

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΜΣΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ

# ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ ΣΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ



ΣΤΑΜΟΥΛΗΣ ΜΟΥΡΟΓΙΑΝΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Α. ΛΟΪΖΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2012

# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ Ανδρέα Λοΐζο, επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας εργασίας, για την εμπιστοσύνη, που έδειξε στο πρόσωπό μου με την ανάθεση της εργασίας, καθώς και για τη συνεχή και ουσιαστική καθοδήγησή του σε όλα τα στάδια εκπόνησής της.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην κα Αγγελική Αρμένη, επιστημονικό συνεργάτη του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ, για την πολύτιμη και διαρκή υποστήριξή της, καθώς και για την υπομονή που επέδειξε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στη Δρ. Χριστίνα Πλατή, για την πολύτιμη συμβολή και τη συμπαράστασή της κατά τη συγγραφή και διόρθωση της εργασίας.

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων των αεροδρομίων. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται οι αποκλίσεις μεταξύ της συμπεριφοράς που προβλέπει οι αναλυτικός υπολογισμός και αυτής που συμβαίνει στην πράξη κατά την επί τόπου επιβολή της φόρτισης. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε διερεύνηση των οριζόντιων παραμορφώσεων, που αναπτύχθηκαν κατά την διαμήκη διεύθυνση, στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης των ευκάμπτων αεροπορικών δαπέδων της πειραματικής εγκατάστασης μεγάλης κλίμακας National Airport Pavement Test Facility (NAPTF), της Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας των ΗΠΑ (FAA). Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση του πειράματος με την ανάπτυξη τρισδιάστατων αναλυτικών προτύπων, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και με τη χρησιμοποίηση παραμέτρων εισαγωγής, που προέκυψαν από επεξεργασία των στοιχείων που συλλέχθηκαν κατά τις επί τόπου πειραματικές δοκιμές με μη καταστρεπτικές μεθόδους. Η συγκριτική ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα που υπολογίστηκαν αναλυτικά με το πρότυπο προσομοίωσης, κατέδειξε ότι υφίσταται ικανοποιητική σύγκλιση των πειραματικά μετρημένων τιμών των παραμορφώσεων με τις αντίστοιχες αναλυτικά υπολογισμένες τιμές. Υπό την προϋπόθεση ότι τα πειραματικά αποτελέσματα είναι αξιόπιστα, τα αποτελέσματα της σύγκρισης των πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων θα μπορούσαν να ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων των αεροδρομίων.

Λέξεις κλειδιά: Οδοστρώματα αεροδρομίων, εύκαμπτα δάπεδα, ανηγμένη παραμόρφωση ασφαλτικής στρώσης.

# ABSTRACT

In this diploma thesis differences between airport flexible pavements field measured responses and calculated responses are under discussion. The deliberation focuses on asphalt concrete tensile strain.

Asphalt strain gages were installed at the Federal Aviation Administration's National Airport Pavement Test Facility (NAPTF) to measure the load-induced asphalt concrete tensile strain during full-scale traffic testing. The results have been taken into account in this discussion.

A finite element (FE) analysis software was used to model the NAPTF flexible test sections and compute the asphalt concete strain responses. Data acquired through non-destructive tests conducted at NAPTF were used to back-calculate the resilient moduli of the pavement layers.

The computed strains at different locations in the test sections are compared with the field measured responses in order to validate the three-dimensional pavement analysis and improve the understanding of the pavement response mechanism. There was a good agreement between field-measured and computed strains. The results of the comparison between field measured responses and computed strains could be incorporated in the flexible airport pavement design process, under the assumption that measured responses acquired during full-scale traffic testing are fully reliable.

Key words: Asphalt strain gage (ASG), Asphalt Concrete (AC), flexible airport pavement, finite element modeling, multiple-wheel heavy aircraft gear loading.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ6 -						
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ 10 ·						
1	E	ΞΙΣΑ	λΓΩΓΙ	Н		16 -
	1.1		Γενικ	ήα	νασκόπηση για τα οδοσρώματα αεροδρομίων	16 -
	1.2		Στόχ	ος ε	εργασίας	18 -
	1.3		Μεθο	οδο/	λογία	19 -
	1.4		Δομή	διτ	πλωματικής εργασίας	20 -
2	A	NA	.ΠTY:	ΞH	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΕ ΕΥΚΑΜΠΤΑ ΟΔ/ΜΑΤΑ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ	22 -
	2.1		Γενικ	ά		22 -
	2.2		Παρα	μοι	ρφώσεις σε εύκαμπτα οδοστρώματα πειραματικών διατάξεων	22 -
	2.3		Εκτίμ	ιησι	η φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων	26 -
	2.4		Προς	τομ	οίωση ευκάμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων με 3D πρότυπα	28 -
3	В	ΒΑΣ	ΙΚΕΣ	AP	ΧΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ	30 -
	3.1		Διερε	:úvr	ηση συμπεριφοράς ευκάμπτων οδοστρωμάτων	30 -
	3	.1.1	1 E	Βασ	πκές θεωρίες υπολογισμού ευκάμπτων οδοστρωμάτων	30 -
			3.1.1	.1	Ελαστικός ημιχώρος - Boussinesq	30 -
			3.1.1	.2	Συστήματα επάλληλων στρώσεων – Burmister	33 -
			3.1.1	.3	Γενικευμένο ελαστικό σύστημα πολλαπλών στρώσεων	34 -
	Э	3.1.	2 6	Ξντα	ατική κατάσταση εύκαμπτου οδοστρώματος	35 -
	3	3.1.	3 `	Yπc	ολογισμός τάσεων - παραμορφώσεων	38 -
			3.1.3	.1	Αναλυτικές μέθοδοι	38 -
			3.1.3	.2	Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	39 -
	3.2		Δομιι	κή c	αξιολόγηση οδοστρώματος	43 -
	3	3.2.	1 E	Ξκτί	ίμηση φέρουσας ικανότητας οδοστρώματος	43 -
	:	3.2	.2 /	Διαδ	δικασία ανάστροφου υπολογισμού (back-analysis)	46 -

#### ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

4	ΠΕΙ	ΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΝΑΡΤF	51 -
	4.1	Γενικά	51 -
	4.2	Πειραματικές δοκιμές	53 -
	4.3	Τυπικές διατομές ευκάμπτων δαπέδων	58 -
	4.4	Αισθητήρες μέτρησης της απόκρισης των δαπέδων	57 -
	4.5	Καταγραφή παραμορφώσεων	60 -
5	ЕΠ	ΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	63 -
	5.1	Γενικά	63 -
	5.2	Συλλογή και επεξεργασία παρατηρήσεων	63 -
	5.3	Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού (back-analysis)	76 -
	5.4	Αναλυτικός υπολογισμός των παραμορφώσεων	83 -
6	ΣΥΓ	ΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ 1	07 -
	6.1	Γενικά 1	07 -
	6.2	Γραμμική συσχέτηση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων 1	07 -
	6.2	.1 Αρχές γραμμικής συσχέτισης με τη μέθοδο της γραμμικής	
πο	αλινδρ	όμησης 1	07 -
	6.2	2.2 Γραμμική συσχέτιση των παραμορφώσεων του δαπέδου LFC	09 -
	6.2	2.3 Γραμμική συσχέτιση των παραμορφώσεων του δαπέδου MFC 1	17 -
	6.2	.4 Συγκεντρωτικά συμπεράσματα από τα αποτελέσματα της γραμμικής	
συ	σχέτια	σης 1	25 -
	6.3	Στατιστικό t-test κατά ζεύγη πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων 1	25 -
	6.3	8.1 Αρχές στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη παρατηρήσεων	25 -
	6.3	5.2 Στατιστικός έλεγχος t-test κατά ζεύγη παραμορφώσεων του δαπέδου	
LF	C	1	27 -
M	6.3 C	3.3 Στατιστικός έλεγχος t-test κατά ζεύγη παραμορφώσεων του δαπέδου	28 -
	6.4	Γενικά συμπεράσματα στατιστικής επεξεργασίας 1	30 -
7	ΣΥΝ	ΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ 1	31 -

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	136 -
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	139 -

# ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα ASG59
Πίνακας 5.1: Αισθητήρες ASG σε θέσεις δοκιμών FWD - Αρχικό δείγμα64
Πίνακας 5.2: Αισθητήρες ASG σε θέσεις δοκιμών FWD – Τελικό δείγμα66
Πίνακας 6.1: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 1 <sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)110
Πίνακας 6.2: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 2 <sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)111
Πίνακας 6.3: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 3 <sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)112
Πίνακας 6.4: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 4 <sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)113
Πίνακας 6.5: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 5 <sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)114
Πίνακας 6.6: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 6 <sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)115
Πίνακας 6.7: Συντελεστής γραμμικής συσχέτισης R <sup>2</sup> της παραμόρφωσης του δαπέδου LFC
Πίνακας 6.8: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 1 <sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)117
Πίνακας 6.9: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 2 <sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)118
Πίνακας 6.10: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παρακορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 3 <sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)119
Πίνακας 6.11: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 4 <sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)120
Πίνακας 6.12: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 5 <sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)121

Πίνακας 6.13: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 6<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)......122 Πίνακας 6.14: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 7<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα).....123 Πίνακας 6.15: Συντελεστής γραμμικής συσχέτισης R<sup>2</sup> της παραμόρφωσης του δαπέδου MFC......124 Πίνακας 6.16: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων για το δάπεδο LFC......128 Πίνακας 6.17: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων για το δάπεδο MFC......130 Πίνακας Π6.1: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παρακορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 1<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)......140 Πίνακας Π6.2: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παρακορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 1<sup>η</sup> χρονική περίοδο...141 Πίνακας Π6.3: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παρακορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 2<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)......143 Πίνακας Π6.4: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παρακορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 2<sup>η</sup> χρονική περίοδο...144 Πίνακας Π6.5: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παρακορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 3<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)......146 Πίνακας Π6.6: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παρακορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 3<sup>η</sup> χρονική περίοδο...147 Πίνακας Π6.7: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παρακορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 4<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)......149 Πίνακας Π6.8: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παρακορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 4<sup>η</sup> χρονική περίοδο...150 Πίνακας Π6.9: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παρακορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 5<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)......152 Πίνακας Π6.10: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παρακορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 5<sup>η</sup> χρονική περίοδο...153

Πίνακας Π6.11: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές Πίνακας Π6.12: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παρακορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 6<sup>η</sup> χρονική περίοδο...156 Πίνακας Π6.13: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παρακορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 1<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)......158 Πίνακας Π6.14: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παρακορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 1<sup>η</sup> χρονική περίοδο..159 Πίνακας Π6.15: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παρακορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 2<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)......161 Πίνακας Π6.16: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παρακορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 2<sup>η</sup> χρονική περίοδο..161 Πίνακας Π6.17: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παρακορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 3<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)......162 Πίνακας Π6.18: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παρακορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 3<sup>η</sup> χρονική περίοδο..162 Πίνακας Π6.19: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παρακορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 4<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)......163 Πίνακας Π6.20: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παρακορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 4<sup>η</sup> χρονική περίοδο..163 Πίνακας Π6.21: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παρακορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 5<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)......164 Πίνακας Π6.22: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παρακορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 5<sup>η</sup> χρονική περίοδο..164 Πίνακας Π6.23: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παρακορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 6<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)......165 Πίνακας Π6.24: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παρακορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 6<sup>η</sup> χρονική περίοδο..165 Πίνακας Π6.25: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές 

Πίνακας Π6.26: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παρακορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 7<sup>η</sup> χρονική περίοδο..166

# ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 3.1: Αναπτυσσόμενες τάσεις κατά Boussinesq - Σημειακό φορτίο30
Εικόνα 3.2: Κατακόρυφες και οριζόντιες τάσεις από κυκλικό φορτίο στον άξονα Συμμετρίας
Εικόνα 3.3: Στατικό πρότυπο της θεωρίας του συστήματος των επάλληλων στρώσεων (Burmister)
Εικόνα 3.4: Γενικευμένο ελαστικό σύστημα πολλαπλών στρώσεων
Εικόνα 3.5: Μεταβολή των τάσεων που αναπτύσσονται σε ένα τυχαίο σημείο κατά τη διάρκεια διέλευσης φορτίου
Εικόνα 3.6: Κρίσιμη θέση φόρτισης οδοστρώματος
Εικόνα 3.7: Κρίσιμες θέσεις εύκαμπτου οδοστρώματος
Εικόνα 3.8: Τρισδιάστατη απεικόνιση οδοστρώματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων40
Εικόνα 3.9: Εξαεδρικό τρισδιάστατο στοιχείο είκοσι κόμβων42
Εικόνα 3.10: Παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (FWD)44
Εικόνα 3.11: Παλμική φόρτιση παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους (FWD)45
Εικόνα 3.12: Εφαρμογή μέτρησης με παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (FWD)45
Εικόνα 3.13: Σύγκλιση μετρημένων και υπολογισμένων υποχωρήσεων47
Εικόνα 3.14: Καμπύλες μετρημένων και υπολογισμένων υποχωρήσεων48
Εικόνα 3.15: Διάγραμμα ροής ανάστροφου υπολογισμού (back-analysis)49
Εικόνα 3.16 <b>:</b> Περιοχή καταπόνησης λόγω φόρτισης FWD49
Εικόνα 4.1: Η εγκατάσταση National Airport Pavement Test Facility (NAPTF)51
Εικόνα 4.2: Το όχημα επιβολής πειραματικών φορτίσεων στην εγκατάσταση NAPTF52
Εικόνα 4.3: Δάπεδα πειραματικών φορτίσεων του προγράμματος CC1 της NAPTF53
Εικόνα 4.4: Εύκαμπτα δάπεδα του προγράμματος CC1 της NAPTF54
Εικόνα 4.5: Διαμόρφωση των φορείων των τροχών των πειραματικών φορτίσεων55

Εικόνα 4.6: Τα ίχνη (tracks) των διελεύσεων στα δάπεδα της NAPTF55
Εικόνα 4.7: Κανονική κατανομή των στα δάπεδα της ΝΑΡΤΕ56
Εικόνα 4.8: Τυπικές διατομές ευκάμπτων δαπέδων της NAPTF (CC1)57
Εικόνα 4.9: Σχηματική απεικόνιση αισθητήρα ASG59
Εικόνα 4.10: Θέσεις αισθητήρων ASG στα δάπεδα LFC και MFC60
Εικόνα 4.11: Θέσεις αισθητήρων ASG στο δάπεδο HFC60
Εικόνα 4.12: Τυπικό διάγραμμα παραμόρφωσης-χρόνου για φόρτιση διπλού τροχού σε τρείς άξονες (Β-777) - (θέση του αισθητήρα ASG κάτω από τον τροχό)61
Εικόνα 4.13: Τυπικό διάγραμμα παραμόρφωσης-χρόνου για φόρτιση διπλού τροχού σε δύο άξονες (Β-747) - (θέση του αισθητήρα ASG κάτω από τον τροχό)62
Εικόνα 5.1: Οι θέσεις των αισθητήρων LSC3 και MSC1265
Εικόνα 5.2: Δάπεδο LFC - Τυπικό διάγραμμα οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυρο- δέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" του αισθητήρα από τον τροχό του φορείου
Εικόνα 5.3α: Δάπεδο LFC – Διαγράμματα οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" του αισθητήρα από τον τροχό του φορείου για κάθε μία από τις εξεταζόμενες χρονικές περιόδους 1 <sup>η</sup> έως 3 <sup>η</sup>
Εικόνα 5.3β: Δάπεδο LFC – Διαγράμματα οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" του αισθητήρα από τον τροχό του φορείου για κάθε μία από τις εξεταζόμενες χρονικές περιόδους 4 <sup>η</sup> έως 6 <sup>η</sup>
Εικόνα 5.4: Δάπεδο MFC - Τυπικό διάγραμμα οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυρο- δέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" του αισθητήρα από τον τροχό του φορείου
Εικόνα 5.5α: Δάπεδο MFC – Διαγράμματα οριζόντιας παραμόρφωσης σφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" του αισθητήρα από τον τροχό του φορείου για κάθε μία από τις χρονικές περιόδους 1 <sup>η</sup> έως 3 <sup>η</sup>
Εικόνα 5.5β: Δάπεδο MFC – Διαγράμματα οριζόντιας παραμόρφωσης σφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" του αισθητήρα από τον τροχό του φορείου για κάθε μία από τις χρονικές περιόδους 4 <sup>η</sup> έως 6 <sup>η</sup>

Εικόνα 5.5γ: Δάπεδο MFC – Διάγραμμα οριζόντιας παραμόρφωσης σφαλτοσκυροδέματος
ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" του αισθητήρα από τον τροχό του φορείου για την 7 <sup>η</sup> χρονική περίοδο
Εικόνα 5.6: Δάπεδο LFC - Τυπικό διάγραμμα οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυρο- δέματος στη θέση κάτω από τον τροχό του φορείου, ως συνάρτηση του χρόνου
Εικόνα 5.7: Δάπεδο MFC - Τυπικό διάγραμμα οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυρο- δέματος στη θέση κάτω από τον τροχό του φορείου, ως συνάρτηση του χρόνου
Εικόνα 5.8: Παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους της FAA76
Εικόνα 5.9: Περιοχή εφαρμογής των δοκιμών FWD77
Εικόνα 5.10: Τα πρότυπα των δαπέδων LFC και MFC, όπως αυτά εισήχθησαν στο λογισμικό ανάστροφου υπολογισμού BAKFAA
Εικόνα 5.11: Η αρχική οθόνη του λογισμικού ΒΑΚΕΑΑ, με τα δεδομένα εισαγωγής από τις μετρήσεις του FWD και τις σπερματικές τιμές για το δάπεδο LFC
Εικόνα 5.12: Η οθόνη του λογισμικού ΒΑΚΓΑΑ, με τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού για το δάπεδο LFC81
Εικόνα 5.13: Υπολογισμένα μέτρα δυσκαμψίας/ελαστικότητας των υλικών των στρώσεων του δαπέδου LFC (ανάστροφος υπολογισμός)
Εικόνα 5.14: Υπολογισμένα μέτρα δυσκαμψίας/ελαστικότητας των υλικών των στρώσεων του δαπέδου MFC (ανάστροφος υπολογισμός)82
Εικόνα 5.15: Τρισδιάστατο πρότυπο προσομοίωσης του δαπέδου LFC
Εικόνα 5.16: Τρισδιάστατο πρότυπο προσομοίωσης του δαπέδου MFC85
Εικόνα 5.17: Λεπτομέρεια του πλέγματος του 3D προτύπου για το δάπεδο LFC86
Εικόνα 5.18: Λεπτομέρεια του πλέγματος του 3D προτύπου για το δάπεδο MFC86
Εικόνα 5.19: Αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στο 3D πρότυπο του δαπέδου LFC
Εικόνα 5.20: Αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στο 3D πρότυπο του δαπέδου MFC
Εικόνα 5.21: Δάπεδο LFC - Τυπικό διάγραμμα υπολογισμένης οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" από τον τροχό του φορείου

Εικόνα 5.22α: Δάπεδο LFC – Διαγράμματα οριζόντιας υπολογισμένης παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" από τον τροχό του φορείου για κάθε μία από τις εξεταζόμενες χρονικές περιόδους 1<sup>η</sup> έως 3<sup>η</sup> ......90

Εικόνα 5.22β: Δάπεδο LFC – Διαγράμματα οριζόντιας υπολογισμένης παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" από τον τροχό του φορείου για κάθε μία από τις εξεταζόμενες χρονικές περιόδους 4<sup>η</sup> έως 6<sup>η</sup> ......91

Εικόνα 5.24α: Δάπεδο MFC – Διαγράμματα οριζόντιας υπολογισμένης παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" από τον τροχό του φορείου για κάθε μία από τις εξεταζόμενες χρονικές περιόδους (ημέρες) 1<sup>η</sup> έως 3<sup>η</sup> ...........94

Εικόνα 5.24β: Δάπεδο MFC – Διαγράμματα οριζόντιας υπολογισμένης παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" από τον τροχό του φορείου για κάθε μία από τις εξεταζόμενες χρονικές περιόδους (ημέρες) 4<sup>η</sup> έως 6<sup>η</sup> ......95

Εικόνα 5.24γ: Δάπεδο MFC – Διαγράμματα οριζόντιας υπολογισμένης παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" από τον τροχό του φορείου για την 7<sup>η</sup> χρονική περίοδο.....96

 Εικόνα 5.30β: Δάπεδο MFC – Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικά μετρημένης και αναλυτικά υπολογισμένης οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" από τον τροχό του φορείου για τις εξεταζόμενες χρονικές περιόδους (ημέρες) 4<sup>η</sup> έως 6<sup>η</sup> ......103

Εικόνα 5.30γ: Δάπεδο MFC – Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικά μετρημένης και αναλυτικά υπολογισμένης οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" από τον τροχό του φορείου για την 7<sup>η</sup> χρονική περίοδο.....104

Εικόνα 6.1: Διάγραμμα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 1<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)......110

Εικόνα 6.2: Διάγραμμα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 2<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)......111

Εικόνα 6.3: Διάγραμμα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 3<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)......112

Εικόνα 6.5: Διάγραμμα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 5<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)......114

Εικόνα 6.6: Διάγραμμα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 6<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)......115

Εικόνα 6.8: Διάγραμμα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 1<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)......117

Εικόνα 6.9: Διάγραμμα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 2<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)......118

Εικόνα 6.10: Διάγραμμα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 3<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)......119

Εικόνα 6.11: Διάγραμμα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 4<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)......120

Εικόνα 6.12: Διάγραμμα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 5<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)......121

Εικόνα 6.13: Διάγραμμα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 6<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)......122

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Γενική ανασκόπηση για τα οδοστρώματα αεροδρομίων

Τα οδοστρώματα των αεροδρομίων, όπως άλλωστε και τα οδοστρώματα των οδών, έχουν ως σκοπό να μεταφέρουν στο έδαφος σημαντικά μειωμένες τις τάσεις που προκαλούνται από την κυκλοφορία των οχημάτων/αεροσκαφών και παράλληλα να το προστατεύουν από τις περιβαλλοντικές επιδράσεις.

Τα οδοστρώματα αεροδρομίων παρουσιάζουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά με τα οδοστρώματα των οδών, αλλά διαφοροποιούνται από αυτά σε ορισμένες βασικές παραμέτρους σχεδιασμού και λειτουργίας, όπως είναι τα σημαντικού μεγέθους φορτία των αεροσκαφών, που υπερβαίνουν κατά πολύ τα αντίστοιχα των οχημάτων, η πολύ μεγάλη διακύμανση που παρουσιάζουν τα φορτία των διαφορετικών τύπων αεροσκαφών, τόσο ως προς το μέγεθος, όσο και ως προς τον τρόπο επιβολής τους, ο διαφορετικός τρόπος φόρτισης που δέχεται ένα οδόστρωμα αεροδρομίου, ιδιαίτερα κατά την προσγείωση, οι σύνθετες διατάξεις τροχών, η συχνότητα φόρτισης, οι μικρές ταχύτητες κίνησης των αεροσκαφών, η διακύμανση της κυκλοφορίας στην εγκάρσια διεύθυνση και ο διαφορετικός αριθμός αεροσκαφών που εξυπηρετεί ένα αεροδρόμιο σε σχέση με τον κυκλοφορικό φόρτο μιας οδού.

Γενικά τα οδοστρώματα που χρησιμοποιούνται στα αεροδρόμια παρουσιάζουν την ίδια δομή με εκείνα των οδών (Λοϊζος, 2012), και πιο συγκεκριμένα διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Εύκαμπτα, τα οποία αποτελούνται από στρώσεις ασφαλτομίγματος και βάση υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο.
- Ημιάκαμπτα, που αποτελούνται από στρώσεις ασφαλτομίγματος, βάση από κατεργασμένο με υδραυλικές κονίες υλικό και στραγγιστική στρώση από ασύνδετο αμμοχάλικο.
- Δύσκαμπτα, που αποτελούνται από πλάκα σκυροδέματος, εδραζόμενη σε υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο ή αμμοχάλικο κατεργασμένο με υδραυλικές κονίες.
- Σύνθετα, τα οποία αποτελούν συνδυασμούς των παραπάνω κατηγοριών.

