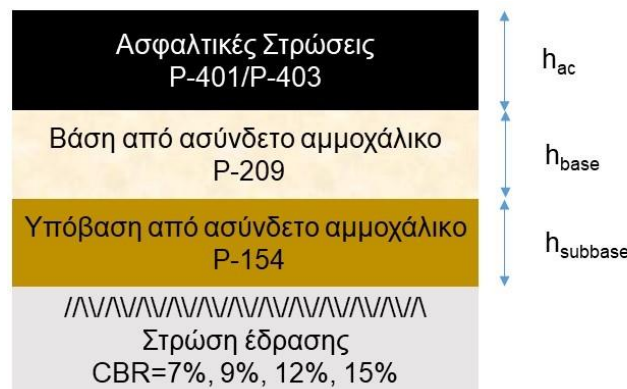
αεροδρόμια του ελλαδικού χώρου και τα οποία φαίνονται στον Πίνακα 9.2. Σημειώνεται ότι κατά τον σχεδιασμό αγνοήθηκε η επίδραση των αεροσκαφών μικρού βάρους (light aircrafts). Στον ίδιο πίνακα φαίνεται και ο τύπος του αεροσκάφους που επελέγη από τη βάση δεδομένων των λογισμικών COMFAA 3.0 και FAARFIELD 2.0 για την προσομοίωση της φόρτισης του κάθε αεροσκάφους.



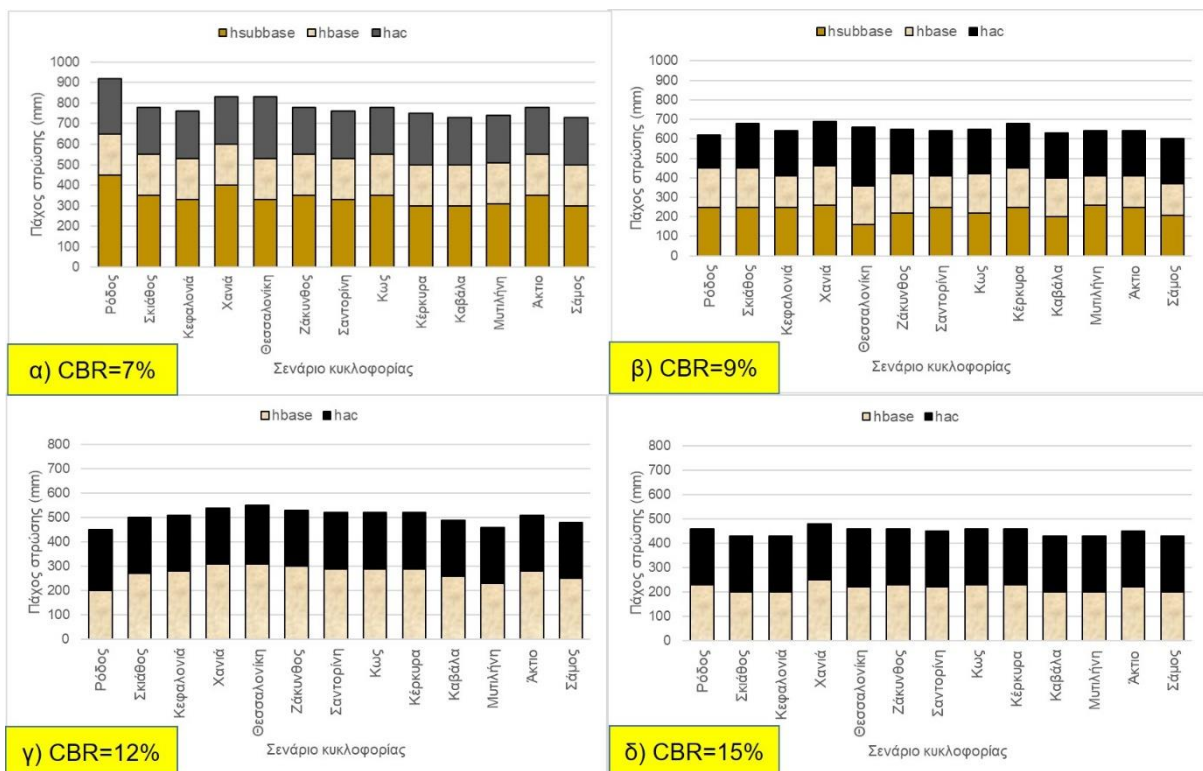
**Πίνακας 9.2 Ετήσια στοιχεία κίνησης αεροσκαφών για 13 αεροδρόμια**

Ετήσια στοιχεία κίνησης αεροσκαφών για το έτος 2019															Αεροσκάφος σε COMFAA 3.0	Αεροσκάφος σε FAARFIELD 2.0
Τύπος αεροσκάφους	Ρόδος	Σκιάθος	Κεφαλονιά	Χανιά	Θεσσαλονίκη	Ζάκυνθος	Σαντορίνη	Κώς	Κέρκυρα	Καβάλα	Μυτιλήνη	Ακτιο	Σάμος	Αεροσκάφος σε COMFAA 3.0	Αεροσκάφος σε FAARFIELD 2.0	
A20N			156				318	180	394			165	96	A320-200std	A320-200std	
A21N	532			382										A321-200opt	A321-NEO	
A318		96												A318-100std	A318-100std	
A319	1116	232	175	432	4621	363	682	728	1032	346	90	142	416	A319-100	A319-100	
A320	10238	302	706	4796	17839	1464	3845	3220	4708	578	1226	919	482	A320-200std	A320-200std	
A321	2068	208	172	808	2252	948	802	750	886	204		290		Airbus A321-200	Airbus A321-200	
A32A	1160		406	749	2450	416	1332	492	1738	77	204	214		A320-200std	A320-200std	
A32B	1246	282	122	836	409	368	306	320	431	118	108	394	32	A321-200	A321-200	
AT43		52	40		538	26		114			150		136	Fokker 50 HTP	Fokker 50	
AT45	1612	186	884	228	1060	646	230	1542	1000		1562	674	1436	Fokker 50 HTP	Fokker 50	
AT46		80	52				164					56		Fokker 50 HTP	Fokker 50	
AT72		177	110	826	1606	464	1266	277	215		523		220	Fokker 50 HTP	Fokker 50	
AT73					348									Fokker 50 HTP	Fokker 50	
AT75		122	286	884		314	2188	302	530		512		156	Fokker 50 HTP	Fokker 50	
B462			31			25	260		34					Bae-146-200	Bae-146-200	
B712	275	212	98			304	2206			54		190	52	B717-200	B717-200	
B733	518			80	1460	322								B737-300	B737-300	
B737									288	46	39		46	B737-700	B737-700	
B738	3102	216	322	1270	2074	1465	292	2145	1667	53	100	178	289	B737-800	B737-800	
7S8										54	16			B737-800	B737-800	
B73H	9637	320	1854	6548	11102	3656	2626	5832	6752	329	349	805	679	B737-800	B737-800	
B73W	498			414			154		334	102	72	138	150	B737-700	B737-700	
B753								250						B757-300	B757-300	
B75W		238	122			334								B757-200	B757-200	
B76W				278				172						B767-300ER	B767-300ER/FREIGHTER	
DH8A	553	14												Fokker F-28-2000	Dash 8 Q400	
DH8D	36	463	472		2131	228	2090	1190	292	996	1292	72	1348	Fokker F-28-2000	Dash 8 Q400	

Η τυπική διατομή οδοστρώματος που χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό αποτελείται από ασφαλικές στρώσεις (τυπικό υλικό FAA P-401), στρώση βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο (τυπικό υλικό της FAA P-209), στρώση υπόβασης από ασύνδετο αμμοχάλικο (τυπικό υλικό της FAA P-154) όπου απαιτείτο με βάση τα κυκλοφορικά στοιχεία του εκάστοτε αεροδρομίου και τη στρώση έδρασης με CBR = 7%, 9%, 12% και 15% (Εικόνα 9.19). Για κάθε κατηγορία εδαφικής αντοχής σχεδιάστηκαν 13 διατομές και προέκυψαν συνολικά 52 διατομές εύκαμπτου οδοστρώματος εφαρμόζοντας την πιο πρόσφατη αναλυτική μεθοδολογία διαστασιολόγησης οδοστρώματων της FAA (FAA 2021). Τα πάχη των επιμέρους στρώσεων των διατομών σχεδιασμού φαίνονται στην Εικόνα 9.20.



Εικόνα 9.19 Διατομή οδοστρώματος

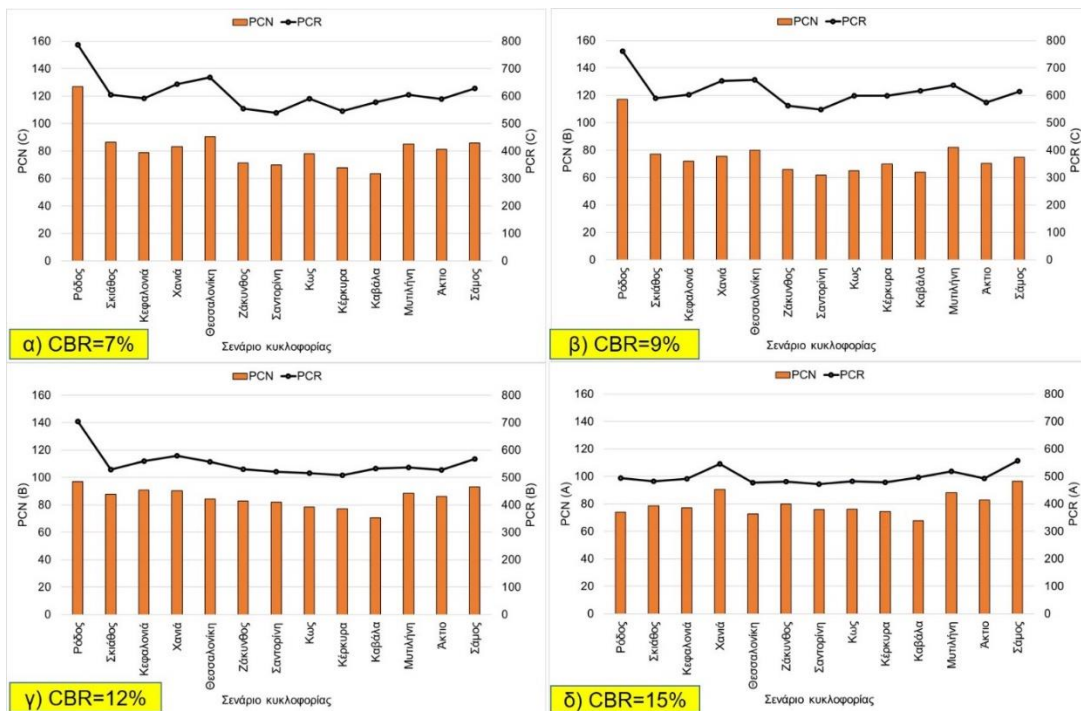


Εικόνα 9.20 Πάχη διατομών για CBR: (α) 7%, (β) 9%, (γ) 12% και (δ) 15%

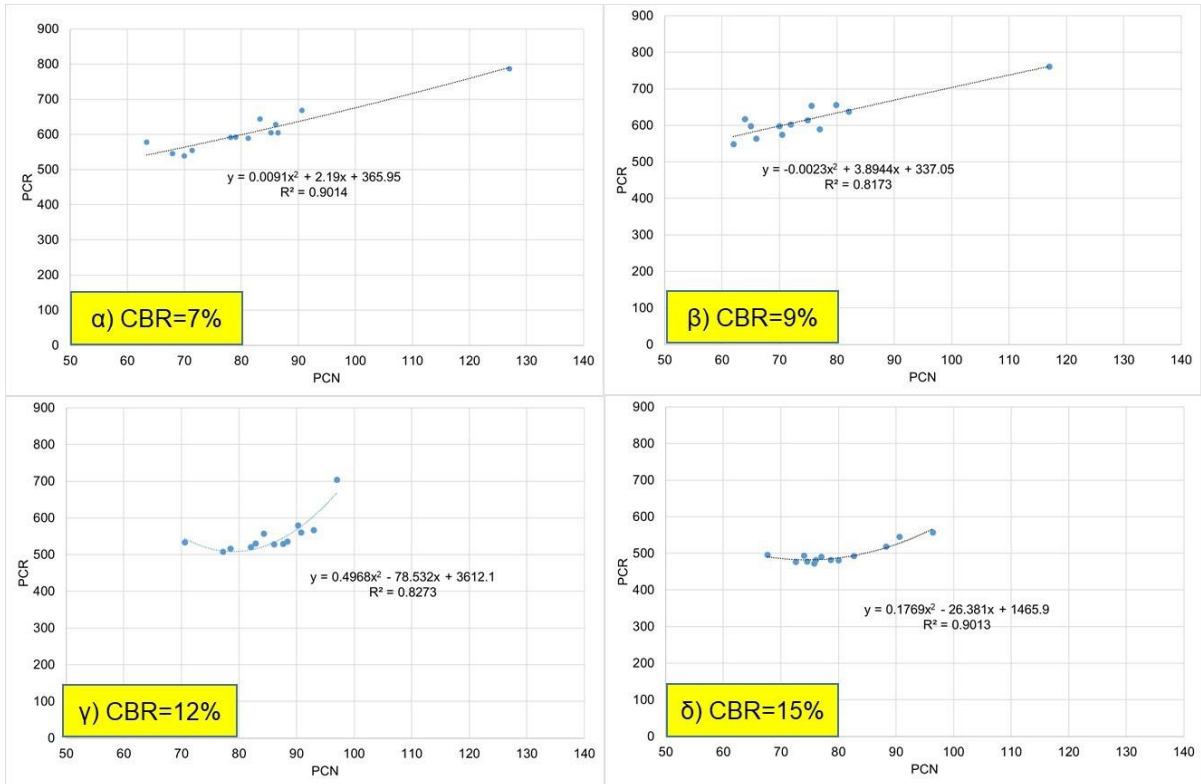
Σημειώνεται ότι για τις εδαφικές κατηγορίες με CBR=12% και 15% δεν απαιτήθηκε στρώση υπόβασης κατά τον σχεδιασμό, όπως φαίνεται στην Εικόνα 9.20. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε εκτίμηση των δεικτών PCN-PCR για κάθε διατομή με βάση τις διαδικασίες που παρουσιάζονται στις (FAA 2014b) και (FAA 2020, FAA 2022) αντίστοιχα και τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 9.21. Από την ανάλυση προκύπτει ότι οι δύο δείκτες παρουσιάζουν αντίστοιχη τάση μεταβολής.

Επιπλέον πραγματοποιήθηκε συσχέτιση των δύο δεικτών για κάθε τιμή του δείκτη CBR της στρώσης έδρασης και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 9.22. Παρατηρείται ότι οι δύο δείκτες παρουσιάζουν πολύ καλή συσχέτιση, με τον συντελεστή συσχέτισης  $R^2$  να λαμβάνει τις τιμές 0.90, 0.82, 0.83 και 0.90 για CBR=7%, 9%, 12% και 15% αντίστοιχα. Ο συντελεστής  $R^2$  αντιστοιχεί στο ποσοστό της μεταβλητότητας του δείκτη PCR που ερμηνεύεται από τη γραμμή παλινδρόμησης. Ως εκ τούτου η μεταβολή του δείκτη PCR μπορεί να περιγραφεί από τη μεταβολή του δείκτη PCN και συνεπώς για τη συγκεκριμένη περίπτωση η προσαρμογή της γραμμής παλινδρόμησης στα υπόψη δεδομένα είναι πολύ καλή.

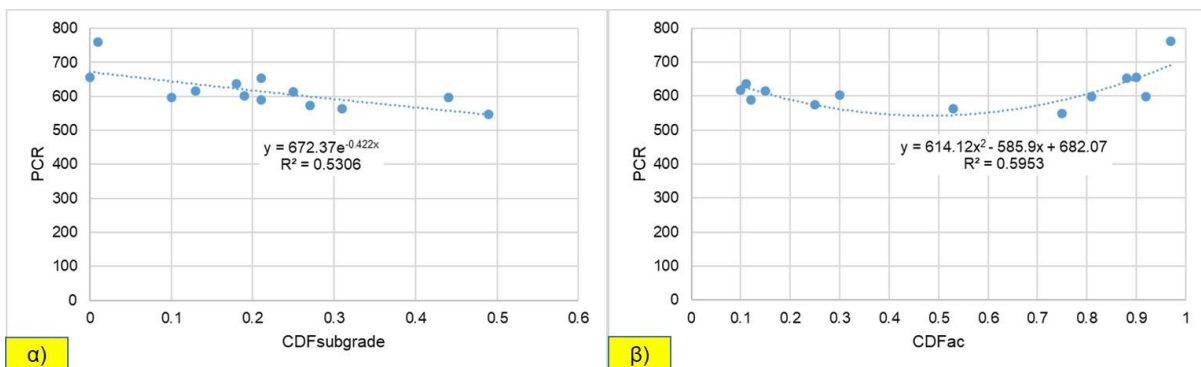
Στη συνέχεια διερευνήθηκε η ύπαρξη συσχέτισης μεταξύ του δείκτη PCR και της φθοράς τόσο της στρώσης έδρασης όσο και των ασφαλτικών στρώσεων. Τα σχετικά αποτελέσματα φαίνονται στις Εικόνες 9.23-9.26. Παρατηρείται ότι ο δείκτης PCR παρουσιάζει καλύτερη συσχέτιση ως προς τη φθορά της στρώσης έδρασης, γεγονός το οποίο μπορεί να οφείλεται στη βασική αρχή εκτίμησης του υπόψη δείκτη.



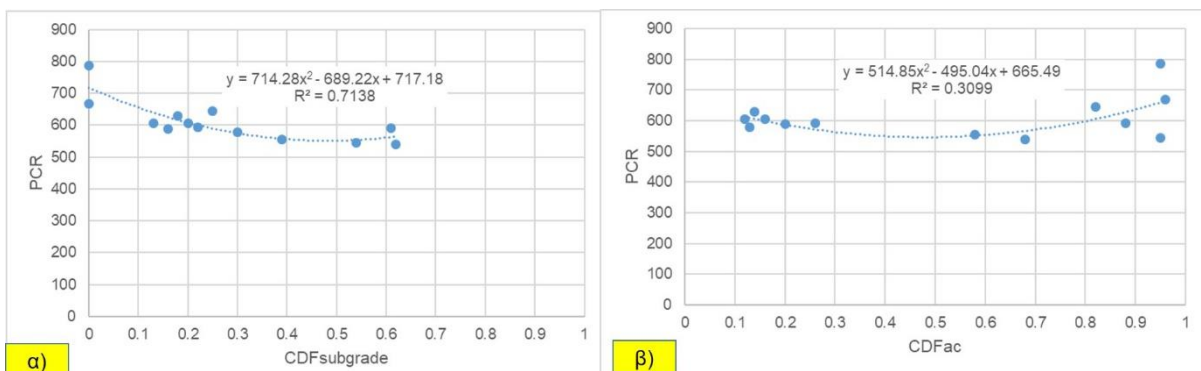
Εικόνα 9.21 Δείκτες PCN και PCR για διατομές με CBR: (α) 7%, (β) 9%, (γ) 12% και (δ) 15%



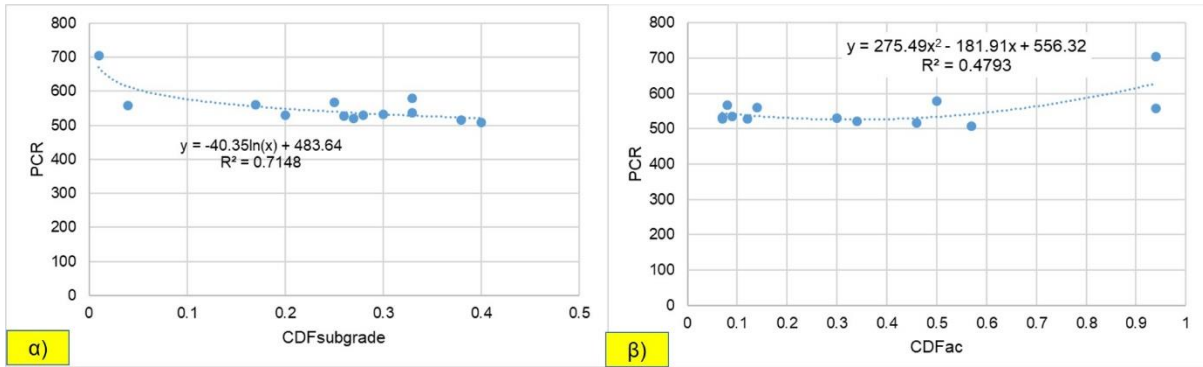
Εικόνα 9.22 Συσχέτιση δεικτών PCN και PCR για CBR: (α) 7%, (β) 9%, (γ) 12% και (δ) 15%



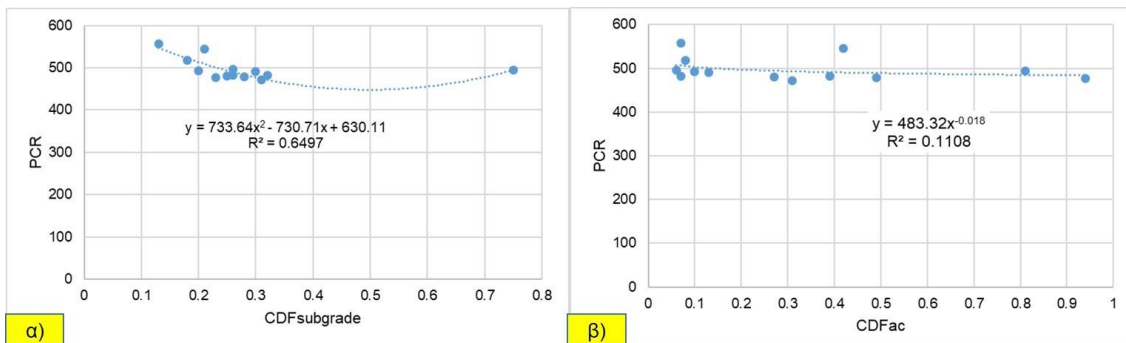
Εικόνα 9.23 Συσχέτιση δείκτη PCR και φθοράς: (α) στρώσης έδρασης (β) ασφαλτικών στρώσεων (CBR=7%)



Εικόνα 9.24 Συσχέτιση δείκτη PCR και φθοράς: (α) στρώσης έδρασης (β) ασφαλτικών στρώσεων (CBR=9%)



**Εικόνα 9.25** Συσχέτιση δείκτη PCR και φθοράς: (α) στρώσης έδρασης (β) ασφαλτικών στρώσεων (CBR=12%)

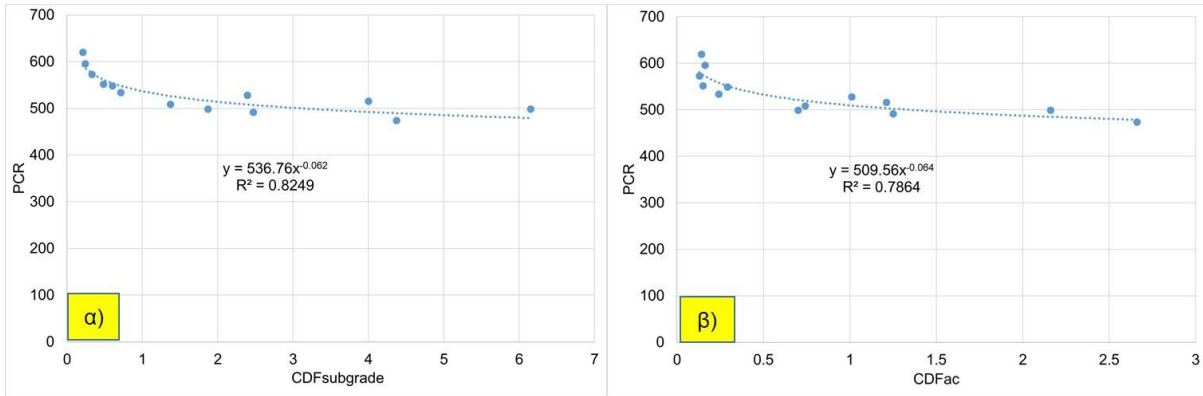


**Εικόνα 9.26** Συσχέτιση δείκτη PCR και φθοράς: (α) στρώσης έδρασης (β) ασφαλτικών στρώσεων (CBR=15%)

**9.3.2.3** Επίδραση θεώρησης της κυκλοφορίας στην κατάταξη φέρουσας ικανότητας οδοστρώματος

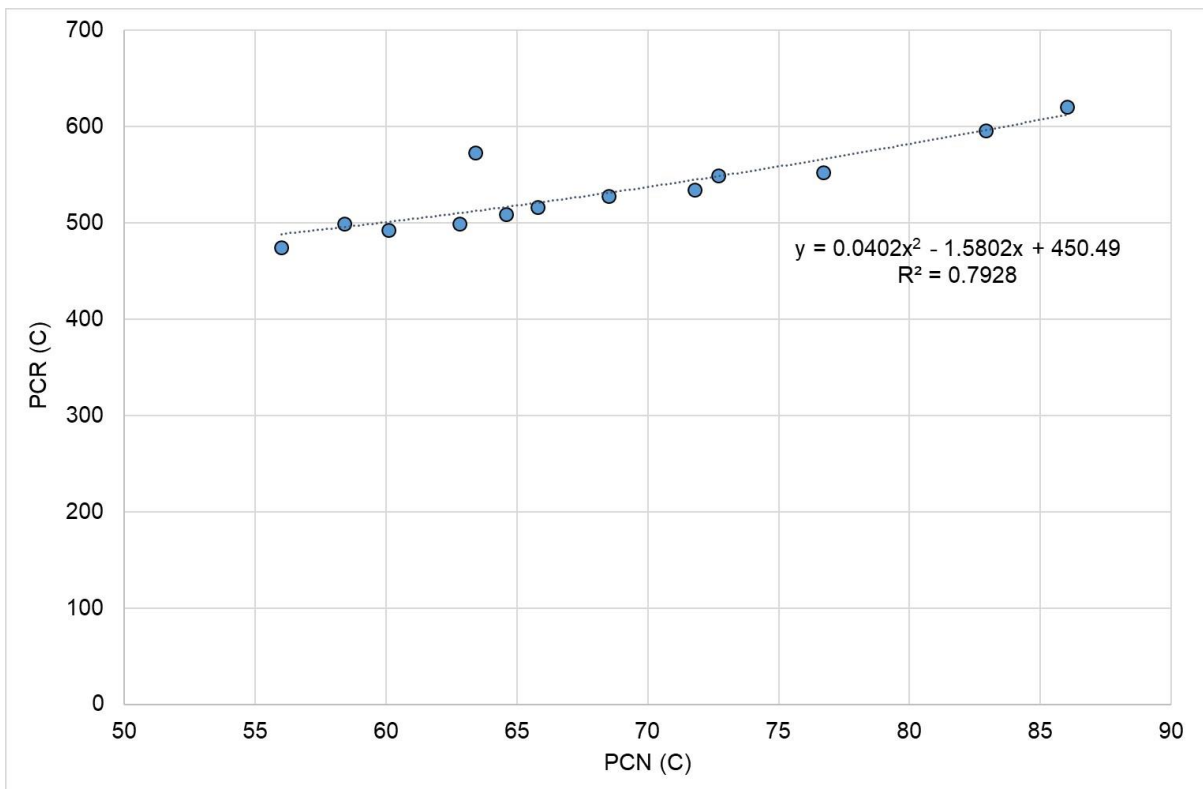
Δεδομένου ότι η παραπάνω διερεύνηση πραγματοποιήθηκε σε διαφορετικές διατομές οδοστρώματος οι οποίες προέκυψαν με βάση τις απαιτήσεις του εκάστοτε σεναρίου κυκλοφορίας, κρίθηκε σκόπιμο να διερευνηθεί η επίδραση της μεταβολής της θεώρησης της κυκλοφορίας στην έκφραση της φέρουσας ικανότητας της ίδιας διατομής. Προς τούτο επελέγη ενδεικτική διατομή οδοστρώματος η οποία φαίνεται στην Εικόνα 9.27. Στη συνέχεια εκτιμήθηκε η φθορά που αναπτύσσεται την επιφάνεια της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος ( $CDF_{subgrade}$ ) καθώς και στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων ( $CDF_{ac}$ ) εξαιτίας της επίδρασης των διαφορετικών σεναρίων κυκλοφορίας του Πίνακα 9.2. Επιπλέον για την ίδια διατομή εκτιμήθηκε ο δείκτης PCR του οδοστρώματος και τα σχετικά αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 9.28. Παρατηρείται ότι καθώς μειώνεται η φθορά του οδοστρώματος αυξάνεται η έκφραση της φέρουσας ικανότητας της διατομής. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει τη σημασία εκτίμησης της υφιστάμενης κυκλοφορίας ενός αεροδρομίου με όσο το δυνατόν τη μεγαλύτερη ακρίβεια για την ορθή έκφραση της φέρουσας ικανότητάς του.





**Εικόνα 9.29 Συσχέτιση δείκτη PCR και φθοράς: (α) στρώσης έδρασης (CDFsubgrade) (β) ασφαλικών στρώσεων (CDFac)**

Επιπλέον, για κάθε σενάριο κυκλοφορίας εκτιμήθηκε και ο δείκτης PCN της διατομής. Σε αντιστοιχία με τα αποτελέσματα της εκτίμησης του δείκτη PCR, παρατηρείται ότι και ο δείκτης PCN επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη θεώρηση της κυκλοφορίας.



**Εικόνα 9.30 Συσχέτιση δεικτών PCN και PCR**

Παρατηρείται ότι και σε αυτή την περίπτωση υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των δεικτών PCN και PCR με τον συντελεστή συσχέτισης να ισούται με  $R^2=0.79$  (Εικόνα 9.30). Ο συντελεστής  $R^2$  αντιστοιχεί στο ποσοστό της μεταβλητότητας του δείκτη PCR που ερμηνεύεται από τη γραμμή παλινδρόμησης. Η μεταβολή του δείκτη PCR και σε αυτή την περίπτωση μπορεί να περιγραφεί



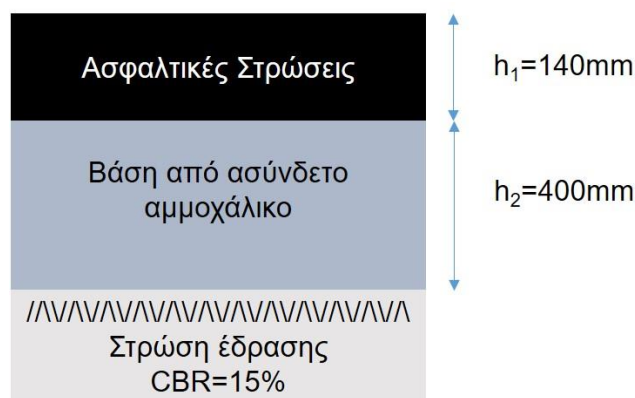
από τη μεταβολή του δείκτη PCN. Συνεπώς η προσαρμογή της γραμμής παλινδρόμησης στα υπόψη δεδομένα είναι πολύ καλή.

### 9.3.3 Πρακτική εφαρμογή μεθόδων ACN-PCN και ACR-PCR

Για τη διερεύνηση της επίδρασης της εισαγωγής της μεθόδου ACR-PCR στην αναφορά της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων πραγματοποιήθηκε εκτίμηση των δεικτών PCN και PCR του εύκαμπτου οδοστρώματος του διαδρόμου (Π/Α) αεροσκαφών δύο περιφερειακών αεροδρομίων του ελλαδικού χώρου με στοιχεία που διατέθηκαν από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ. Βασικό κριτήριο για την επιλογή των δύο αεροδρομίων ήταν η διαφοροποίηση της κατηγορίας της εδαφικής αντοχής.

#### 9.3.3.1 Αεροδρόμιο Α

Η διατομή του εύκαμπτου οδοστρώματος του διαδρόμου Π/Α αεροσκαφών που διερευνήθηκε αποτελούνταν από ασφαλτικές στρώσεις πάχους 140mm, βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο πάχους 400mm και τη στρώση έδρασης από φυσικό έδαφος. Στην Εικόνα 9.31 φαίνεται μία αντιπροσωπευτική διατομή του υπό διερεύνηση οδοστρώματος και στον Πίνακα 9.3 παρατίθεται η σύνθεση της κυκλοφορίας των αεροσκαφών που αναμένεται να διέλθουν από το υπόψη οδόστρωμα για μια περίοδο 20 ετών.



Εικόνα 9.31 Διατομή οδοστρώματος διαδρόμου Π/Α αεροσκαφών (Αεροδρόμιο Α)

Πίνακας 9.3 Σύνθεση κυκλοφορίας

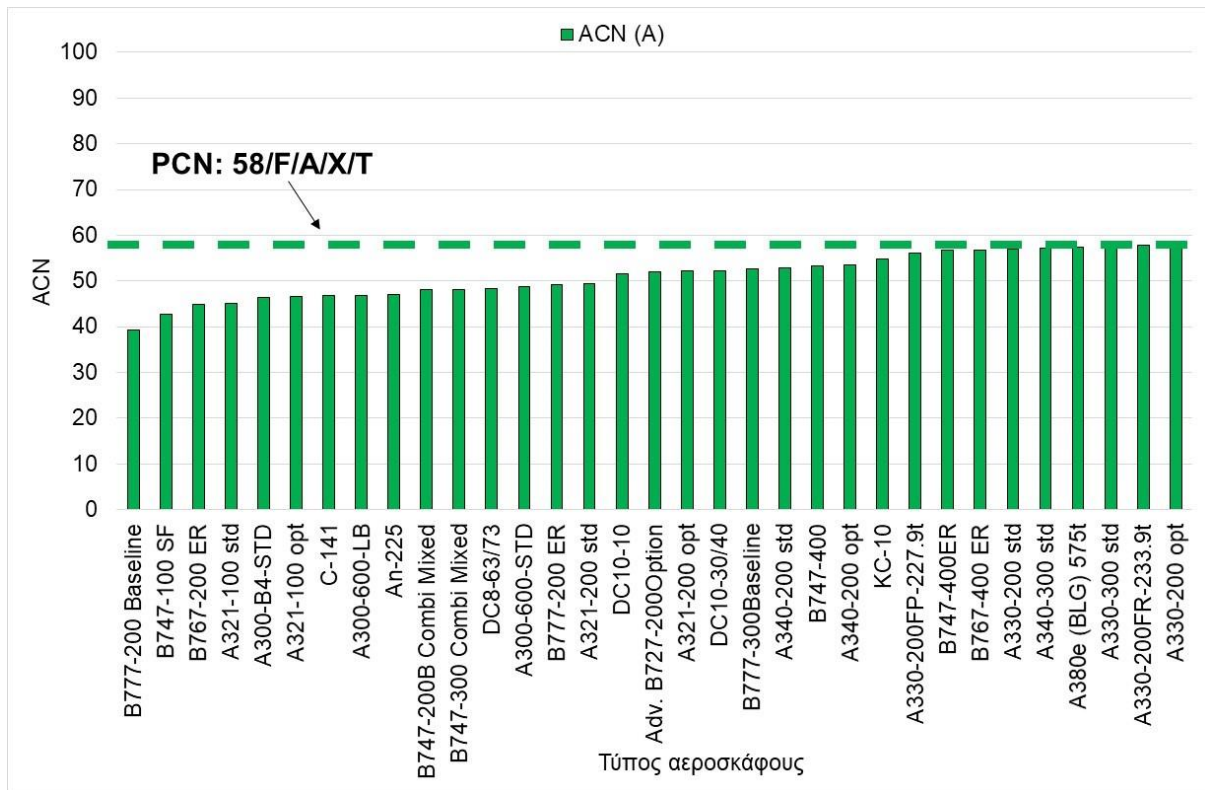
Τύπος αεροσκάφους	Ετήσιες αναχωρήσεις	Βάρος αεροσκάφους (tns)	Πίεση ελαστικού (MPa)
<b>B737-300</b>	1522	63.503	1.386
<b>B737-700</b>	3520	70.307	1.358
<b>B737-800</b>	15232	79.243	1.407
<b>A319-100std</b>	5522	64.400	1.190



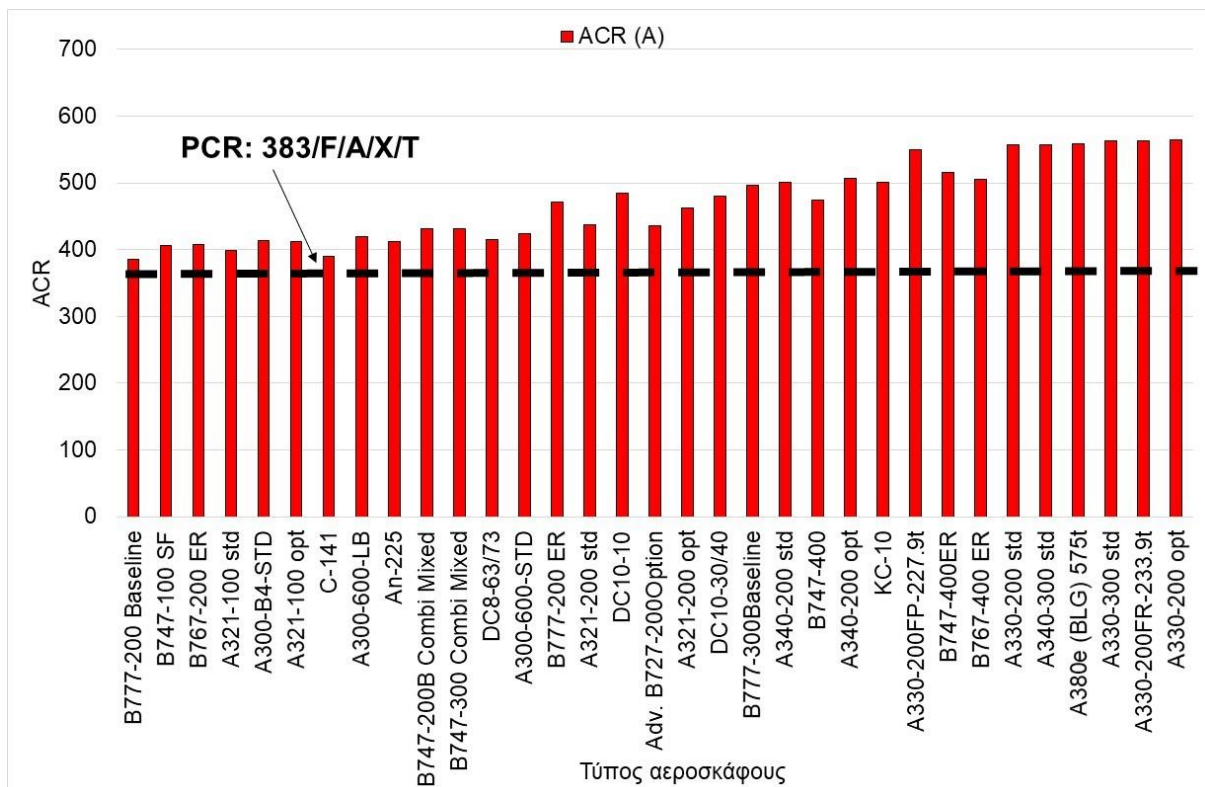
<b>A321-100std</b>	3251	83.400	1.360
<b>A320-200 twin std</b>	19583	73.900	1.380

Δεδομένου ότι ο δείκτης CBR της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος του διαδρόμου είναι ίσος με 15%, η στρώση έδρασης κατατάσσεται στην κατηγορία εδαφικής αντοχής A. Στη συνέχεια, ακολουθώντας τη διαδικασία τεχνικής αξιολόγησης που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4.3, εκτιμήθηκε ο δείκτης PCN του διαδρόμου Π/Α και προέκυψε η κωδικοποίηση 58/F/A/X/T. Εφαρμόζοντας τη διαδικασία που περιγράφεται στο κεφάλαιο 4.4 υπολογίστηκε ο δείκτης PCR ίσος με 383/F/A/X/T. Σημειώνεται ότι για την ανάλυση θεωρήθηκε το τυπικό υλικό P-401 για τις ασφαλτικές στρώσεις, ενώ για τη στρώση της βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο, η οποία παρουσίασε σχετικά χαμηλό μέτρο ελαστικότητας της τάξης των 290MPa, θεωρήθηκε το τυπικό υλικό P-154.

Προκειμένου να διερευνηθεί η ισοδυναμία αυτών των δύο δεικτών ως προς την αναφορά της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος του διαδρόμου, εξετάστηκε η δυνατότητα αποδοχής της προσγείωσης διαφόρων αεροσκαφών, εφαρμόζοντας τη βασική συνθήκη ελέγχου. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκαν περίπου 30 τύποι αεροσκαφών με τιμές ACN μικρότερες από το αναφερόμενο PCN, γεγονός που σημαίνει ότι το οδόστρωμα μπορούσε να φέρει τη φόρτιση τους χωρίς περιορισμούς βάρους σύμφωνα με το δείκτη PCN. Οι τύποι των αεροσκαφών μαζί με τις τιμές ACN τους απεικονίζονται στην Εικόνα 9.32. Για αυτά τα αεροσκάφη, οι τιμές ACR τους εκτιμήθηκαν και παρουσιάζονται στην Εικόνα 9.33 μαζί με την τιμή PCR του οδοστρώματος του αντίστοιχου διαδρόμου. Η ανάλυση έδειξε ότι οι τιμές ACR αυτών των αεροσκαφών υπερέβαιναν την αναφερόμενη τιμή PCR που σημαίνει ότι σύμφωνα με το νέο σύστημα το οδόστρωμα του διαδρόμου δεν μπορεί να δεχτεί διελύσεις αυτών των αεροσκαφών χωρίς περιορισμούς. Κατά συνέπεια προκύπτει ότι ο δείκτης PCR δεν είναι ισοδύναμος με τον δείκτη PCN και φαίνεται να αποτελεί μια πιο συντηρητική προσέγγιση για την έκφραση της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων αεροδρομίων για τη συγκεκριμένη περίπτωση.



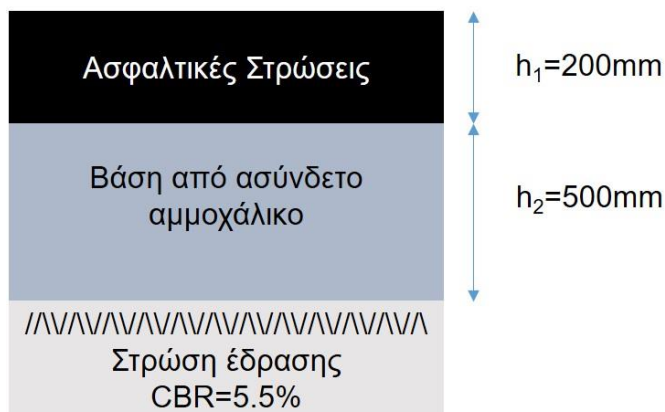
Εικόνα 9.32 Τιμές ACN αεροσκαφών για εδαφική κατηγορία Α σε σχέση με το PCN



Εικόνα 9.33 Τιμές ACR αεροσκαφών για εδαφική κατηγορία Α σε σχέση με το PCR

### 9.3.3.2 Αεροδρόμιο Β

Αντίστοιχη ανάλυση πραγματοποιήθηκε για το εύκαμπτο οδόστρωμα ενός διαδρόμου Π/Α αεροσκαφών με τη διατομή που φαίνεται στην Εικόνα 9.34 και το οποίο αναμένεται να μεταφέρει ετησίως τη σύνθεση της κυκλοφορίας που παρουσιάζεται στον Πίνακα 9.1 για μια περίοδο σχεδιασμού 20 ετών.

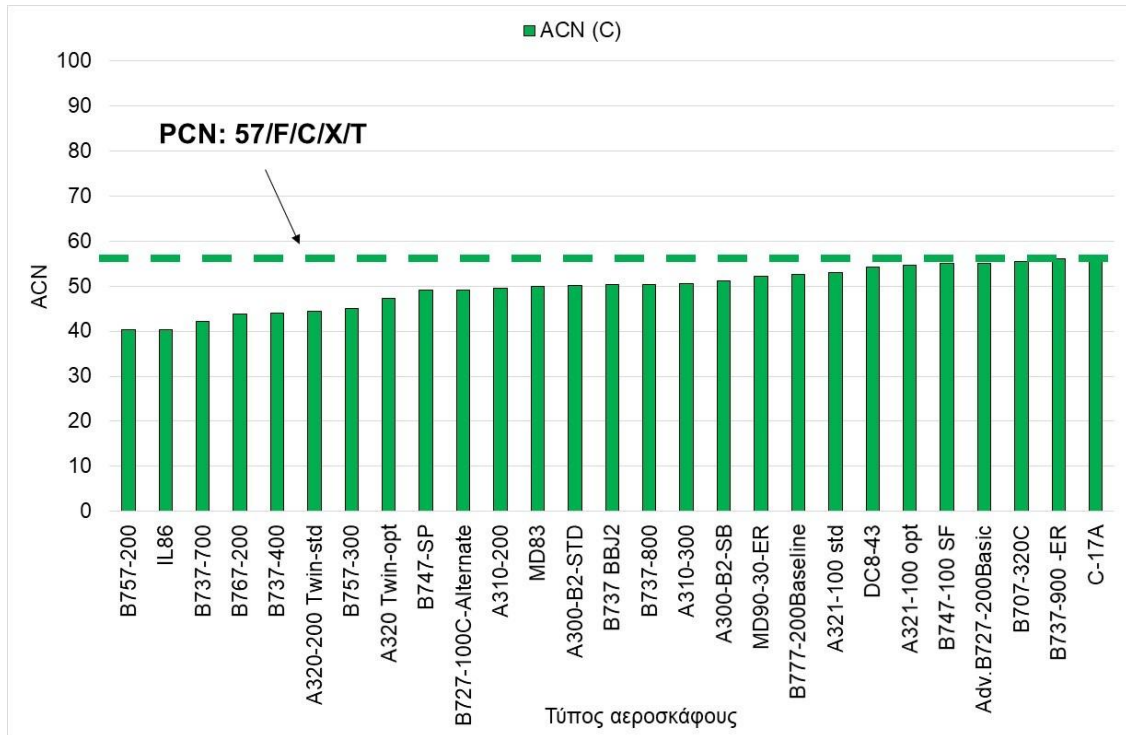


**Εικόνα 9.34 Διατομή οδοστρώματος διαδρόμου Π/Α αεροσκαφών (Αεροδρόμιο Β)**

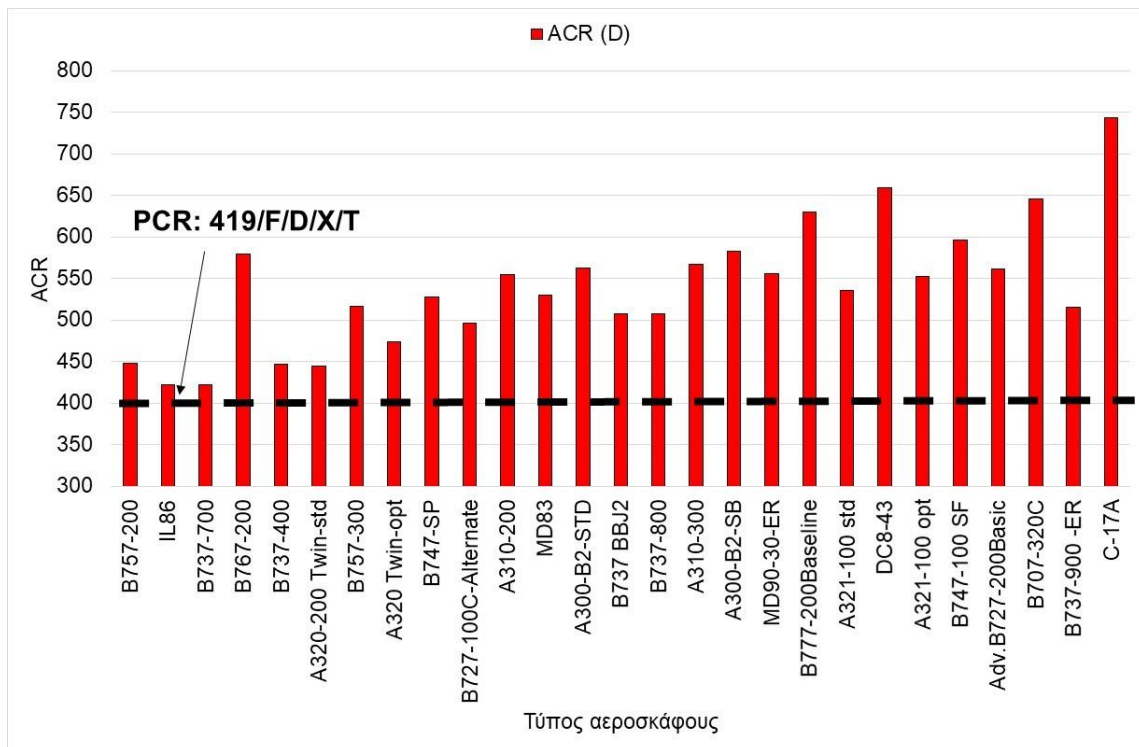
Δεδομένου ότι η στρώση έδρασης του οδοστρώματος διαθέτει  $\text{CBR}=5.5\%$  κατατάχθηκε στην κατηγορία εδαφικής αντοχής C σύμφωνα με τη μέθοδο ACN-PCN, ενώ με βάση τη μέθοδο ACR-PCR κατατάχθηκε στην κατηγορία D. Το PCN του διαδρόμου υπολογίστηκε ίσο με 57/F/C/W/T και ο δείκτης PCR εκτιμήθηκε ίσος με 419/F/D/X/T. Σημειώνεται ότι για την ανάλυση θεωρήθηκε το τυπικό υλικό P-401 για τις ασφαλτικές στρώσεις, ενώ για τη στρώση της βάσης από ασύνδετο αμμοχάλικο, η οποία παρουσίασε μέτρο ελαστικότητας της τάξης των 520MPa, θεωρήθηκε το τυπικό υλικό P-209. Στη συνέχεια επιλέχθηκαν περίπου 30 τύποι αεροσκαφών με τιμές ACN μικρότερες από το αναφερόμενο PCN που σημαίνει ότι το οδόστρωμα μπορούσε να φέρει τη φόρτίσή τους χωρίς περιορισμούς βάρους. Οι τύποι των αεροσκαφών μαζί με τις τιμές ACN τους απεικονίζονται στην Εικόνα 9.35. Για αυτά τα αεροσκάφη, οι τιμές ACR τους εκτιμήθηκαν και παρουσιάζονται στην Εικόνα 9.36 μαζί με την τιμή PCR του οδοστρώματος του διαδρόμου.

Η ανάλυση έδειξε ότι οι τιμές ACR αυτών των αεροσκαφών υπερέβαιναν την αναφερόμενη τιμή PCR που σημαίνει ότι σύμφωνα με το νέο σύστημα το οδόστρωμα του διαδρόμου δεν μπορεί να δεχτεί διελεύσεις αυτών των αεροσκαφών χωρίς περιορισμούς. Επιπλέον, οι τιμές ACR της κατηγορίας D για αυτά τα αεροσκάφη παρουσίασαν σημαντικές διακυμάνσεις σε σύγκριση με την αυξητική τάση των τιμών ACN των ίδιων αεροσκαφών για την κατηγορία C. Φαίνεται ότι οι διαφορές των δύο δεικτών μπορεί να είναι πιο έντονες για τις τιμές CBR που

αντιστοιχούν σε διαφορετικές εδαφικές κατηγορίες σύμφωνα με την επικαιροποιημένη κωδικοποίηση των εδαφικών κατηγοριών.



Εικόνα 9.35 Τιμές ACN αεροσκαφών για εδαφική κατηγορία C σε σχέση με το PCN



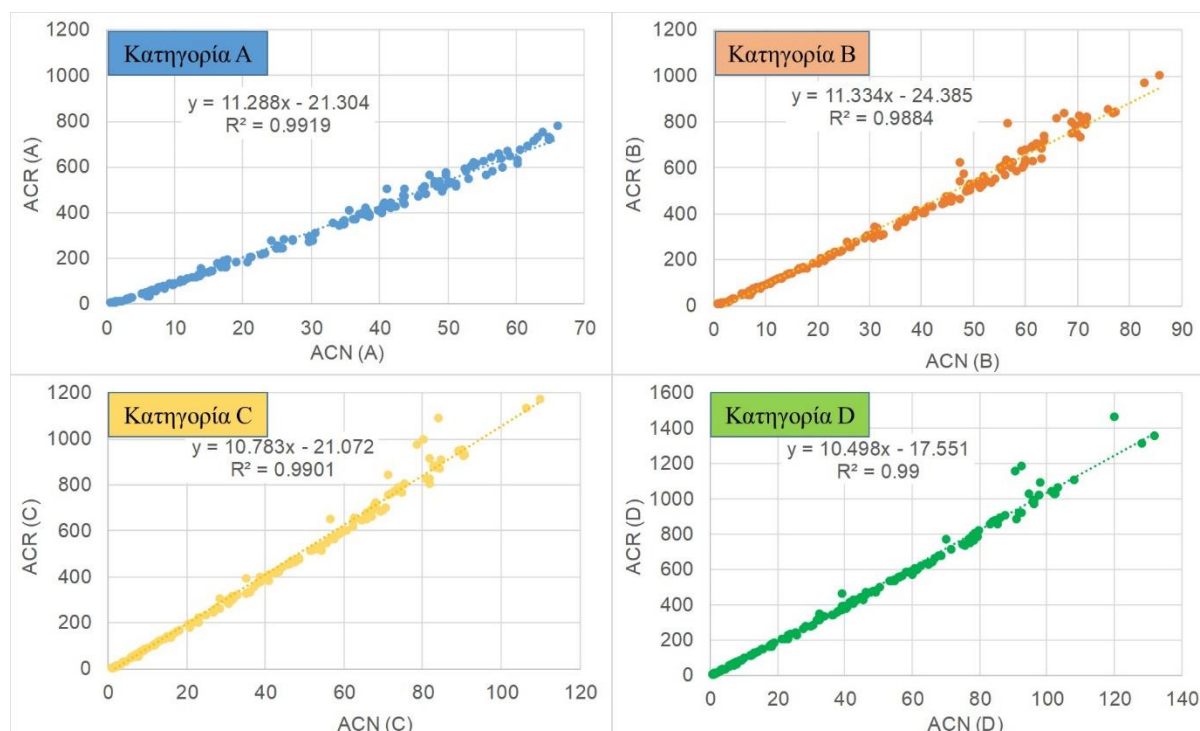
Εικόνα 9.36 Τιμές ACR αεροσκαφών για εδαφική κατηγορία D σε σχέση με το PCR

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η εφαρμογή του συστήματος αναφοράς παίζει σημαντικό ρόλο στη διαχείριση του οδοστρώματος του αεροδρομίου και στη λήψη αποφάσεων.

## 9.4 Δύσκαμπτα Οδοστρώματα

### 9.4.1 Σύγκριση δεικτών ACN-ACR

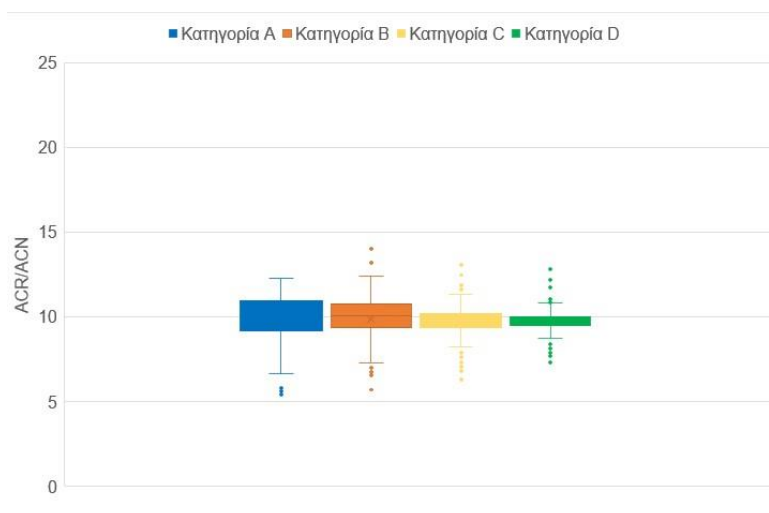
Σε αντιστοιχία με τα εύκαμπτα οδοστρώματα, διερευνήθηκε η ύπαρξη συσχέτισης μεταξύ του δείκτη ACN και ACR ενός αεροσκάφους για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα, χρησιμοποιώντας τα ίδια 170 αεροσκάφη από τη βάση δεδομένων της FAA. Οι τιμές του δείκτη ACN κάθε αεροσκάφους υπολογίστηκαν για τις τέσσερις κατηγορίες εδαφικής αντοχής (A, B, C και D) χρησιμοποιώντας το λογισμικό COMFAA 3.0 που αναπτύχθηκε από την FAA (FAA 2014b). Στη συνέχεια, για τα ίδια αεροσκάφη υπολογίστηκε η τιμή ACR χρησιμοποιώντας το λογισμικό ICAO-ACR 1.32 (FAA 2021). Τα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 9.37, στην οποία παρατίθεται και ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$  για κάθε εδαφική κατηγορία. Από τη σχετική ανάλυση προέκυψε ότι υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των τιμών ACN και ACR για όλες τις κατηγορίες εδαφικής αντοχής, καθώς ο δείκτης  $R^2$  κυμαίνεται από 0.98 έως 0.99.



**Εικόνα 9.37** Συσχέτιση δεικτών ACN και ACR για εδαφική κατηγορία: (α) A, (β) B, (γ) C και (δ) D (δύσκαμπτα οδοστρώματα)

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο λόγος των δύο δεικτών ACR/ACN για τα ίδια 170 αεροσκάφη που χρησιμοποιήθηκαν στην παραπάνω ανάλυση για κάθε κατηγορία εδαφικής αντοχής. Η κατανομή του λόγου ACR/ACN για κάθε κατηγορία εδαφικής αντοχής παρουσιάζεται στην

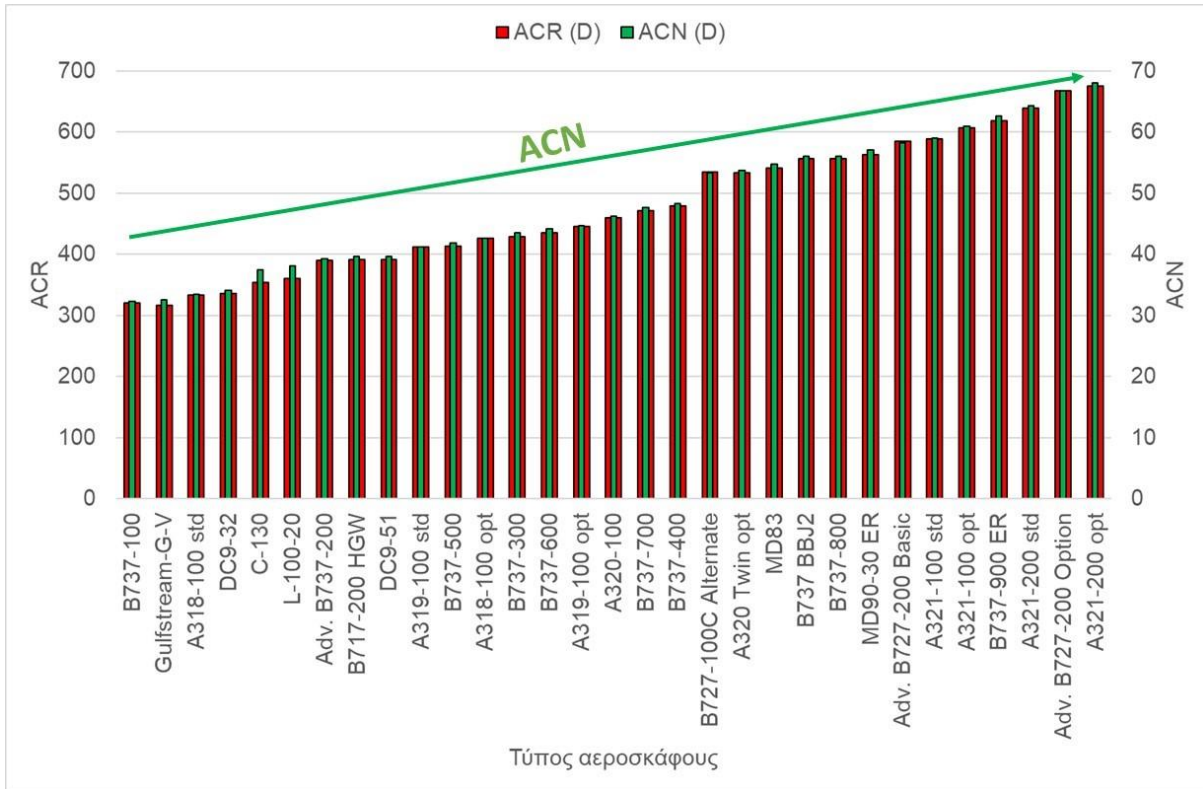
Εικόνα 9.38 με τη μορφή θηκογράμματος, όπου η ενδιάμεση γραμμή αναφέρεται στη μέση τιμή. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αναλογία των δύο δεικτών δεν είναι σταθερή για κάθε κατηγορία εδαφικής αντοχής και στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μικρότερη από 10. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις όπου ο δείκτης ACR μπορεί να είναι ακόμη και 14 φορές μεγαλύτερος από το δείκτη ACN, όπως παρατηρείται στην περίπτωση κατηγορίας εδαφικής αντοχής B. Εντούτοις, αξίζει να σημειωθεί ότι οι υπόψη αποκλίσεις παρατηρούνται σε μικρότερο αριθμό αεροσκαφών σε σχέση με την περίπτωση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων και είναι μικρότερης κλίμακας.



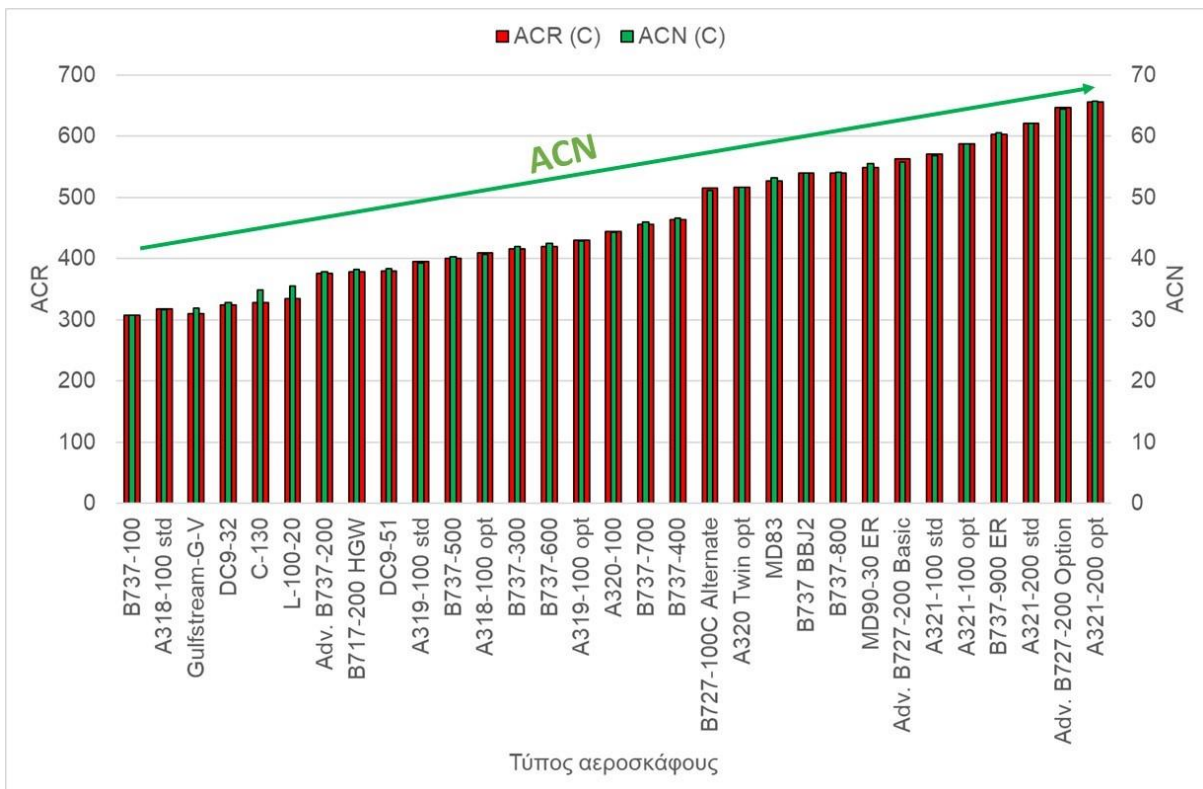
**Εικόνα 9.38 Λόγος ACR/ACN (δύσκαμπτα οδοστρώματα)**

Προκειμένου να γίνει μια πιο ενδελεχής διερεύνηση της σχέσης μεταξύ των δεικτών ACN και ACR, επιλέχθηκαν περίπου 30 αεροσκάφη από τη βάση δεδομένων της FAA που έχουν την ίδια διάταξη τροχών στο σύστημα προσγείωσης (διπλό τροχό). Οι τιμές ACN και ACR για κάθε κατηγορία εδαφικής αντοχής παρουσιάζονται στις Εικόνες 9.39-9.42, απ' όπου προκύπτει ότι η διακύμανση των τιμών του δείκτη ACN δεν ακολουθεί τη διακύμανση των τιμών του δείκτη ACR. Εντούτοις, οι υπόψη αποκλίσεις είναι μικρότερης κλίμακας σε σχέση με την περίπτωση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων.

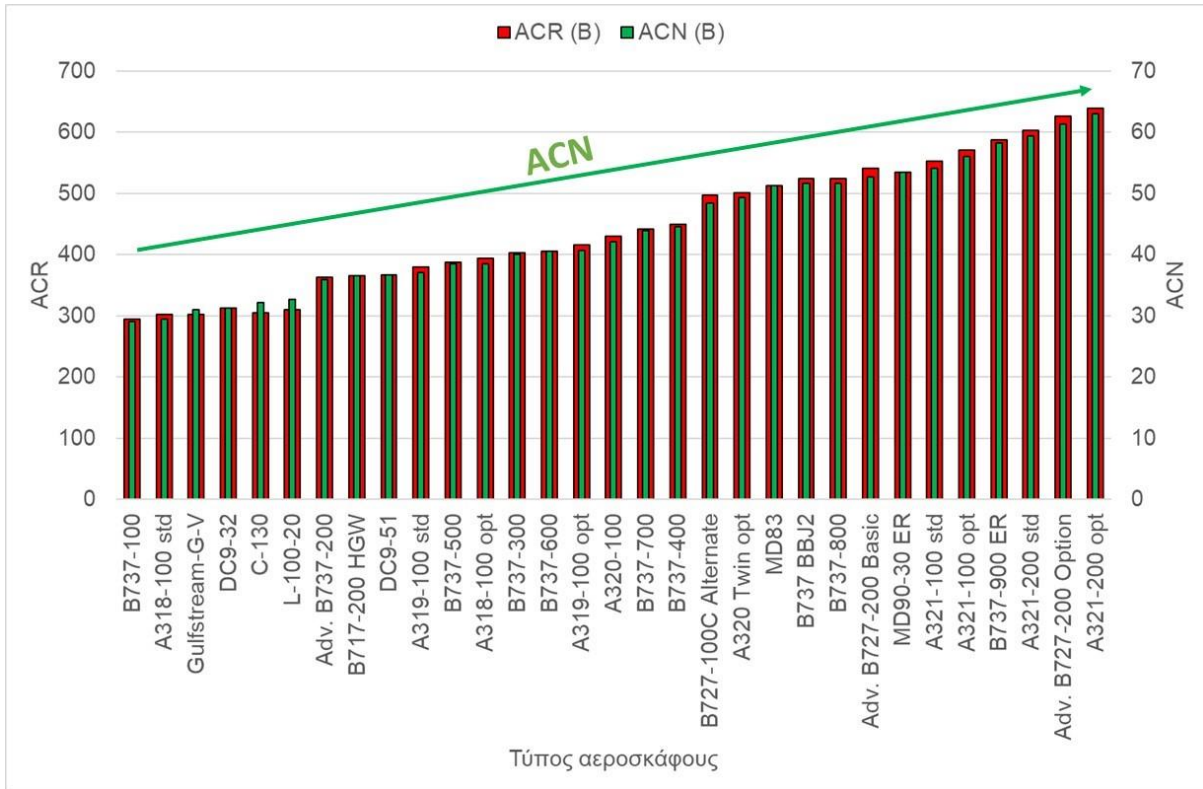




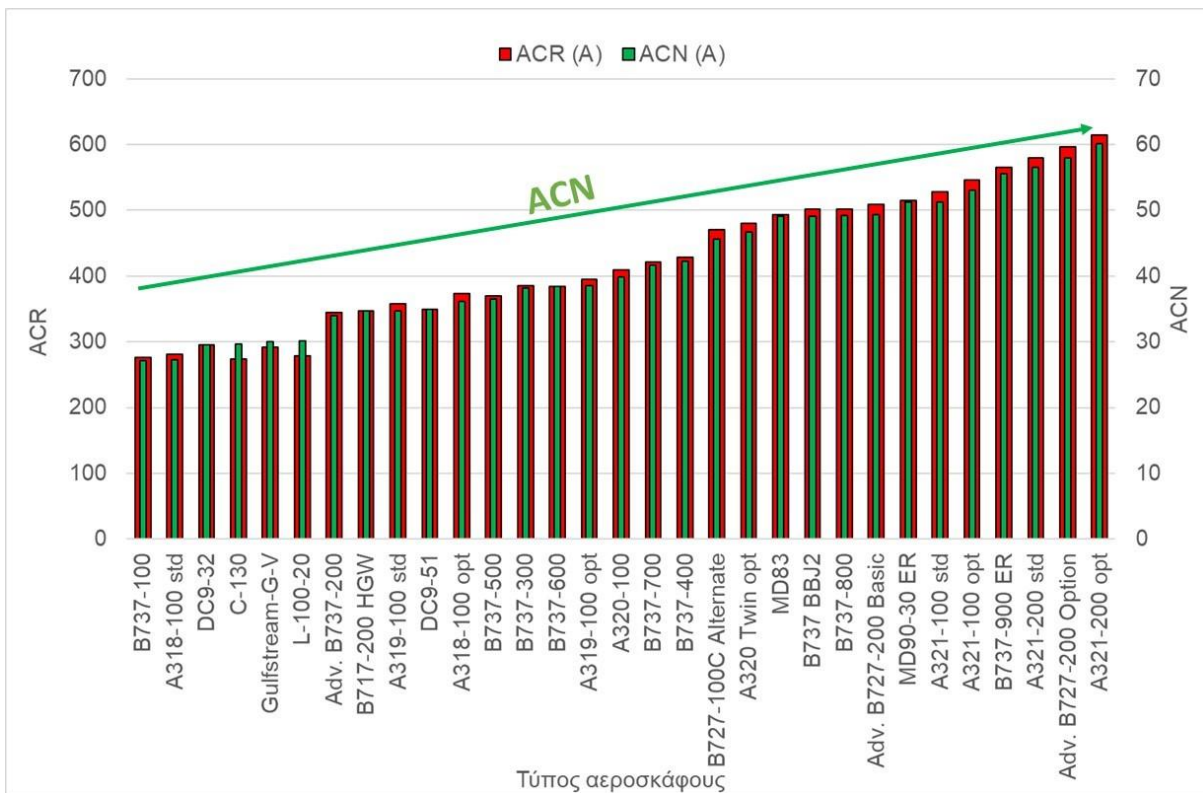
**Εικόνα 9.39 Σύγκριση δεικτών ACN και ACR αεροσκαφών με διάταξη διπλών τροχών για εδαφική κατηγορία D**



**Εικόνα 9.40 Σύγκριση δεικτών ACN και ACR αεροσκαφών με διάταξη διπλών τροχών για εδαφική κατηγορία C**



Εικόνα 9.41 Σύγκριση δεικτών ACN και ACR αεροσκαφών με διάταξη διπλών τροχών για εδαφική κατηγορία Β