Τα φορτία των αεροσκαφών αποτελούν τον κύριο παράγοντα καταπόνησης για τα οδοστρώματα των αεροδρομίων. Λόγω της συνεχούς αύξησης της μεταφορικής ζήτησης και της εισαγωγής νέων, μεγαλύτερων και βαρύτερων αεροσκαφών παρατηρείται μια αντίστοιχη αύξηση και των απαιτήσεων φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων. Η σχετικά πρόσφατη εισαγωγή των νέων τύπων μεγάλων αεροσκαφών (New Generation Aircrafts - NGA) όπως είναι το B-777 και το A-380, έχει πρακτικά θέσει νέες απαιτήσεις και προδιαγραφές για τα γεωμετρικά στοιχεία, τα οδοστρώματα, και γενικότερα για το σχεδιασμό των αεροδρομίων.

Ο σχεδιασμός των οδοστρωμάτων αεροδρομίων έγκειται στον υπολογισμό ικανού αριθμού και πάχους στρώσεων, ώστε να περιοριστούν οι καταπονήσεις των οδοστρωμάτων σε ανεκτά επίπεδα, με βάση τις αναμενόμενες συνθήκες φόρτισης. Οι κυριότερες από τις καταπονήσεις αυτές για τα εύκαμπτα οδοστρώματα είναι η οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης, που συνδέεται με τη ρηγμάτωση της στρώσης αυτής λόγω κόπωσης (κριτήριο αστοχίας λόγω κόπωσης άδρασης, που έχει ως αποτέλεσμα την παραμένουσα παραμόρφωση στην κορυφή της στρώσης έδρασης, που έχει ως αστοχίας λόγω τροχοαυλάκωσης). Είναι σημαντικό συνεπώς να μπορεί να εκτιμηθεί το μέγεθος των οριζόντιων παραμορφώσεων στο ασφαλτικό σκυρόδεμα, ώστε να αξιολογηθούν κατάλληλα η απόκριση του οδοστρώματος και η συμπεριφορά του σε ρηγμάτωση λόγω κόπωσης.

Συνήθως, ο σχεδιασμός των οδοστρωμάτων των αεροδρομίων, βασίζεται σε ένα μηχανιστικό-εμπειρικό πρότυπο, στο οποίο συνδυάζονται οι βασικές αρχές της εδαφομηχανικής με εμπειρικά δεδομένα (πίνακες-νομογραφήματα). Η αύξηση, όμως, του αριθμού των στρώσεων και οι πρόσθετες παράμετροι, που σχετίζονται με τον πραγματικό τρόπο φόρτισης και υπεισέρχονται στον υπολογισμό (περισσότερες από μία επιφάνειες φόρτισης, σύνθετα συστήματα τροχών, δυναμική φόρτιση) καθιστούν ιδιαίτερα δύσκολο τον υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων με την προσέγγιση αυτή.

Η πρόσφατη εμπειρία έχει δείξει ότι, η επί τόπου συμπεριφορά των οδοστρωμάτων των αεροδρομίων παρουσιάζει σε πολλές περιπτώσεις σημαντική απόκλιση από την αναμενόμενη συμπεριφορά με βάση το σχεδιασμό. Οι διαφορές αυτές συνήθως δεν είναι δυνατόν να εξηγηθούν από τυχόν αποκλίσεις κατά τη φάση της κατασκευής, η οποία είναι πλέον επαρκώς τεκμηριωμένη από πλευράς προδιαγραφών και βασίζεται σε εξελιγμένες κατασκευαστικές μεθόδους εφαρμογής. Κατά συνέπεια, υφίσταται ένα θέμα προς διερεύνηση από την τεχνική κοινότητα, στο πεδίο της βελτίωσης των μεθόδων του σχεδιασμού των οδοστρωμάτων των αεροδρομίων.

Στο πλαίσιο αυτό, η βέλτιστη προσέγγιση θα ήταν να παρακολουθείται, σε συνεχή βάση, η απόκριση των οδοστρωμάτων των αεροδρομίων υπό τις πραγματικές συνθήκες καταπόνησης, συνθήκη που προφανώς είναι εξαιρετικά δύσκολο να επιτευχθεί. Εναλλακτικά, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί προσομοίωση της επί τόπου κατάστασης στο εργαστήριο ή σε πειραματικές διατάξεις μεγάλης κλίμακας, η μελέτη των οποίων μπορεί να προσφέρει χρήσιμες ενδείξεις για τη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων στο φυσικό πεδίο. Μια από τις πλέον αξιόλογες πειραματικές διατάξεις μεγάλης κλίμακας (Large Scale Facility, LSF) είναι η National Airport Pavement Test Facility (NAPTF), στις ΗΠΑ, που λειτουργεί συστηματικά από το έτος 2000.

Παράλληλα, στο πεδίο των μεθόδων υπολογισμού των οδοστρωμάτων, τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο αναλυτικές προσεγγίσεις του προβλήματος, με τις οποίες ο υπολογισμός των τάσεων και των παραμορφώσεων γίνεται με τη βοήθεια κατάλληλων αλγορίθμων και καταστατικών εξισώσεων, που προγραμματίζονται με ειδικά προγράμματα Η/Υ. Τα λογισμικά αυτά στηρίζονται στη θεωρία των πολλαπλών ελαστικών στρώσεων, αλλά και στην αρχή των πεπερασμένων στοιχείων.

### 1.2 Στόχος εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στο να συνεισφέρει στην καλύτερη κατανόηση της σχέσης μεταξύ της επί τόπου και της αναμενόμενης συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων των αεροδρομίων, εστιαζόμενη στη διερεύνηση των οριζόντιων παραμορφώσεων στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης των ευκάμπτων δαπέδων των αεροδρομίων. Το πεδίο των πειραματικά προσδιορισμένων οριζόντιων παραμορφώσεων στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης των ευκάμπτων δαπέδων των ασφαλτοσκυροδέματος δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς από τη διεθνή βιβλιογραφία, ίσως λόγω της δυσκολίας που παρουσιάζει η ανάπτυξη μιας τέτοιας πειραματικής διάταξης μεγάλης κλίμακας. Στο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας εντάσσεται η ανάπτυξη ενός τρισδιάστατου, αναλυτικού προτύπου ευκάμπτου οδοστρώματος αεροδρομίου, με τη μέθοδο των πειραματική εγκατάσταση μεγάλης κλίμακας. Τα συμπεράσματα, που προκύπτουν από τη συγκριτική ανάλυση των αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων με τα πειραματικά μετρηθέντα στοιχεία, αποτελούν αντικείμενο προβληματισμού και οριοθετούν ένα πεδίο για περαιτέρω διερεύνηση των υφιστάμενων μεθόδων σχεδιασμού των ευκάμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων.

### 1.3 Μεθοδολογία

Το πρώτο στάδιο της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση των οριζόντιων παραμορφώσεων στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης επί της εγκατάστασης NAPTF, η οποία είναι μια πειραματική διάταξη μεγάλης κλίμακας και βρίσκεται στην Τεχνική Βάση William Hughes της FAA, στο διεθνές αεροδρόμιο Atlantic City του New Jersey των ΗΠΑ. Η εγκατάσταση περιλαμβάνει διάφορα δάπεδα (εύκαμπτα, δύσκαμπτα και ημιάκαμπτα), κατασκευασμένα σε τρείς διαφορετικές στρώσεις έδρασης, δηλαδή χαμηλής αντοχής (τιμή δείκτη φέρουσας ικανότητας CBR 4), μέσης αντοχής (CBR 8), και υψηλής αντοχής (CBR 20). Για τους σκοπούς της παρούσα εργασίας αξιοποιήθηκαν τα στοιχεία των εύκαμπτων δαπέδων της εγκατάστασης. Τα χαρακτηριστικά των τυπικών διατομών των δαπέδων, καθώς επίσης και οι λοιπές λεπτομέρειες για το μέγεθος του φορτίου και τη διαμόρφωση των συστημάτων τροχών, περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.

Παράλληλα, για τα εύκαμπτα αυτά δάπεδα έγινε εκτίμηση της φέρουσας ικανότητάς τους, με βάση τα αποτελέσματα των επί τόπου δοκιμών με Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer, FWD). Τα αποτελέσματα των δοκιμών FWD μαζί με μια σειρά άλλων στοιχείων (γεωμετρικά και δομικά χαρακτηριστικά των στρώσεων, κ.λπ.) εισήχθησαν στον αλγόριθμο ανάστροφου υπολογισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών του οδοστρώματος (back-analysis). Το αποτέλεσμα του ανάστροφου υπολογισμού είναι πρακτικώς οι τιμές των τροποποιημένων μέτρων δυσκαμψίας/ελαστικότητας των στρώσεων του δαπέδου. Για τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό BAKFAA της Ομοσπονδιακής Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας των ΗΠΑ (Federal Aviation Administration, FAA).

Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, ένα πρότυπο τριών διαστάσεων, για την προσομοίωση των ευκάμπτων δαπέδων της NAPTF. Ο προγραμματισμός του προτύπου έγινε με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Μέσω του προτύπου αυτού υπολογίστηκε η οριζόντια παραμόρφωση στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης του οδοστρώματος και στη συνέχεια, έγινε σύγκριση των στοιχείων των αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων με τα αντίστοιχα καταγεγραμμένα στοιχεία από τις δοκιμαστικές φορτίσεις στην πειραματική εγκατάσταση και εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα.

### 1.4 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας περιγράφεται συνοπτικά ως ακολούθως:

Στο **2° κεφάλαιο** πραγματοποιείται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση του θέματος των οριζόντιων παραμορφώσεων στη βάση της ασφαλτικής στρώσης των ευκάμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στη διεθνή εμπειρία και πρακτική σε συναφή θέματα, που σχετίζονται με πειραματικές διατάξεις, με χαρακτηριστικότερη την εγκατάσταση της NAPTF. Παράλληλα, αναφέρονται στοιχεία σχετικά με ερευνητικές εργασίες εκτίμησης της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων αεροδρομίων (διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού των μέτρων ελαστικότητας των στρώσεων του οδοστρώματος, back-analysis). Τέλος, παρέχονται αναφορές για αεροδρομίων, που αναπτύχθηκαν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και αξιολογήθηκαν με τη χρήση των πειραματικών αποτελεσμάτων της NAPTF.

Στο 3° κεφάλαιο αναπτύσσονται με συντομία οι βασικές αρχές για την αξιολόγηση των παραμορφώσεων στα εύκαμπτα οδοστρώματα. Γίνεται αναφορά στις βασικές θεωρίες υπολογισμού των ευκάμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων και περιγράφονται συνοπτικά οι μέθοδοι υπολογισμού των τάσεων-παραμορφώσεων (εμπειρικές και αναλυτικές μέθοδοι, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων). Τέλος αναφέρονται ορισμένα στοιχεία για τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού των μέτρων ελαστικότητας των στρώσεων του οδοστρώματος.

Το 4° κεφάλαιο περιλαμβάνει όλα τα δεδομένα των πειραματικών φορτίσεων, που πραγματοποιήθηκαν στην εγκατάσταση της NAPTF. Γίνεται μια συνοπτική περιγραφή της εγκατάστασης και των πρωτοκόλλων προσομοίωσης και επιβολής του φορτίου των αεροσκαφών στα δάπεδα, καθώς επίσης των συστημάτων μέτρησης και καταγραφής των αποκρίσεων των δαπέδων (τάσεων-παραμορφώσεων).

Το 5° κεφάλαιο πραγματεύεται τη διαδικασία επεξεργασίας των αποτελεσμάτων των πειραματικών δοκιμών στη NAPTF. Αρχικά αναπτύσσεται η μεθοδολογία συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων των μετρήσεων, που επελέγησαν προς αξιοποίηση στην παρούσα εργασία και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρημένων παραμορφώσεων στη βάση της ασφαλτικής στρώσης. Ακολουθεί η περιγραφή των βημάτων της διαδικασίας ανάστροφου υπολογισμού, με την οποία γίνεται εκτίμηση των μέτρων ελαστικότητας των στρώσεων. Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία ανάπτυξης ενός τρισδιάστατου, αναλυτικού προτύπου προσομοίωσης των πειραματικών δαπέδων της NAPTF, το οποίο αναπτύχθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Στο τελευταίο μέρος του κεφαλαίου αναπτύσσεται η μεθοδολογία υπολογισμού των οριζόντιων παραμορφώσεων και γίνεται η παρουσίαση των σχετικών αποτελεσμάτων.