Εικόνα 9.42 Σύγκριση δεικτών ACN και ACR αεροσκαφών με διάταξη διπλών τροχών για εδαφική κατηγορία Α



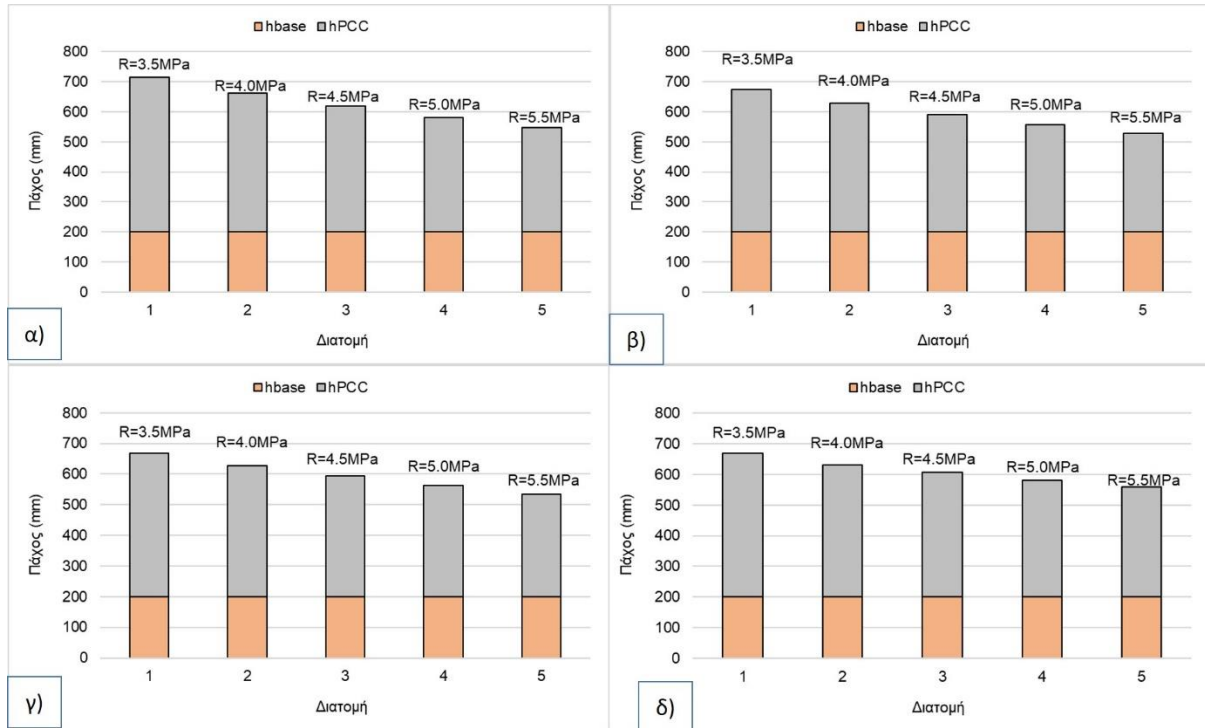
## 9.4.2 Σύγκριση δεικτών PCN-PCR

### 9.4.2.1 Εκτίμηση δεικτών PCN-PCR για σταθερή κυκλοφορία σε διατομές με $CDF_{PCC}=1$

Για τη σύγκριση των δεικτών PCN-PCR σχεδιάστηκαν 20 διατομές δύσκαμπτου οδοστρώματος χρησιμοποιώντας την πιο πρόσφατη αναλυτική μεθοδολογία διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων της FAA (FAA 2021) μέσω του αντίστοιχου λογισμικού (FAARFIELD 2.0). Η τυπική διατομή οδοστρώματος που χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό αποτελούνταν από πλάκα σκυροδέματος (τυπικό υλικό FAA P-501), στρώση βάσης από σταθεροποιημένο με τσιμέντο αμμοχάλικο (τυπικό υλικό της FAA P-304) και τη στρώση έδρασης με μέτρο ελαστικότητας  $E = 45\text{MPa}$ ,  $80\text{MPa}$ ,  $145\text{MPa}$  και  $344\text{MPa}$  (Εικόνα 9.43). Λόγω της τροποποίησης των ορίων των κατηγοριών εδαφικής αντοχής κατά το επικαιροποιημένο σύστημα ACR-PCR, η επιλογή των τιμών  $E$  της στρώσης έδρασης έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να ανήκει στην ίδια κατηγορία εδαφικής αντοχής ( $E = 45\text{MPa}$  (D),  $80\text{MPa}$  (C),  $145\text{MPa}$  (B),  $344\text{MPa}$  (A)) ανεξάρτητα από το σύστημα κατάταξης (ACN-PCN και ACR-PCR). Για κάθε κατηγορία εδαφικής αντοχής σχεδιάστηκαν πέντε διατομές, θεωρώντας ότι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος ισούται με  $R=3.5\text{MPa}$ ,  $4.0\text{MPa}$ ,  $4.5\text{MPa}$ ,  $5.0\text{MPa}$ ,  $5.5\text{MPa}$ . Το πάχος της βάσης θεωρήθηκε σταθερό και ίσο με  $20\text{cm}$  και υπολογίστηκε το πάχος της πλάκας σκυροδέματος ώστε η φθορά στον πυθμένα της πλάκας σκυροδέματος να είναι ίση με τη μονάδα ( $CDF_{PCC}=1$ ). Η σύνθεση της κυκλοφορίας που ελήφθη υπόψη στο σχεδιασμό φαίνεται στον Πίνακα 9.1. Τα πάχη των επιμέρους στρώσεων των διατομών φαίνονται στην Εικόνα 9.44.



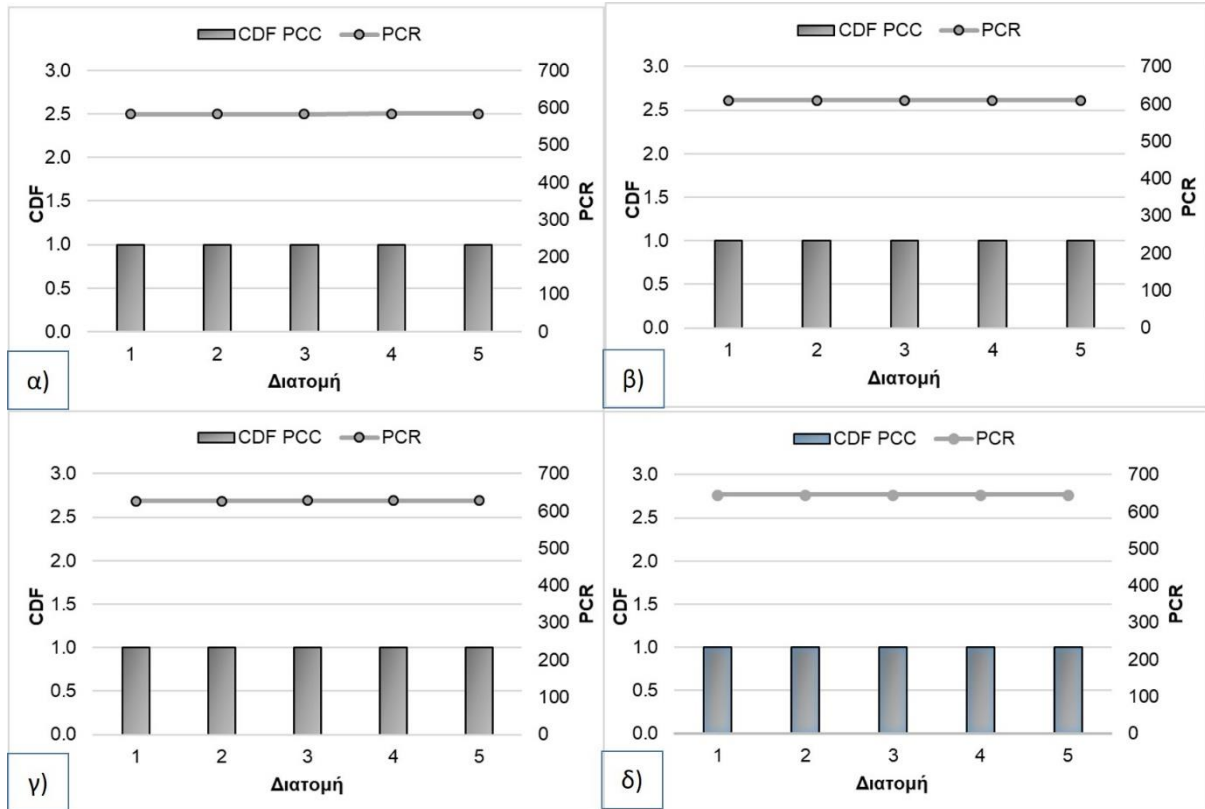
**Εικόνα 9.43 Διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος**



**Εικόνα 9.44 Πάχη διατομών για κατηγορία εδαφικής αντοχής: (α) A, (β) B, (γ) C and (δ) D**

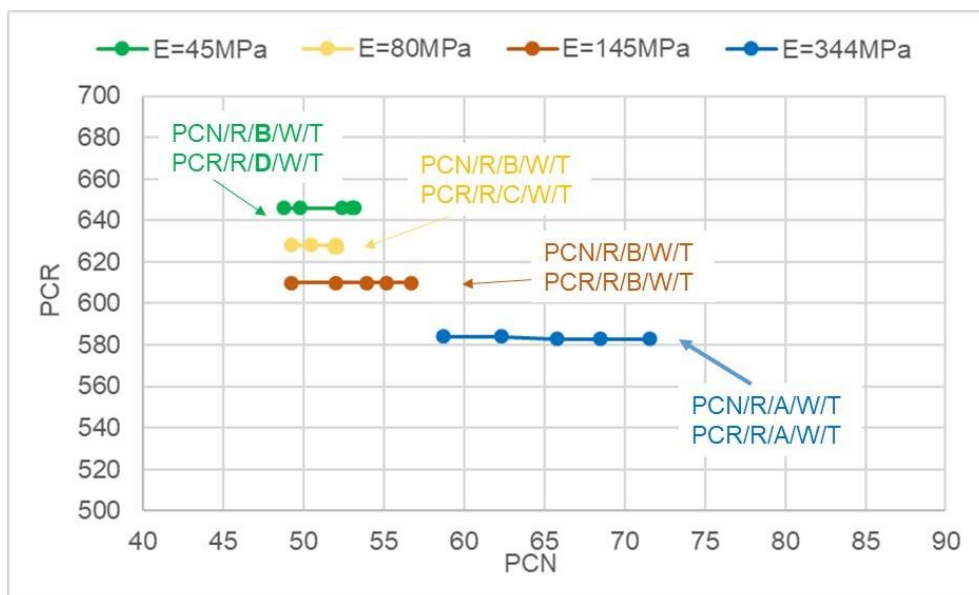
Από την ανάλυση προέκυψε ότι η μεταβολή της εδαφικής κατηγορίας δεν επηρέασε σημαντικά το πάχος της πλάκας σκυροδέματος. Εντούτοις το πάχος της πλάκας σκυροδέματος επηρεάστηκε κυρίως από τη μεταβολή της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος.

Αρχικά εκτιμήθηκε ο δείκτης PCR για κάθε διατομή με βάση τη διαδικασία που παρουσιάζεται στην (FAA 2020, FAA 2022). Από τη σχετική ανάλυση προέκυψε ότι ο δείκτης PCR ήταν σταθερός για τις διατομές που διέθεταν την ίδια φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης και για τις οποίες ίσχυε  $CDF_{PCC}=1$  (Εικόνα 9.45).



**Εικόνα 9.45 Δείκτες  $CDF_{PCC}$  και  $PCR$  για διατομές με κατηγορία εδαφικής αντοχής: (α) A, (β) B, (γ) C and (δ) D**

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε εκτίμηση του δείκτη PCN για κάθε διατομή με βάση τη διαδικασία που παρουσιάζεται στην (FAA 2014b). Ο υπόψη δείκτης συγκρίθηκε με τις αντίστοιχες τιμές του δείκτη PCR και τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 9.46.

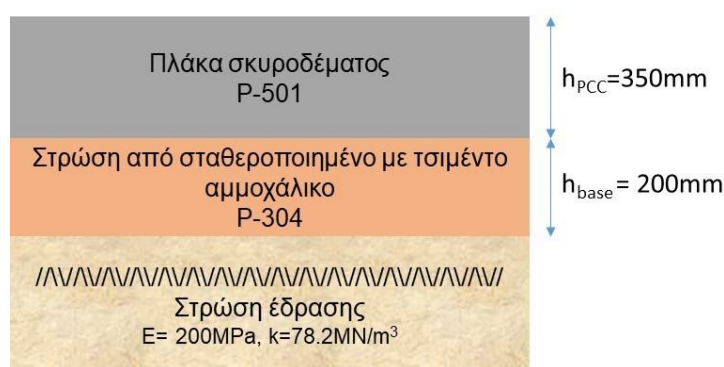


**Εικόνα 9.46 Σύγκριση PCN και PCR (δύσκαμπτα οδοστρώματα)**

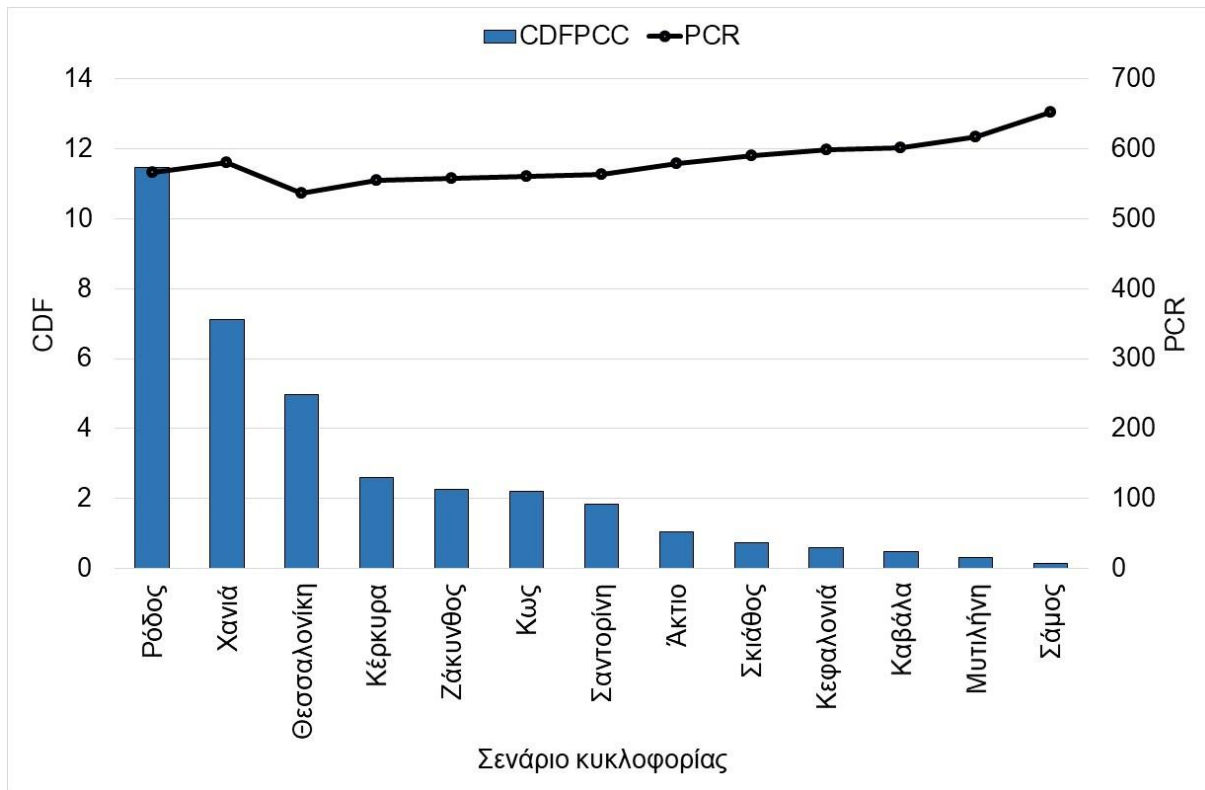
Από την ανάλυση προκύπτει ότι παρόλο που ο δείκτης PCR ήταν σταθερός για τις διατομές που διέθεταν την ίδια φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης και για τις οποίες ίσχυε  $CDF_{PCC}=1$ , ο δείκτης PCN παρουσίασε διαφορές. Παρατηρείται επίσης ότι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των δεικτών PCN και PCR για τη συγκεκριμένη ανάλυση. Επιπλέον, παρατηρείται ότι όπως και στα εύκαμπτα οδοστρώματα, διατομές οδοστρώματος με διαφορετικές τιμές PCN και κατά συνέπεια διαφορετική αντοχή παρουσιάζουν ίδια φέρουσα ικανότητα με βάση το επικαιροποιημένο σύστημα αναφοράς ACR-PCR. Εντούτοις οι υπόψη διαφορές φαίνεται να είναι μικρότερης κλίμακας σε σχέση με την περίπτωση των εύκαμπτων οδοστρώματων.

#### 9.4.2.2 Επίδραση θεώρησης της κυκλοφορίας στην κατάταξη φέρουσας ικανότητας οδοστρώματος

Δεδομένου ότι η παραπάνω διερεύνηση πραγματοποιήθηκε για την ίδια κυκλοφορία κρίθηκε σκόπιμο να διερευνηθεί η επίδραση της μεταβολής της θεώρησης της κυκλοφορίας στην έκφραση της φέρουσας ικανότητας της ίδιας διατομής. Προς τούτο επελέγη ενδεικτική διατομή οδοστρώματος η οποία φαίνεται στην Εικόνα 9.47. Στη συνέχεια εκτιμήθηκε η φθορά που αναπτύσσεται στον πυθμένα της πλάκας σκυροδέματος ( $CDF_{PCC}$ ) εξαιτίας της επίδρασης των διαφορετικών σεναρίων κυκλοφορίας του Πίνακα 9.2. Επιπλέον για την ίδια διατομή εκτιμήθηκε ο δείκτης PCR του οδοστρώματος και τα σχετικά αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 9.48. Παρατηρείται ότι καθώς μειώνεται η φθορά του οδοστρώματος αυξάνεται η έκφραση της φέρουσας ικανότητας της διατομής. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει τη σημασία εκτίμησης της υφιστάμενης κυκλοφορίας ενός αεροδρομίου με όσο το δυνατόν τη μεγαλύτερη ακρίβεια για την ορθή έκφραση της φέρουσας ικανότητάς του.

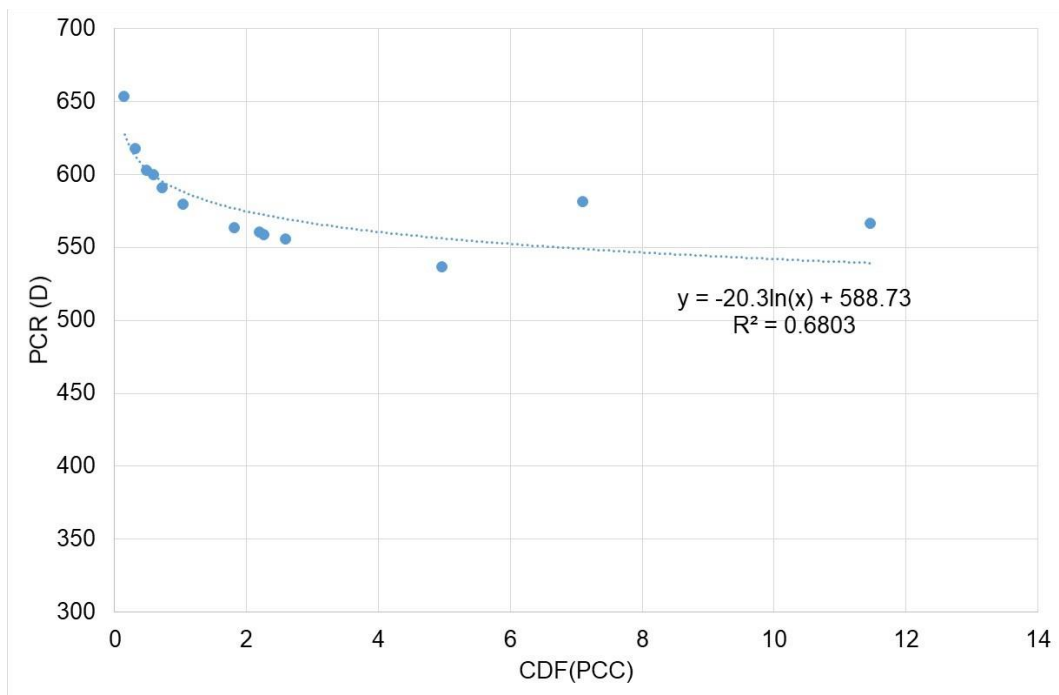


**Εικόνα 9.47 Διατομή οδοστρώματος**



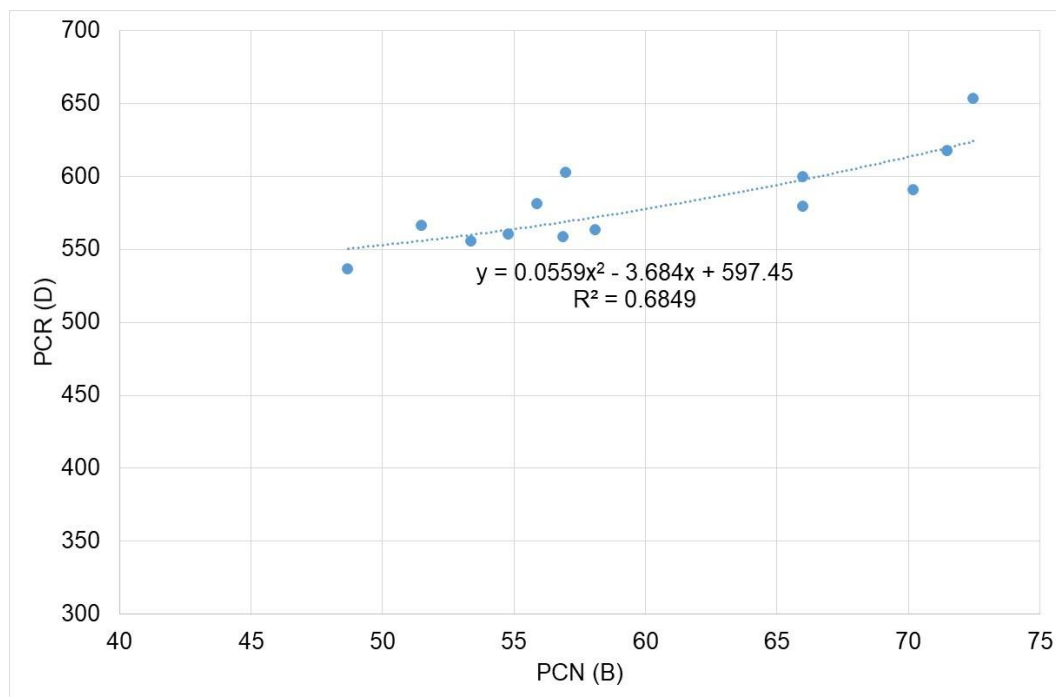
**Εικόνα 9.48 Δείκτης PCR και φθορά πλάκας σκυροδέματος ( $CDF_{PCC}$ )**

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε συσχέτιση του δείκτη PCR με τη φθορά της πλάκας σκυροδέματος ( $CDF_{PCC}$ ) και τα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 9.49. Παρατηρείται ότι ο δείκτης PCR παρουσιάζει καλή συσχέτιση με τον δείκτη φθοράς.



**Εικόνα 9.49 Συσχέτιση δείκτη PCR και φθοράς**

Επιπλέον, για κάθε σενάριο κυκλοφορίας εκτιμήθηκε και ο δείκτης PCN της διατομής. Σε αντιστοιχία με τα αποτελέσματα της εκτίμησης του δείκτη PCR, παρατηρείται ότι και ο δείκτης PCN επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη θεώρηση της κυκλοφορίας.



**Εικόνα 9.50 Συσχέτιση δεικτών PCN και PCR**

Παρατηρείται ότι και σε αυτή την περίπτωση υπάρχει καλή συσχέτιση μεταξύ των δεικτών PCN και PCR με τον συντελεστή συσχέτισης να ισούται με  $R^2=0.68$  (Εικόνα 9.50). Ο συντελεστής  $R^2$  αντιστοιχεί στο ποσοστό της μεταβλητότητας του δείκτη PCR που ερμηνεύεται από τη γραμμή παλινδρόμησης. Ως εκ τούτου η μεταβολή του δείκτη PCR μπορεί να περιγραφεί από τη μεταβολή του δείκτη PCN και συνεπώς η προσαρμογή της γραμμής παλινδρόμησης στα υπόψη δεδομένα είναι καλή.

#### **9.4.3 Πρακτική εφαρμογή μεθόδων ACN-PCN και ACR-PCR**

Για τη διερεύνηση της επίδρασης της εισαγωγής της μεθόδου ACR-PCR στην αναφορά της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων πραγματοποιήθηκε εκτίμηση του δείκτη PCN και PCR του δύσκαμπτου οδοστρώματος του δαπέδου αναμονής αεροσκαφών ενός περιφερειακού αεροδρομίου του ελλαδικού χώρου με στοιχεία που διατέθηκαν από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ (Αεροδρόμιο Γ). Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε αντίστοιχη ανάλυση σε δύο διατομές οδοστρώματος που προέκυψαν από την ανάλυση ευαισθησίας που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 9.4.1. και οι οποίες εφεξής θα αναφέρονται ως Διατομή Α και Διατομή Β. Βασικό κριτήριο για την επιλογή των δύο διατομών ήταν η κατάταξή τους με βάση την κατηγορία της εδαφικής αντοχής.

### 9.4.3.1 Διατομή Α

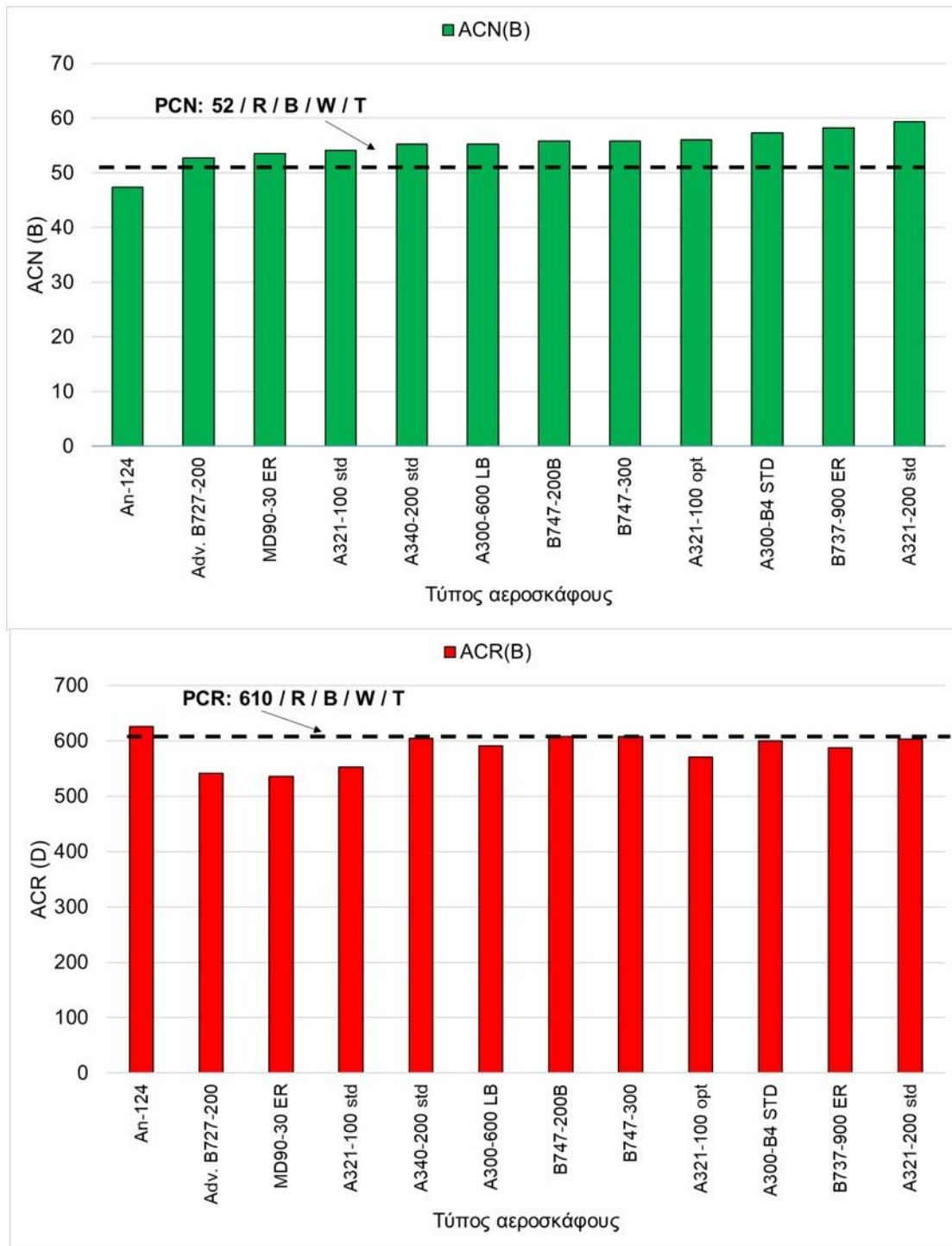
Η Διατομή Α αποτελείται από πλάκα σκυροδέματος πάχους 357mm, βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο πάχους 200mm και τη στρώση έδρασης με δείκτη αντίδρασης εδάφους  $k=60.8\text{MN/m}^3$  (Εικόνα 9.51). Η υπόψη διατομή έχει σχεδιαστεί για τη σύνθεση της κυκλοφορίας των αεροσκαφών που φαίνεται στον Πίνακα 9.1.



**Εικόνα 9.51 Διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος (Διατομή Α)**

Ο δείκτης PCN εκτιμήθηκε ίσως με 52/R/B/W/T και ο δείκτης PCR εκτιμήθηκε ίσως με 610/R/B/W/T, με τη στρώση έδρασης να κατατάσσεται στην κατηγορία Β. Προκειμένου να διερευνηθεί η ισοδυναμία αυτών των δύο δεικτών ως προς την αναφορά της φέρουσας ικανότητας της διατομής του οδοστρώματος, εξετάστηκε η δυνατότητα αποδοχής χρήσης του από αεροσκάφη που δεν περιλαμβάνονται στη σύνθεση της κυκλοφορίας, εφαρμόζοντας τη βασική συνθήκη ελέγχου. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκαν 12 τύποι αεροσκαφών με τιμές ACN και ACR για εδαφική κατηγορία Β που φαίνονται στην Εικόνα 9.52. Η ανάλυση έδειξε ότι τα περισσότερα αεροσκάφη δεν γίνονται αποδεκτά με το σύστημα ACN-PCN αλλά μπορούν να γίνουν αποδεκτά με το σύστημα ACR-PCR. Συνεπώς σε αυτή την περίπτωση η προσέγγιση της μεθόδου ACN-PCN αποτελεί μία πιο συντηρητική προσέγγιση.



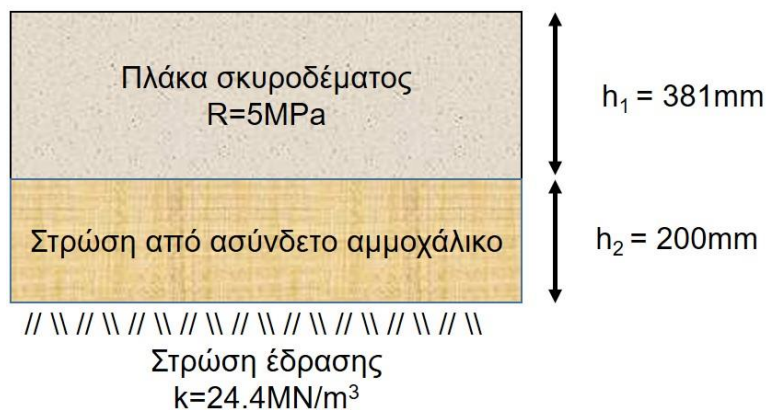


Εικόνα 9.52 Τιμές ACN και ACR αεροσκαφών για εδαφική κατηγορία B και D αντίστοιχα

#### 9.4.3.2 Διατομή B

Η Διατομή B αποτελείται από πλάκα σκυροδέματος πάχους 381mm, βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο πάχους 200mm και τη στρώση έδρασης με δείκτη αντίδρασης εδάφους  $k=24.4\text{MN/m}^3$  (Εικόνα 9.53). Η υπόψη διατομή έχει σχεδιαστεί για τη σύνθεση της κυκλοφορίας των αεροσκαφών που φαίνεται στον Πίνακα 9.1.

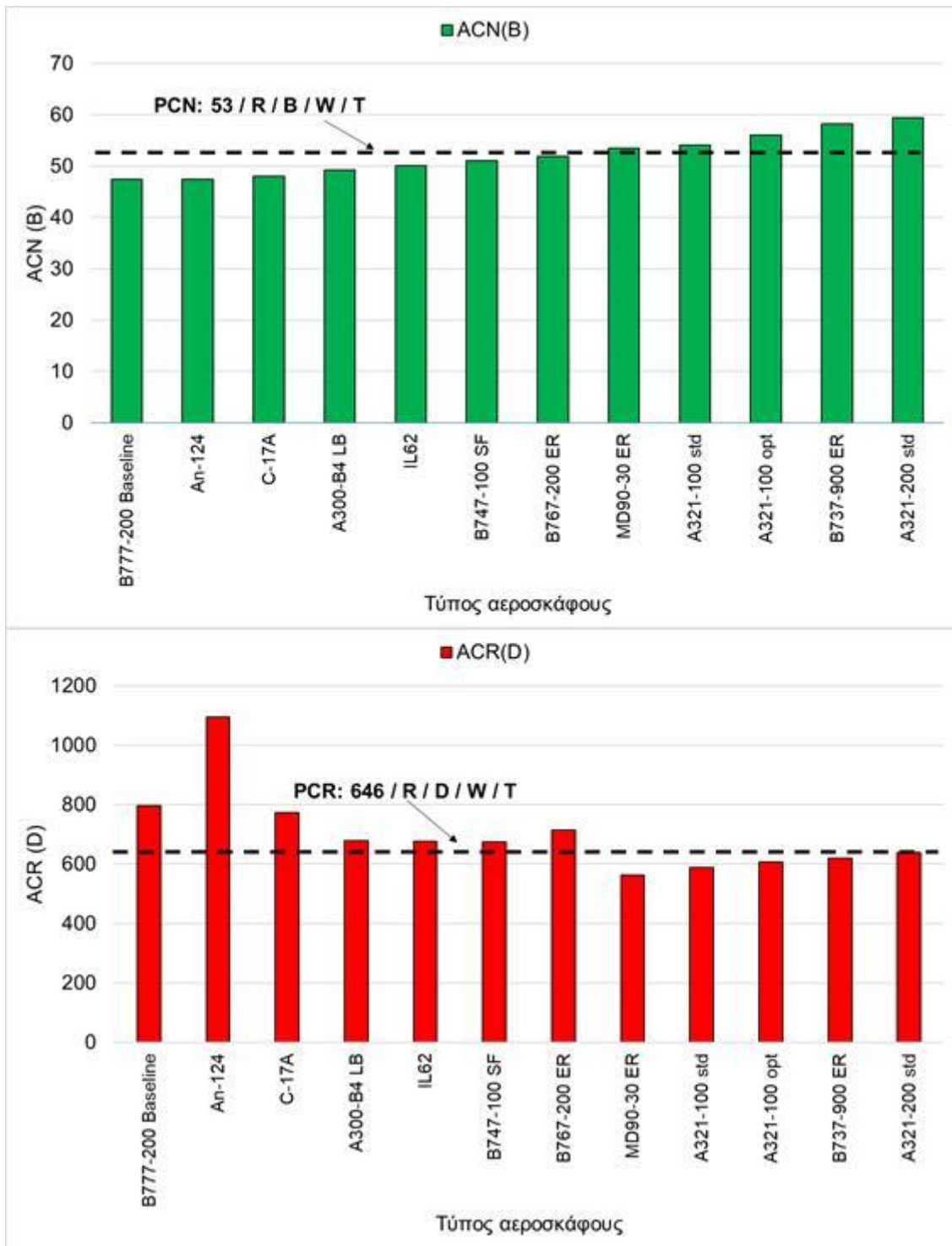




**Εικόνα 9.53 Διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος (Διατομή Β)**

Ο δείκτης PCN εκτιμήθηκε ίσως με 53/R/B/W/T, δεδομένου ότι η στρώση έδρασης κατατάσσεται στην κατηγορία εδαφικής αντοχής B. Για την ίδια διατομή ο δείκτης PCR εκτιμήθηκε ίσως με 646/R/D/W/T, με τη στρώση έδρασης να κατατάσσεται στην κατηγορία D.

Προκειμένου να διερευνηθεί η ισοδυναμία αυτών των δύο δεικτών ως προς την αναφορά της φέρουσας ικανότητας της διατομής του οδοστρώματος, εξετάστηκε η δυνατότητα αποδοχής χρήσης του από αεροσκάφη που δεν περιλαμβάνονται στη σύνθεση της κυκλοφορίας, εφαρμόζοντας τη βασική συνθήκη ελέγχου. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκαν 12 τύποι αεροσκαφών με τιμές ACN που είτε είναι μικρότερες είτε μεγαλύτερες από το δείκτη PCN και για τα ίδια αεροσκάφη υπολογίστηκαν οι τιμές ACR. Οι τιμές ACN και ACR εκτιμήθηκαν για τις εδαφικές κατηγορίες B και D αντίστοιχα, οι οποίες αντιστοιχούν στους δείκτες PCN και PCR αντίστοιχα (Εικόνα 9.54).

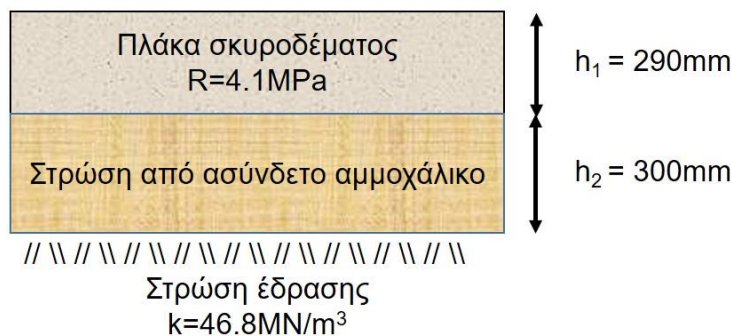


**Εικόνα 9.54 Τιμές ACN και ACR αεροσκαφών για εδαφική κατηγορία B και D αντίστοιχα**

Η ανάλυση έδειξε ότι αεροσκάφη που γίνονται αποδεκτά με το σύστημα ACN-PCN δεν μπορούν να γίνουν αποδεκτά με το σύστημα ACR-PCR και το αντίστροφο.

### 9.4.3.1 Αεροδρόμιο Γ

Η διατομή του δύσκαμπτου δαπέδου αναμονής αεροσκαφών που διερευνήθηκε αποτελούνταν από πλάκα σκυροδέματος πάχους 290mm, βάση από ασύνδετο αμμοχάλικο πάχους 300mm και τη στρώση έδρασης. Στην Εικόνα 9.55 φαίνεται μία αντιπροσωπευτική διατομή του υπό διερεύνηση οδοστρώματος και ο Πίνακας 9.4 δείχνει τη σύνθεση της κυκλοφορίας των αεροσκαφών που αναμένεται να διέλθουν από το υπόψη οδόστρωμα για μια περίοδο 20 ετών.



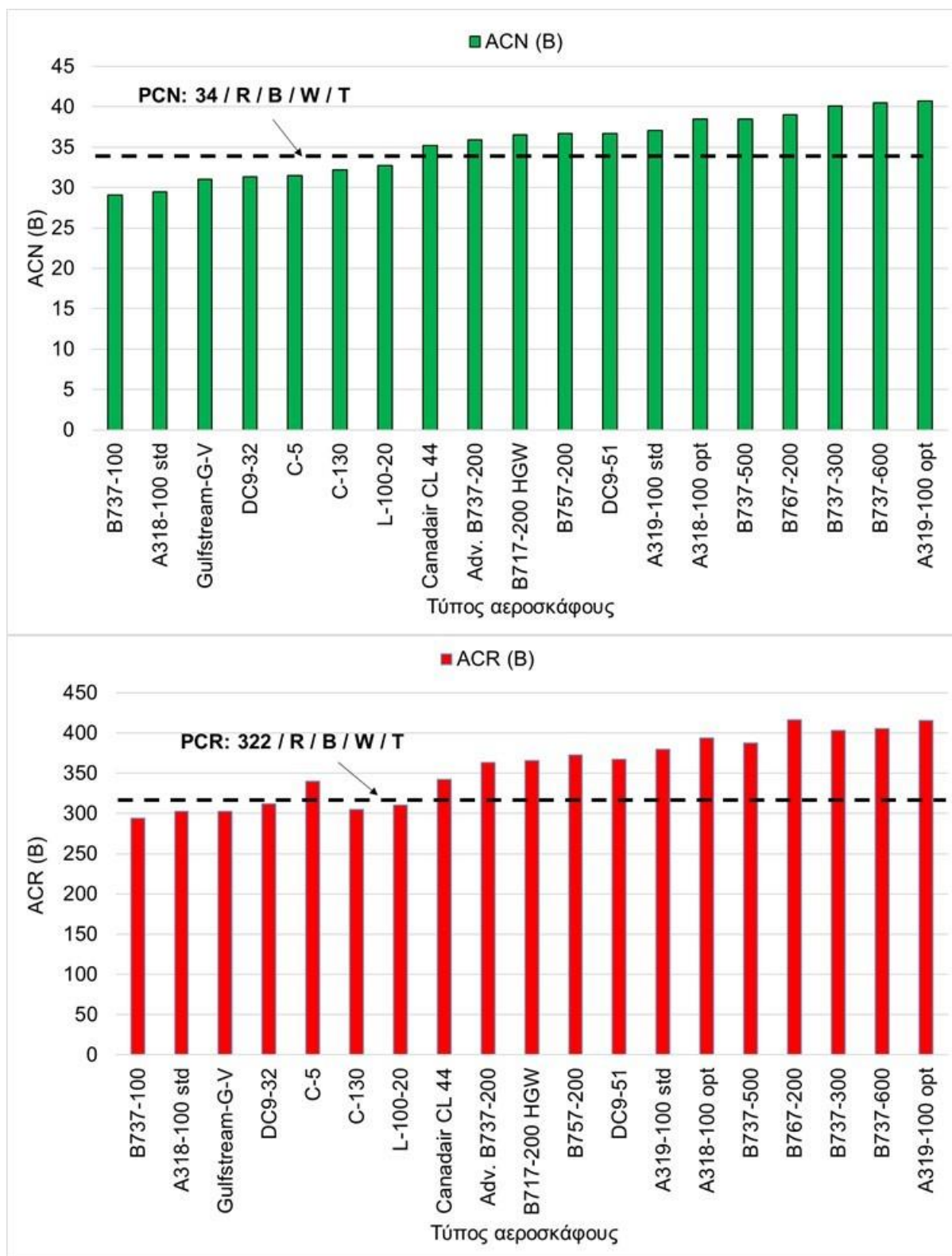
Εικόνα 9.55 Διατομή οδοστρώματος δαπέδου αναμονής αεροσκαφών (Αεροδρόμιο Γ)

Πίνακας 9.4 Σύνθεση κυκλοφορίας

Τύπος αεροσκάφους	Ετήσιες αναχωρήσεις	Βάρος αεροσκάφους (tns)	Πίεση ελαστικού (MPa)
Dash-Q400	1900	29.347	1.565
A318	250	56.400	1.240

Με βάση τον δείκτη αντίδρασης εδάφους της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος, η στρώση έδρασης κατατάσσεται στην κατηγορία εδαφικής αντοχής B ακολουθώντας τη διαδικασία τεχνικής αξιολόγησης που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4.3. Ο δείκτης PCN του δαπέδου εκτιμήθηκε 34/R/B/W/T. Στη συνέχεια εφαρμόζοντας τη διαδικασία που περιγράφεται στο κεφάλαιο 4.4 υπολογίστηκε ο δείκτης PCR ίσος με 322/R/B/W/T.

Προκειμένου να διερευνηθεί η ισοδυναμία αυτών των δύο δεικτών ως προς την αναφορά της φέρουσας ικανότητας του δαπέδου, εξετάστηκε η δυνατότητα αποδοχής χρήσης του δαπέδου από αεροσκάφη που δεν περιλαμβάνονται στη σύνθεση της κυκλοφορίας, εφαρμόζοντας τη βασική συνθήκη ελέγχου. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκαν 19 τύποι αεροσκαφών με τιμές ACN που είτε είναι μικρότερες είτε μεγαλύτερες από το δείκτη PCN και για τα ίδια αεροσκάφη υπολογίστηκαν οι τιμές ACR για την εδαφική κατηγορία B (Εικόνα 9.56). Η ανάλυση έδειξε ότι η τιμή ACR μόνο για ένα αεροσκάφος υπερέβη την αναφερόμενη τιμή PCR.



**Εικόνα 9.56 Τιμές ACN και ACR αεροσκαφών για εδαφική κατηγορία B**

Κατά συνέπεια ο δείκτης PCR φαίνεται να είναι ισοδύναμος με τον δείκτη PCN για τη συγκεκριμένη περίπτωση, σε αντίθεση με την περίπτωση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων.

## 9.5 Σχόλια - Παρατηρήσεις

Από την παρούσα διερεύνηση προέκυψε ότι το επικαιροποιημένο σύστημα κατάταξης της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACR-PCR έχει ενσωματώσει λεπτομερείς αναλυτικές διαδικασίες για την αξιολόγηση. Ο δείκτης ACR που χρησιμοποιείται για την έκφραση της επίδρασης των αεροσκαφών στα οδοστρώματα αεροδρομίων έχει βελτιωθεί σημαντικά, ωστόσο εξακολουθεί να παρουσιάζει ορισμένες αδυναμίες και ως εκ τούτου θεωρείται ότι το μοντέλο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ενδεχομένου να χρήζει περαιτέρω βελτίωσης.

Όσον αφορά στη δυνατότητα μεταφοράς μεταξύ των δύο συστημάτων, αν και φαίνεται ότι υπάρχει ισχυρή στατιστική συσχέτιση μεταξύ των δεικτών ACN και ACR, εντούτοις συστήνεται το ACR να προσδιορίζεται ανεξάρτητα από το ACN. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι διατομές με διαφορετικές τιμές του δείκτη PCN και κατά συνέπεια διαφορετική αντοχή, αναφέρουν την ίδια φέρουσα ικανότητα με βάση τον επερχόμενο δείκτη PCR για τις διατομές για τις οποίες ισχύει ότι  $CDF_{\text{subgrade}}=1$  και για την ίδια κυκλοφορία. Αντίστοιχες παρατηρήσεις προέκυψαν από τη σχετική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στα δύσκαμπτα οδοστρώματα. Εντούτοις οι υπόψη διαφορές φαίνεται να είναι μικρότερης κλίμακας σε σχέση με την περίπτωση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων.

Για τις διατομές εύκαμπτου οδοστρώματος που σχεδιάστηκαν για 13 σενάρια κυκλοφορίας προέκυψε ότι οι δείκτες PCN και PCR παρουσιάζουν αντίστοιχη τάση μεταβολής. Οι δύο δείκτες παρουσίασαν καλή συσχέτιση για όλες τις τιμές του δείκτη CBR. Επιπλέον ο δείκτης PCR φαίνεται να παρουσιάζει καλύτερη συσχέτιση με τη φθορά της στρώσης έδρασης, γεγονός που φαίνεται ορθολογικό δεδομένου ότι βασική αρχή εκτίμησης του υπόψη δείκτη αποτελεί η υπόψη φθορά.

Επιπλέον, από την εκτίμηση των τιμών PCN και PCR του εύκαμπτου οδοστρώματος του διαδρόμου Π/Α δύο αεροδρομίων, προέκυψε ότι η έκφραση της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος μέσω του δείκτη PCR μπορεί να οδηγεί σε μία πιο συντηρητική θεώρηση σε σύγκριση με τον δείκτη PCN, όσον αφορά στους τύπους των αεροσκαφών που μπορεί να δεχθεί το οδοστρώμα. Από την αντίστοιχη ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σε δύσκαμπτα οδοστρώματα προέκυψε ότι η έκφραση της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος μέσω του δείκτη PCR δεν αποτελεί σε όλες τις περιπτώσεις μία πιο συντηρητική θεώρηση σε σύγκριση με τον δείκτη PCN, ενώ εντοπίστηκαν περιπτώσεις που η έκφραση της φέρουσας ικανότητας με τα δύο συστήματα είναι ισοδύναμη.

Η ανάλυση έδειξε επίσης ότι δεδομένου ότι η μέθοδος ACR-PCR έχει δομηθεί με βάση την αστοχία της στρώσης έδρασης για τα εύκαμπτα οδοστρώματα ενδεχομένως να μην μπορεί να αναδείξει διαφοροποιήσεις στη φθορά των ασφαλικών στρώσεων. Ωστόσο, πιστεύεται ότι πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην αστοχία λόγω της κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων, καθώς μπορεί να είναι κρίσιμη όσον αφορά στις διαδικασίες συντήρησης του οδοστρώματος του αεροδρομίου.

Σε κάθε περίπτωση για την αξιολόγηση της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων και τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών κατάταξης είναι θεμιτό να αξιοποιούνται αναλυτικά στοιχεία του οδοστρώματος. Με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης αναλυτικών στοιχείων του οδοστρώματος στις διαδικασίες αξιολόγησης και κατάταξης της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων πραγματοποιήθηκε πείραμα πεδίου σε δύσκαμπτο δάπεδο αναμονής αεροσκαφών που παρατίθεται στο κεφάλαιο 10. Αντίστοιχη διερεύνηση πραγματοποιήθηκε και για την περίπτωση ενός εύκαμπτου οδοστρώματος διαδρόμου Π/Α και τα σχετικά αποτελέσματα παρατίθενται στο κεφάλαιο 11. Στο πλαίσιο της έρευνας αξιοποιήθηκαν επιτόπου στοιχεία καθώς και στοιχεία από εργαστηριακές δοκιμές.

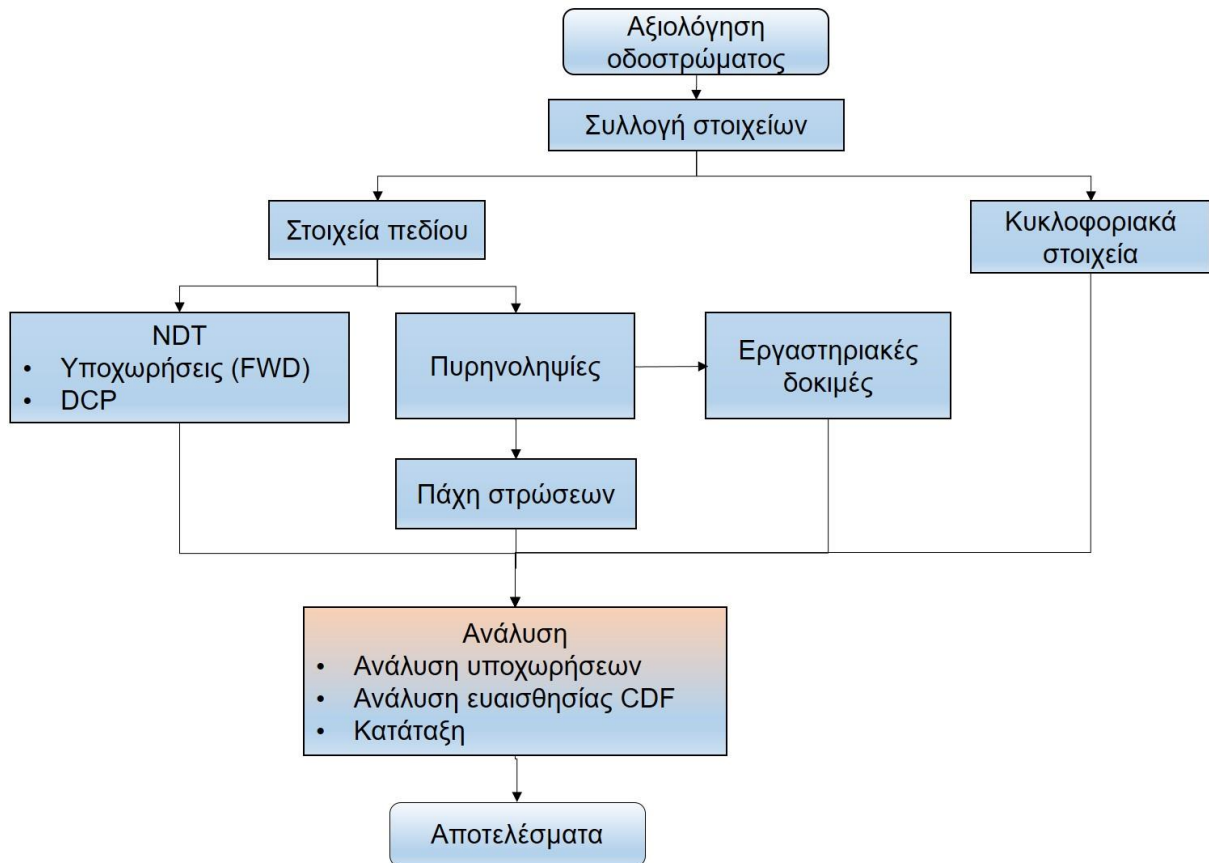
## **10 ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΔΥΣΚΑΜΠΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟΥ**

---

### **10.1 Γενική περιγραφή**

Στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της δομικής κατάστασης ενός δύσκαμπτου δαπέδου αναμονής αεροσκαφών αεροδρομίου με στόχο να αναδειχθεί η σημασία αξιοποίησης λεπτομερών στοιχείων συλλογής ενός υφιστάμενου δαπέδου κατά τις διαδικασίες αξιολόγησης και κατάταξης της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Προς τούτο αξιοποιήθηκαν καταγραφές από μετρήσεις πεδίου, αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών καθώς και κυκλοφορικά στοιχεία του αεροδρομίου. Στην συνέχεια παρατίθεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε, η οποία μπορεί να αποτελέσει ένα μεθοδολογικό πλαίσιο αξιολόγησης δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων, χρήσιμο εργαλείο για τις αρχές διαχείρισης ενός αεροδρομίου. Η παρούσα διερεύνηση στοχεύει επίσης να αναδείξει τη σημασία τέτοιων μεθοδολογιών αξιολόγησης ακόμα και κατά την αρχική φάση κατασκευής ενός δαπέδου και πριν αυτό δοθεί στην κυκλοφορία. Για το σκοπό αυτό επελέγη ένα δάπεδο αποτελούμενο από δύσκαμπτο οδόστρωμα με αρμούς χωρίς οπλισμό το οποίο παρουσίασε ρωγμές αμέσως μετά την κατασκευή (early-life cracks).

Για την αξιολόγηση του δύσκαμπτου οδοστρώματος ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που φαίνεται στην Εικόνα 10.1. Η ερευνητική διαδικασία περιλάμβανε συλλογή στοιχείων με μετρήσεις πεδίου. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με το Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους (FWD) και το Δυναμικό Πενετρόμετρο Κώνου (DCP) σύμφωνα με τις αντίστοιχες προδιαγραφές (ASTM 2009, ASTM 2015) καθώς και πυρηνοληψίες για την εκτίμηση του πάχους της πλάκας σκυροδέματος. Στα υπόψη δοκίμια πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος. Σημειώνεται ότι το FWD αποτελεί πάγια τακτική που εφαρμόζεται για την αξιολόγηση δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων (Tang 1993, Reddy and Kumar 2018, Redles et al. 2018, White 2018, Muslim et al. 2021). Στη συνέχεια ακολούθησε συνδυαστική ανάλυση της συμπεριφοράς του οδοστρώματος λαμβάνοντας υπόψη και στοιχεία κυκλοφορίας (Gkyrtis et al. 2021b).



**Εικόνα 10.1 Μεθοδολογία αξιολόγησης**



**Εικόνα 10.2 Πειραματικές δοκιμές: (α) FWD, (β) DCP και (γ) πυρηνοληψίες**

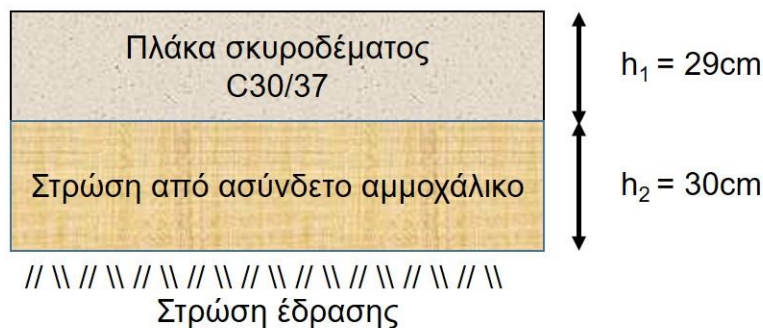
## 10.2 Περιοχή διερεύνησης

Πεδίο εφαρμογής της παρούσας διερεύνησης αποτελεί ο διάδρομος Π/Α αεροσκαφών ενός περιφερειακού αεροδρομίου του ελλαδικού χώρου. Δεδομένης της αυξανόμενης ζήτησης που προκάλεσε η τουριστική ανάπτυξη της ευρύτερη περιοχής προέκυψε η ανάγκη επέκτασης του



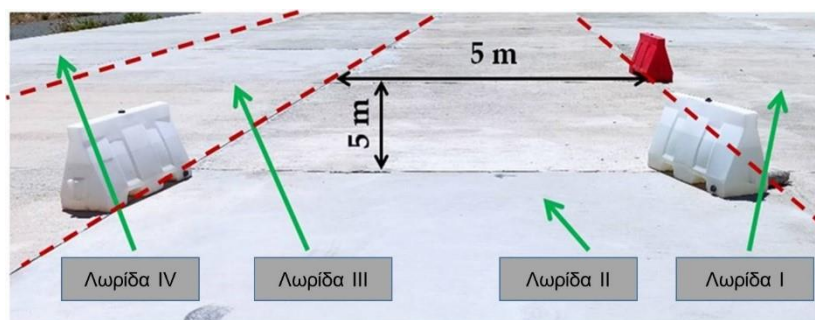
υφιστάμενου διαδρόμου Π/Α αεροσκαφών που αποτελείται από εύκαμπτο οδόστρωμα. Μέρος της επέκτασης αποτελεί η κατασκευή δύσκαμπτου οδοστρώματος με αρμούς χωρίς οπλισμό. Το υπόψη οδόστρωμα κατασκευάστηκε από πλάκα σκυροδέματος τύπου C30/37, υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο και τη στρώση έδρασης. Τυπική διατομή του οδοστρώματος φαίνεται στην Εικόνα 10.3. Τα πάχη των στρώσεων αντιστοιχούν στις τιμές που προέκυψαν από τη διαδικασία σχεδιασμού του οδοστρώματος, η οποία πραγματοποιήθηκε με βάση τις αρχές της μεθόδου της FAA.

Το οδόστρωμα αναμένεται να εξυπηρετήσει ετησίως 1900 ετήσιες αναχωρήσεις αεροσκαφών τύπου Dash8-Q400 και 250 ετήσιες αναχωρήσεις αεροσκαφών τύπου Airbus A318 για περίοδο σχεδιασμού 20 ετών.



**Εικόνα 10.3 Διατομή υπό διερεύνηση οδοστρώματος (Αεροδρόμιο Γ)**

Σύμφωνα με τα ιστορικά στοιχεία κατασκευής του οδοστρώματος προέκυψε ότι οι εργασίες κατασκευής πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και λίγες ημέρες αργότερα εμφανίστηκαν τριχοειδείς ρηγματώσεις που οφείλονται σε φαινόμενα συρρίκνωσης του σκυροδέματος (shrinkage cracks). Η διερεύνηση στοχεύει στην αξιολόγηση της κατάστασης του κατασκευασμένου οδοστρώματος το οποίο αποτελείται από τέσσερις λωρίδες. Κάθε λωρίδα αποτελείται από πλάκες διαστάσεων 5m x 5m και η συνολική περιοχή διερεύνησης ήταν 1800m<sup>2</sup>.



**Εικόνα 10.4 Περιοχή διερεύνησης κατασκευασμένου τμήματος δύσκαμπτου οδοστρώματος**

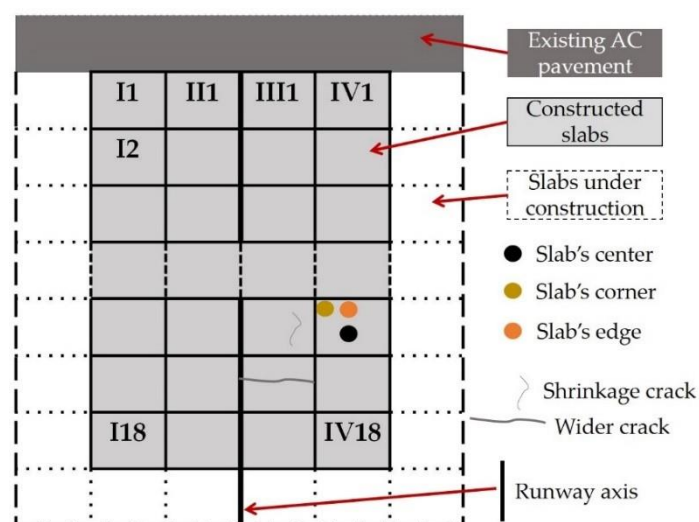
### 10.3 Συλλογή στοιχείων με μη καταστρεπτικά συστήματα

Σχετικά με τις μετρήσεις πεδίου, εκτός από την οπτική επισκόπηση, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με μη καταστρεπτικά συστήματα. Σημειώνεται ότι ακόμα κι αν η επιφανειακή κατάσταση ενός οδοστρώματος δεν παρουσιάζει φθορές εντούτοις η ανάλυση στοιχείων μη καταστρεπτικών δοκιμών μπορεί να οδηγήσει στον εντοπισμό περιοχών με ενδεχομένως μειωμένη φέρουσα ικανότητα.

Οι μετρήσεις με το Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους FWD πραγματοποιήθηκαν με φορτίο 100 kN. Η επιλογή του υπόψη φορτίου πραγματοποιήθηκε με βάση τη διεθνή πρακτική ώστε να εξασφαλιστεί ότι ο συγκεκριμένος τύπος οδοστρώματος θα παρουσίαζε ικανοποιητική απόκριση. Η διάταξη των γεωφώνων που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στον Πίνακα 10.1. Σύμφωνα με την FAA (FAA 2011) συνήθως οι δοκιμές με το FWD πραγματοποιούνται στο κέντρο της πλάκας σκυροδέματος. Η δοκιμή αυτή χρησιμεύει στη συλλογή στοιχείων ελαστικών υποχωρήσεων που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της αντοχής του οδοστρώματος και της στρώσης έδρασης. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να γίνει αδρομερής εκτίμηση της συνολικής κατάστασης της ευρύτερης περιοχής.

**Πίνακας 10.1 Διάταξη γεωφώνων FWD**

Γεώφωνο	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Απόσταση από το κέντρο φόρτισης (mm)	0	200	300	450	600	900	1200	1500	1800



**Εικόνα 10.5 Κάτοψη περιοχής διερεύνησης και σημεία μετρήσεων**

Σε κάθε θέση μέτρησης, αρχικά πραγματοποιήθηκε μία μέτρηση για τη βαθμονόμηση του συστήματος (seating drop) και ακολούθησαν τρεις μετρήσεις για περαιτέρω ανάλυση,

σύμφωνα με σχετικές διαδικασίες αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων (DMG 27 2011). Σε κάθε θέση μέτρησης ελήφθησαν υπόψη και οι τρεις μετρήσεις. Σημειώνεται ότι η διακύμανση μεταξύ των τριών μετρήσεων ήταν μικρότερη από 2% για την κεντρική υποχώρηση (δείκτης D1) και μικρότερη από 4% για την υποχώρηση που καταγράφηκε στο πιο απομακρυσμένο γεώφωνο (δείκτης D9), λαμβάνοντας υπόψη στοιχεία από όλες τις πλάκες.

Οι υποχωρήσεις από κάθε πλάκα χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της ομοιογένειας και της διαφοροποίησης της κατασκευής κατά την περιοχή διερεύνησης. Για κάθε λωρίδα πλακών, η ομοιογένεια εκτιμήθηκε μέσω του συντελεστή μεταβλητότητας CV (Coefficient of Variation), ο οποίος προκύπτει ως ο λόγος της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή των υποχωρήσεων.

Η ανομοιογένεια των υποχωρήσεων γειτονικών πλακών οδήγησε στην επιλογή ενδεικτικών πλακών για την πραγματοποίηση πυκνότερων μετρήσεων σε κάθε πλάκα. Οι μετρήσεις στο σύνολο της πλάκας περιλάμβαναν καταγραφή υποχωρήσεων σε όλες τις ακμές και τις γωνίες. Οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της «ανθεκτικότητας» (durability) της πλάκας σκυροδέματος σύμφωνα με την FAA (FAA 2021). Συνολικά μετρήθηκαν 72 πλάκες στο κέντρο και η εκτίμηση της «ανθεκτικότητας» πραγματοποιήθηκε σε 8 πλάκες.

Σύμφωνα με την FAA, η «ανθεκτικότητα» μπορεί να προσδιοριστεί μέσω του λόγου ISM (Impulse Stiffness Modulus) στο κέντρο των πλακών και στις άκρες/γωνίες. Ο λόγος ISM ορίζεται ως:

$$ISM_i = \frac{F_{center}/D_{1-center}}{F_i/D_{1-i}} \quad (\text{Εξ. 10.1})$$

Όπου:

- $F_{center}, D_{1-center}$ : φορτίο και μέγιστη υποχώρηση στο κέντρο της πλάκας
- $i$ : θέση που αναφέρεται στην άκρη της πλάκας ή στη γωνία της πλάκας
- $F_i, D_{1-i}$ : φορτίο και μέγιστη υποχώρηση στη  $i$ -θέση της πλάκας

Τιμές του δείκτη ISM μεγαλύτερες από 3 υποδηλώνουν μειωμένη (poor) ανθεκτικότητα στη γωνία ή στην άκρη/αρμό της πλάκας. Η ανθεκτικότητα χαρακτηρίζεται ως καλή (good) για τιμές του δείκτη ISM μικρότερες από 3. Τιμές που κυμαίνονται από 3 έως 1.5 χαρακτηρίζονται ως αμφισβητήσιμες (questionable).

Όσον αφορά στους αρμούς πραγματοποιήθηκε εκτίμηση της ικανότητας μεταβίβασης φορτίου LTE (Load Transfer Efficiency) (Vandenbossche 2007) με βάση τα στοιχεία του FWD στους

αρμούς ανάμεσα στις πλάκες (Εικόνα 10.6α), τόσο κατά την εγκάρσια όσο και κατά τη διαμήκη διεύθυνση.

Η ικανότητα γειτονικών πλακών να διανέμουν τα φορτία πραγματοποιείται μέσω του λόγου LTE:

$$LTE (\%) = \frac{D_{unloaded}}{D_{loaded}} \quad (\text{Εξ. 10.2})$$

όπου

- $D_{loaded}$ : υποχώρηση (μm) που καταγράφεται στην πλάκα που φορτίζεται, συνήθως ακριβώς κάτω από την πλάκα του FWD
- $D_{unloaded}$ : υποχώρηση (μm) που καταγράφεται στη γειτονική μη φορτιζόμενη πλάκα, συνήθως σε απόσταση 300mm από το κέντρο επιβολής του φορτίου FWD

Επιπλέον η παρουσία ρηγματώσεων σε διάφορες θέσεις οδήγησε στην εκτέλεση επιπλέον μετρήσεων FWD, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν γύρω από τις ρωγμές και επάνω στις ρωγμές με σκοπό να προσδιοριστεί η δυνατότητα μεταβίβασης φορτίου στις ρωγμές και η διαφοροποίηση της απόκρισης του οδοστρώματος εξαιτίας των ρηγματώσεων.



**Εικόνα 10.6 (α) Μετρήσεις LTE σε αρμούς, (β) Μετρήσεις LTE σε ρωγμές και (γ) Μετρήσεις απευθείας σε ρωγμή**

## 10.4 Πυρήνες

Εκτός από τη συλλογή στοιχείων πεδίου με μη καταστρεπτικές δοκιμές, πραγματοποιήθηκαν δέκα πυρηνοληψίες σε διάφορες τοποθεσίες προκειμένου να καλυφθεί η περιοχή της διερεύνησης στο μέγιστο δυνατό βαθμό. Οι πυρήνες που εξήχθησαν χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για την εκτίμηση του πάχους της πλάκας σκυροδέματος που κατασκευάστηκε. Επιπλέον, δεδομένου ότι η συμπεριφορά του οδοστρώματος σε βάθος χρόνου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, οι εξαγόμενοι πυρήνες από περιοχές χωρίς ρωγμές ελέγχθηκαν περαιτέρω στο εργαστήριο για την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος.

Επί των πυρήνων που ελήφθησαν πραγματοποιήθηκε εργαστηριακή δομική προσδιορισμού της αντοχής εφελκυσμού λόγω διάρρηξης (splitting strength). Η δοκιμή γίνεται σε κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος σύμφωνα με το σχετικό πρωτόκολλο της δοκιμής (ASTM 2015). Με βάση την Εικόνα 10.7, η επιβολή ελεγχόμενου θλιπτικού φορτίου με ρυθμό 0.7 kN/s οδηγεί στη διάρρηξη («διαχωρισμό») του δοκιμίου και η μέγιστη τιμή της παρατηρούμενης εφελκυστικής τάσης, οριζόμενη ως εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη, υπολογίζεται ως εξής:

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot L \cdot D} \quad (\text{Εξ. 10.3})$$

όπου:

- $f_{(ct,sp)}$ : η εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη (MPa),
- P: το μέγιστο θλιπτικό φορτίο διάρρηξης (N), και
- L, D: το μήκος και η διάμετρος δοκιμίου (σε mm).



**Εικόνα 10.7 Διάταξη εργαστηριακής δοκιμής διάρρηξης (Splitting strength test)**

Με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία (Greer 1983, Mohamed et al. 2017, Maureen Melis et al. 1985) μέσω χρήσης συντελεστών συσχέτισης μπορούν να εκτιμηθούν τόσο η καμπτική αντοχή όσο και η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Η πρώτη τιμή συνιστά ένδειξη της κατηγορίας σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε κατά την κατασκευή του οδοστρώματος ενώ η δεύτερη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λεπτομερή αξιολόγηση του οδοστρώματος.