Στο 6° κεφάλαιο πραγματοποιείται μια συγκριτική ανάλυση των αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων με τις αντίστοιχες μετρημένες από τις πειραματικές φορτίσεις. Η σύγκριση πραγματοποείται με τη βοήθεια δύο στατιστικών ελέγχων. Αρχικά εξετάζεται η ύπαρξη ή μη γραμμικής συσχετίσεως μεταξύ των δύο δειγμάτων, με τη βοήθεια της γραμμικής παλινδρόμησης. Στη συνέχεια ελέγχονται οι πιθανές διαφορές με το στατιστικό t-test κατά ζεύγη. Τέλος, γίνεται μια προσπάθεια ερμηνείας των αποτελεσμάτων.

Στο **7° κεφάλαιο** διατυπώνονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν, τόσο από την σύγκριση των στοιχείων των αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων με αυτά των πειραματικά μετρημένων, όσο και από τη συνολική διερεύνηση για τις παραμορφώσεις των ασφαλτικών δαπέδων των αεροδρομίων, που πραγματοποιήθηκε με την παρούσα διπλωματική εργασία.

# 2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΕ ΕΥΚΑΜΠΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ

# 2.1 Γενικά

Είναι ευρέως αποδεκτό από τη διεθνή βιβλιογραφία, ότι η ρηγμάτωση, λόγω κόπωσης, των ασφαλτοσκυροδεμάτων συγκαταλέγεται ανάμεσα στους βασικούς παράγοντες δομικής αστοχίας των ευκάμπτων δαπέδων των αεροδρομίων. Χαρακτηριστικά αναφέρονται τα αποτελέσματα των ερευνών της Ένωσης Πολιτικών Μηχανικών των ΗΠΑ (Rawe et al, 1991) και των αντίστοιχων μελετών της Ομοσπονδιακής Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας (FAA) των ΗΠΑ για το Δείκτη Κατάστασης Οδοστρώματος (Pavement Condition Index, PCI) (Guo and Rice, 1999), που το επιβεβαιώνουν. Ο μηχανισμός της αστοχίας λόγω κόπωσης των ασφαλτοσκυροδεμάτων συνδέεται κυρίως με το μέγεθος των εφελκυστικών τάσεων στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης. Αποτελεί λοιπόν σημαντική επιδίωξη η εκτίμηση των οριζόντιων παραμορφώσεων στο ασφαλτικό σκυρόδεμα, ώστε να αξιολογηθούν κατάλληλα η απόκριση του οδοστρώματος και η συμπεριφορά του σε ρηγμάτωση λόγω κόπωσης (Gopalakrishnan, 2006).

# 2.2 Παραμορφώσεις σε εύκαμπτα οδοστρώματα πειραματικών διατάξεων

Ένας σημαντικός αριθμός ερευνών έχει πραγματοποιηθεί για τη μέτρηση της οριζόντιας παραμόρφωσης της ασφαλτικής στρώσης των δαπέδων των αεροδρομίων με την χρήση αισθητήρων μέτρησης (Asphalt Strain Gages, ASG), που εγκιβωτίζονται στη μάζα του ασφαλτοσκυροδέματος, συνήθως κατά τη φάση της κατασκευής. Παράλληλα, έχει πλέον αναγνωριστεί διεθνώς η προσφορά των εγκαταστάσεων επιταχυνόμενης φόρτισης δαπέδων (Accelerated Pavement Testing Facility), στις οποίες είναι δυνατή η διερεύνηση μεγάλου εύρους καταπονήσεων, με διαφορετικά φορτία και διαμορφώσεις συστημάτων τροχών υπό πειραματικές συνθήκες φυσικής κλίμακας.

Οι Edwards, Green και Sargand (2004) συνέκριναν τις αποκρίσεις τεσσάρων διατομών οδοστρωμάτων, που μελετήθηκαν τόσο σε συνθήκες φυσιολογικής καταπόνησης, όσο και στην πειραματική εγκατάσταση επιταχυνόμενης φόρτισης (Accelerated Pavement Loading Facility, APLF) στο Οχάιο των ΗΠΑ. Κατά τις δοκιμές στην εγκατάσταση APLF έγινε φόρτιση με διαμόρφωση δίδυμου τροχού, ενώ πραγματοποιήθηκαν και μετρήσεις με παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους, με βάση τις οποίες εκτιμήθηκαν τα μέτρα ελαστικότητας των στρώσεων με τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι οριζόντιες παραμορφώσεις των ασφαλτικών στρώσεων με τη βοήθεια λογισμικού βασισμένου στη θεωρία των ελαστικών στρώσεων. Γενικά, οι υπολογισμένες παραμορφώσεις πορέκυψαν ελαφρώς μικρότερες από τις μετρημένες παραμορφώσεις στο φυσικό πεδίο.

Κατά τις πειραματικές φορτίσεις, που πραγματοποιήθηκαν στα εύκαμπτα δάπεδα της NAPTF, για την οποία δίδονται περισσότερα στοιχεία στο κεφ. 4, που ακολουθεί, καταγράφηκαν και αναλύθηκαν, πέραν των άλλων παραμέτρων και οι αποκρίσεις των αισθητήρων ASG, μέτρησης της οριζόντιας παραμόρφωσης της ασφαλτικής στρώσης. Τα πειράματα διεξήχθησαν σε δύο φάσεις. Αρχικά, από τον Αύγουστο 1999 έως τον Σεπτέμβριο 1999, πραγματοποιήθηκε ένα πρόγραμμα καταπόνησης των δαπέδων με στατικό φορτίο, φορτίο κινούμενο με χαμηλές ταχύτητες (0,5 km/h) και παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (FWD). Κατά τη δεύτερη φάση (Φεβρουάριος 2000 έως Σεπτέμβριος 2001) πραγματοποιήθηκε το πρόγραμμα συστηματικής καταπόνησης των δαπέδων με επαναλαμβανόμενο κυκλοφοριακό φόρτο, διαμορφώσεις των συστημάτων τροχών των αεροσκαφών Β-777 και Β-747 και ταχύτητα διέλευσης 8,0 km/h (trafficking tests). Η καταπόνηση αυτή εφαρμόστηκε μέχρι τη φάση της αστοχίας των δαπέδων. Τέλος, ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας, που εξετάστηκε κατά τη διάρκεια των παραπάνω ελέγχων, ήταν και η επίδραση της θερμοκρασίας στις αναπτυσσόμενες οριζόντιες παραμορφώσεις στη βάση των ασφαλτικών στρώσεων.

Οι Gomez-Ramirez και Thompson (2002) χρησιμοποίησαν τα αποτελέσματα του προγράμματος της πρώτης φάσης στη NAPTF (φορτίο κινούμενο με χαμηλές ταχύτητες της τάξης των 0,5 km/h) για να μελετήσουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ φορτίων πολλαπλών τροχών. Η γενική τους διαπίστωση είναι ότι η οριζόντια παραμόρφωση στη βάση της ασφαλτικής στρώσης παρουσίασε πολύ μεγάλη διακύμανση τιμών, ίσως λόγω της χαμηλής ταχύτητας διέλευσης του φορτίου (0,5 km/h). Ειδικότερα για τα δάπεδα με σταθεροποιημένη βάση, στα οποία επικεντρώθηκε η μελέτη τους, διαπιστώθηκε ότι οι παραμορφώσεις στη βάση της ανώτερης ασφαλτικής στρώσης ήταν σημαντικά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στον πυθμένα της σταθεροποιημένης βάσης. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι για το δάπεδο σταθεροποιημένης βάσης, επί στρώσης έδρασης με φέρουσα ικανότητα CBR 8, οι παραμορφώσεις στη βάση της ασφαλτικής στρώσης κυμάνθηκαν από 1.700 έως 3.500 microstrain, ενώ οι αντίστοιχες παραμορφώσεις στον πυθμένα της σταθεροποιημένης βάσης στον πυθμένα της σταθεροποιημένης βάσης στον πυθμένα της σταθεροποιημένης βάσης του προφορια και 1.700 microstrain. Η έρευνα αυτή κατέδειξε επίσης τη μη-

γραμμικά ελαστική συμπεριφορά των υλικών των στρώσεων βάσης–υπόβασης και στρώσης έδρασης.

Οι Garg και Hayhoe (2001), με βάση τα αποτελέσματα των ίδιων δοκιμών (φορτίο κινούμενο με χαμηλές ταχύτητες της τάξης των 0,5 km/h), παρατήρησαν μέγιστες τιμές παραμορφώσεων στην περιοχή των 500 έως 2.000 microstrain, για τη βάση της ασφαλτικής στρώσης στο εύκαμπτο δάπεδο HFC με στρώση έδρασης CBR 20. Γενικά οι τιμές των μετρημένων παραμορφώσεων βρέθηκαν δύο έως τρείς φορές μεγαλύτερες από τις τιμές που υπολογίστηκαν με διάφορα λογισμικά, που βασίζονται στη θεώρηση των ελαστικών στρώσεων. Για να διερευνήσουν το θέμα περαιτέρω, οι Garg και Hayhoe διενήργησαν πρόσθετους ελέγχους στα εύκαμπτα δάπεδα συμβατικής βάσης-υπόβασης και σταθεροποιημένης βάσης, που κατασκευάστηκαν σε στρώση έδρασης υψηλής φέρουσας ικανότητας (CBR 20). Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν φορτίσεις (20-4-00 και 23-6-00) με ταχύτητες από 0,3 km/h έως 8,0 km/h, με διάφορα φορτία τροχού (106,8, 133,5 και 160,2 kN) και υπό διαφορετικές θερμοκρασίες δαπέδου (11,1°C και 22,2°C). Σημειώνεται ότι η ταχύτητα των 8,0 km/h είναι η ταχύτητα με την οποία πραγματοποιήθηκαν οι έλεγχοι κατά τη δεύτερη φάση των πειραμάτων στη NAPTF (συστηματική καταπόνηση των δαπέδων με επαναλαμβανόμενο κυκλοφοριακό φόρτο - trafficking tests). Παρατήρησαν σαφή μείωση των καταγεγραμμένων παραμορφώσεων με την αύξηση της ταχύτητας διέλευσης του φορτίου. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι, για αύξηση της ταχύτητας διέλευσης από 0,3km/h σε 8,0km/h για ένα δεδομένο φορτίο, παρατηρήθηκε μείωση της παραμόρφωσης κατά 50% έως 55%. Αντίστοιχα, η αύξηση της θερμοκρασίας του ασφαλτοσκυροδέματος (στο μέσο του πάχους της ασφαλτικής στρώσης) από 11,1°C σε 22,2°C είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση των παραμορφώσεων κατά 100% έως 120%, ανάλογα με το μέγεθος του φορτίου και την ταχύτητα διέλευσης.

Οι Gopalakrishnan και Thompson (2006) προχώρησαν σε προτυποποίηση των δαπέδων της NAPTF, με τη βοήθεια του λογισμικού αξονοσυμμετρικής προσομοίωσης δύο διαστάσεων ILLI-PAVE, που βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Μέσω των προτύπων αυτών υπολόγισαν αναλυτικά τις οριζόντιες παραμορφώσεις στις ασφαλτικές στρώσεις των δαπέδων. Αξίζει να σημειωθεί, ότι τα υλικά των ασφαλτικών στρώσεων θεωρήθηκαν γραμμικώς ελαστικά υλικά, ενώ για τα υλικά των στρώσεων βάσης-υπόβασης και στρώσης έδρασης υιοθετήθηκε το πρότυπο του μη-γραμμικώς ελαστικού υλικού με κριτήριο αστοχίας κατά Mohr-Coulomb. Στη συνέχεια συνέκριναν τα αποτελέσματα του προτύπου με τις τιμές των καταγεγραμμένων παραμορφώσεων κατά τις δοκιμαστικές φορτίσεις της δεύτερης φάσης των πειραμάτων στη NAPTF (συστηματική καταπόνηση των δαπέδων με επαναλαμβανόμενο κυκλοφοριακό φόρτο - trafficking tests).

Γενικά, για τα αρχικά στάδια της καταπόνησης, διαπιστώθηκε καλή συμφωνία μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών των παραμορφώσεων. Στα δάπεδα με συμβατική βάση-υπόβαση, οι υπολογισμένες τιμές των παραμορφώσεων βρέθηκαν υψηλότερες από τις αντίστοιχες των μετρημένων. Το αντίθετο παρατηρήθηκε στα δάπεδα με σταθεροποιημένη βάση. Σε γενικές γραμμές επίσης, και οι δύο τύποι φορείων τροχών (B-777 και B-747) είχαν σαν αποτέλεσμα ισοδύναμες τιμές παραμορφώσεων. Τέλος, παρατηρήθηκε δραματική αύξηση των παραμορφώσεων καθώς τα δάπεδα πλησίασαν το σημείο της δομικής αστοχίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι, ενώ τα εύκαμπτα δάπεδα, επί της στρώσης έδρασης με μέση φέρουσα ικανότητα CBR 8, θεωρήθηκε ότι αστόχησαν στη στρώση έδρασης, σύμφωνα με τα κριτήρια του Σώματος Μηχανικών των ΗΠΑ (Ahlvin et al., 1971), τα εύκαμπτα δάπεδα επί της στρώσης έδρασης με CBR 4, αστόχησαν λόγω κόπωσης των ασφαλτικών στρώσεων (ρηγμάτωση της ασφαλτικής στρώσης).

Οι Donavan και Tutumluer (2007) προχώρησαν στη διερεύνηση της επίδρασης, που έχει στην καταπόνηση των δαπέδων των αεροδρομίων η διαφοροποίηση του ίχνους διέλευσης του φορτίου (wander), σε σχέση με την κίνηση του φορτίου επί σταθερού ίχνους. Πιο συγκεκριμένα, μελέτησαν τα αποτελέσματα των πειραματικών φορτίσεων στη NAPTF, όπου οι δοκιμαστικές φορτίσεις πραγματοποιήθηκαν στη βάση ενός προδιαγεγραμμένου μεταβλητού ίχνους διέλευσης του φορτίου, που προσομοίαζε την πραγματική φόρτιση κατά την κίνηση των αεροσκαφών στο δάπεδο του αεροδρομίου. Παρά το ότι η υπόψη έρευνα ασχολήθηκε αποκλειστικά με την παραμένουσα (κατακόρυφη) παραμόρφωση των δαπέδων και δεν παρέχει στοιχεία για την οριζόντια παραμόρφωση στη βάση της ασφαλτικής στρώσης, γίνεται αναφορά της στην παρούσα εργασία δεδομένου ότι είναι από τις ελάχιστες προσπάθειες προσέγγισης του θέματος των επιπτώσεων που έχει η διαφοροποίηση του ίχνους διέλευσης του φορτίου (wander) στην καταπόνηση των δαπέδων. Συνοπτικά αξίζει να αναφερθεί, ότι σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας, η φόρτιση με κυμαινόμενο ίχνος δημιουργεί μια αρκετά σύνθετη εντατική κατάσταση στο δάπεδο, με εναλλαγή καταστάσεων συμπύκνωσης (θλιπτική καταπόνηση) και διαστολής (εφελκυστική καταπόνηση), καθ' όλη την εγκάρσια διάσταση του δαπέδου, η οποία είναι ιδιαίτερα έντονη στις στρώσεις της βάσης και της υπόβασης. Το αποτέλεσμα είναι να παρατηρείται μια μικρότερη του αναμενομένου παραμένουσα παραμόρφωση, αλλά η συνολική καταπόνηση του οδοστρώματος να προσομοιάζει σε μια εντατική κατάσταση έντονης κόπωσης, η οποία μειώνει σταδιακά τη δομική σταθερότητα του δαπέδου.

### 2.3 Εκτίμηση φέρουσας ικανότητας οδοστρωμάτων

Είναι γενικά αποδεκτό από τη σχετική βιβλιογραφία (Gopalakrishnan και Thompson, 2004), ότι τα μέτρα ελαστικότητας των διακριτών στρώσεων των δαπέδων των αεροδρομίων, όπως αυτά υπολογίζονται με τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού των τιμών από τις δοκιμές με FWD, είναι ικανοποιητικοί δείκτες της κατάστασης των στρώσεων των δαπέδων Για παράδειγμα, η μείωση του μέτρου ελαστικότητας στις στρώσεις ασφαλτοσκυροδέματος, συνδέεται με την ανάπτυξη φαινομένων ρηγμάτωσης και απώλειας συνεκτικότητας μεταξύ των αδρανών του ασφαλτοσκυροδέματος. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού των τιμών από το μότρων ελαστικότητας στις στρώσεις ασφαλτοσκυροδέματος, συνδέεται με την ανάπτυξη φαινομένων ρηγμάτωσης και απώλειας συνεκτικότητας μεταξύ των αδρανών του ασφαλτοσκυροδέματος. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού ενός καταπονημένου δαπέδου με αυτά ενός ακέραιου δαπέδου, μπορούν να εκτιμηθούν η κατάσταση ή ο βαθμός της καταπόνησης στην οποία το δάπεδο έχει ήδη υποβληθεί. Αρκετοί ερευνητές προτείνουν ότι ένα δάπεδο θα πρέπει να θεωρηθεί ότι έχει αστοχήσει, όταν το μέτρο ελαστικότητας μειωθεί περισσότερο από το 50% της αρχικής τιμής του (Sharp and Johnson-Clarke, 1997). Επίσης, το μέτρο ελαστικότητας των στρώσεων είναι προαπαιτούμενο δεδομένο για τον υπολογισμό των δαπέδων με βάση τη θεωρία των ελαστικών στρώσεων.

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο της Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας των ΗΠΑ (FAA) για την αξιοποίηση των μη-καταστρεπτικών μεθόδων στην αξιολόγηση των δαπέδων των αεροδρομίων (FAA, 2011), τα περισσότερα από τα λογισμικά υπολογισμού των δαπέδων των αεροδρομίων χρησιμοποιούν στατικά δομικά μοντέλα. Αντίθετα, τόσο τα αεροσκάφη, όσο και οι συσκευές μη-καταστρεπτικών ελέγχων επιβάλουν στα δάπεδα μια δυναμική φόρτιση. Κατά συνέπεια είναι συνήθως απαραίτητο να γίνονται κάθε φορά προσαρμογές στα δεδομένα, που θα χρησιμοποιηθούν στα εργαλεία υπολογισμού των δαπέδων.

Αναφορικά με τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού των μέτρων ελαστικότητας των στρώσεων ενός δαπέδου, είναι σκόπιμο να επιλέγεται για τον ανάστροφο υπολογισμό μια μέθοδος που να βασίζεται στο ίδιο θεωρητικό υπόβαθρο με τη μέθοδο σχεδιασμού, που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για το υπολογισμό του δαπέδου (FAA, 2011). Για παράδειγμα, αν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του δαπέδου μια μέθοδος βασισμένη στη θεωρία των ελαστικών στρώσεων, τότε η μεθοδολογία του ανάστροφου υπολογισμού, που θα χρησιμοποιηθεί, θα πρέπει να βασίζεται στο ίδιο θεωρητικό υπόβαθρο (π.χ. λογισμικό BAKFAA).

Οι McQueen, Marsey και Arze (2001) αξιοποίησαν τα αποτελέσματα μιας σειράς ελέγχων με παραμοσφωσίμετρο πίπτοντος βάρους, που πραγματοποιήθηκαν στην

εγκατάσταση της NAPTF αμέσως μετά την ολοκλήρωση των εργασιών κατασκευής της και πριν την έναρξη των δοκιμών φόρτισης, με σκοπό να αξιολογήσουν το λογισμικό ανάστροφου υπολογισμού BAKFAA της FAA. Πιο συγκεκριμένα, προχώρησαν στον ανάστροφο υπολογισμό των μέτρων ελαστικότητας των υλικών όλων των στρώσεων των πειραματικών δαπέδων της NAPTF, με δεδομένα τα δομικά χαρακτηριστικά τους, καθ' ότι τα δάπεδα είχαν μόλις κατασκευαστεί και δεν είχε ακόμη επιβληθεί φόρτιση. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι τα μεγέθη των υπολογισμένων μέτρων ελαστικότητας είναι μάλλον ανεξάρτητα από το φορτίο δοκιμής των ελέγχων FWD, ενώ γενικά τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού με το λογισμικό BAKFAA προέκυψαν σε συμφωνία με αυτά του προγράμματος WESDEF. Τέλος, τα αποτελέσματα για τη στρώση έδρασης έδειξαν ότι η εξίσωση *E* (*psi*) = 1500 x CBR, με την οποία εκτιμάται εμπειρικά το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης, λειτουργεί ικανοποιητικά για το εύρος τιμών 3 < CBR < 20.

Οι Gopalakrishnan και Thompson (2004) χρησιμοποίησαν τα αποτελέσματα των μηκαταστρεπτικών ελέγχων που πραγματοποιήθηκαν στην εγκατάσταση της NAPTF (δοκιμές με FWD) κατά τη διάρκεια των ελέγχων πραγματικού κυκλοφοριακού φόρτου (trafficking tests) και υπολόγισαν με τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού τα μέτρα ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων και στρώσεων έδρασης των δαπέδων. Το αντικείμενο της έρευνας ήταν η μελέτη της μεταβολής των μέτρων ελαστικότητας ως συνάρτηση της κυκλοφορίας. Για τον ανάστροφο υπολογισμό χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά ILLI-PAVE (2D λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων, University of Illinois), WESDEF (U.S. Army-Van Cauwelaert et al, 1989) και BAKFAA (FAA) και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτά, τα μεγέθη των υπολογισμένων μέτρων ελαστικότητας με τους τρείς διαφορετικούς αλγόριθμους εμφανίζουν ικανοποιητική συσχέτιση μεταξύ τους. Τα μέτρα ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων παρουσίασαν σημαντική εξάρτηση από τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Θα πρέπει εδώ να επισημανθεί ότι παρατηρήθηκε ασήμαντη μεταβολή της θερμοκρασίας του ασφαλτοσκυροδέματος ως προς το βάθος (limited depth effect), γεγονός που δικαιολογείται επαρκώς από το ότι η εγκατάσταση της NAPTF είναι στεγασμένη. Ήταν χαρακτηριστική η σημαντική μείωση του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτοσκυροδέματος στα δάπεδα με συμβατική βάση, ως συνάρτηση της κυκλοφορίας. Τέλος, στο δάπεδο συμβατικής βάσης και στρώσης έδρασης με CBR 8, τα μεγέθη των υπολογισμένων μέτρων δυσκαμψία του ασφαλτοσκυροδέματος για το τμήμα, που καταπονήθηκε με τη διαμόρφωση τροχών του Β-747 ήταν συστηματικά χαμηλότερα από τα αντίστοιχα του τμήματος, που καταπονήθηκε με τη διαμόρφωση τροχών

του B-777, υποδεικνύοντας έτσι τη δυσμενέστερη εντατική κατάσταση που δημιουργεί η διαμόρφωση τροχών του B-747.

Οι ίδιοι ερευνητές (Gopalakrishnan, Thompson και Manik, 2004) επέκτειναν την έρευνα επί των μεθόδων του ανάστροφου υπολογισμού των μέτρων ελαστικότητας των στρώσεων των δαπέδων των αεροδρομίων, λαμβάνοντας υπόψη τις διαπιστώσεις προηγούμενων ερευνητών περί μη-γραμμικά ελαστικής συμπεριφοράς των υλικών των δαπέδων της NAPTF (Gomez-Ramirez και Thompson, 2002) και εξάρτησης της συμπεριφοράς των στρώσεων των αδρανών υλικών (βάσης-υπόβασης) από το μέγεθος των αναπτυσσόμενων τάσεων (Garg και Marsey, 2002). Πιο συγκεκριμένα, έκαναν προσπάθεια να αναπτύξουν έναν αλγόριθμο Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου (Atificial Neural Network, ANN) για τη μη-γραμμική μοντελοποίηση της διαδικασίας του ανάστροφου υπολογισμού. Η αξιολόγηση του αλγόριθμου έγινε με βάση τα αποτελέσματα των μη-καταστρεπτικών ελέγχων που πραγματοποιήθηκαν στην εγκατάσταση της NAPTF (δοκιμές με FWD). Τα αποτελέσματα της έρευνας θεωρήθηκαν επιτυχή για την εκτίμηση των μέτρων ελαστικότητας των αδρανών υλικών στρώσεων και στρώσεων έδρασης, όχι όμως για το υλικό των στρώσεων των αδρανών μοι καταστος για το υλικό των στρώσεων των αδρανώς εδου ματολογισμού.