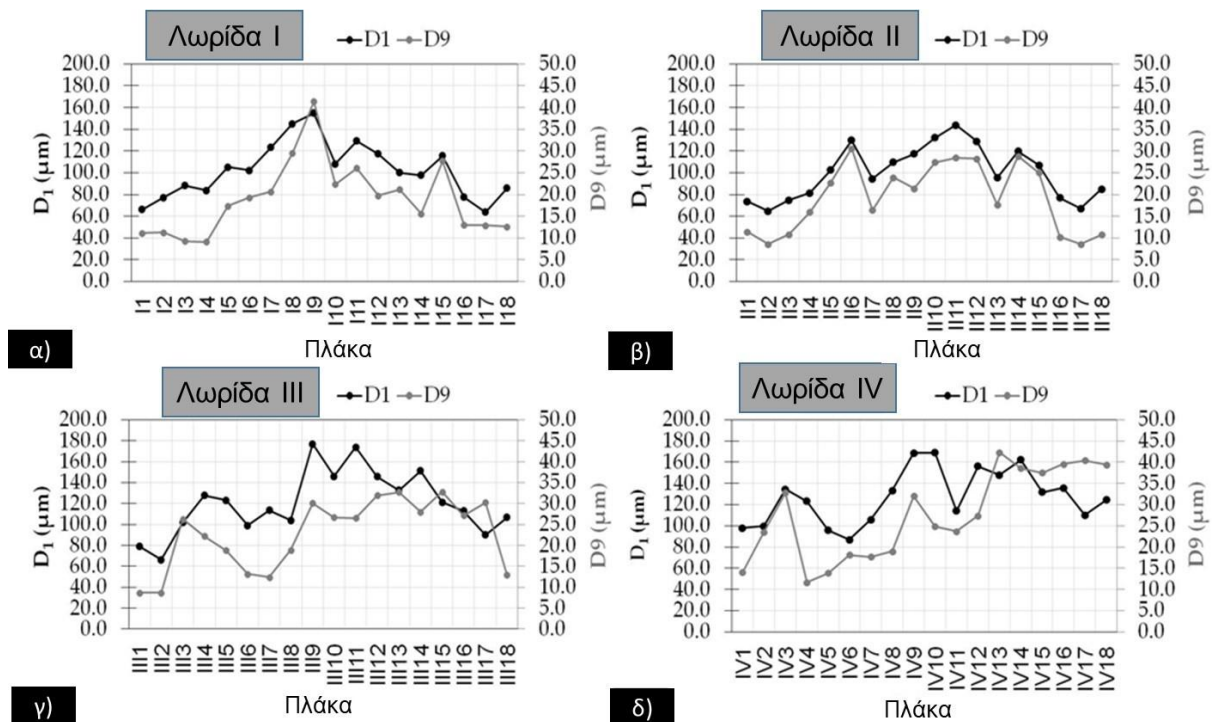
## 10.5 Αποτελέσματα

### 10.5.1 Πάχος πλάκας σκυροδέματος

Με βάση τους πυρήνες που ελήφθησαν προέκυψε μέσο πάχος της πλάκας σκυροδέματος ίσο με 30.1cm με τυπική απόκλιση 3.2cm. Παρόλο που το μέσο πάχος της πλάκας σκυροδέματος προσεγγίζει την τιμή του σχεδιασμού, περίπου οι μισοί πυρήνες παρουσίασαν μικρότερο πάχος με την ελάχιστη τιμή να ισούται με 26cm.

### 10.5.2 Ανάλυση ελαστικών υποχωρήσεων

Από την επεξεργασία των στοιχείων συλλογής προέκυψε η εκτίμηση των δεικτών D1 και D9 για κάθε λωρίδα καταγραφής. Ο δείκτης D1 αντιστοιχεί στην καταγραφή της υποχώρησης ακριβώς κάτω από το σημείο επιβολής του φορτίου και αντιπροσωπεύει τη συνολική κατάσταση του οδοστρώματος. Ο δείκτης D9 αντιστοιχεί στην καταγραφή της υποχώρησης στο πιο απομακρυσμένο γέωφωνο (απόσταση 1800mm) από το κέντρο επιβολής του φορτίου και αντιπροσωπεύει την κατάσταση των υποκείμενων στρώσεων του οδοστρώματος.



**Εικόνα 10.8 Μεταβολή δεικτών D1 και D9 σε: (α) Λωρίδα I, (β) Λωρίδα II, (γ) Λωρίδα III και (δ) Λωρίδα IV**

Παρόλο που το υπόψη οδόστρωμα δεν έχει δοθεί στη λειτουργία κατά τη χρονική στιγμή της διερεύνησης, παρατηρήθηκε ανομοιογένεια των πλακών όσον αφορά στις ελαστικές υποχωρήσεις. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 10.2, οι συντελεστές μεταβλητότητας είναι υψηλοί



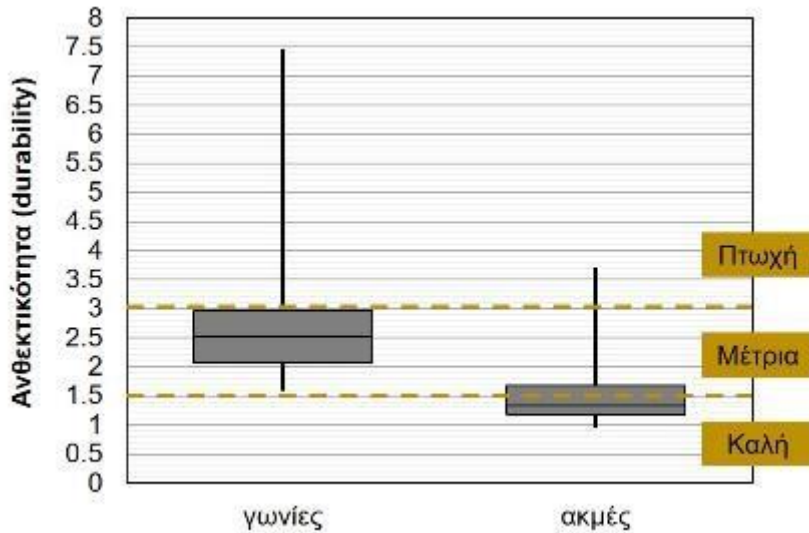
και για τους δύο δείκτες. Υψηλοί δείκτες CV αποτελούν ένδειξη μειωμένου πάχους ή προβλημάτων στην κατασκευή που οδηγούν σε μεγάλη διαφοροποίηση στις υποχωρήσεις. Αυτό αναδεικνύει την σπουδαιότητα αξιολόγησης ενός οδοστρώματος αμέσως μετά την κατασκευή. Ένα οδόστρωμα ακόμα κι αν έχει σχεδιαστεί σωστά, η επιτόπου συμπεριφορά του είναι καθοριστική για την ικανότητά του να φέρει τα προβλεπόμενα φορτία. Σημειώνεται ότι οι πυρήνες που ελήφθησαν σε θέσεις γύρω από τις πλάκες 8-12 σε όλες τις λωρίδες όπου παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές των δεικτών D1 και D9 παρουσίασαν μειωμένο πάχος σε σαφή αρνητική επίδραση στη συμπεριφορά του οδοστρώματος.

**Πίνακας 10.2 Συντελεστής μεταβλητότητας CV (%) για τους δείκτες D1 και D9 κατά μήκος των λωρίδων**

Λωρίδα	Δείκτης D <sub>1</sub>	Δείκτης D <sub>9</sub>
I	25%	49%
II	25%	41%
III	25%	37%
IV	20%	38%

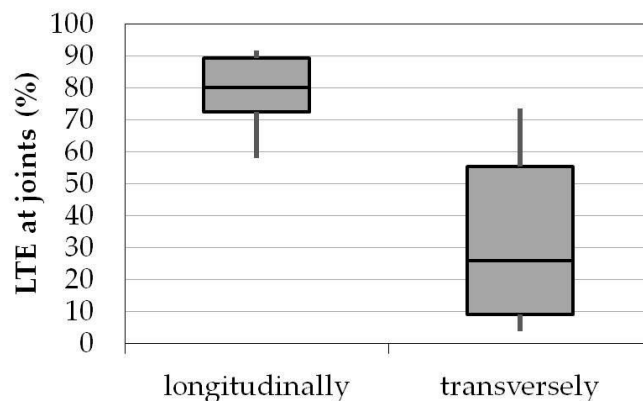
Σύμφωνα με την (FAA 2021), τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα μπορεί να παρουσιάσουν προβλήματα ανθεκτικότητας σαν αποτέλεσμα μη κατάλληλης σύνθεσης μίγματος, κακής κατασκευής και παρουσίας υγρασίας. Τιμές του δείκτη ανθεκτικότητας κάτω του 1.5 υποδεικνύουν καλή ανθεκτικότητα της πλάκας, τιμές από 1.5 έως 3 υποδεικνύουν μέτρια/αμφισβητήσιμη ανθεκτικότητα, ενώ πτωχή ανθεκτικότητα υποδεικνύεται για τιμές άνω του 3.

Στην Εικόνα 10.9 φαίνονται τα αποτελέσματα του δείκτη ανθεκτικότητας με τη μορφή θηκογράμματος. Παρατηρείται ότι στις γωνίες η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος δεν είναι ικανοποιητική, ενώ στις ακμές η κατάσταση εμφανίζεται μερικώς βελτιωμένη. Ωστόσο, δεδομένου ότι πρόκειται για νέο και κυρίως ακυκλοφόρητο οδόστρωμα, εκτιμάται ότι η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος δεν είναι ικανοποιητική, ενώ περαιτέρω επιδείνωσή της θα ήταν αναμενόμενη στην περίπτωση που το υπόψη οδόστρωμα καταπονηθεί από τα φορτία των αεροσκαφών.



**Εικόνα 10.9** Θηκογράμματα δείκτη ανθεκτικότητας στις γωνίες και στις ακμές των πλακών σκυροδέματος

Αυτές οι παρατηρήσεις ενισχύθηκαν λαμβάνοντας υπόψη την αξιολόγηση της δυνατότητας μεταφοράς φορτίου LTE στους αρμούς και στις ρωγμές. Όσον αφορά στους αρμούς, τα αποτελέσματα του LTE τόσο για την κατά μήκος διεύθυνση όσο και για την εγκάρσια δίνονται στην Εικόνα 10.10. Παρατηρείται ότι οι κατά μήκος αρμοί παρουσιάζουν μικρότερη ικανότητα μεταφοράς φορτίου μεταξύ γειτονικών πλακών (εγκάρσια διεύθυνση) σε σύγκριση με τους εγκάρσιους αρμούς (διαμήκης διεύθυνση). Μειωμένες τιμές του LTE στην εγκάρσια κατεύθυνση μπορεί να σχετίζονται με φαινόμενα ανισοσταθμίας (faulting) που παρατηρήθηκαν κατά την οπτική επισκόπηση. Ωστόσο, χαμηλές τιμές του δείκτη LTE σε νέα οδοστρώματα μπορεί να μην συναντώνται συνήθως. Επιπλέον, μπορεί να αναμένεται περαιτέρω επιδείνωση λόγω των κινήσεων του αεροσκάφους, ειδικά όταν ο άξονας ενός αεροσκάφους δεν ευθυγραμμιστεί με την κεντρική γραμμή του διαδρόμου. Σε μια τέτοια περίπτωση, το LTE κατά την εγκάρσια διεύθυνση αναμένεται να είναι κρίσιμο.



**Εικόνα 10.10** Αποτελέσματα LTE στους αρμούς



Όσον αφορά στις ρωγμές, ο δείκτης LTE παρουσίασε μια μέση τιμή της τάξης του 81% γύρω από τις ρωγμές συρρίκνωσης (shrinkage cracks) και μια χαμηλότερη τιμή της τάξης του 46% σε περιοχές γύρω από τις ρωγμές. Το τελευταίο μπορεί να υποδηλώνει ότι οι ρηγματωμένες πλάκες τείνουν να χωρίζονται σε ξεχωριστά μέρη και να συμπεριφέρονται ανεξάρτητα, κάτι που θα μπορούσε να επιδεινώσει περαιτέρω την ακεραιότητα του οδοστρώματος σε περίπτωση πραγματικής φόρτισης του οδοστρώματος από αεροσκάφη.

Αναφορικά με τις μετρήσεις με το DCP, εντοπίστηκε κάποια ανομοιογένεια υλικού που συμφωνεί με τη διακύμανση του δείκτη D9 (Εικόνα 10.8). Ωστόσο, οι ελάχιστες τιμές που παρατηρήθηκαν για τον εκτιμώμενο δείκτη CBR από τα δεδομένα DCP έδειξαν ότι τα επιτόπου μηχανικά χαρακτηριστικά της υποδομής του οδοστρώματος πληρούν τις παραδοχές σχεδιασμού τόσο για τη στρώση έδρασης του οδοστρώματος όσο και για τη στρώση υπόβασης. Ως εκ τούτου, η υπόλοιπη έρευνα επικεντρώθηκε στα χαρακτηριστικά της πλάκας σκυροδέματος.

### 10.5.3 Εργαστηριακές δοκιμές

Με βάση τις εργαστηριακές δοκιμές στους πυρήνες που ελήφθησαν προέκυψε μέση αντοχή σε διάρρηξη ίση με 3.03MPa με συντελεστή μεταβλητότητας 15%, το οποίο υποδεικνύει μία ανομοιογένεια στο υλικό σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή. Υπέρ ασφαλείας ως χαρακτηριστική για την περαιτέρω αξιολόγηση του οδοστρώματος θεωρήθηκε η ελάχιστη τιμή της αντοχής σε διάρρηξη (2.83MPa).

Με βάση την χαρακτηριστική τιμή της αντοχής σε διάρρηξη ( $f_{ct,sp}$ ), εκτιμήθηκε η καμπτική αντοχή ( $f_{ct,fl}$ ) ίση με 3.70 MPa (με μέση τιμή 3.90 MPa) σύμφωνα με την εξίσωση 10.4 που προτείνεται από την FAA (FAA 2021):

$$f_{ct,fl} = 1.02 \cdot f_{ct,sp} + 0.81 \quad (\text{Εξ. 10.4})$$

Σημειώνεται ότι η καμπτική αντοχή που ελήφθη υπόψη κατά το σχεδιασμό του οδοστρώματος ήταν ίση με 4.1MPa. Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος εκτιμήθηκε ίση με 2.55MPa (90% της αντοχής σε διάρρηξη (ΕΚΩΣ 2000)). Η τιμή αυτή εμπίπτει εντός των ορίων της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος κατηγορίας C30/37, ωστόσο προσεγγίζει το ελάχιστο όριο της κατηγορίας αυτής.

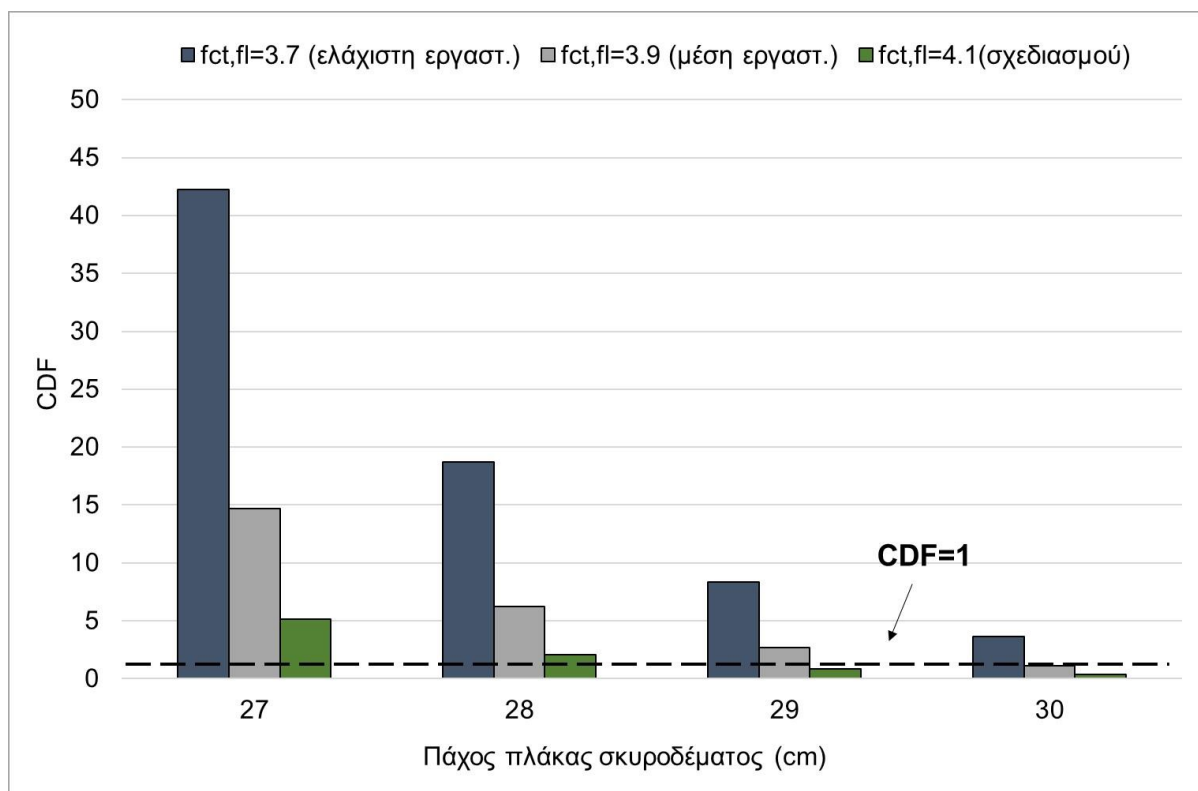
### 10.5.4 Αποτελέσματα ανάλυσης φθοράς

Τα παραπάνω στοιχεία αξιοποιήθηκαν για την αξιολόγηση του οδοστρώματος μέσω της εκτίμησης της φθοράς. Προς τούτο πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της επίδρασης της

μεταβολής του πάχους της πλάκας σκυροδέματος και της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος (flexural strength). Η σχετική ανάλυση ευαισθησίας περιλάμβανε τιμές του πάχους της πλάκας σκυροδέματος από 27cm έως 30cm, δεδομένου ότι ο μέσος όρος των τιμών του πάχους ήταν 30cm και η χαρακτηριστική τιμή που αντιστοιχούσε στο μέσο όρο μείον μία τυπική απόκλιση ήταν 27cm. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τη μέθοδο της FAA, προτείνεται η χρήση της υπόψη χαρακτηριστικής τιμής για την αξιολόγηση ενός οδοστρώματος αεροδρομίου, η οποία θεωρείται ότι αντιστοιχεί σε μια συντηρητική προσέγγιση.

Όσον αφορά στην θεώρηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος ελήφθησαν υπόψη τρεις τιμές: η τιμή που χρησιμοποιήθηκε κατά τον αρχικό σχεδιασμό του οδοστρώματος (4.1MPa), η μέση τιμή που βασίστηκε στα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών (3.9MPa) καθώς και η ελάχιστη τιμή (3.7MPa). Τα υπόλοιπα στοιχεία του οδοστρώματος (πάχος υπόβασης, μηχανικά χαρακτηριστικά υλικών) ελήφθησαν υπόψη με βάση τη διατομή σχεδιασμού. Κατά συνέπεια η ανάλυση επικεντρώθηκε στην επίδραση των χαρακτηριστικών της πλάκας σκυροδέματος στη συμπεριφορά του δύσκαμπτου οδοστρώματος.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης φαίνονται στην Εικόνα 10.11 απ' όπου προκύπτει η σημασία της επιλογής κατάλληλων στοιχείων κατά την αξιολόγηση του οδοστρώματος. Πιο συγκεκριμένα η επιλογή του μέσου πάχους της πλάκας σκυροδέματος (30 cm) και της μέσης εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος (3.9 MPa) οδηγεί σε επαρκή φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος. Αντίθετα η επιλογή μίας πιο συντηρητικής προσέγγισης αναφορικά με το πάχος της πλάκας σκυροδέματος (μέση τιμή μείον μία τυπική απόκλιση) οδηγεί σε υψηλές τιμές του δείκτη CDF.

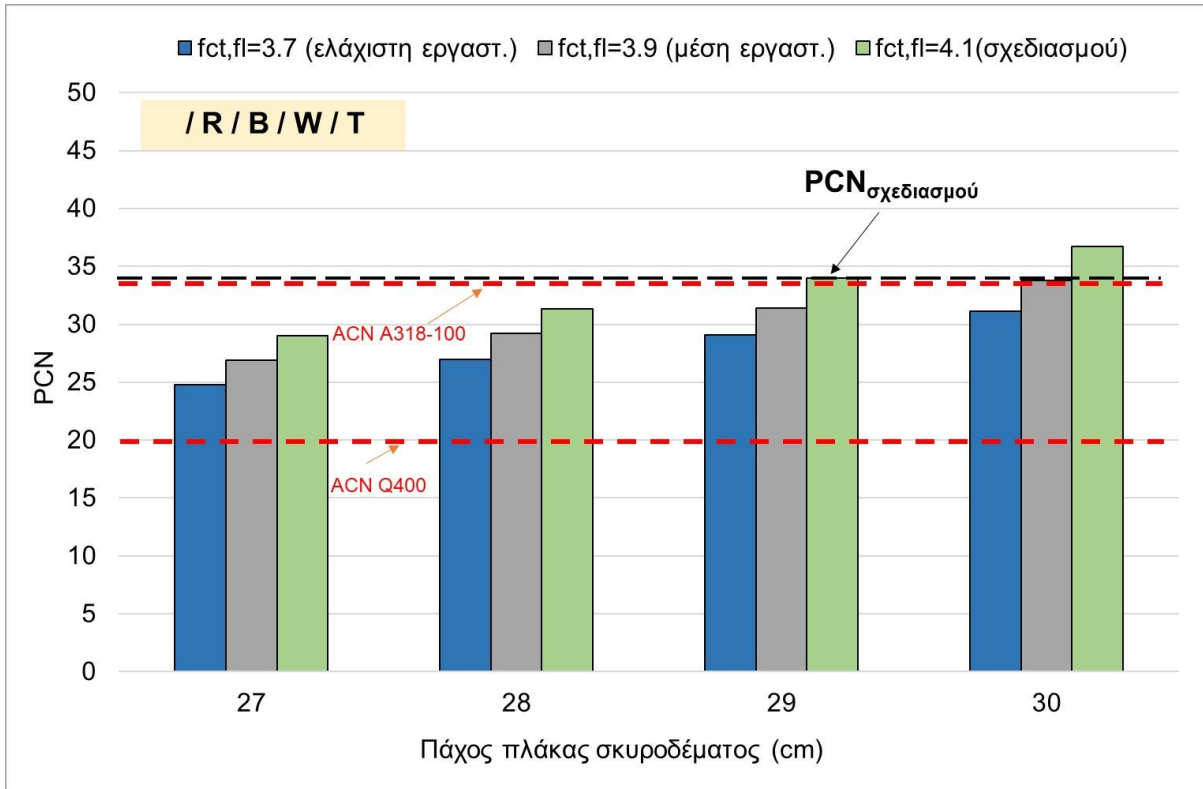


**Εικόνα 10.11 Επίδραση πάχους πλάκας και καμπτικής αντοχής σκυροδέματος στη φθορά του οδοστρώματος**

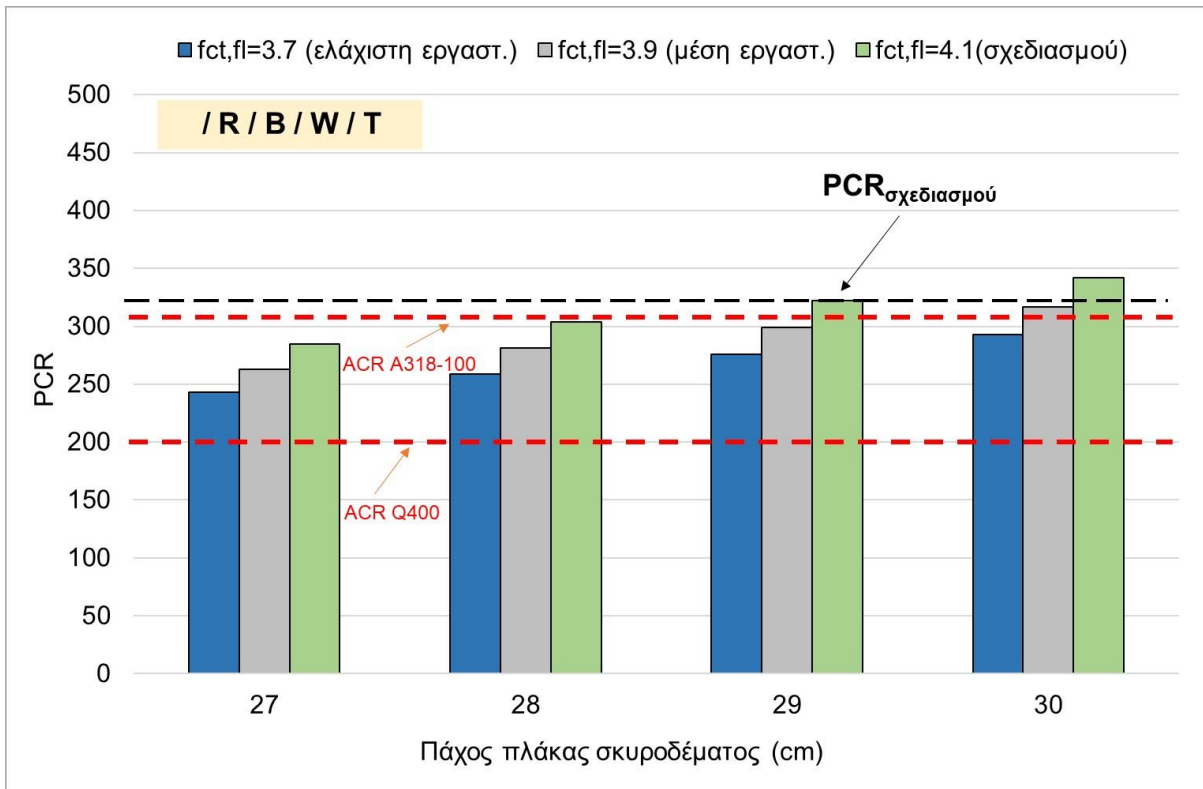
Επιπλέον, ο συνδυασμός χαμηλών τιμών πάχους πλάκας σκυροδέματος και εφελκυστικής αντοχής, όπως εντοπίστηκε σε κάποιες περιοχές, προκαλεί εκθετική αύξηση της φθοράς του υπόψη οδοστρώματος, ακόμα και κατά το συγκεκριμένο στάδιο κατά το οποίο δεν εντοπίζεται φόρτιση αεροσκαφών. Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει ότι ο συνδυασμός στοιχείων πεδίου και εργαστηριακών στοιχείων μπορεί να παρέχει πολύτιμη πληροφορία για την κατάλληλη/βέλτιστη διαχείριση και προτεραιοποίηση των εργασιών συντήρησης.

#### 10.5.5 Κατάταξη φέρουσας ικανότητας δαπέδου

Τα παραπάνω αναλυτικά στοιχεία του οδοστρώματος χρησιμοποιήθηκαν για την έκφραση της φέρουσας ικανότητας του υπόψη δαπέδου μέσω των δεικτών PCN και PCR. Λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή των στοιχείων συλλογής που αφορούν στο πάχος της πλάκας σκυροδέματος καθώς και στην καμπτική αντοχή του σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε εκτίμηση του δείκτη PCN. Η επίδραση της μεταβολής των υπόψη παραμέτρων στο δείκτη PCN φαίνεται στην Εικόνα 10.12. Αντίστοιχη ανάλυση πραγματοποιήθηκε και για την εκτίμηση του δείκτη PCR και τα σχετικά αποτελέσματα παρατίθενται στην Εικόνα 10.13.



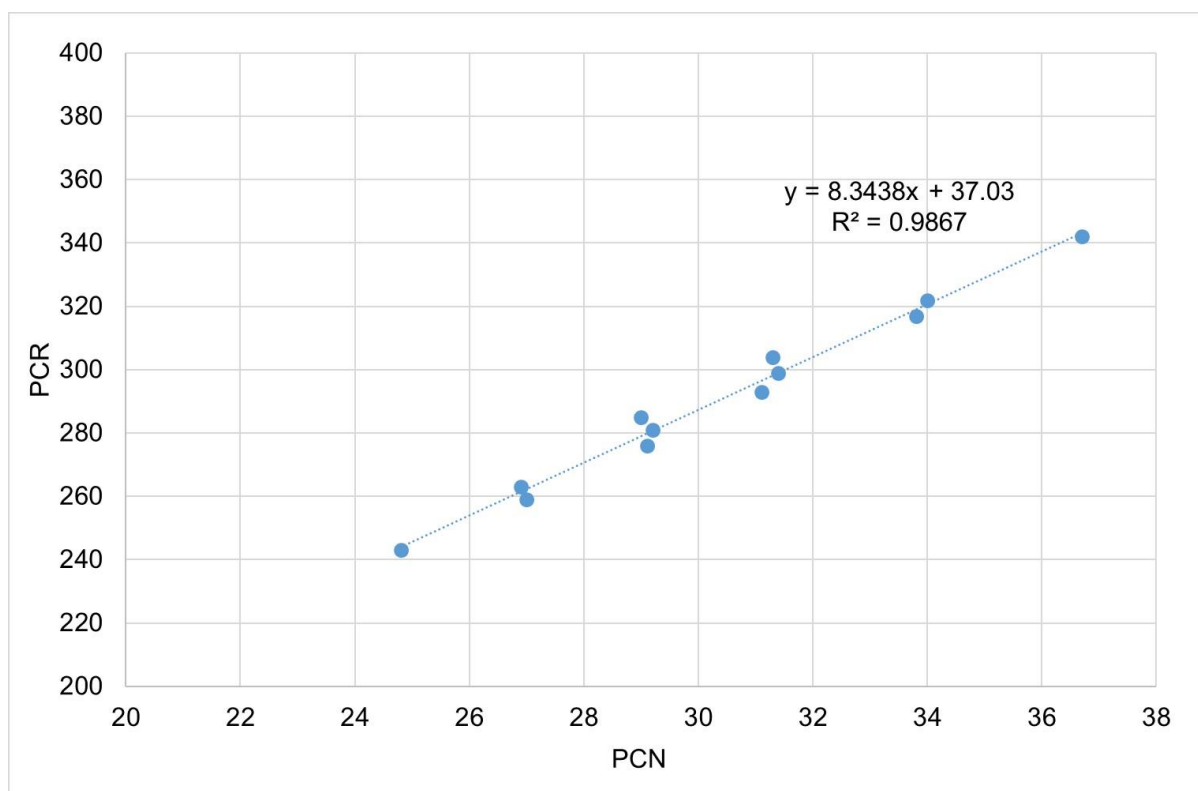
Εικόνα 10.12 Επίδραση πάχους πλάκας και καμπτικής αντοχής σκυροδέματος στο δείκτη PCN



Εικόνα 10.13 Επίδραση πάχους πλάκας και καμπτικής αντοχής σκυροδέματος στο δείκτη PCR

Στις δύο εικόνες σημειώνονται και οι τιμές ACN και ACR των αεροσκαφών που χρησιμοποιούν το υπόψη οδόστρωμα. Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι η μεταβολή των δεικτών PCN και PCR παρουσιάζει την ίδια τάση και επιπλέον ακολουθεί τη μεταβολή της φθοράς του δύσκαμπτου οδοστρώματος.

Επιπλέον διαπιστώνεται ότι η διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών του οδοστρώματος που εντοπίστηκε κατά την επεξεργασία τόσο των στοιχείων συλλογής όσο και μέσω των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό και την έκφραση της φέρουσας ικανότητας του υπόψη οδοστρώματος μέσω των συστημάτων κατάταξης ACN-PCN και ACR-PCR. Διαπιστώνεται ότι ο συνδυασμός μειωμένου πάχους πλάκας σκυροδέματος καθώς και μειωμένης καμπτικής αντοχής σκυροδέματος σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές που ελήφθησαν υπόψη κατά τον σχεδιασμό του οδοστρώματος μπορεί να οδηγήσει σε περιορισμό του στόλου που μπορεί να δεχθεί. Επίσης εντοπίστηκε ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των δύο δεικτών ( $R^2=0.98$ ) όπως φαίνεται στην Εικόνα 10.14.



**Εικόνα 10.14 Συσχέτιση δεικτών PCN και PCR οδοστρώματος**

Δεδομένου ότι ο συντελεστής  $R^2$  αντιστοιχεί στο ποσοστό της μεταβλητότητας του δείκτη PCR που ερμηνεύεται από τη γραμμή παλινδρόμησης, η μεταβολή του δείκτη PCR μπορεί να περιγραφεί από τη μεταβολή του δείκτη PCN. Συνεπώς η προσαρμογή της γραμμής παλινδρόμησης στα υπόψη δεδομένα είναι εξαιρετική.

## 10.6 Σχόλια-παρατηρήσεις

Στην παρούσα διερεύνηση αναπτύχθηκε ένα πρακτικό και μεθοδολογικό πλαίσιο για την αξιολόγηση δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Δεδομένου ότι η παρακολούθηση του οδοστρώματος που βασίζεται αποκλειστικά σε ευρήματα οπτικής επισκόπησης μπορεί να οδηγήσει ακόμη και στα αρχικά στάδια της ζωής ενός οδοστρώματος σε εσφαλμένη λήψη αποφάσεων, η μελέτη ανέδειξε τη συμβολή τόσο των δεδομένων πεδίου όσο και των εργαστηριακών δεδομένων στις διαδικασίες αξιολόγησης του οδοστρώματος.

Παρόλο που οι ενέργειες συντήρησης ή αποκατάστασης αποτελούν κανονικά ζήτημα για τις υπηρεσίες αεροδρομίων μετά από 5-6 χρόνια περίπου, η αξιολόγηση του οδοστρώματος σε νεαρή ηλικία είναι υψίστης σημασίας για δύο κυρίαρχους λόγους. Πρώτον, η αξιολόγηση του οδοστρώματος στοχεύει στον ποιοτικό έλεγχο της κατασκευής και δεύτερον συμβάλει στον προσδιορισμό της κατάστασης ενός οδοστρώματος στο «σημείο 0», δηλαδή σε μία κατάσταση αναφοράς ενόψει της εξέλιξης της κατάστασής του. Αυτό συμβάλει στην ανάπτυξη μιας βάσης δεδομένων που λαμβάνει ανατροφοδότηση από τις διαδικασίες παρακολούθησης του οδοστρώματος, επιτρέποντας έτσι είτε μια πρόβλεψη της συμπεριφοράς του οδοστρώματος είτε την ορθολογική λήψη αποφάσεων για τη διαχείριση της υποδομής.

Ειδικότερα, το προτεινόμενο πλαίσιο περιλαμβάνει: α) Μετρήσεις μη καταστρεπτικών δοκιμών για την αξιολόγηση των επιτόπου χαρακτηριστικών του οδοστρώματος, β) Εξαγωγή πυρήνων για την αξιολόγηση της μεταβλητότητας του πάχους της πλάκας σκυροδέματος και την τροφοδότηση των διαδικασιών ανάλυσης οδοστρωμάτων της FAA με τα απαιτούμενα εργαστηριακά στοιχεία του οδοστρώματος, γ) Ανάλυση συμπεριφοράς οδοστρώματος για την αξιολόγηση της φθοράς λόγω φόρτισης αεροσκαφών για διάφορους συνδυασμούς πάχους και αντοχής σκυροδέματος που εντοπίστηκαν στο πεδίο και δ) Κατάταξη της φέρουσας ικανότητας του δύσκαμπτου οδοστρώματος για διάφορους συνδυασμούς πάχους και αντοχής σκυροδέματος.

Η αυξημένη μεταβλητότητα των ελαστικών υποχωρήσεων αποτελεί ένδειξη κακών κατασκευαστικών πρακτικών ή/και κακών υλικών, λαμβάνοντας υπόψη ότι το οδόστρωμα δεν είχε δοθεί στην κυκλοφορία κατά τη στιγμή της αξιολόγησης. Παρατηρήθηκαν επίσης διαφοροποιήσεις σε επιμέρους πλάκες, υποδεικνύοντας προβλήματα ανθεκτικότητας. Επιπλέον, οι χαμηλές τιμές LTE καθώς και η χαμηλή αντοχή σε κάμψη του σκυροδέματος ήταν σύμφωνες με τα αποτελέσματα της ανάλυσης αστοχίας του οδοστρώματος. Ως εκ τούτου, η σύνθεση των μεμονωμένων αποτελεσμάτων ανάλυσης βοήθησε στη διαμόρφωση μιας πιο ολοκληρωμένης εικόνας της επιτόπου συμπεριφοράς του οδοστρώματος, η οποία

μπορεί να διαφέρει σημαντικά από αυτό που θα αναμενόταν με βάση τις προδιαγραφές σχεδιασμού.