### 2.4 Προσομοίωση ευκάμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων με 3D πρότυπα

Ο Kim (2007) και στη συνέχεια οι Kim, Tutumluer και Mishra (2008) χρησιμοποίησαν τα δεδομένα των μετρήσεων από τις πειραματικές φορτίσεις κυκλοφορίας (trafficking tests) της NAPTF για να τεκμηριώσουν τα αναλυτικά αποτελέσματα των τρισδιάστατων προτύπων, που κατέστρωσαν με βάση τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των δαπέδων της NAPTF. Τα πρότυπα αυτά προγραμματίστηκαν μέσω του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Στα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν μη-γραμμικά, ελαστικά πρότυπα για τα υλικά των στρώσεων βάσης-υπόβασης και στρώσης έδρασης ενώ η επιφανειακή στρώση ασφαλτικού σκυροδέματος θεωρήθηκε γραμμικά ελαστική. Τα στοιχεία (elements) που χρησιμοποιήθηκαν ήταν παραβολικά εξαεδρικά στοιχεία είκοσι (20) κόμβων.

Από τις παραπάνω έρευνες δεν δημοσιοποιούνται στοιχεία για τα αποτελέσματα της σχέσης μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων οριζόντιων παραμορφώσεων στη βάση της ασφαλτικής στρώσης. Δημοσιοποιούνται όμως πολλά στοιχεία για τις αναπτυσσόμενες τάσεις και τις κατακόρυφες παραμορφώσεις στη στρώση έδρασης και την ασφαλτική στρώση. Σε γενικές γραμμές, οι προβλέψεις του προτύπου μη-γραμμικής ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία, συμφωνούν ικανοποιητικά με τις μετρούμενες αποκρίσεις των δοκιμαστικών διατομών. Τα αποτελέσματα έρχονταν σε καλύτερη συμφωνία στις διατομές

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2° : ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΕ ΕΥΚΑΜΠΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ

ευκάμπτων δαπέδων, συμβατικής βάσης με στρώση έδρασης μέσης φέρουσας ικανότητας (CBR 8), απ' ότι στις αντίστοιχες διατομές ευκάμπτων δαπέδων, συμβατικής βάσης με στρώση έδρασης χαμηλής φέρουσας ικανότητας (CBR 4). Διαπιστώθηκε μια τάση οι μετρημένες τιμές να είναι υψηλότερες των προβλεπόμενων από το λογισμικό. Η διαφορά αυτή πιθανολογείται ότι μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η φόρτιση των πειραματικών δοκιμών είναι δυναμικό φαινόμενο, ενώ το αναλυτικό πρότυπο λαμβάνει υπόψη του στατικά φορτία. Πέραν αυτού, οι προβλεπόμενες από το αναλυτικό πρότυπο αποκρίσεις, δεδομένης της συμμετρίας των φορτίσεων των τροχών, παρέχουν ίδιες τιμές μεγεθών για την πρώτη και την τελευταία μέγιστη τιμή (πρώτος και τελευταίος άξονας φορείου τροχών), γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με τις αντίστοιχες, πειραματικά μετρημένες, αποκρίσεις.

Ο Mojarrad (2011), στο πλαίσιο της διερεύνησης της επίδρασης διαφορετικών διαμορφώσεων και αποτυπωμάτων τροχών επί των δαπέδων των αεροδρομίων, ανέπτυξε τρισδιάστατα πρότυπα των εξεταζόμενων δαπέδων και στη συνέχεια τα αξιολόγησε χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των μετρήσεων από τις πειραματικές φορτίσεις κυκλοφορίας (trafficking tests) της NAPTF. Η προσέγγιση έγινε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, ενώ για τον προγραμματισμό των προτύπων αυτών χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Στα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν μη-γραμμικά, ελαστικά πρότυπα για τα υλικά των στρώσεων βάσης και υπόβασης, ενώ τα υλικά της επιφανειακής στρώσης ασφαλτοσκυροδέματος και της στρώσης έδρασης θεωρήθηκαν γραμμικά ελαστικά. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι τα υπολογισμένα μεγέθη από τα 3D πρότυπα ήταν γενικά σε ικανοποιητική συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα της NAPTF.

Γενικά, κατά τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται σημαντική προσπάθεια προς την κατεύθυνση της προτυποποίησης της συμπεριφοράς των μη-συνεκτικών υλικών των στρώσεων βάσης-υπόβασης και της στρώσης έδρασης, τα οποία εμφανίζουν και τη μεγαλύτερη δυσκολία προσομοίωσης.

## 3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

### 3.1 Διερεύνηση συμπεριφοράς ευκάμπτων οδοστρωμάτων

#### 3.1.1 Βασικές θεωρίες υπολογισμού ευκάμπτων οδοστρωμάτων

### 3.1.1.1 Ελαστικός ημιχώρος - Boussinesq

Ο υπολογισμός των τάσεων που αναπτύσσονται σε ένα οδόστρωμα επιτυγχάνεται με διάφορες θεωρίες αναλόγως του αριθμού των στρώσεων που συνθέτουν το οδόστρωμα. Στα εύκαμπτα οδοστρώματα χρησιμοποιείται κυρίως η θεωρία του ελαστικού, ομογενούς και ισότροπου ημιχώρου (Boussinesq), καθώς και η θεωρία των πολλαπλών ελαστικών στρώσεων εδραζομένων επί ελαστικού εδαφικού ημιχώρου (Burmister) (Λοΐζος, 2011).

Η θεωρία Boussinesq αποτελεί τη βάση ανάπτυξης όλων των μεταγενέστερων θεωριών για κατανομές τάσεων. Σύμφωνα με τον Boussinesq για ανελαστικό, ομογενές και ισότροπο υλικό, του οποίου η μάζα εκτείνεται στο άπειρο και κατά τις δύο διευθύνσεις (οριζόντια και κατακόρυφη), οι τάσεις που εξασκούνται σε οποιοδήποτε σημείο υπό την επίδραση σημειακού φορτίου μπορούν να υπολογιστούν από τις παρακάτω θεμελιώδης εξισώσεις (Λοΐζος, 2011):



Εικόνα 3.1: Αναπτυσσόμενες τάσεις κατά Boussinesq - Σημειακό φορτίο

- 30 -

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi R^2} \sigma \upsilon v^3 \theta , \qquad \qquad \forall i \alpha \ \theta = 0 \qquad \sigma_z = \frac{3P}{2\pi z^2} \quad (R = z) \qquad (3.1)$$

$$\sigma_r = \frac{P}{2\pi R} \left( \frac{3\sigma \upsilon \nu \theta \eta \mu^2 \theta - (1 - 2\nu)}{1 + \sigma \upsilon \nu \theta} \right)$$
(3.2)

$$\sigma_{t} = \frac{P}{2\pi R^{2}} \left( 1 - 2\nu \right) \left( \frac{-\sigma \nu \nu \theta + 1}{1 + \sigma \nu \nu \theta} \right)$$
(3.3)

$$\varepsilon_{z} = \frac{(1+\nu)P}{2\pi R^{2}E} \left( 3\sigma \nu v^{3}\theta - 2\nu\sigma \nu v\theta \right), \quad \forall \alpha \theta = 0 \qquad \varepsilon_{z} = (1+\nu)(3-2\nu)\frac{P}{2\pi z^{2}E}$$
(3.4)

$$w_{z} = (1+\nu)\frac{P}{2\pi RE} (2(1-\nu)+\sigma \nu \nu^{2}\theta)$$
(3.5)

όπου:

- $σ_z$ : η κατακόρυφη τάση
- ε<sub>z</sub>: η κατακόρυφη παραμόρφωση
- σ<sub>r</sub>: η ακτινική οριζόντια τάση
- ε<sub>r</sub>: η ακτινική οριζόντια παραμόρφωση
- σ<sub>t</sub>: η εφαπτομενική οριζόντια τάση
- ε<sub>t</sub>: η εφαπτομενική οριζόντια παραμόρφωση
- *w<sub>z</sub>* : η υποχώρηση

Στην περίπτωση που εξασκείται ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο οι αντίστοιχες τάσεις εξάγονται από ολοκλήρωση των παραπάνω σχέσεων. Για την ειδική περίπτωση επιβολής ενός ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου κυκλικής διατομής (η διατομή που λαμβάνεται σε φορτίσεις οδοστρωμάτων), οι τάσεις σε οποιοδήποτε βάθος *z* πάνω στον άξονα συμμετρίας της επιφάνειας φόρτισης δίνονται από τις σχέσεις που ακολουθούν (Λοΐζος, 2011):



Εικόνα 3.2: Κατακόρυφες και οριζόντιες τάσεις από κυκλικό φορτίο στον άξονα συμμετρίας

Στον κατακόρυφο άξονα διά του κέντρου του φορτίου

$$\sigma_{z} = p \left( 1 - \frac{1}{\left( 1 + \left( \frac{a}{z} \right)^{2} \right)^{\frac{3}{2}}} \right)$$
(3.6)  
$$\varepsilon_{z} = \frac{p(1+\nu)}{E} \left( \frac{\frac{z}{a}}{\left( 1 + \left( \frac{z}{a} \right)^{2} \right)^{\frac{3}{2}}} - (1 - 2\nu) \left( \frac{\frac{z}{a}}{\left( 1 + \left( \frac{z^{2}}{a} \right)^{\frac{1}{2}}} - 1 \right) \right)$$
(3.7)  
$$\sigma_{z} = \sigma_{r} = p \left( \frac{1 + 2\nu}{2} - \frac{1 + \nu}{\left( 1 + \left( \frac{a}{z} \right)^{2} \right)^{\frac{1}{2}}} + \frac{1}{2\left( 1 + \left( \frac{a}{z} \right)^{2} \right)^{\frac{3}{2}}} \right)$$
(3.8)

$$\varepsilon_t = \varepsilon_r = \frac{1}{E} \left( \frac{1 - \nu}{2\nu} (\sigma_z - E\varepsilon_z) - \nu \sigma_z \right)$$
(3.9)

$$w_{z} = \frac{(1+\nu)pa}{E} \left( \frac{1}{\left(1+\left(\frac{z}{a}\right)^{2}\right)^{\frac{1}{2}}} + \left(1-2\nu\right) \left( \left(1+\left(\frac{z}{a}\right)^{2}\right)^{\frac{1}{2}} - \frac{z}{a} \right) \right)$$
(3.10)

όπου:

- $σ_z$ : η κατακόρυφη τάση
- ε.: η κατακόρυφη παραμόρφωση
- σ<sub>r</sub>: η ακτινική οριζόντια τάση
- ε<sub>r</sub>: η ακτινική οριζόντια παραμόρφωση
- σ<sub>t</sub>: η εφαπτομενική οριζόντια τάση
- ε<sub>t</sub>: η εφαπτομενική οριζόντια παραμόρφωση

*w*<sub>z</sub>: η υποχώρηση

#### 3.1.1.2 Συστήματα επάλληλων στρώσεων – Burmister

Η μετάβαση από τη θεωρία του ελαστικού ημιχώρου (Boussinesq) στη θεωρία δύο ή τριών επάλληλων στρώσεων ενός οδοστρώματος βασίζεται στη θεμελιώδη αρχή των γραμμικώς ελαστικών μέσων (Burmister). Τα συνηθισμένα εύκαμπτα οδοστρώματα αποτελούνται από στρώσεις, ώστε τα μέτρα ελαστικότητας να ελαττώνονται με το βάθος. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση των τάσεων και των υποχωρήσεων στο υπέδαφος σε σχέση με τις τιμές που προκύπτουν σε ιδεατό ομοιογενές μέσο.