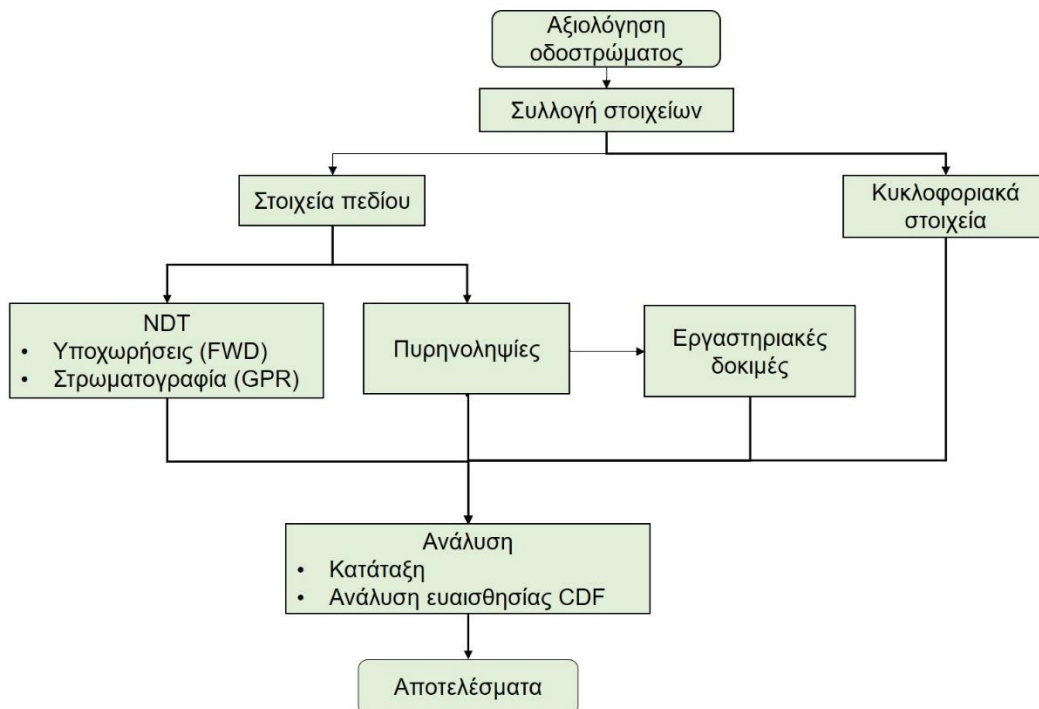
Συνοψίζοντας, η ενοποίηση πολλαπλών δεδομένων (π.χ. παραμορφώσεις, LTE, πάχη και αντοχή σε κάμψη) μπορεί να παρέχει στις αρμόδιες αρχές του αεροδρομίου τις απαραίτητες πληροφορίες προκειμένου να κάνουν μια ορθολογική διαχείριση περιουσιακών στοιχείων. Επιπλέον, οι αρχές μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτήν τη διαδικασία ως ένα εργαλείο για το σχεδιασμό των στρατηγικών συντήρησης ή αποκατάστασης, λαμβάνοντας υπόψη την ανάγκη για την ασφαλή λειτουργία του αεροδρομίου.

## 11 ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΕΥΚΑΜΠΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟΥ

### 11.1 Γενική περιγραφή

Στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της δομικής κατάστασης ενός εύκαμπτου οδοστρώματος διαδρόμου Π/Α αεροσκαφών αεροδρομίου με στόχο να αναδειχθεί η σημασία αξιοποίησης λεπτομερών στοιχείων συλλογής κατά τις διαδικασίες κατάταξης της φέρουσας ικανότητας οδοστρώματων αεροδρομίων. Προς τούτο αξιοποιήθηκαν καταγραφές από μετρήσεις πεδίου, αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών καθώς και κυκλοφορικά στοιχεία του αεροδρομίου.

Η ερευνητική διαδικασία περιλάμβανε συλλογή στοιχείων με μετρήσεις πεδίου. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με το Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους (FWD) και με το Γεωραντάρ (GPR) καθώς και πυρηνοληψίες για την εκτίμηση του πάχους των ασφαλτικών στρώσεων. Στα υπόψη δοκίμια πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών των ασφαλτομιγμάτων. Στη συνέχεια ακολούθησε συνδυαστική ανάλυση της συμπεριφοράς του οδοστρώματος λαμβάνοντας υπόψη και στοιχεία κυκλοφορίας (Εικόνα 11.1).

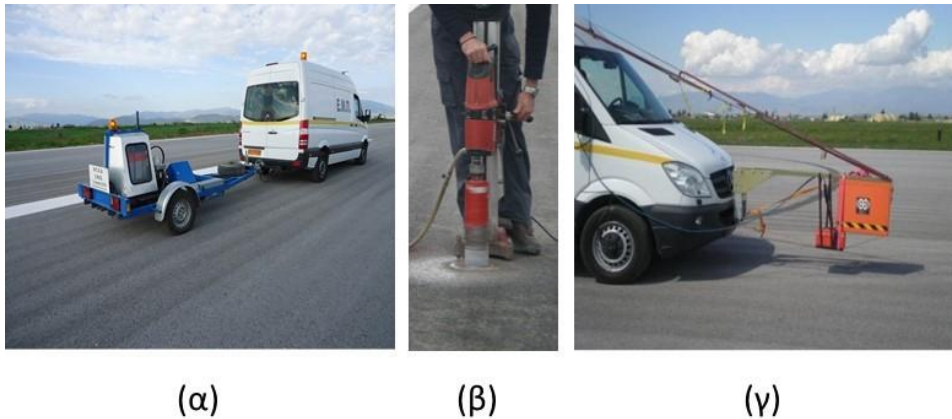


Εικόνα 11.1 Μεθοδολογία που ακολουθήθηκε



## 11.2 Συλλογή στοιχείων

Για τις ανάγκες της παρούσας διερεύνησης αξιοποιήθηκαν στοιχεία ενός περιφερειακού αεροδρομίου του ελλαδικού χώρου που αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ. Το πείραμα πεδίου περιλάμβανε στοιχεία συλλογής με συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών (FWD και GRP) για την εκτίμηση των ελαστικών υποχωρήσεων και των παχών των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος. Οι μετρήσεις με το FWD πραγματοποιήθηκαν με φορτίο 100 kN. Η επιλογή του υπόψη φορτίου πραγματοποιήθηκε με βάση τη διεθνή πρακτική. Το σύστημα GPR χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των παχών των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος. Σημειώνεται, ότι παράλληλα με την καταγραφή της στρωματογραφίας πραγματοποιήθηκαν και πυρηνοληψίες (Εικόνα 11.2). Επιπλέον ήταν διαθέσιμα στοιχεία της μελέτης του οδοστρώματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 11.3.



Εικόνα 11.2 Πειραματικές δοκιμές: (α) FWD, (β) πυρηνοληψίες και (γ) GPR



Εικόνα 11.3 Τυπική διατομή οδοστρώματος διαδρόμου Π/Α

Σχετικά με τη θεωρούμενη φόρτιση, επιλέχθηκε ένας μικτός στόλος αεροσκαφών, συμπεριλαμβανομένων τόσο πολιτικών όσο και στρατιωτικών αεροσκαφών. Τα επιμέρους χαρακτηριστικά των αεροσκαφών και η διάταξη των τροχών τους φαίνονται στον Πίνακα 11.1.

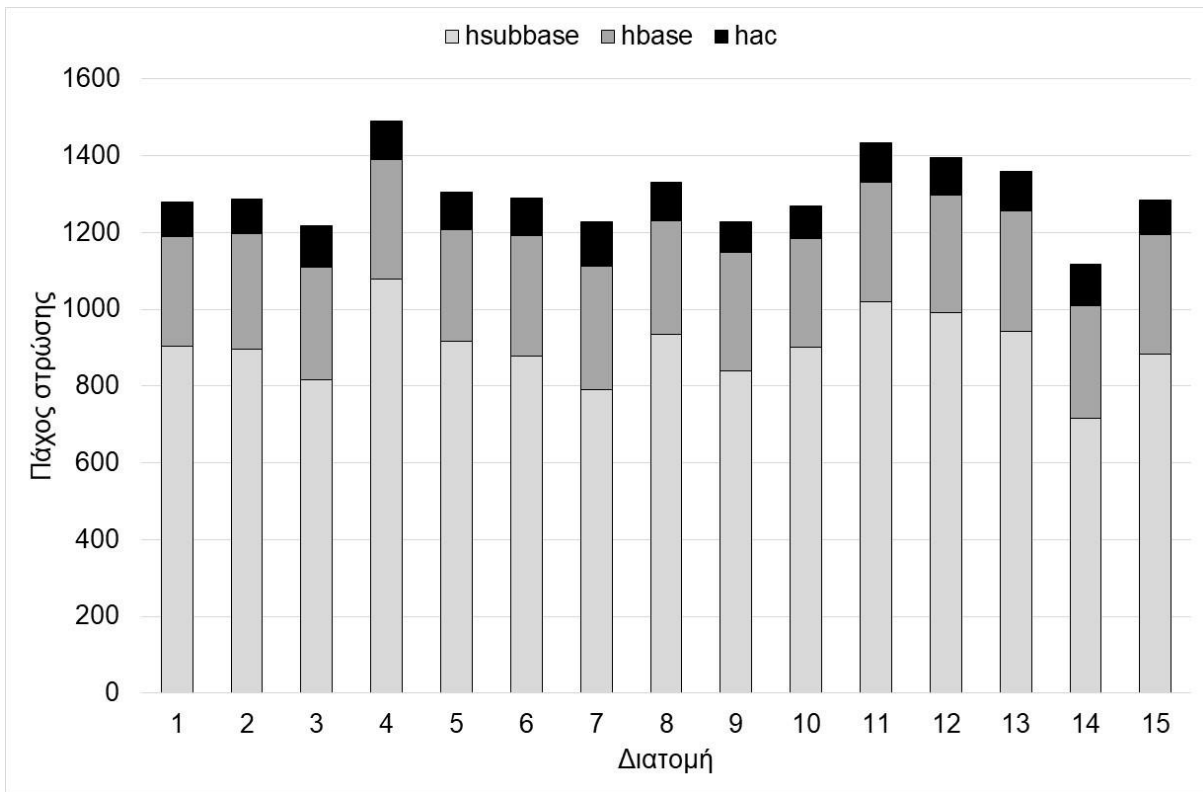
**Πίνακας 11.1 Χαρακτηριστικά αεροσκαφών**

Αεροσκάφος	Σύστημα τροχών	Βάρος (ton)	Ετήσιες αναχωρήσεις
<b>A320-200</b>	Διπλός τροχός	78.400	2000
<b>B757-300</b>	Διπλός δίδυμος τροχός	124.058	2000
<b>C-130</b>	Δίδυμος τροχός	70.307	1000
<b>F-16C</b>	Μονός τροχός	19.187	4000

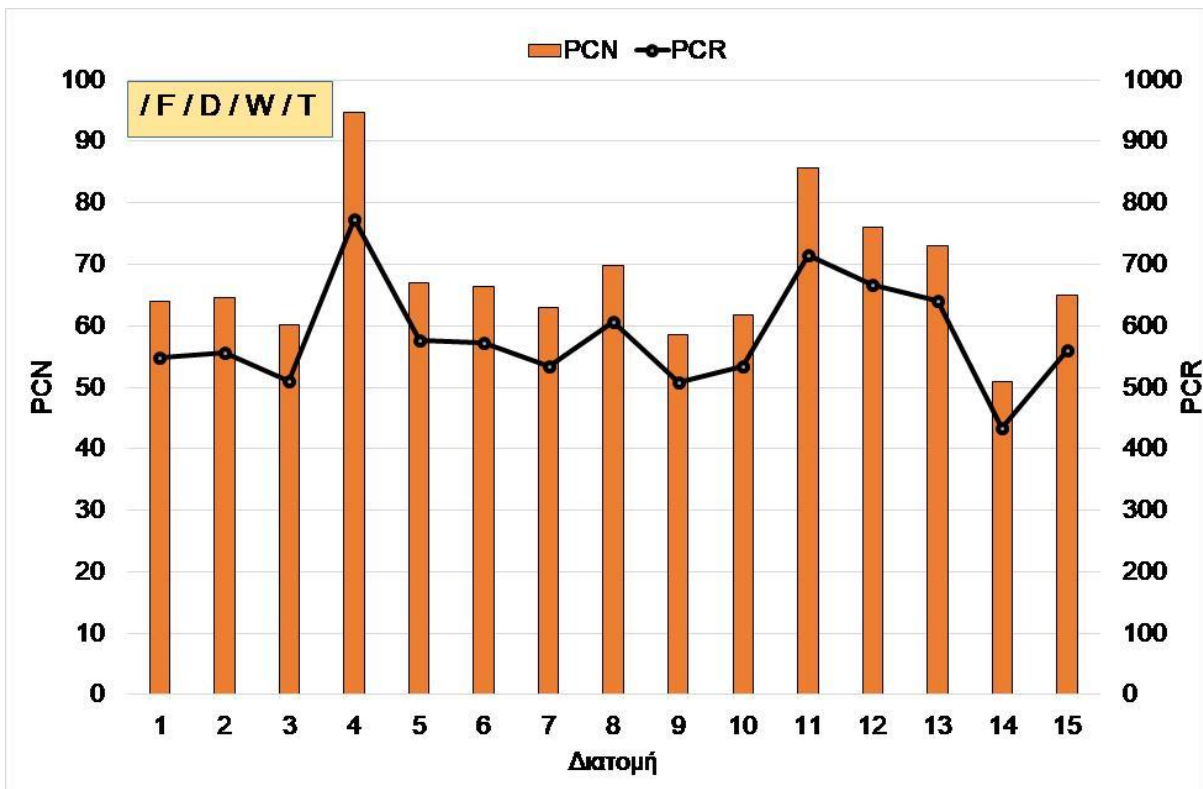
Εκτός από τη συλλογή στοιχείων πεδίου με μη καταστρεπτικές δοκιμές, πραγματοποιήθηκαν πυρηνοληψίες σε διάφορες θέσεις προκειμένου να καλυφθεί η περιοχή της διερεύνησης στο μέγιστο δυνατό βαθμό. Οι πυρήνες που εξήχθησαν χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για την εκτίμηση του πάχους των ασφαλτικών στρώσεων του οδοστρώματος. Επιπλέον, δεδομένου ότι η συμπεριφορά του οδοστρώματος σε βάθος χρόνου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη δυσκαμψία των ασφαλτικών στρώσεων, οι εξαγόμενοι πυρήνες ελέγχθηκαν περαιτέρω στο εργαστήριο για την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του ασφαλτομίγματος.

### 11.3 Κατάταξη φέρουσας ικανότητας οδοστρώματος

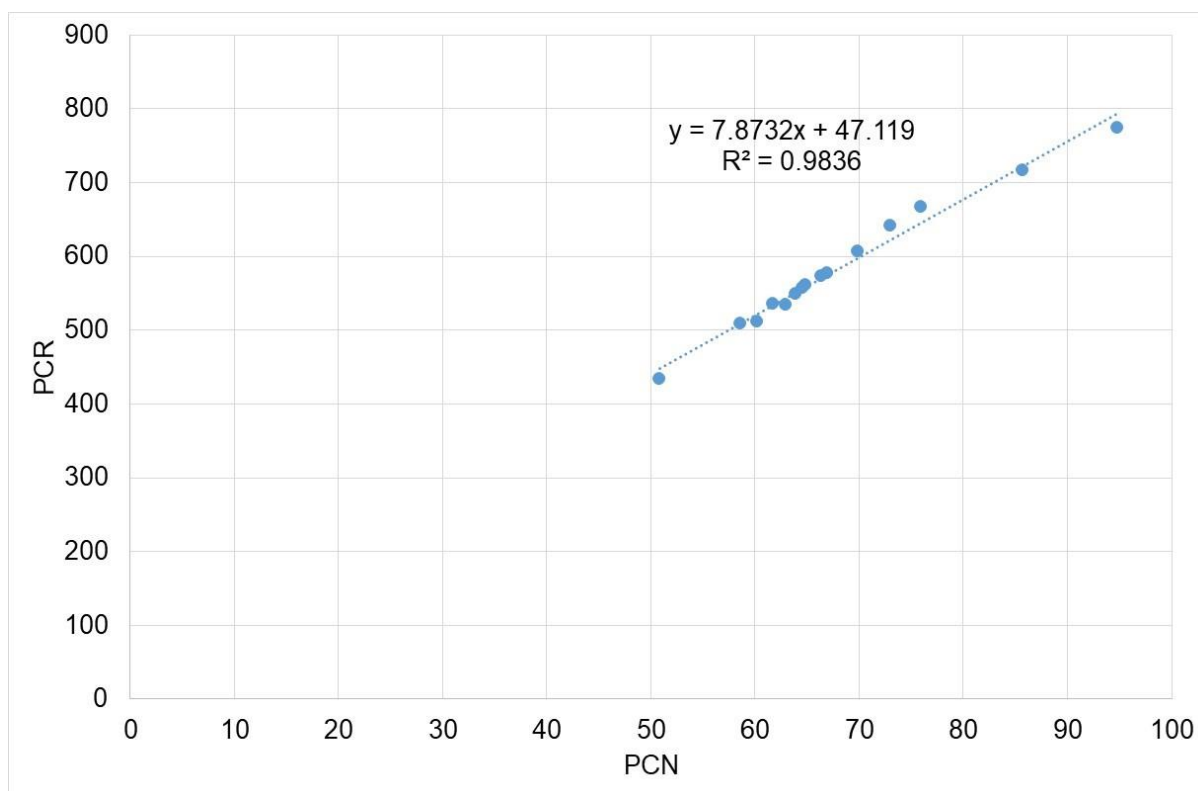
Από την επεξεργασία των ελαστικών υποχωρήσεων επιλέχθηκαν 15 χαρακτηριστικές διατομές για περαιτέρω ανάλυση. Στην Εικόνα 11.4 φαίνονται τα πάχη των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος όπως προέκυψαν από την επεξεργασία των στοιχείων συλλογής με το GPR. Αρχικά πραγματοποιήθηκε εκτίμηση των δεικτών PCN και PCR για κάθε διατομή θεωρώντας τα τυπικά υλικά της FAA. Τα σχετικά αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 11.5. Παρατηρείται ότι η διακύμανση των παχών οδηγεί σε σημαντική διαφοροποίηση των δεικτών κατάταξης της φέρουσας ικανότητας του υπόψη οδοστρώματος κατά μήκος του ίχνους καταγραφής. Ωστόσο οι δύο δείκτες παρουσιάζουν ισχυρή συσχέτιση ( $R^2=0.98$ ) όπως φαίνεται στην Εικόνα 11.6. Δεδομένου ότι ο συντελεστής  $R^2$  αντιστοιχεί στο ποσοστό της μεταβλητότητας του δείκτη PCR που ερμηνεύεται από τη γραμμή παλινδρόμησης, η μεταβολή του δείκτη PCR μπορεί να περιγραφεί από τη μεταβολή του δείκτη PCN. Συνεπώς η προσαρμογή της γραμμής παλινδρόμησης στα υπόψη δεδομένα είναι εξαιρετική.



Εικόνα 11.4 Πάχη στρώσεων χαρακτηριστικών διατομών

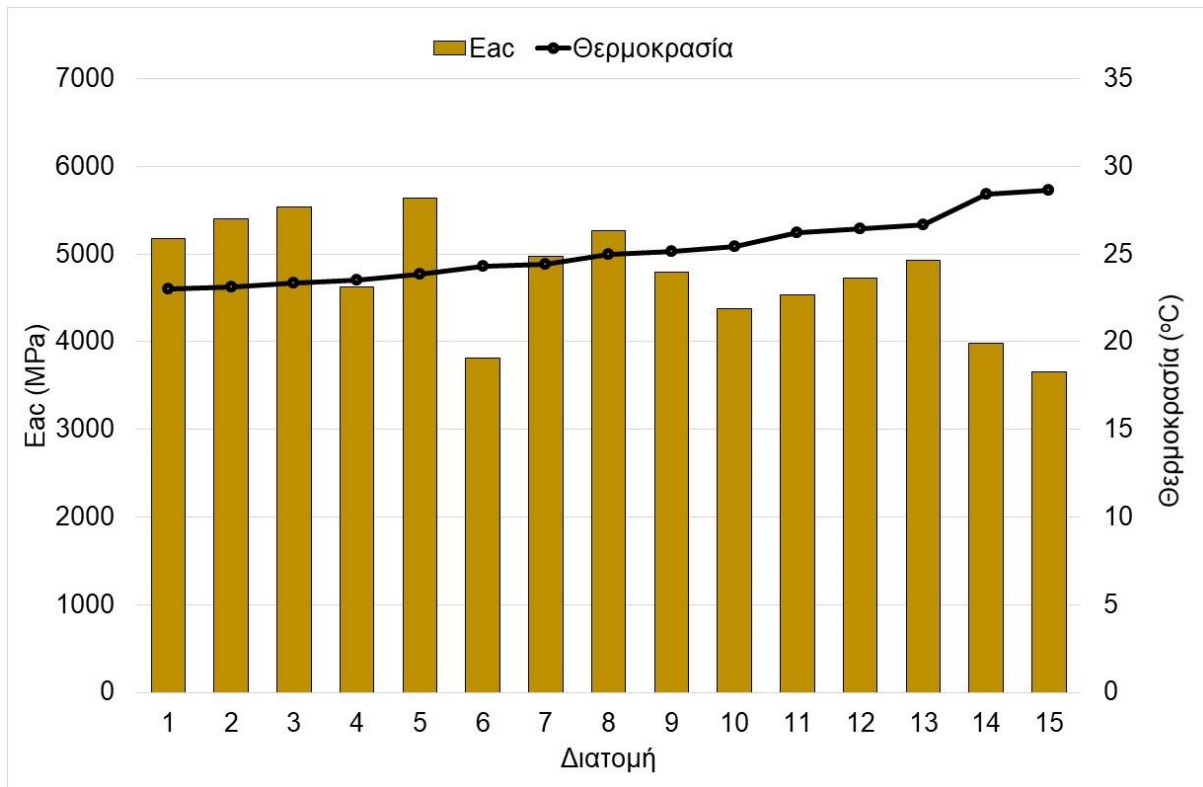


Εικόνα 11.5 Δείκτες PCN και PCR χαρακτηριστικών διατομών οδοστρώματος



**Εικόνα 11.6 Συσχέτιση δεικτών PCN και PCR**

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάστροφος υπολογισμών των μέτρων ελαστικότητας των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος χρησιμοποιώντας το λογισμικό BAKFAA που έχει αναπτυχθεί από την FAA. Από τη σχετική ανάλυση προέκυψε ότι οι στρώσεις βάσης και υπόβασης παρουσίαζαν παρόμοια χαρακτηριστικά με εκείνα των τυπικών υλικών της FAA. Εντούτοις, ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην εκτίμηση των μέτρων ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων, δεδομένου ότι η θεώρηση του τυπικού υλικού της FAA (P-401 με  $E_{ac}=1378\text{MPa}$  στους  $32^{\circ}\text{C}$ ) κρίνεται συντηρητική για τα μίγματα που χρησιμοποιούνται στον ελλαδικό χώρο. Τα αποτελέσματα της σχετικής ανάλυσης φαίνονται στην Εικόνα 11.7. Στην ίδια Εικόνα παρατίθεται και η θερμοκρασία στο σώμα των ασφαλτικών στρώσεων, δεδομένου ότι η υπόψη παράμετρος επηρεάζει τη συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος και κατ' επέκταση του οδοστρώματος.



**Εικόνα 11.7 Μέτρο ελαστικότητας ασφαλτικών στρώσεων διατομών μέσω ανάστροφου υπολογισμού**

Τα παραπάνω στοιχεία αξιοποιήθηκαν για την εκτίμηση του δείκτη PCR των 15 διατομών. Για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων, πραγματοποιήθηκε αναγωγή των μέτρων ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων στη θερμοκρασία των 32°C χρησιμοποιώντας σχετικό αλγόριθμο μετατροπής (εξίσωση 11.1) με βάση τη διεθνή εμπειρία και πρακτική (Akbarzadeh et al. 2012).

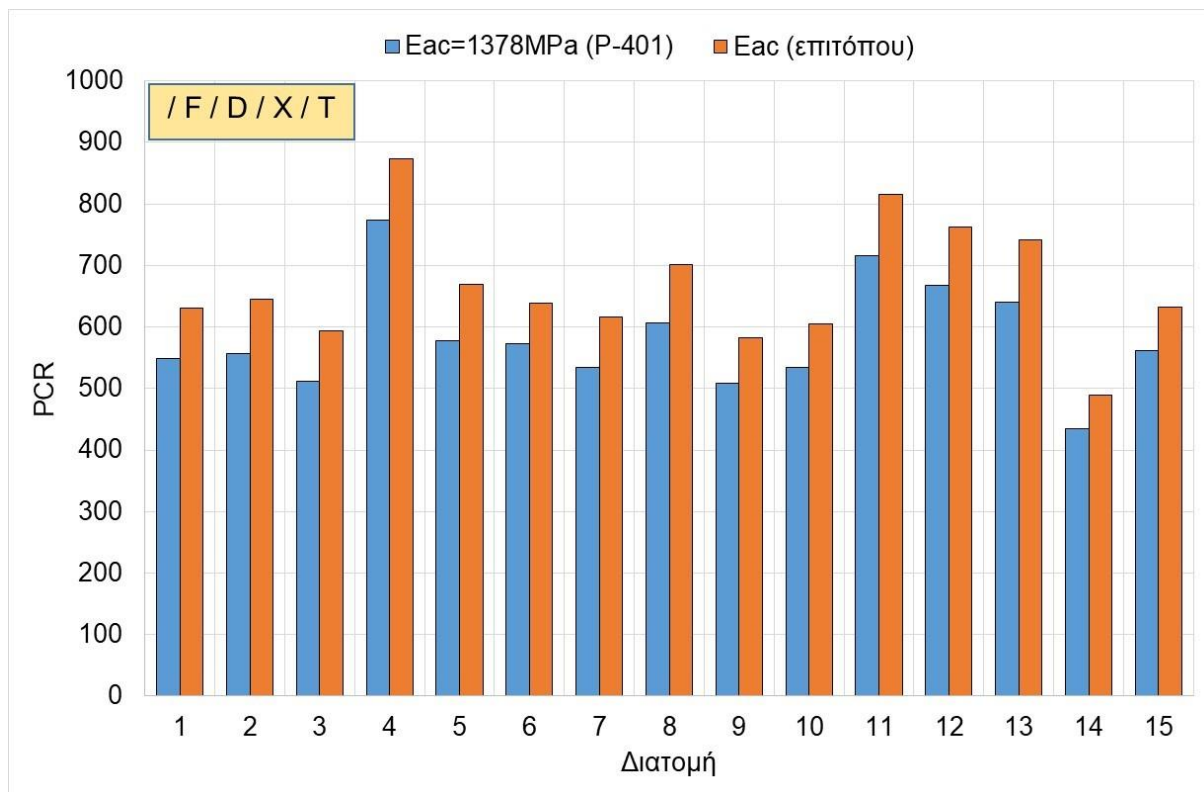
$$\frac{E_{ref}}{E_{AC}} = \frac{1}{1 - 2.2 \log\left(\frac{T_{AC}}{T_{ref}}\right)} \quad (\text{Εξ. 11.1})$$

Όπου

- $E_{ref}$ : Μέτρο ελαστικότητας ασφαλτικών στρώσεων σε θερμοκρασία αναφοράς (°C)
- $E_{AC}$ : Μέτρο ελαστικότητας ασφαλτικών στρώσεων από διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού
- $T_{ref}$ : Θερμοκρασία αναφοράς (°C)
- $T_{AC}$ : Θερμοκρασία στο 1/3 πάχους των ασφαλτικών στρώσεων

Από τη σχετική μετατροπή προέκυψε ότι ο μέσος όρος των μέτρων ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων των χαρακτηριστικών διατομών ήταν  $E_{ac}=3860\text{MPa}$  με τυπική

απόκλιση 386MPa, συνεπώς ως χαρακτηριστική τιμή του δείγματος μπορεί να θεωρηθεί η τιμή  $E_{ac} = 3475\text{MPa}$ , η οποία διαφέρει σημαντικά από τα χαρακτηριστικά του τυπικού υλικού της FAA.



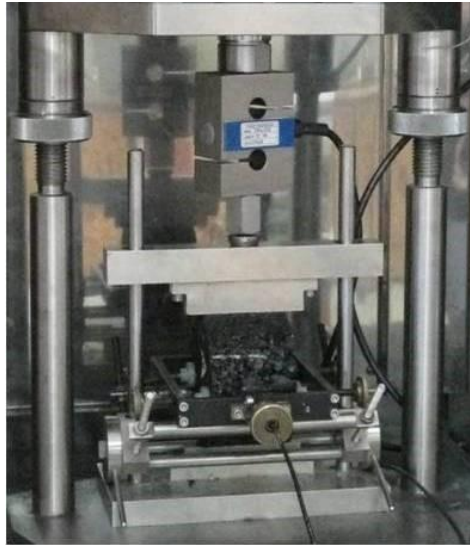
**Εικόνα 11.8 Επίδραση θεώρησης επιτόπου μηχανικών χαρακτηριστικών στο δείκτη PCR**

Με βάση τα στοιχεία που προέκυψαν από τον ανάστροφο υπολογισμό πραγματοποιήθηκε εκτίμηση του δείκτη PCR και τα αποτελέσματα παρατίθενται στην Εικόνα 11.8. Παρατηρείται ότι η θεώρηση των επιτόπου χαρακτηριστικών των ασφαλτικών στρώσεων επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το δείκτη κατάταξης της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος.

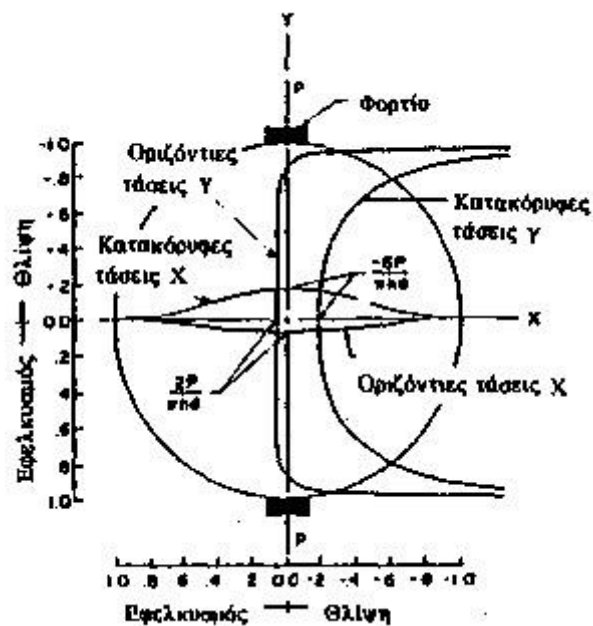
Στη συνέχεια, εκτός από την ανάλυση των ελαστικών υποχωρήσεων για τον χαρακτηρισμό των ασφαλτομιγμάτων πραγματοποιήθηκαν και εργαστηριακή δομική προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας ITSM (Indirect Tensile Stiffness Modulus) (EN 12697-26) σε πυρήνες που ελήφθησαν.

Η υπόψη συσκευή αποτελείται από: α) Το μεταλλικό πλαίσιο δοκιμής και σύστημα επιβολής φορτίου με πεπιεσμένο αέρα, β) μονάδα καταγραφής, επεξεργασίας και ελέγχου μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή και γ) θάλαμο ελέγχου θερμοκρασίας μέσα στον οποίο είναι τοποθετημένα το μεταλλικό πλαίσιο της δοκιμής και η μονάδα επιβολής του φορτίου, ώστε η δοκιμή να εκτελείται υπό σταθερή θερμοκρασία. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής επιβάλλεται

φόρτιση κατά μήκος της κάθετης διαμέτρου κυλινδρικού δοκιμίου, η οποία επιφέρει μια εφελκυστική τάση κατά μήκος της οριζόντιας διαμέτρου (Εικόνα 11.10).



Εικόνα 11.9 Συσσκευή ITSM του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ



Εικόνα 11.10 Κατανομή τάσεων κατά τη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού

Μετρώντας την οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση που ανακτάται κατά τη διάρκεια του χρόνου αποφόρτισης και γνωρίζοντας το αρχικό επιβαλλόμενο φορτίο υπολογίζεται το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος.

$$S_m = \frac{F \cdot (\nu + 0.27)}{z \cdot h} \quad (\text{Εξ. 11.2})$$

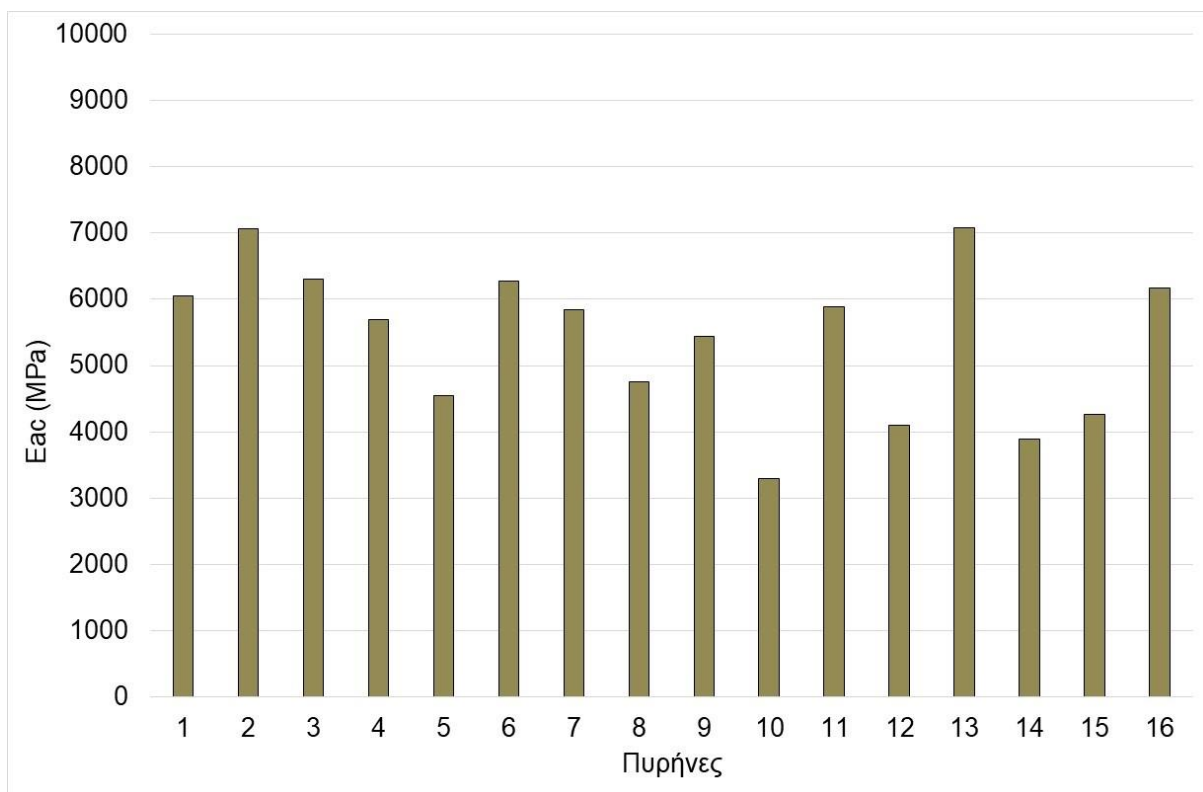
όπου:



- $S_m$ : το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος (MPa)
- $F$ : η μέγιστη τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου (N)
- $\nu$ : ο συντελεστής Poisson
- $z$ : η εφελκυστική παραμόρφωση (mm)
- $h$ : μέσο πάχος υπό εξέταση δοκιμίου (mm)

Για την εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι σε δοκίμια τα οποία υποβλήθηκαν σε αντιδιαμετρική θλίψη με 5 φορτίσεις για τον υπολογισμό του μέτρου δυσκαμψίας. Στη συνέχεια τα δοκίμια περιστράφηκαν κατά  $90^\circ$ , τοποθετήθηκαν εκ νέου στη διάταξη της συσκευής και υποβλήθηκαν ξανά σε αντιδιαμετρική θλίψη. Το αποτέλεσμα κάθε δοκιμής υπολογίστηκε ως ο μέσος όρος των δύο τιμών σε κάθε διεύθυνση φόρτισης.