Λύσεις του προβλήματος με συνθήκες που προσεγγίζουν τις πραγματικές έχουν επιτευχθεί από τον Burmister. Κατά τη λύση του προβλήματος δύο στρώσεων γίνονται ορισμένες αναγκαίες παραδοχές σχετικά με τις οριακές συνθήκες και τις συνθήκες συνέχειας. Τα υλικά των στρώσεων υποτίθεται ότι είναι ομοιογενή, ισότροπα και ελαστικά. Η επιφανειακή στρώση υποτίθεται ότι εκτείνεται πλευρικά μέχρι το άπειρο ενώ το βάθος είναι πεπερασμένο. Η υποκείμενη στρώση υποτίθεται ότι εκτείνεται μέχρι το άπειρο πλευρικά και κατακόρυφα.



Εικόνα 3.3: Στατικό πρότυπο της θεωρίας του συστήματος των επάλληλων στρώσεων (Burmister).

Οι οριακές συνθήκες και οι συνθήκες συνέχειας επιβάλλουν οι στρώσεις να είναι σε συνεχή επαφή και η επιφανειακή στρώση να μην υπόκειται σε διατμητικές και ορθές τάσεις εκτός περιοχής φόρτισης. Το στατικό πρότυπο στο οποίο βασίζεται η θεωρία του συστήματος των επάλληλων στρώσεων (Burmister) φαίνεται στην Εικόνα 3.3.

### 3.1.1.3 Γενικευμένο ελαστικό σύστημα πολλαπλών στρώσεων

Η γενική μορφή ενός ελαστικού συστήματος πολλαπλών στρώσεων απεικονίζεται στην εικόνα 3.4:



Εικόνα 3.4: Γενικευμένο ελαστικό σύστημα πολλαπλών στρώσεων

- 34 -
Η αναλυτική λύση της κατάστασης τάσης ή παραμόρφωσης, στηρίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

- Το υλικό κάθε στρώσης είναι ομογενές, δηλαδή η ιδιότητα στο σημείο *Ai* είναι η ίδια όπως στο σημείο *Bi*.
- Κάθε στρώση έχει πεπερασμένο πάχος εκτός από την κατώτερη στρώση και όλες έχουν άπειρη πλευρική διάσταση.
- Κάθε στρώση είναι ισότροπη, δηλαδή η ιδιότητα σε ένα σημείο Αi είναι ίδια σε κάθε διεύθυνση ή προσανατολισμό.
- Στις διαχωριστικές επιφάνειες των στρώσεων αναπτύσσεται πλήρης τριβή.
- Δεν υπάρχουν διατμητικές δυνάμεις στην επιφάνεια.
- Οι λύσεις των τάσεων χαρακτηρίζονται από δύο ιδιότητες του υλικού για κάθε στρώση, οι οποίες είναι ο λόγος του Poisson v και το μέτρο ελαστικότητας Ε.

Από τη θεωρία φαίνεται ότι σε ένα σημείο μιας οποιασδήποτε στρώσης, αναπτύσσονται 9 τάσεις. Οι τάσεις αυτές περιλαμβάνουν 3 ορθές τάσεις ( $\sigma_z$ ,  $\sigma_r$ ,  $\sigma_t$ ) που ενεργούν κάθετα στις έδρες του στοιχείου και 6 διατμητικές τάσεις ( $\tau_{rt}$ ,  $\tau_{tr}$ ,  $\tau_{rz}$ ,  $\tau_{zr}$ ,  $\tau_{tz}$ ,  $\tau_{zt}$ ),που ενεργούν παράλληλα προς τις έδρες. Οι συνθήκες στατικής ισορροπίας του στοιχείου δείχνουν ότι οι διατμητικές τάσεις σε δύο τεμνόμενες έδρες είναι ίσες. Έτσι  $\tau_{rz} = \tau_{zr}$ ,  $\tau_{rt} = \tau_{tr}$ ,  $\tau_{tz} = \tau_{zt}$ . Σε κάθε σημείο του συστήματος υπάρχει ένας ορισμένος προσανατολισμός του στοιχείου, τέτοιος ώστε οι διατμητικές τάσεις που ενεργούν σε κάθε έδρα είναι μηδέν. Κάτω από αυτές τις συνθήκες οι ορθές τάσεις χαρακτηρίζονται σαν κύριες τάσεις.

## 3.1.2 Εντατική κατάσταση ευκάμπτου οδοστρώματος

Κατά τη διέλευση ενός τροχού από ένα σημείο του οδοστρώματος η επιφάνεια επαφής μεταβάλλεται συνεχώς από μία ελάχιστη τιμή σε μία μέγιστη, ενώ στη συνέχεια παίρνει πάλι μια ελάχιστη τιμή. Ανάλογα λοιπόν με την πιο πάνω διαδικασία έχουμε τη φόρτιση του οδοστρώματος η οποία φτάνει σε μία μέγιστη τιμή και ακολουθεί η αποφόρτιση. Σε κάθε επανάληψη της φόρτισης, δηλαδή σε κάθε διέλευση του τροχού από ένα σημείο της διατομής ενός οδοστρώματος οι αναπτυσσόμενες τάσεις μεταβάλλονται όπως φαίνεται στην εικόνα 3.5.



Εικόνα 3.5: Μεταβολή των τάσεων που αναπτύσσονται σε ένα τυχαίο σημείο κατά τη διάρκεια διέλευσης φορτίου.

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζονται ποιοτικά οι τάσεις που αναπτύσσονται σε ένα σημείο του οδοστρώματος κατά τη διάρκεια της διελεύσεως ενός τροχού. Παρατηρείται ότι γενικά οι κατακόρυφες και οι οριζόντιες τάσεις μεταβάλλονται κατά παρόμοιο τρόπο με τη διαφορά ότι το κύμα φορτίσεως για τις οριζόντιες τάσεις είναι μεγαλύτερο με μικρότερη ένταση από το κύμα των κατακόρυφων τάσεων και συνήθως παρουσιάζει τάσεις εφελκυσμού στο κάτω μέρος των δύσκαμπτων στρώσεων. Η διατμητική τάση παρουσιάζει μια αντιστροφή του προσήμου (θλίψη-εφελκυσμός) στο σημείο όπου ο τροχός διέρχεται πάνω από το σημείο. Η κρίσιμη θέση φόρτισης για το κινούμενο φορτίο Α είναι η χαρακτηριστική θέση Β (κατακόρυφος άξονας), όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 3.6. Στη θέση αυτή οι ορθές τάσεις μετατρέπονται σε κύριες ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ ).



Εικόνα 3.6: Κρίσιμη θέση φόρτισης οδοστρώματος



Εικόνα 3.7: Κρίσιμες θέσεις εύκαμπτου οδοστρώματος

Οι κρίσιμες θέσεις για την εντατική κατάσταση ενός εύκαμπτου οδοστρώματος είναι ο πυθμένας των ασφαλτικών στρώσεων και η επιφάνεια της στρώσης έδρασης (εικόνα 3.7). Τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στις θέσεις αυτές είναι οι εφελκυστικές τάσεις και παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων και οι κατακόρυφες τάσεις και παραμορφώσεις στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης. Κατά συνέπεια, τα κριτήρια αστοχίας του εύκαμπτου οδοστρώματος είναι:

σ<sub>r1</sub>, ε<sub>r1</sub> : κριτήρια για την αντοχή σε ρηγμάτωση του ασφαλτοσκυροδέματος

σ<sub>Z3</sub>, ε<sub>Z3</sub> : κριτήρια για την αστοχία-παραμορφωσιμότητα της στρώσης έδρασης

#### 3.1.3 Υπολογισμός τάσεων - παραμορφώσεων

#### 3.1.3.1 Αναλυτικές μέθοδοι

Η αύξηση του αριθμού των στρώσεων πολλαπλασιάζει τις δυσκολίες προσδιορισμού των τάσεων και παραμορφώσεων, με αποτέλεσμα να είναι σχεδόν αδύνατη η ύπαρξη νομογραφημάτων ή πινάκων που να καλύπτουν όλους τους δυνατούς συνδυασμούς μεταβολής των χαρακτηριστικών των στρώσεων. Εάν στην παραπάνω δυσκολία προστεθεί και ο πραγματικός τρόπος φόρτισης των οδοστρωμάτων (περισσότερες από μία επιφανειακές φορτίσεις, δίδυμοι τροχοί, διαξονικοί δίδυμοι τροχοί κ.λπ.), τότε είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο να υπολογιστούν οι τάσεις και οι παραμορφώσεις από πίνακες ή νομογραφήματα.

Συνήθως για τον υπολογισμό των τάσεων και παραμορφώσεων ενός εύκαμπτου οδοστρώματος χρησιμοποιείται η γραμμική θεωρία των πολλαπλών ελαστικών στρώσεων. Η παραδοχή ότι τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των εύκαμπτων οδοστρωμάτων έχουν ελαστική γραμμική συμπεριφορά, απέχει πολύ από την πραγματικότητα. Αυτό ισχύει μόνο όταν οι τάσεις και οι παραμορφώσεις είναι μάλλον περιορισμένες. Στην πραγματικότητα τα ασφαλτικά σκυροδέματα έχουν βισκοελαστική (ιξοελαστική) συμπεριφορά και τα ασύνδετα υλικά εξαρτώνται από τις αναπτυσσόμενες τάσεις.

Στις αναλυτικές μεθόδους χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως λογισμικά ηλεκτρονικού υπολογιστή, τα οποία βασίζονται στη θεωρία των πολλαπλών στρώσεων και χρησιμοποιούνται τόσο για εύκαμπτα όσο και για δύσκαμπτα οδοστρώματα. Ένα γνωστό πρόγραμμα για τον υπολογισμό εύκαμπτου οδοστρώματος είναι το KENLAYER. Η βάση του KENLAYER είναι η επίλυση ενός συστήματος πολλαπλών στρώσεων υπό φορτίο κατανεμημένο σε κυκλική επιφάνεια επαφής. Οι επιλύσεις υπερτίθενται για πολλαπλούς

τροχούς, εφαρμόζονται επαναληπτικά για μη-γραμμικές στρώσεις και παρατίθενται σε διάφορες χρονικές στιγμές για βισκοελαστικές στρώσεις. Το KENLAYER μπορεί να εφαρμοστεί σε συστήματα επάλληλων στρώσεων υπό μονό, δίδυμο ή τρίδυμο άξονα με ένα ή δύο ελαστικούς τροχούς εκατέρωθεν, με κάθε στρώση να συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά, ή μη-γραμμικώς ελαστικά, ή βισκοελαστικά (Huang, 2004). Αντίστοιχο λογισμικό αποτελεί το πρόγραμμα H/Y FAARFIELD (FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design), που αποτελεί εξέλιξη της πλέον γνωστής μεθοδολογίας διαστασιολόγησης δαπέδων αεροδρομίων, της μεθόδου FAA, της Ομοσπονδιακής Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας των ΗΠΑ, η οποία δημοσιεύτηκε στην αρχική της μορφή το 1958 και εξελίσσεται συνεχώς μέχρι σήμερα. Για τον υπολογισμό ενός οδοστρώματος με τη μέθοδο της FAA, λαμβάνεται υπόψη η αθροιστική φθορά που προκαλούν τα αεροσκάφη που δέχεται το οδόστρωμα, στις κρίσιμες θέσεις του οδοστρώματος (Λοϊζος 2011).

## 3.1.3.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία τεχνική αριθμητικής ανάλυσης για την εύρεση προσεγγιστικών λύσεων σε μία ποικιλία προβλημάτων. Σε ένα πρόβλημα που αφορά μία συνεχή μάζα, οι μεταβλητές που μας ενδιαφέρουν λαμβάνουν ένα τεράστιο αριθμό τιμών καθότι αποτελούν συναρτήσεις κάθε σημείου στο συνεχές. Επομένως η τάση σε ένα στοιχείο στο οδόστρωμα δε μπορεί να υπολογιστεί μόνο από μία απλή εξίσωση, επειδή οι συναρτήσεις, που περιγράφουν την τάση του, αναφέρονται αποκλειστικά στη συγκεκριμένη θέση. Εντούτοις, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διαιρέσει το συνεχές, δηλαδή τον όγκο ενός οδοστρώματος, σε έναν αριθμό μικρών διακριτών όγκων, προκειμένου να καταλήξουμε σε μία προσεγγιστική αριθμητική λύση για κάθε όγκο, αντί μίας ακριβούς λύσης κλειστού τύπου για όλο το οδόστρωμα (εικόνα 3.8).