Με βάση τις εργαστηριακές δοκιμές στους πυρήνες που ελήφθησαν προέκυψαν οι τιμές του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων που φαίνονται στην Εικόνα 11.11 στους  $32^\circ\text{C}$ .



**Εικόνα 11.11 Μέτρο δυσκαμψίας ασφαλτικών στρώσεων ( $32^\circ\text{C}$ )**

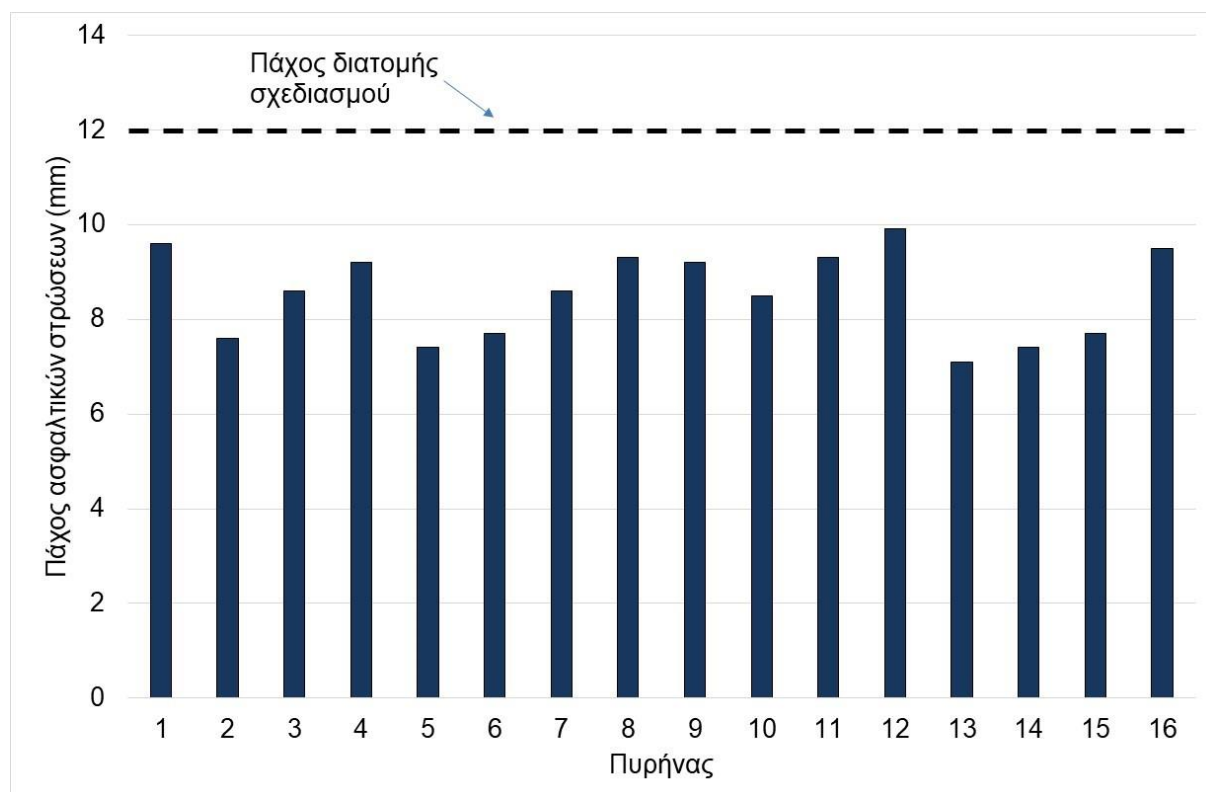
Ο μέσος όρος των μέτρων δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων ήταν  $E_{ac}=5418\text{MPa}$  με τυπική απόκλιση  $1140\text{MPa}$ , συνεπώς ως χαρακτηριστική τιμή του δείγματος μπορεί να θεωρηθεί η τιμή  $E_{ac}= 4278\text{MPa}$ . Σημειώνεται ότι η υπόψη τιμή προσεγγίζει τις τιμές των μέτρων ελαστικότητας που έχουν προκύψει από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού.



## 11.4 Ανάλυση φθοράς

Με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης της μεταβολής του πάχους των ασφαλτικών στρώσεων και της θεώρησης του μέτρου ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων στην αξιολόγηση ενός οδοστρώματος, πραγματοποιήθηκε σχετική ανάλυση ευαισθησίας με βασικό κριτήριο τη φθορά στην κορυφή της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος.

Η σχετική ανάλυση ευαισθησίας περιλάμβανε τιμές του πάχους των ασφαλτικών στρώσεων από 7cm έως 12cm, δεδομένου ότι με βάση τους πυρήνες που ελήφθησαν ο μέσος όρος των τιμών του πάχους ήταν 8.5cm και η χαρακτηριστική τιμή που αντιστοιχούσε στο μέσο όρο μείον μία τυπική απόκλιση ήταν 7.6cm. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τη μέθοδο της FAA, προτείνεται η χρήση της υπόψη χαρακτηριστικής τιμής για την αξιολόγηση ενός οδοστρώματος αεροδρομίου, η οποία θεωρείται ότι αντιστοιχεί σε μια συντηρητική προσέγγιση. Από την Εικόνα 11.12 παρατηρείται ότι σε όλους τους πυρήνες το πάχος των ασφαλτικών στρώσεων υπολείπεται του πάχους της διατομής σχεδιασμού. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από την επεξεργασία των καταγραφών με το σύστημα GPR.

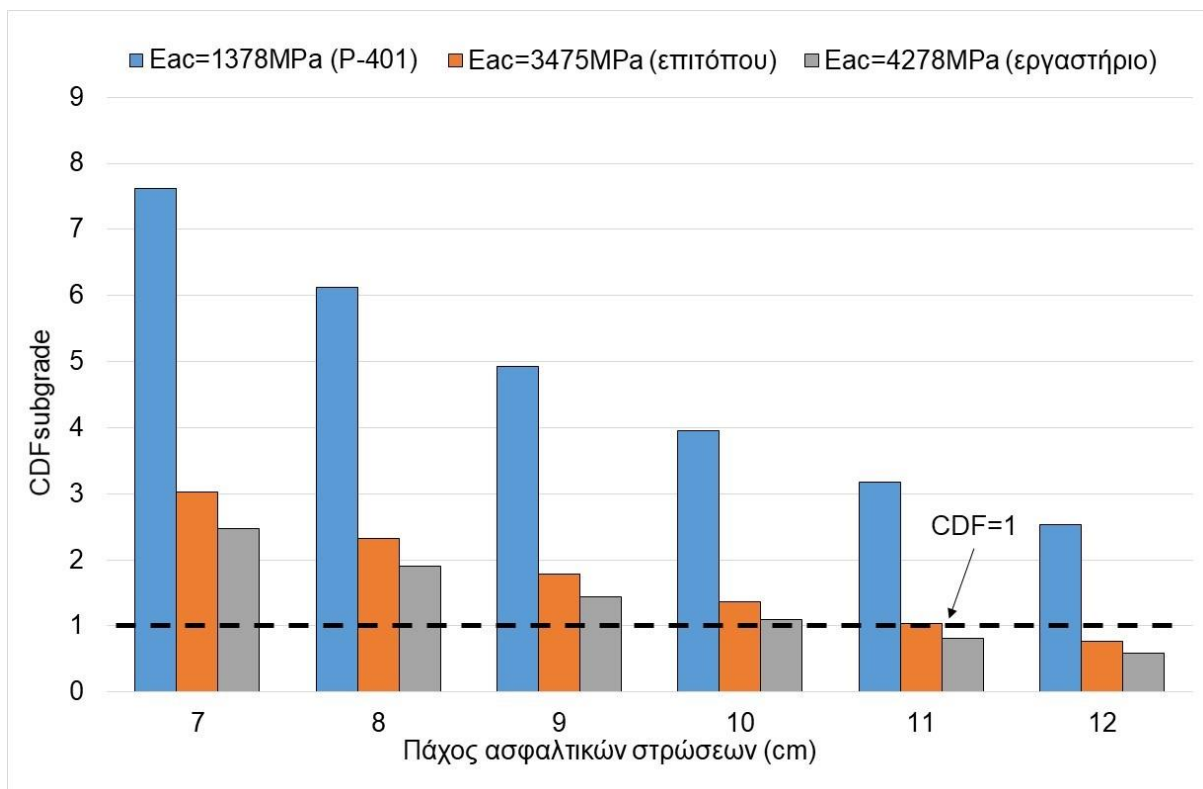


**Εικόνα 11.12 Πάχος ασφαλτικών στρώσεων από πυρήνες**

Όσον αφορά στην θεώρηση του μέτρου ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων ελήφθησαν υπόψη τρεις τιμές: η τιμή που αντιστοιχεί στις αρχικές θεωρήσεις σχεδιασμού του οδοστρώματος μέσω της θεώρησης των τυπικών υλικών της FAA ( $E_{ac}=1378\text{MPa}$ ), η

χαρακτηριστική τιμή που βασίστηκε στις διαδικασίες του ανάστροφου υπολογισμού ( $E_{ac}=3475\text{MPa}$ ), καθώς και η χαρακτηριστική τιμή που βασίστηκε στα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών ( $E_{ac}=4278\text{MPa}$ ). Τα υπόλοιπα στοιχεία του οδοστρώματος (πάχος βάσης, πάχος υπόβασης, μηχανικά χαρακτηριστικά υλικών) ελήφθησαν υπόψη με βάση τη διατομή σχεδιασμού. Κατά συνέπεια η ανάλυση επικεντρώθηκε στην επίδραση των χαρακτηριστικών των ασφαλτικών στρώσεων στη συμπεριφορά του οδοστρώματος.

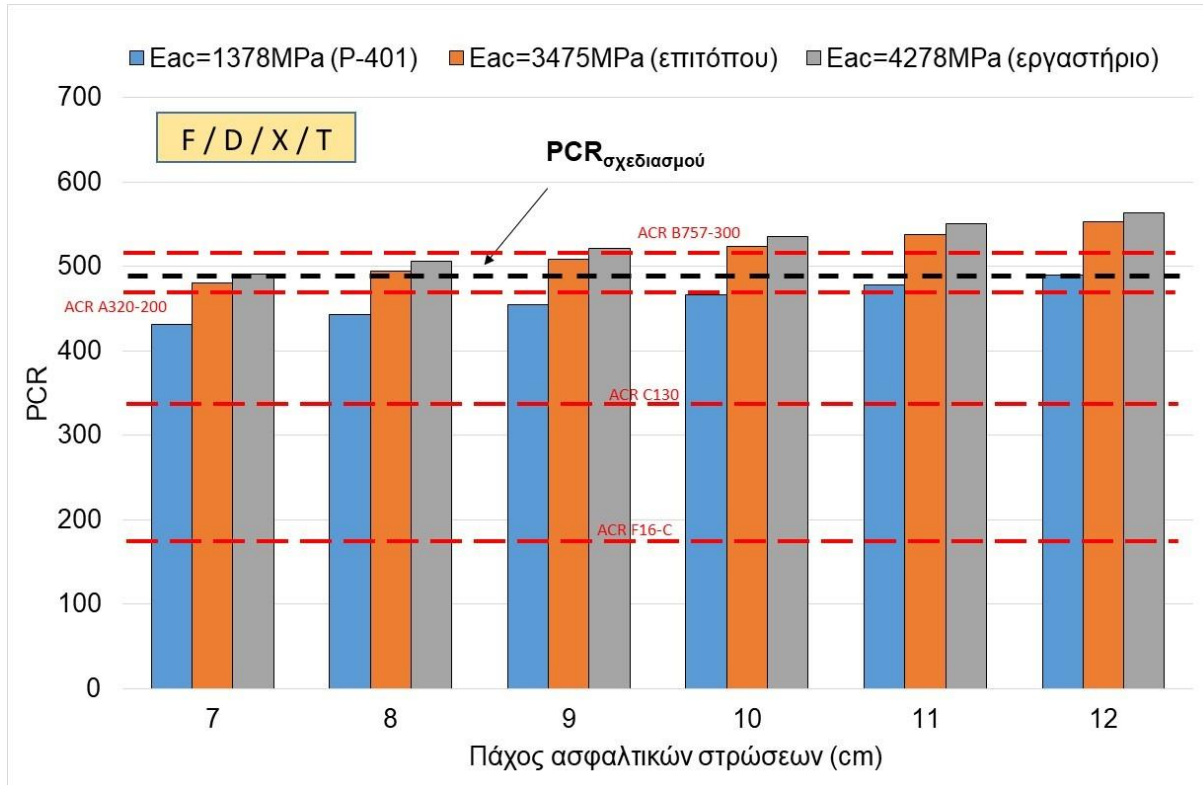
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης φαίνονται στην Εικόνα 11.13 απ' όπου προκύπτει η σημασία της επιλογής κατάλληλων στοιχείων κατά την αξιολόγηση του οδοστρώματος. Πιο συγκεκριμένα η επιλογή του πάχους της διατομής σχεδιασμού (12 cm) και του μέτρου ελαστικότητας που αντιστοιχεί στην επιτόπου κατάσταση του οδοστρώματος ( $E_{ac}=3475\text{MPa}$ ) οδηγεί σε επαρκή φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος για τη θεωρούμενη κυκλοφορία. Αντίθετα η επιλογή μίας πιο συντηρητικής προσέγγισης αναφορικά με το πάχος των ασφαλτικών στρώσεων σε συνδυασμό με τη θεώρηση του μέτρου ελαστικότητας των υλικών οδηγεί σε υψηλές τιμές του δείκτη  $CDF_{\text{subgrade}}$ .



**Εικόνα 11.13 Επίδραση πάχους ασφαλτικών στρώσεων και μέτρου ελαστικότητας ασφαλτομιγμάτων στη φθορά της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος**

Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας εξετάστηκε και η επίδραση της μεταβολής των υπόψη παραμέτρων στο δείκτη PCR και τα σχετικά αποτελέσματα παρατίθενται στην Εικόνα 11.14. Στην Εικόνα 11.14 σημειώνονται και οι τιμές ACR των αεροσκαφών που χρησιμοποιούν το

υπόψη οδόστρωμα. Διαπιστώνεται ότι η διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών του οδοστρώματος που εντοπίστηκε κατά την επεξεργασία τόσο των επιτόπου στοιχείων όσο και μέσω των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό και την έκφραση της φέρουσας ικανότητας του υπόψη οδοστρώματος μέσω του συστήματος κατάταξης ACR-PCR. Ο συνδυασμός μειωμένου πάχους σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές που ελήφθησαν υπόψη κατά τον σχεδιασμό του οδοστρώματος μπορεί να οδηγήσει σε περιορισμό του στόλου που μπορεί να δεχθεί.



**Εικόνα 11.14 Επίδραση πάχους και μέτρου ελαστικότητας στο δείκτη PCR**

Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει ότι ο συνδυασμός στοιχείων πεδίου και εργαστηριακών στοιχείων μπορεί να παρέχει πολύτιμη πληροφορία για την κατάλληλη διαχείριση της λειτουργίας των οδοστρωμάτων ενός αεροδρομίου.

### 11.5 Σχόλια-παρατηρήσεις

Από την παρούσα διερεύνηση προκύπτει ότι ο συνδυασμός στοιχείων πεδίου και στοιχείων εργαστηριακών δοκιμών μπορεί να συμβάλλει στη βελτιστοποίηση των διαδικασιών αξιολόγησης και κατάταξης της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Ο ακριβέστερος προσδιορισμός των επιτόπου στοιχείων του οδοστρώματος είναι καθοριστικής σημασίας για την ορθή διαχείριση ενός αεροδρομίου. Ειδικότερα για την περίπτωση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, όπου η θερμοκρασία επηρεάζει τη συμπεριφορά των

ασφαλικών στρώσεων και κατ'επέκταση τη συνολική συμπεριφορά του οδοστρώματος, η παρούσα διερεύνηση αποκτά ιδιαίτερη αξία. Δεδομένου ότι στην πράξη η εφαρμογή αναγνωρισμένων μεθοδολογιών αξιολόγησης και κατάταξης οδοστρωμάτων αεροδρομίων συχνά πραγματοποιείται με βάση τις παραδοχές των τυπικών υλικών της μεθόδου, η παρούσα διερεύνηση αναδεικνύει τη σημασία της προσαρμογής της εκάστοτε μεθοδολογίας με βάση τις επικρατούσες συνθήκες στη χώρα εφαρμογής.

## 12 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΔΕΙΚΤΗ PCR

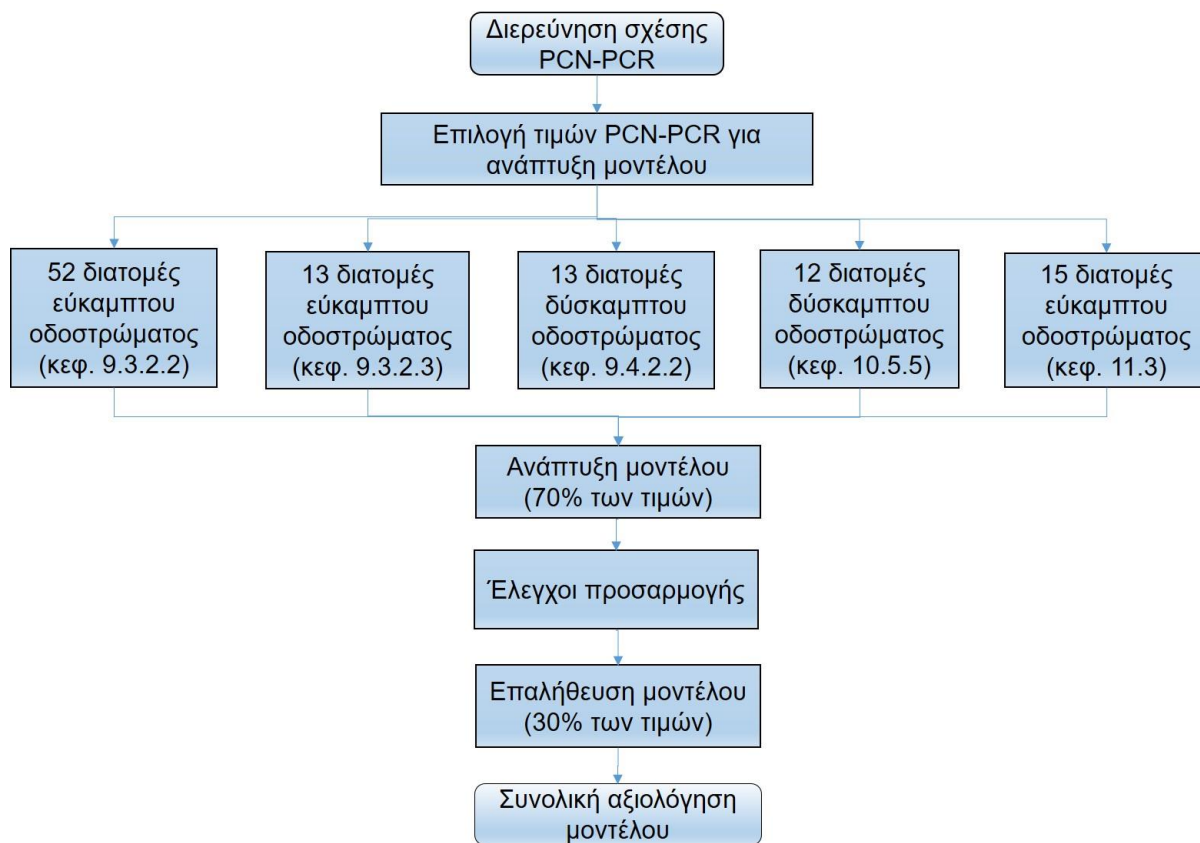
### 12.1 Γενική περιγραφή

Όπως αναπτύχθηκε στα κεφάλαια 10 και 11, ο συνδυασμός στοιχείων πεδίου και στοιχείων εργαστηριακών δοκιμών μπορεί να συμβάλλει στη βελτιστοποίηση των διαδικασιών αξιολόγησης και κατάταξης της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Εντούτοις η παραπάνω διαδικασία σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να μην είναι εφικτή, δεδομένου ότι απαιτεί την ύπαρξη πόρων και τη σχετική τεχνογνωσία για την ορθή εφαρμογή της. Προς τούτο η ύπαρξη μίας σχέσης για την αναγωγή της έκφρασης της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος ενός αεροδρομίου από τον ισχύοντα δείκτη PCN στον επικαιροποιημένο δείκτη PCR, θα μπορούσε να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο κατά την προκαταρκτική φάση εφαρμογής του νέου συστήματος κατάταξης.

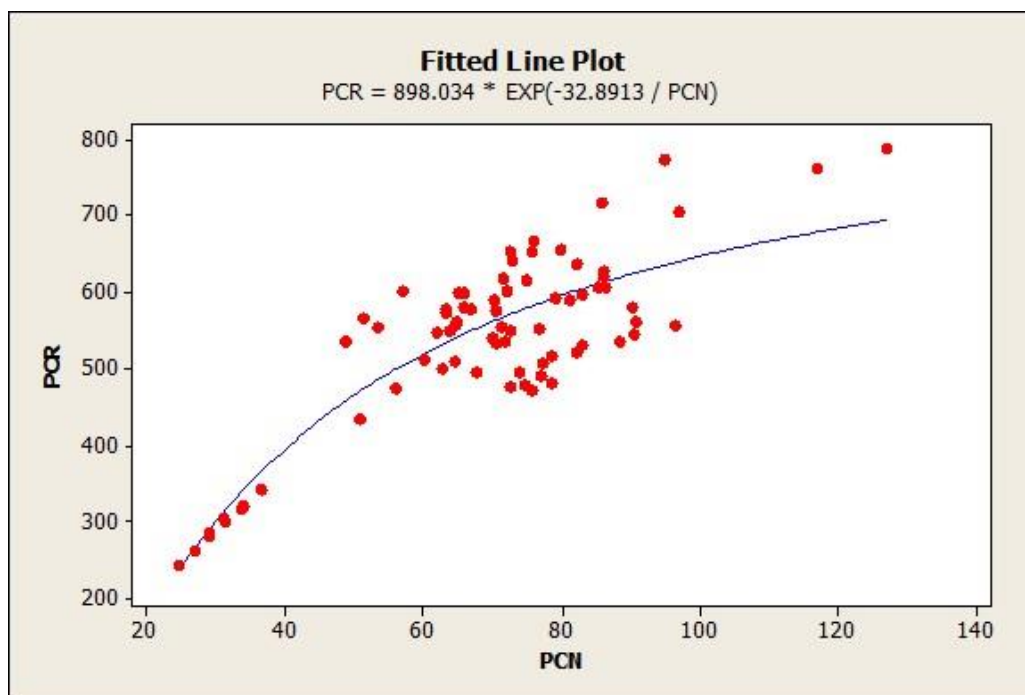
Σε συνέχεια των παραπάνω στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης πραγματοποιήθηκε περαιτέρω έλεγχος της συσχέτισης μεταξύ των δεικτών PCN και PCR. Από τις αναλύσεις που παρουσιάστηκαν στα υποκεφάλαια 9.3.2.2, 9.3.2.3, 9.4.2.2, 10.5.5 και 11.3 παρατηρήθηκε ότι για τις επιμέρους περιπτώσεις που εξετάστηκαν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των δύο δεικτών. Το γεγονός αυτό αρχικά υποδηλώνει την ύπαρξη μίας πιθανής σχέσης μεταξύ των δύο δεικτών. Προς τούτο διερευνήθηκε η δυνατότητα ανάπτυξης ενός μοντέλου εκτίμησης του επικαιροποιημένου δείκτη κατάταξης της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων PCR μέσω του ισχύοντος δείκτη PCN.

### 12.2 Ανάπτυξη μοντέλου

Για την ανάπτυξη του μοντέλου εκτίμησης του δείκτη PCR ακολουθήθηκε η διαδικασία που φαίνεται στην Εικόνα 12.1. Αρχικά επιλέχθηκαν τα αποτελέσματα εκτίμησης των δύο δεικτών για συνολικά 105 διατομές εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων οι οποίες παρουσιάζονται στα υποκεφάλαια 9.3.2.2, 9.3.2.3, 9.4.2.2, 10.5.5 και 11.3. Για την ανάπτυξη του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το 70% των τιμών (73 τιμές). Από τη σχετική διαδικασία προέκυψε το μοντέλο που φαίνεται στην Εικόνα 12.2. Ακολούθησε έλεγχος προσαρμογής του μοντέλου. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε έλεγχος επαλήθευσης του μοντέλου αξιοποιώντας το υπόλοιπο 30% των τιμών (32 τιμές) PCN και PCR.



**Εικόνα 12.1 Διαδικασία ανάπτυξης μοντέλου εκτίμησης δείκτη PCR**



**Εικόνα 12.2 Μοντέλο συσχέτισης δεικτών PCN-PCR**

Η ακρίβεια εκτίμησης του δείκτη PCR μέσω του μοντέλου που αναπτύχθηκε προσδιορίστηκε με βάση τα αποτελέσματα στατιστικών ελέγχων καλής προσαρμογής,  $R^2$  και  $Se/Sy$ . Ο

συντελεστής ή δείκτης προσδιορισμού  $R^2$  (coefficient of determination) προσδιορίζεται από την εξίσωση 12.1. Ο όρος  $Se/Sy$  αντιστοιχεί στον λόγο του τυπικού σφάλματος των εκτιμώμενων τιμών ( $Se$ ) (εξίσωση 12.2) προς την τυπική απόκλιση των μετρημένων τιμών από τη μέση τιμή τους ( $Sy$ ) (εξίσωση 12.3).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y} - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y - \bar{Y})^2} \quad (\text{Εξ. 12.1})$$

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{n-1}} \quad (\text{Εξ. 12.2})$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \bar{Y})^2}{n-1}} \quad (\text{Εξ. 12.3})$$

Όπου

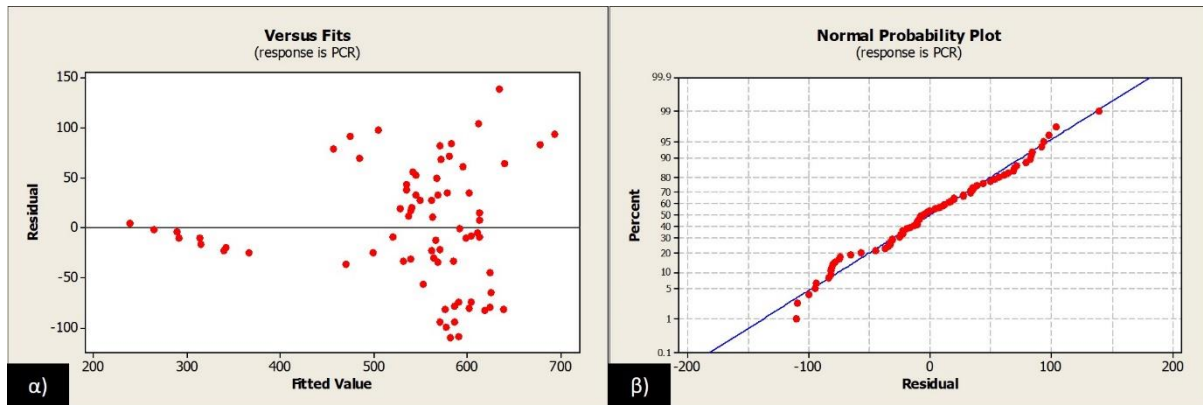
- $R^2$ : Ο συντελεστής προσδιορισμού
- $Se$ : το τυπικό σφάλμα των εκτιμώμενων τιμών
- $Sy$ : η τυπική απόκλιση των μετρημένων τιμών από τη μέση τιμή τους
- $Y$ : οι μετρημένες τιμές
- $\hat{Y}$ : οι εκτιμώμενες τιμές που προκύπτουν από την εφαρμογή της εξίσωσης της παλινδρόμησης
- $\bar{Y}$ : η μέση τιμή των μετρημένων τιμών
- $n$ : το πλήθος των τιμών του δείγματος

Ο χαρακτηρισμός του μοντέλου πραγματοποιήθηκε μέσω των τιμών του  $R^2$  και  $Se/Sy$  με βάση τον Πίνακα 12.1 (Yousefdoost et al. 2015). Πιο συγκεκριμένα για την υπόψη σχέση ο συντελεστής προσδιορισμού προέκυψε ίσος με  $R^2=0.74$  και ο λόγος  $Se/Sy=0.51$ , που αντιστοιχεί σε πολύ καλή συσχέτιση με βάση τον Πίνακα 12.1.

**Πίνακας 12.1 Κριτήρια αξιολόγησης μοντέλου**

Κριτήρια αξιολόγησης	$R^2$	$Se/Sy$
<b>Εξαιρετικό</b>	$\geq 0,90$	$\leq 0,35$
<b>Πολύ καλό</b>	0,70-0,89	0,36-0,55
<b>Σχετικά καλό</b>	0,40-0,69	0,56-0,75
<b>Κακό</b>	0,20-0,39	0,79-0,89
<b>Πολύ κακό</b>	$\leq 0,19$	$\geq 0,90$

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε έλεγχος των υπολοίπων (residuals) για την περαιτέρω αξιολόγηση του μοντέλου που αναπτύχθηκε. Στην Εικόνα 12.3 παρουσιάζονται τα διαγράμματα ελέγχου των υπολοίπων: α) υπόλοιπα σε σχέση με την εκτιμώμενη τιμή του δείκτη PCR και β) το διάγραμμα της κανονικής κατανομής. Μέσω του διαγράμματος κανονικής κατανομής ελέγχεται γραφικά η υπόθεση της κανονικότητας των υπολοίπων. Στην περίπτωση που τα σημεία σχηματίζουν μια ευθεία γραμμή τότε ενισχύεται η υπόθεση ότι τα υπόλοιπα ακολουθούν την κανονική κατανομή.



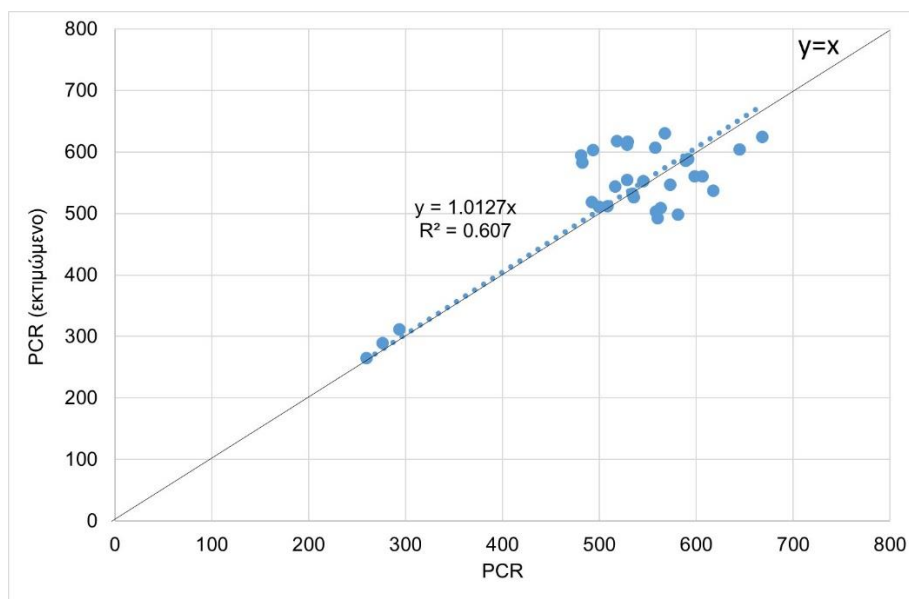
**Εικόνα 12.3 Διαγράμματα ελέγχου υπολοίπων**

Με βάση την Εικόνα 12.3α τα υπόλοιπα θεωρούνται ότι κατανέμονται τυχαία γύρω από το μηδέν γεγονός που υποδεικνύει την τυχαιότητα των σφαλμάτων και επομένως η υπόθεση της σταθερής διακύμανσης των σφαλμάτων δεν παραβιάζεται. Επίσης, σύμφωνα με το διάγραμμα της κανονικής κατανομής που φαίνεται στην Εικόνα 12.3β, με εξαίρεση ελάχιστα σημεία, τα υπόλοιπα ακολουθούν την κανονική κατανομή εφόσον βρίσκονται πάνω στην ευθεία γραμμή.

### 12.3 Επαλήθευση μοντέλου

Για τον έλεγχο της καλής προσαρμογής του μοντέλου εκτίμησης του δείκτη PCR ακολούθησε η διαδικασία επαλήθευσής του. Για το σκοπό αυτό αξιοποιήθηκαν στοιχεία 32 διατομών εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων στις οποίες είχε γίνει εκτίμηση των δεικτών PCN και PCR και δεν είχαν ληφθεί υπόψη κατά τη διαδικασία ανάπτυξης του μοντέλου. Στην Εικόνα 12.4 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς των μετρημένων (PCR) και των εκτιμώμενων τιμών ( $PCR_{\text{εκτιμώμενο}}$ ).





**Εικόνα 12.4 Διάγραμμα διασποράς**

Στην Εικόνα 12.4 φαίνεται η γραμμή  $y=x$  καθώς και η τιμή του συντελεστή  $R^2=0.60$ . Παρατηρείται ότι οι τιμές δεν αποκλίνουν σε μεγάλο βαθμό από τη γραμμή της ισότητας ( $y=x$ ) και κατά συνέπεια θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι πρόκειται για καλή συσχέτιση. Επιπλέον εκτιμήθηκε ο δείκτης RMSPE (εξίσωση 12.4) για τον προσδιοσμό των αποκλίσεων των εκτιμώμενων PCR τιμών από τις υπολογισμένες PCR τιμές.

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{Y - \hat{Y}}{Y} \right)^2} 100\% \quad (\text{Εξ. 12.4})$$

Όπου

- RMSPE: Root Mean Square Percentage Error
- $Y$ : οι μετρημένες τιμές
- $\hat{Y}$ : οι εκτιμώμενες τιμές που προκύπτουν από την εφαρμογή της εξίσωσης της παλινδρόμησης
- $n$ : το πλήθος των τιμών του δείγματος

Από τη σχετική ανάλυση προέκυψε ο δείκτης RMSPE ίσος με 10.8%, ο οποίος δείχνει ότι η ποσοστιαία απόκλιση των εκτιμώμενων PCR τιμών από τις υπολογισμένες τιμές κυμαίνεται σε ικανοποιητικά επίπεδα.

Στη συνέχεια οι μετρημένες και οι εκτιμώμενες τιμές του PCR ελέγχθηκαν ως προς τη σημαντικότητα των διαφορών τους μέσω ελέγχου t-test. Σύμφωνα με τη μηδενική υπόθεση, η διαφορά των δεικτών PCR θεωρείται ως μη σημαντική για επίπεδο εμπιστοσύνης ίσο με 95%.

Για τις τιμές PCR του Σχήματος 12.4 προέκυψε  $t_{stat}=-0.95$  και  $t_{critical}=2.04$  και επομένως η μηδενική υπόθεση ισχύει. Ως εκτούτου πιστεύεται ότι το μοντέλο που αναπτύχθηκε για την εκτίμηση του δείκτη PCR μέσω του δείκτη PCN μπορεί να παρέχει μία προκαταρκτική εκτίμηση της έκφρασης της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος μέσω του επικαιροποιημένου συστήματος αναφοράς.

## 13 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 13.1 Κύρια συμπεράσματα

Τα κυριότερα συμπεράσματα της παρούσας έρευνας ανά ερευνητική ενότητα παρουσιάζονται ακολούθως.

#### 13.1.1 Διερεύνηση επίδρασης της θεώρησης των μηχανικών χαρακτηριστικών στην αξιολόγηση

- Η θεώρηση των μέτρων ελαστικότητας των υλικών των επιμέρους στρώσεων ενός οδοστρώματος επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το αποτέλεσμα της αξιολόγησης μιας διατομής, δεδομένου ότι τα τυπικά υλικά των μεθόδων αξιολόγησης μπορεί να διαφέρουν από τα συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται στην εκάστοτε χώρα εφαρμογής της διαδικασίας. Δεδομένου ότι το μέτρο ελαστικότητας των ασφαλικών στρώσεων επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, η θεώρηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υπόψη στρώσεων είναι καθοριστική κατά την εφαρμογή των υπαρχόντων διαδικασιών αξιολόγησης οδοστρωμάτων στον ελλαδικό χώρο.
- Η θεώρηση της συμπεριφοράς ενός υλικού μέσω του προσδιορισμού του μοντέλου αστοχίας είναι καθοριστική για την ανάλυση. Η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των ασφαλικών στρώσεων  $E_{AC}$  μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε μείωση των καλύψεων-διελεύσεων έως την αστοχία, γεγονός που δεν μπορεί να θεωρηθεί λογικό, δεδομένου ότι η χρήση υλικών με καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά αναμένεται να συμβάλει υπέρ της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται στα μοντέλα αστοχίας όπου εκτός από τις παραμορφώσεις λαμβάνεται υπόψη και το  $E_{AC}$  και συνεπώς η συνδυαστική επίδραση τους πιστεύεται ότι προκαλεί αυτές τις αποκλίσεις.

#### 13.1.2 Διερεύνηση επίδρασης εξέλιξης μεθόδου αξιολόγησης

- Η εξελιγμένη αναλυτική διαδικασία αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων της FAA φαίνεται να είναι λιγότερο συντηρητική σε σχέση με την αρχική της μορφή καθώς και με τις εμπειρικές διαδικασίες. Ο νόμος κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων των «Shen & Carpenter» που έχει ενσωματωθεί στις πρόσφατες διαδικασίες αξιολόγησης οδοστρωμάτων της FAA είναι λιγότερο συντηρητικός από τον προηγούμενο «Heukelom & Klomp» και μπορεί να επηρεάσει τη λήψη αποφάσεων όσον αφορά στη διαχείριση της συντήρησης του οδοστρώματος του αεροδρομίου.

- Η συστηματική εφαρμογή της αρχικής αναλυτικής προσέγγισης για την αξιολόγηση οδοστρωμάτων αεροδρομίων που χρησιμοποιήθηκε για περίπου οκτώ χρόνια με την εφαρμογή του νόμου «Heukelom & Klomp» μπορεί να οδήγησε σε στρατηγικές διαχείρισης οδοστρώματος αεροδρομίων που λειτουργούσαν υπέρ της ασφάλειας της συμπεριφοράς του οδοστρώματος. Κατά συνέπεια, αν και η εξέλιξη της μεθοδολογίας της FAA στο υπόψη θέμα θεωρείται σημαντική ως προς τον χαρακτηρισμό των υλικών, διαφαίνεται ότι οι νέες εξελίξεις δεν θα οδηγήσουν σε επιπλέον απαιτήσεις συντήρησης των οδοστρωμάτων αεροδρομίων που έχουν σχεδιαστεί με προγενέστερες διαδικασίες.
- Διατομές που έχουν σχεδιαστεί με την εμπειρική μέθοδο της FAA φαίνεται να είναι δομικά επαρκείς όταν αξιολογούνται αξιοποιώντας τις πρόσφατες εξελιγμένες αναλυτικές διαδικασίες αξιολόγησης που έχουν αναπτυχθεί. Το γεγονός αυτό είναι ενδιαφέρον για τον ελλαδικό χώρο όπου τα οδοστρώματα πολλών αεροδρομίων έχουν σχεδιαστεί με την εμπειρική μέθοδο της FAA.
- Ο ακριβέστερος προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών που χρησιμοποιούνται σε μία χώρα μπορεί να συμβάλει σε μία πιο ορθολογική θεώρηση της συμπεριφοράς των υλικών στο πλαίσιο της αξιολόγησης του οδοστρώματος. Συστήνεται ο προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος να πραγματοποιείται μέσω επιτόπου μετρήσεων με συστήματα μη καταστρεπτικών δοκιμών (NDT) και να μην χρησιμοποιούνται προεπιλεγμένες θεωρήσεις των μηχανικών χαρακτηριστικών των τυπικών υλικών των μεθόδων αξιολόγησης.

### **13.1.3 Διερεύνηση επίδρασης ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς ασφαλτομιγμάτων**

- Η επίδραση της ιξωδοελαστικής θεώρησης της συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων, η οποία μέχρι στιγμής δεν περιλαμβάνεται στις ισχύουσες μεθοδολογίες αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων, είναι σημαντική για την αξιολόγηση της εντατικής καταπόνησης στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων ενός οδοστρώματος, δεδομένου ότι η συγκεκριμένη θεώρηση οδηγεί σε μεγαλύτερη φθορά των ασφαλικών στρώσεων. Η ιξωδοελαστική θεώρηση της συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων αναδεικνύει την ανάγκη αναθεώρησης του συμβατικού τρόπου αξιολόγησης των οδοστρωμάτων αεροδρομίων, καθώς η συνήθης θεώρηση της ελαστικής συμπεριφοράς των υλικών που υιοθετείται μέχρι στιγμής από την FAA, εμφανίζεται ευμενέστερη ως προς την αναπτυσσόμενη εντατική κατάσταση των οδοστρωμάτων.

Το γεγονός αυτό μπορεί να επηρεάσει τη λήψη αποφάσεων για τη διαχείριση των οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

- Σε ταχύτητες που προσεγγίζουν την ταχύτητα απογείωσης, διαφάνηκε μία τάση σύγκλισης μεταξύ των δύο παραδοχών συμπεριφοράς των ασφατομιγμάτων αναφορικά με τις κρίσιμες παραμορφώσεις. Συνεπώς, η ελαστική θεώρηση η οποία υιοθετείται από την FAA για τον σχεδιασμό και την ανάλυση οδοστρωμάτων αεροδρομίων, δεν αποτελεί συντηρητική προσέγγιση στις κανονικές ταχύτητες λειτουργίας.

#### **13.1.4 Διερεύνηση υπερφόρτωσης με αναλυτική διαδικασία**

- Η εφαρμογή του εμπειρικού κριτηρίου υπερφόρτωσης του ICAO που βασίζεται στη μέθοδο ACN-PCN μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της φθοράς της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος και κατ' επέκταση σε σημαντική μείωση της εναπομένουσας διάρκειας ζωής του. Κατά συνέπεια το ισχύον κριτήριο της υπερφόρτωσης θα πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή για το χρονικό διάστημα κατά το οποίο είναι σε ισχύ η μέθοδος ACN-PCN, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις απουσίας αναλυτικών διαδικασιών αξιολόγησης για την εκτίμηση της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος.
- Αεροσκάφη με ίδιες τιμές ACN μπορεί να παρουσιάζουν διαφορετική επίδραση στη συνολική φθορά της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος. Η παραπάνω παρατήρηση αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον αν αναλογιστεί κανείς και τη διαφοροποίηση των τιμών PCN που προκύπτουν από την εφαρμογή διαφορετικών διαδικασιών που έχουν αναπτυχθεί παγκοσμίως.

#### **13.1.5 Διερεύνηση επίδρασης εισαγωγής μεθόδου ACR-PCR**

- Το επικαιροποιημένο σύστημα κατάταξης της φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων αεροδρομίων ACR-PCR βασίζεται σε διαφορετικό θεωρητικό υπόβαθρο σε σχέση με το ισχύον σύστημα ACN-PCN. Μία από τις σημαντικότερες διαφοροποιήσεις του νέου συστήματος αποτελεί η τροποποίηση της κατηγοριοποίησης της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης, η οποία ενδεχομένως να δυσχεραίνει τη μετάβαση από το σύστημα ACN-PCN στο σύστημα ACR-PCR.
- Ο δείκτης ACR που χρησιμοποιείται για την έκφραση της επίδρασης των αεροσκαφών στα οδοστρώματα αεροδρομίων έχει βελτιωθεί σημαντικά σε σχέση με τον δείκτη ACN, ωστόσο εξακολουθεί να παρουσιάζει ορισμένες αδυναμίες και ως εκ τούτου θεωρείται

ότι το μοντέλο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ενδεχομένως να χρήζει περαιτέρω βελτίωσης.

- Παρατηρείται ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των δεικτών ACN και ACR, εντούτοις η μεταβολή του δείκτη ACN δεν ακολουθεί τη μεταβολή του δείκτη ACR. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι με το σύστημα ACR-PCR μεταβάλλεται η σχετική επίδραση των αεροσκαφών όπως εκφράζεται μέχρι στιγμής μέσω του δείκτη ACN. Συνεπώς μπορεί να μεταβάλλεται το αεροσκάφος που θεωρείται μέχρι στιγμής κρίσιμο από τις αρχές διαχείρισης ενός αεροδρομίου. Επιπλέον ο τρόπος μεταβολής των δύο δεικτών διαφέρει ανάλογα με την εδαφική κατηγορία. Κατά συνέπεια ο δείκτης ACR θα πρέπει να προσδιορίζεται ανεξάρτητα από το δείκτη ACN.
- Παρόλο που ο δείκτης ACR έχει δομηθεί ώστε να είναι περίπου 10 φορές μεγαλύτερος από το δείκτη ACN, η αναλογία των δύο δεικτών δεν είναι σταθερή για κάθε κατηγορία εδαφικής αντοχής και στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μικρότερη από 10. Επιπλέον παρατηρήθηκαν περιπτώσεις όπου ο δείκτης ACR είναι ακόμη και 20 φορές μεγαλύτερος από το δείκτη ACN σε πολύ ελαφριά αεροσκάφη.
- Διατομές με διαφορετικές τιμές του δείκτη PCN και κατά συνέπεια διαφορετική αντοχή, αναφέρουν την ίδια φέρουσα ικανότητα με βάση τον επερχόμενο δείκτη PCR για τις διατομές για τις οποίες ισχύει ότι  $CDF_{\text{subgrade}}=1$  και για την ίδια κυκλοφορία. Το γεγονός αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στη βασική αρχή εκτίμησης του δείκτη PCN, η οποία ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της διατομής του οδοστρώματος και τα στοιχεία της κυκλοφορίας μπορεί να οδηγήσει σε υψηλές τιμές του PCN που υπερεκτιμούν τη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος. Αντίστοιχη εικόνα παρατηρείται και στην περίπτωση των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων όμως οι αποκλίσεις είναι μικρότερης κλίμακας.
- Ο δείκτης PCR για την έκφραση της φέρουσας ικανότητας διατομών που δέχονται την ίδια κυκλοφορία και παρουσιάζουν  $CDF_{\text{subgrade}}=1$  παραμένει σταθερός, παρόλο που οι υπόψη διατομές μπορεί να διαφοροποιούνται ως προς τη φθορά των ασφαλικών στρώσεων. Κατά συνέπεια η διαφοροποίηση της φθοράς των ασφαλικών στρώσεων δεν μπορεί να αναδειχθεί μέσω του δείκτη PCR. Δεδομένου ότι ο υπόψη δείκτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη λήψη αποφάσεων για την αποδοχή της χρήσης ενός οδοστρώματος από συγκεκριμένους τύπους αεροσκαφών, η αποδοχή αεροσκαφών με  $ACR < PCR$  χωρίς περιορισμούς μπορεί να οδηγήσει σε εκτεταμένη φθορά των ασφαλικών στρώσεων που μπορεί να επηρεάσει τις διαδικασίες συντήρησης ενός οδοστρώματος.

- Οι δείκτες PCN και PCR παρουσιάζουν αντίστοιχη τάση μεταβολής και πολύ καλή συσχέτιση για τις διατομές που σχεδιάστηκαν με βάση τις αρχές της FAA και για 13 σενάρια κυκλοφορίας. Επιπλέον ο δείκτης PCR φαίνεται να παρουσιάζει καλύτερη συσχέτιση με τη φθορά της στρώσης έδρασης, γεγονός που φαίνεται ορθολογικό δεδομένου ότι η βασική αρχή εκτίμησης του υπόψη δείκτη αποτελεί η υπόψη φθορά.
- Η ακριβής εκτίμηση της κυκλοφορίας που δέχεται το οδόστρωμα ενός αεροδρομίου αποτελεί βασικό στοιχείο της αξιολόγησης δεδομένου ότι επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη φθορά, η οποία αποτελεί πρωταρχικό κριτήριο για τη διαχείριση οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Επιπλέον επηρεάζει και την κατάταξη της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος, η οποία καθορίζει τον στόλο των αεροσκαφών που μπορεί το αεροδρόμιο να δεχτεί.
- Η έκφραση της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος μέσω του δείκτη PCR μπορεί να οδηγήσει σε μία πιο συντηρητική θεώρηση σε σύγκριση με τον δείκτη PCN, όσον αφορά στους τύπους των αεροσκαφών που μπορεί να δεχθεί το οδόστρωμα για την περίπτωση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Αντιθέτως για τα δύσκαμπτα οδοστρώματα προέκυψε ότι η έκφραση της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος μέσω του δείκτη PCR δεν αποτελεί σε όλες τις περιπτώσεις μία πιο συντηρητική θεώρηση σε σύγκριση με τον δείκτη PCN, ενώ εντοπίστηκαν περιπτώσεις που η έκφραση της φέρουσας ικανότητας με τα δύο συστήματα είναι ισοδύναμη.
- Η επικαιροποιημένη διαδικασία κατάταξης της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων φαίνεται να οδηγεί σε μία πιο ορθολογική απεικόνιση της πραγματικής κατάστασης ενός οδοστρώματος αξιοποιώντας αναλυτικές διαδικασίες, λαμβάνοντας υπόψη τα πραγματικά στοιχεία της διατομής ενός οδοστρώματος (πάχη, μηχανικά χαρακτηριστικά). Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται θεωρήσεις των εμπειρικών διαδικασιών για την προσομοίωση του εκάστοτε οδοστρώματος, οι οποίες ήταν σε μεγάλο βαθμό προσεγγιστικές και αδρομερείς, οδηγώντας πολλές φορές σε υπερεκτίμηση της φέρουσας ικανότητας, με συνέπειες στη διαχείριση ενός αεροδρομίου.

#### **13.1.6 Αξιοποίηση επιτόπου στοιχείων για την κατάταξη φέρουσας ικανότητας δύσκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου**

- Η εφαρμογή ενός πρακτικού και μεθοδολογικού πλαισίου για την αξιολόγηση δύσκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων στο αρχικό στάδιο της ζωής ενός οδοστρώματος μπορεί να συμβάλλει υποστηρικτικά στην ορθολογική λήψη

αποφάσεων για τη διαχείριση της υποδομής. Η σύνθεση των μεμονωμένων αποτελεσμάτων ανάλυσης βοήθησε στη διαμόρφωση μιας ολοκληρωμένης εικόνας της επί τύπου συμπεριφοράς του οδοστρώματος, η οποία μπορεί να διαφέρει σημαντικά από αυτό που θα αναμενόταν με βάση τις προδιαγραφές σχεδιασμού.

- Ο συνδυασμός επιτόπου και εργαστηριακών στοιχείων του οδοστρώματος μπορεί να αξιοποιηθεί στην εκτίμηση ενός δείκτη έκφρασης της φέρουσας ικανότητας του δύσκαμπτου οδοστρώματος PCR ο οποίος να ανταποκρίνεται στην πραγματική κατάσταση του οδοστρώματος και ως εκ τούτου να μπορέσει να αποτελέσει ένα ισχυρό εργαλείο της διαχείρισης του οδοστρώματος.

#### **13.1.7 Αξιοποίηση επιτόπου στοιχείων για την κατάταξη φέρουσας ικανότητας εύκαμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου**

- Ο συνδυασμός στοιχείων πεδίου και στοιχείων εργαστηριακών δοκιμών μπορεί να συμβάλει στη βελτιστοποίηση των διαδικασιών κατάταξης της φέρουσας ικανότητας οδοστρώματων αεροδρομίων. Δεδομένου ότι στην πράξη η εφαρμογή αναγνωρισμένων μεθοδολογιών αξιολόγησης και κατάταξης οδοστρώματων αεροδρομίων συχνά πραγματοποιείται με βάση τις παραδοχές των τυπικών υλικών της μεθόδου, απαιτείται κατάλληλη προσαρμογή με βάση τις επικρατούσες συνθήκες στη χώρα εφαρμογής.

#### **13.1.8 Διερεύνηση ανάπτυξης μοντέλου εκτίμησης δείκτη PCR**

- Το μοντέλο που αναπτύχθηκε για την εκτίμηση του δείκτη PCR μέσω του δείκτη PCN μπορεί να παρέχει μία προκαταρκτική εκτίμηση της έκφρασης της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος μέσω του επικαιροποιημένου συστήματος κατάταξης ACR-PCR. Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να είναι χρήσιμη στις περιπτώσεις όπου δεν είναι διαθέσιμοι οι απαιτούμενοι πόροι και η σχετική τεχνογνωσία για την εκτίμηση του επικαιροποιημένου δείκτη PCR μέσω αναλυτικών στοιχείων πεδίου και στοιχείων εργαστηριακών δοκιμών.

### **13.2 Αξιοποίηση ερευνητικών αποτελεσμάτων**

- Οι εξελιγμένες διαδικασίες αξιολόγησης της επιτόπου συμπεριφοράς οδοστρώματων αεροδρομίων φαίνεται να οδηγούν σε μία πιο ορθολογική διαχείριση των υποδομών. Προς αυτή την κατεύθυνση θα μπορούσε να συμβάλει και η θεώρηση της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των ασφαλτομιγμάτων, η οποία θα μπορούσε να ενσωματωθεί μελλοντικά κατά την επικαιροποίηση των διαδικασιών αξιολόγησης.



Στην παρούσα φάση εφαρμογής πιστεύεται ότι ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται κατά την εφαρμογή των ισχυουσών διαδικασιών αξιολόγησης σε αεροδρόμια του ελλαδικού χώρου, όπου θα πρέπει να γίνονται κατάλληλες προσαρμογές όσον αφορά στις θεωρήσεις των υλικών. Ειδικότερα, δεδομένου ότι η θερμοκρασία επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά ενός οδοστρώματος, η χρήση των τυπικών υλικών της FAA μπορεί να οδηγήσει σε αρκετά συντηρητικές θεωρήσεις. Πιστεύεται ότι οι ισχύουσες μεθοδολογίες θα μπορούσαν να βαθμονομηθούν αξιοποιώντας εργαστηριακά στοιχεία και στοιχεία πεδίου για τα μίγματα που χρησιμοποιούνται συνήθως στον ελλαδικό χώρο.

- Η σημασία εφαρμογής της μεθόδου ACR-PCR διαφαίνεται να αποκτά μεγαλύτερη βαρύτητα όσον αφορά στις διαδικασίες διαχείρισης ενός αεροδρομίου σε σχέση με τη ισχύουσα μέθοδο ACN-PCN. Προς την κατεύθυνση της εισαγωγής του νέου συστήματος στην Ελλάδα, προτείνεται η εφαρμογή της μεθοδολογίας που έχει αναπτυχθεί από την FAA σε κάθε αεροδρόμιο αξιοποιώντας στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό επιτόπου στοιχεία της υφιστάμενης κατάστασης του οδοστρώματος και λιγότερο στοιχεία που αφορούν στο στάδιο της μελέτης του οδοστρώματος. Με αυτόν τον τρόπο θα πραγματοποιηθεί επικαιροποίηση της κατάταξης της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων, η οποία ενδεχομένως να διαφέρει από εκείνη που αναμένεται να έχει ένα οδόστρωμα σύμφωνα με τη διατομή σχεδιασμού. Διαφαίνεται ότι υπό αυτές τις προϋποθέσεις η υπόψη μεθοδολογία είναι πιο βιώσιμη σε σχέση με την ισχύουσα μέθοδο ACN-PCN.
- Παρόλο που ο δείκτης PCR δεν μπορεί να αντικαταστήσει πλήρως τις αναλυτικές διαδικασίες αξιολόγησης οδοστρωμάτων αεροδρομίων, μπορεί να αποτελέσει ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο στο πλαίσιο της διαχείρισης της λειτουργίας ενός αεροδρομίου. Η συμβολή του υπόψη δείκτη φαίνεται να είναι πιο σημαντική ειδικά στις περιπτώσεις αεροδρομίων όπου δεν πραγματοποιείται περιοδική παρακολούθηση της δομικής κατάστασής τους. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η ύπαρξη ενός δείκτη αναφοράς της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων, είτε κατά το στάδιο της μελέτης, είτε κατά το στάδιο της λειτουργίας, μπορεί να υποστηρίξει τη συνεργασία μεταξύ των διαφόρων μερών, όσον αφορά στην αποδοχή της χρήσης ενός αεροδρομίου από νέα αεροσκάφη. Προς αυτή την κατεύθυνση, για τη βελτιστοποίηση της παρεχόμενης πληροφορίας μέσω του δείκτη PCR, συστήνεται η αποφυγή παραδοχών που προσεγγίζουν τα τυπικά υλικά της μεθόδου FAA και κατάλληλη προσαρμογή με βάση τις επικρατούσες συνθήκες στον ελλαδικό χώρο αξιοποιώντας εργαστηριακά στοιχεία και στοιχεία πεδίου όπου αυτό είναι εφικτό.

### 13.3 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

- Η παρούσα διερεύνηση θα μπορούσε να επεκταθεί όσον αφορά στη συσχέτιση των δεικτών PCN-PCR. Δεδομένου ότι η υπόψη συσχέτιση πραγματοποιήθηκε σε διατομές που σχεδιάστηκαν με βάση τα τυπικά υλικά της FAA, η παρούσα διερεύνηση θα μπορούσε να επεκταθεί λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά και κυρίως διαφορετικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων. Η προσέγγιση αυτή θα ήταν ενδιαφέρουσα δεδομένου ότι η διαδικασία εκτίμησης του PCN είναι ιδιαίτερος αδρομερής και λαμβάνει υπόψη την επίδραση αυτών των υλικών μέσω της χρήσης συντελεστών ισοδυναμίας.
- Περαιτέρω εξέλιξη της έρευνας θα μπορούσε να αποτελέσει η διερεύνηση του κόστους μετάβασης από τη μέθοδο ACN-PCN στη μέθοδο ACR-PCR το οποίο είναι σημαντικό για τις αρχές ενός αεροδρομίου. Το κόστος αυτό μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με τα στοιχεία στα οποία μπορεί να βασιστεί η υπόψη διαδικασία (ιστορικά στοιχεία, επιτόπου στοιχεία μη καταστρεπτικών δοκιμών, γεωτεχνικές μελέτες, εμπειρία μακράς χρήσης αεροδρομίου, κ.α).
- Δεδομένου ότι η έκφραση της φέρουσας ικανότητας της εκάστοτε διατομής εύκαμπτου οδοστρώματος μέσω του δείκτη PCR δεν λαμβάνει υπόψη την αστοχία λόγω κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων, αντικείμενο περαιτέρω έρευνας θα μπορούσε να αποτελέσει η ανάπτυξη ενός επιπλέον δείκτη που να αντιπροσωπεύει την κατάσταση των ασφαλτικών στρώσεων. Ο δείκτης αυτός θα μπορούσε να λειτουργήσει επικουρικά στην έκφραση της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος και τη βέλτιστη διαχείριση της συντήρησης.

## 14 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- Akbarzadeh H., Bayat A. and Soleymani H. R. (2012), Analytical Review of the HMA Temperature Correction Factors from Laboratory and Falling Weight Deflectometer Tests, *International Journal of Pavement Research and Technology* 5(1):30-39.
- Armeni A. and Loizos A. (2022), Preliminary evaluation of the ACR-PCR system for reporting the bearing capacity of flexible airfield pavements, *Transportation Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100117>
- ASTM D5340-12 (2012), Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM. C496/C496M-04 (2015), Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- ASTM. D4694-09 (2015), Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device.
- ASTM. D6951/D6951M-09 (2009), Standard Test Method for the Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications.
- Bell H.P., Howard I.L., Freeman R.B. and Brown E.R. (2012), Evaluation of remaining fatigue life model for hot-mix asphalt airfield pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 13 (4), 281-296.
- Carpenter S.H., Ghuzlan K. and Shen S. (2003), A Fatigue Endurance Limit for Highway and Airport Pavement. *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, No 1832 (1), Washington, DC, pp. 131–138.
- COST 336 (1998), Guidelines for Evaluation of Flexible Pavements at Project Level Using Falling Weight Deflectometer, Final Report, European Commission, Brussels.
- CROW (1998), Crow record: Deflection profile-not a pitfall anymore. Survey and interpretation methodology-falling weight deflection measurements, Crow, EDE, The Netherlands.
- Directorate of Civil Engineering Services (1989), A Guide to Airfield Pavement Design and Evaluation, Design and Maintenance Guide 27, Defence Estates, Ministry of Defence, United Kingdom.
- DMG 27 (Design & Maintenance Guide 27) (2011), A Guide to Airfield Pavement Design and Evaluation, 3rd ed., Ministry of Defence.
- EN 12697-26 (2012), Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness.

EN1992-1-1 (2004), Eurocode 2: Design of Concrete Structures—Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings.

ERDC (2001), Pavement Design for Airfields, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, UFC 3-260-03, Mississippi USA.

Fabre C. and Vours G. (2017), Development of rational ACN/PCN system, Proceedings of the 10th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Athens, Greece, 28-30 June 2017.

Federal Aviation Administration (FAA) (1983), Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength – PCN, Advisory Circular 150/5335-5, U.S. Department of Transportation.

Federal Aviation Administration (FAA) (1995), Airport Pavement Design and Evaluation, Advisory Circular 150/5320-6D, U.S. Department of Transportation.

Federal Aviation Administration (FAA) (2009), Airport Pavement Design and Evaluation, Advisory Circular 150/5320-6E, U.S. Department of Transportation.

Federal Aviation Administration (FAA) (2011). Use of Nondestructive Testing in the Evaluation of Airport Pavements, Advisory Circular 150/5370-11B, U.S. Department of Transportation.

Federal Aviation Administration (FAA) (2014a), Standards for Specifying Construction of Airports, Advisory Circular AC 150/5370-10G, U.S. Department of Transportation.

Federal Aviation Administration (FAA) (2014b), Standardized method of reporting airport pavement strength-PCN, Advisory Circular No 150/5335-C.

Federal Aviation Administration (FAA) (2016), Airport Pavement Design and Evaluation, Advisory Circular 150/5320-6F, U.S. Department of Transportation.

Federal Aviation Administration (FAA) (2018), Standards for Specifying Construction of Airports, Advisory Circular AC 150/5370-10H, U.S. Department of Transportation.

Federal Aviation Administration (FAA) (2020), Standardized method of reporting airport pavement strength-PCR, draft Advisory Circular No 150/5335-D.

Federal Aviation Administration (FAA) (2021), Airport Pavement Design and Evaluation, Advisory Circular 150/5320-6G, U.S. Department of Transportation.

Federal Aviation Administration (FAA) (2022), Standardized method of reporting airport pavement strength-PCR, Advisory Circular No 150/5335-D.

Federal Aviation Administration Rigid and Flexible Iterative Elastic Layer Design program (FAARFIELD) (2010), Version 1.305.

- Federal Aviation Administration Rigid and Flexible Iterative Elastic Layer Design program (FAARFIELD) (2017), Version 1.42.
- Federal Aviation Administration Rigid and Flexible Iterative Elastic Layer Design program (FAARFIELD) (2021), Version 2.0.
- Garg N., Guo E. and McQueen Roy D. (2004), Operational Life of Airport Pavements, FAA report DOT/FAA/AR-04/46, December 2004.
- Gkyrtis K., Armeni A. and Loizos A. (2021a). A mechanistic perspective for airfield pavements evaluation focusing on the asphalt layers' behavior. International Journal of Pavement Engineering. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1995733>
- Gkyrtis K., Armeni A., Plati C. and Loizos A. (2021b). Structural Performance Assessment of Airfield Concrete Pavements Based on Field and Laboratory Data. Infrastructures 2021, 6(12), 173; <https://doi.org/10.3390/infrastructures6120173>
- Gkyrtis K., Loizos A. and Plati C. (2021c). A mechanistic framework for field response assessment of asphalt pavements. International Journal of Pavement Research and Technology, 14 (2), 174-185.
- Greer W.G. (1983), The Estimation of Concrete Flexural Strength from Other Types of Strength Tests, Law Engineering Testing Company: Atlanta, GA, USA.
- Heukelom, W. and Klomp A. (1962), Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction. International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements Michigan.
- Huang Y. H. (1993), Pavement Analysis and Design, Prentice Hall.
- International Civil Aviation Organization (ICAO) (1965), Aerodrome manual (Part 2\_physical characteristics), Montreal.
- International Civil Aviation Organization (ICAO) (1983), Aerodrome Design Manual (Part 3-Pavements), ICAO Publications.
- Kawa I. (2012), Pass-to-Coverage computation for arbitrary gear configurations in the FAARFIELD program. DOT/FAA/TC-TN12/47, Virginia: Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation.
- Kawa I. (2017), Development of New Subgrade Failure Model for Flexible Pavements in FAARFIELD. technical report DOT/FAA/TC-17/28, New Jersey: Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation.

- Loizos A., Abacoumkin C. and Charonitis G. (2002), Inconsistencies in Rating the Effect of Aircraft Load and Reporting the Bearing Capacity of Pavements. Proceedings, 6th International Conference of Roads, Railways and Airports, Lisbon.
- Loizos A., and Charonitis G. (2005), Investigation of Classification Parameters and Assumptions for Rigid and Flexible Airfield Pavements, 7th International Conference on Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Trondheim, Norway.
- Loizos A., Armeni A. and Cliatt B. (2017a), Why can't the PCN index be uniquely defined? Proceedings, 10th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Athens, Greece, 28-30 June 2017.
- Loizos A., Armeni A. and Plati C. (2017b), Evaluation of Airfield Pavements Using FAARFIELD, International Conference on Highway Pavements and Airfield Technology, Philadelphia, 27-30 August 2017, <https://doi.org/10.1061/9780784480953.008>
- Loizos A., Armeni A. and Plati C. (2021), Airfield Pavement Overloading and Current Practice, International Airfield and Highway Pavements Conference (virtual event), 8-10 June 2021. <https://doi.org/10.1061/9780784483527.008>
- Loizos A., Armeni A., Plati C. and Cliatt B. (2019), New Challenges in Evaluating Bearing Capacity of Airfield Pavements, International Airfield and Highway Pavements Conference, Chicago, Illinois, 21-24 July 2019 <https://doi.org/10.1061/9780784482476.028>
- Loizos A., Plati C., Papavasiliou V. and Armeni A. (2011), Reporting of Airport Pavement Bearing Capacity, 5th International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements, Thessaloniki, Greece, 1-3 June 2011.
- Maureen Melis L., Meyer A.H. and Fowler D.W. (1985), An Evaluation of Tensile Strength Testing, In Research Report 432-IF, Center for Transportation Research: Austin, TX, USA.
- Mohamed O.A., Al-Hawat W. and Kewalramani M. (2017), The correlation between splitting tensile strength and flexural strength of self-consolidating concrete. Key Eng. Mater. 2017, 753, 326–330.
- Muslim H.B., Haider S.W. and Chatti K. (2021), Influence of seasonal and diurnal FWD measurements on deflection-based parameters for rigid pavements. International Journal of Pavement Engineering, <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1958217> .
- NCHRP (2004), Final Report: Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Part 2: Design Inputs, Chapter 2: Material Characterization, NCHRP 1–37A Project, Transportation Research Board National Council, Washington DC, USA.

- NCHRP (2008), Developing a Plan for Validating an Endurance Limit for HMA Pavements, HMA Endurance Limit Validation Study, NCHRP 9–44 Project, Transportation Research Board National Council, Washington DC, USA.
- Pellinen T.K., Witzczak M.W. and Bonaquist R.F. (2004), Asphalt mix master curve construction using sigmoidal fitting function with non-linear least squares optimization, Recent Advances in Materials Characterization and Modeling of Pavement Systems, 83–101.
- Portland Cement Association (PCA) (1966), Thickness Design for Concrete Pavements, Illinois.
- Powell W. D., Potter J.F., Mayhew H.C. and Nunn M.E. (1984), The Structural Design of Bituminous Pavements, TRRL Laboratory Report 1132, Transportation and Road Research Laboratory, U.K.
- Redles T.A., Ali A.W., Mehta Y.A. and Cleary D. (2018), Estimating fatigue endurance limits of flexible airfield pavements, International Journal of Pavement Engineering, 19 (6), 534–542.
- Redles T.A., Ali A.W., Mehta Y.A. and Cleary D. (2018), Estimating fatigue endurance limits of flexible airfield pavements. International Journal of Pavement Engineering, 2018, 19, 534–542.
- Rollings R. S. (1988), Design of Overlays for Rigid Airport Pavements, FAA report DOT/FAA/PM-87/19.
- Service Techniques des Bases Aériennes (STBA) (2001), Instruction Technique Sur Les Aérodomes Civils, Paris.
- Shen S. and Carpenter S.H. (2007), Development of an asphalt fatigue model based on energy principles, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 76, 525–574.
- Shen S., Airey G.D., Carpenter S.H. and Huang H. (2006), A Dissipated Energy Approach to Fatigue Evaluation. Road Materials and Pavement Design, 7 (1), 47-69.
- Sun J., Chai G., Oh E. and Bell P. (2022), A Review of PCN Determination of Airport Pavements Using FWD/HWD Test, International Journal of Pavement Research and Technology, <https://doi.org/10.1007/s42947-022-00170-1>
- Tang B. (1993), Structural Evaluation of Airfield Rigid Pavements Using Falling Weight Deflectometer. Journal of Transportation Engineering, 1993, 119, 467–476.
- Thompson M. R. (1999), Hot-Mix Asphalt Overlay Design Concepts for Rubblized Portland Cement Concrete Pavements, In Transportation Research Record: Journal of the

- Transportation Research Board, No. 1684, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 147–155.
- Vandenbossche J.M. (2007), Effects of Slab Temperature Profiles on Use of Falling Weight Deflectometer Data to Monitor Joint Performance and Detect Voids, Transportation Research Record, 2007, 75–85.
- Vijender Reddy P., Srinivasa Kumar R. (2018), Structural Evaluation of Rigid Pavement Using Falling Weight Deflectometer (FWD), International Journal of Technical Innovation in Modern Engineering and Science, 2018, 4, 345–359.
- Wang H., Li M., Garg N. and Zhao J. (2020), Multi-wheel gear loading effect on load-induced failure potential of airfield flexible pavement, International Journal of Pavement Engineering, 21 (6), 805-816.
- Westergaard J.M. (1926), Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis, Public Roads, Vol. 7.
- White G. (2017), Limitations and potential improvement of the aircraft pavement strength rating system, International Journal of Pavement Engineering, vol. 18, no. 12, pp. 1111-1121.
- White G. (2018), Use of Falling Weight Deflectometer for Airport Pavements, In Proceedings of the 5th GeoChina International Conference, Hang Zhou, China, 23–25 July 2018, Barman et al., Eds.; pp. 119–133.
- White G. (2019), Modification of the airport pavement strength rating system for improved protection of asphalt surfaces, International Journal of Pavement Engineering, 20:5, 519-529.
- White G. (2022), Practical implications for the implementation of the new international aircraft pavement strength rating system, Proceedings, 11th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Trondheim, Norway, 28-30 June 2022.
- Witczak M.W. (1989), Asphalt Mixture Material Characterization, Report II, University of Maryland.
- Yoder, E.J. and Witczak M.W. (1975), Principles of Pavement Design, 2nd Ed., New York, Wiley.
- Yousefdoost S., Vuong B., Rickards I., Armstrong P. and Sullivan B. (2015), Evaluation of Dynamic Modulus Predictive Models for Typical Australian Asphalt Mixes, AAPA 15<sup>th</sup> International Flexible Pavements Conference.
- Αμπακούμκιν Κ. (1990), Αεροδρόμια, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1990.



Ελληνικός Κανονισμός Σκυροδέματος, έκδοση 2000 (ΕΚΩΣ 2000), (Αριθ. Δ 17α/116/4/ΦΝ 429,Φ.Ε.Κ. 1329 Β/ 6-11-2000).

Λοΐζος Α, Αμπακούμκιν Κ.Γ. & Χαρωνίτης Γ. (1998), Διερεύνηση της Μεθόδου ACN – PCN στο Πλαίσιο της Δομικής Αξιολόγησης Οδοστρωμάτων Αεροδρομίων, Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, Τόμος 1, Τεύχος 2.