Η προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιεί ένα πιο περίπλοκο μαθηματικό πρότυπο από τη μέθοδο των ελαστικών στρώσεων και έτσι γίνονται λιγότερες υποθέσεις. Επειδή δε τα προβλήματα της μηχανικής των παραμορφωσίμων (όπως και όλα τα φυσικά προβλήματα του συνεχούς μέσου) περιγράφονται με διαφορικές εξισώσεις με μερικές παραγώγους, μπορούμε να τα επιλύσουμε με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων.



Εικόνα 3.8: Τρισδιάστατη απεικόνιση οδοστρώματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Οι διαφορικές εξισώσεις για τα προβλήματα της μηχανικής των παραμορφωσίμων προκύπτουν από διάφορες άλλες εξισώσεις όπως οι σχέσεις μετατοπίσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων (3.11), (3.12), οι εξισώσεις συμβιβαστού των παραμορφώσεων (3.13) καθώς και από τις εξισώσεις ισορροπίας στο χώρο (3.14). Όπως κάθε πρόβλημα που εκφράζεται με διαφορικές εξισώσεις έτσι και εδώ υπάρχουν και συνοριακές συνθήκες, όπως φυσικές συνοριακές συνθήκες (φορτίσεις κλπ) και βασικές συνοριακές συνθήκες (δεσμεύσεις, στηρίξεις κλπ) (3.15) και (3.16). Οι βασικές διαφορικές σχέσεις έχουν ως εξής:

Σύνδεση ανηγμένων παραμορφώσεων – μετατοπίσεων:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$
 (3.11)

και

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}$$
 (3.12)

Εξισώσεις συμβιβαστού των παρμορφώσεων:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_i}{\partial j^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_j}{\partial j^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{ij}}{\partial i \partial j}$$
(3.13)

όπου τα i, j είναι x,y ή y,z ή z,x

Εξισώσεις ισορροπίας:

$$\frac{\partial \sigma_{ix}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{jy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{iz}}{\partial z} + F_i = 0$$
(3.14)

όπου i = x,y,z. Οι  $F_i$  είναι οι μαζικές δυνάμεις

Οριακές συνθήκες:

$$\sigma_{ij} v_j = G_i \tag{3.15}$$

όπου **ν** είναι η κλίση στο σύνορο και **G**<sub>i</sub> η δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας στο σύνορο.

Ακόμα:

$$u_i = F_i \tag{3.16}$$

που σημαίνει ότι το διάνυσμα μετατοπίσεων είναι ορισμένο σε περιοχές του σώματος.

Για να επιτύχουμε την αριθμητική λύση του προβλήματος χρησιμοποιούμε την αρχή των δυνατών έργων. Αν σ<sub>ij</sub> και ε<sub>ij</sub> είναι αντίστοιχα οι τανυστές των τάσεων και των ανηγμένων παραμορφώσεων ενώ P<sub>i</sub> και δ<sub>i</sub> είναι τα φορτία και οι δυνατές μετακινήσεις, πρέπει το έργο που προκαλείται από τα φορτία να ισούται με το δυνατό έργο των παραμορφώσεων δηλαδή:

$$\sum_{V} P_i \delta_i = \int_{V} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV \tag{3.17}$$

Για να καταστρωθεί το πρόβλημα των πεπερασμένων στοιχείων, πρέπει το πεδίο του προβλήματος, το οποίο καταλαμβάνει κάποιο πεπερασμένο όγκο στον χώρο, να χωριστεί σε πεπερασμένο αριθμό στοιχείων απλούστερου σχήματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση κάθε πεπερασμένο στοιχείο είναι τρισδιάστατο, εξαερδικό στοιχείο και αποτελείται από είκοσι (20) κόμβους (εικόνα 3.9), όπου κάθε κόμβος έχει τρείς (3) βαθμούς ελευθερίας (3 μετακινήσεις x,y,z). Έτσι το πρόβλημα ανάγεται στο να δοθούν τιμές σε αυτούς τους βαθμούς ελευθερίας. Τα διάφορα στοιχεία συναρμολογούνται σε κάποιους κοινούς βαθμούς ελευθερίας (ή κόμβους). Έτσι σε ένα κόμβο μπορούν να συνδέονται 2,3 ή και περισσότερα στοιχεία. Το πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί ως :

$$\begin{bmatrix} K \end{bmatrix} \mu = F \tag{3.18}$$

όπου u διάνυσμα διάστασης n ίσης με τους βαθμούς ελευθερίας του προβλήματος, όπου κάποιες από αυτές είναι δεσμευμένες ( $u_i$  = δέσμευση) και αποτελούν τις συνοριακές συνθήκες. Το F είναι διάνυσμα διάστασης n και περιέχει τις συνοριακές συνθήκες των φορτίσεων δηλαδή τις δυνάμεις στους κόμβους, τις πιέσεις πάνω στις πλευρές των στοιχείων καθώς και τις μαζικές δυνάμεις (όπως το ίδιο βάρος). Ο πίνακας [K] έχει διαστάσεις n x n και ονομάζεται πίνακας δυσκαμψίας. Στον πίνακα αυτόν περιέχεται η γεωμετρία του προβλήματος καθώς και οι φυσικές ιδιότητες των υλικών. Ονομάζεται δε πίνακας δυσκαμψία του συστήματος να αντιδράσει σε κάποια επιβολή εξωτερικής φόρτισης ή αλλιώς δείχνει την απόκριση του συστήματος στα εξωτερικά αίτια. Για να γίνει η επίλυση του προβλήματος επιλύεται το σύστημα εξισώσεων [K]. u = F και έτσι παίρνουμε και άλλα παράγωγα μεγέθη όπως οι τάσεις. Γενικά, η επιλογή της γεωμετρίας του στοιχείου, μέγεθος και σχήμα, όπως και οι συναρτήσεις παρεμβολής επηρεάζουν επίσης την τελική συμπεριφορά του προσμοιώματος (Σακελαρίου και Κοζάνης, 1997).



Εικόνα 3.9: Εξαεδρικό τρισδιάστατο στοιχείο είκοσι κόμβων.

Τα βήματα που περιλαμβάνει η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι τα ακόλουθα (Huebner et al., 2001):

- Διαίρεση του συνεχούς: Η περιοχή ενδιαφέροντος διαιρείται σε μικρά διακριτά στοιχεία.
- Επιλογή συναρτήσεων παρεμβολής: Επιλέγονται οι κόμβοι σε κάθε στοιχείο και στη συνέχεια η συνάρτηση που θα παρεμβάλει την παραλλαγή της μεταβλητής στο διακριτό στοιχείο.
- Εύρεση των ιδιοτήτων των στοιχείων: Χρησιμοποιείται το καθορισμένο πρότυπο πεπερασμένων στοιχείων (τα στοιχεία και της συναρτήσεις παρεμβολής) για να καθοριστούν οι εξισώσεις των πινάκων που εκφράζουν τις ιδιότητες των ανεξάρτητων στοιχείων.
- Συγκέντρωση των ιδιοτήτων των στοιχείων ώστε να προκύψουν οι εξισώσεις του συστήματος: Οι εξισώσεις των πινάκων συνδυάζονται εκφράζοντας τη συμπεριφορά των στοιχείων και σχηματίζουν την εξίσωση πίνακα που εκφράζει τη συμπεριφορά ολόκληρου του συστήματος.
- Ορισμός των συνοριακών συνθηκών: Ορίζονται τιμές για συγκεκριμένες μεταβλητές σε κομβικές θέσεις ορίων (π.χ. ο πυθμένας και οι πλευρές της περιοχής προς ανάλυση)
- Επίλυση του συστήματος εξισώσεων: Η παραπάνω διαδικασία καταλήγει σε μία ομάδα ταυτόχρονων εξισώσεων που μπορούν να επιλυθούν.
- Επιπλέον υπολογισμοί. Οι άγνωστες τιμές είναι οι μετατοπίσεις. Από αυτές μπορούν να υπολογιστούν οι τάσεις και οι παραμορφώσεις.

## 3.2 Δομική αξιολόγηση οδοστρώματος

## 3.2.1 Εκτίμηση φέρουσας ικανότητας οδοστρώματος

Ένα από τα απαραίτητα βήματα στη διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, είναι η εύρεση των ιδιοτήτων των στοιχείων, δηλαδή ο προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών των επί μέρους στρώσεων του οδοστρώματος (μέτρα δυσκαμψίας/ελαστικότητας, λόγοι Poisson, πάχη). Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των επί μέρους στρώσεων αποτελούν στοιχεία της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος, για την εκτίμηση της οποίας έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν διάφορα συστήματα συλλογής στοιχείων. Τα συστήματα αυτά διαφέρουν κυρίως ως προς τον τρόπο επιβολής του φορτίου (δυναμικό ή στατικό) επί του οδοστρώματος και τη μεθοδολογία καταγραφής.

Το πιο εξελιγμένο σύστημα αποτελεί το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (FWD). Υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη παραμορφωσίμετρων, αλλά η βασική λειτουργία του συστήματος συνίσταται στην πτώση ενός συγκεκριμένου βάρους, που αφήνεται να πέσει κάθετα (falling weight) υπό την επίδραση της βαρύτητας (εικόνα 3.10). Το βάρος αυτό πέφτοντας προσκρούει σε μια ειδικά σχεδιασμένη επιφάνεια και δημιουργεί μια παλμική φόρτιση που μεταβιβάζεται σε έναν κυκλικό δίσκο, ο οποίος είναι σε επαφή με το οδόστρωμα. Η φόρτιση αυτή του οδοστρώματος, η οποία διαρκεί συνήθως 25-30 msec ή 45-60 msec (ανάλογα με τη συσκευή και το υλικό που επιβάλλεται η φόρτιση), προσομοιάζει σε μεγάλο βαθμό την πραγματική φόρτιση του οδοστρώματος από τη διέλευση ενός τροχού (εικόνα 3.11). Για παράδειγμα, η φόρτιση λόγω της διέλευσης φορτηγού με ταχύτητα 50 km/h διαρκεί περίπου 20 msec (Λοΐζος, 2011).



Εικόνα 3.10: Παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (FWD).



Εικόνα 3.11: Παλμική φόρτιση παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους (FWD).

Η προσομοίωση της πραγματικής φόρτισης του οδοστρώματος είναι και το μεγαλύτερο πλεονέκτημα εφαρμογής επί τόπου δοκιμών με το FWD. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης που προκαλεί η συσκευή στο οδόστρωμα καταγράφονται οι μέγιστες ελαστικές υποχωρήσεις (deflections) κάτω από το φορτίο και σε ορισμένες αποστάσεις από αυτό, με τη βοήθεια κατάλληλων αισθητήρων (επιταχυνσιόμετρα), όπως φαίνεται στην εικόνα 3.12. Οι ελαστικές υποχωρήσεις ως δεδομένο, σε συνδυασμό και με άλλα στοιχεία (π.χ. πάχη στρώσεων, αποτελέσματα εξειδικευμένων εργαστηριακών δοκιμών κ.λ.π) είναι δυνατό να δώσουν μία πλήρη πληροφόρηση για τη δομική συμπεριφορά του οδοστρώματος.



Εικόνα 3.12: Εφαρμογή μέτρησης με παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (FWD).

Παράλληλα με τις καταγραφές των ελαστικών παραμορφώσεων, πραγματοποιούνται συστηματικά μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα, της επιφάνειας του οδοστρώματος και του ασφαλτοσκυροδέματος στο μέσο συνήθως των ασφαλτικών στρώσεων. Τα στοιχεία αυτά είναι απαραίτητα για τις σχετικές διερευνήσεις, δεδομένου ότι τα μηχανικά χαρακτηριστικά και η συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων και κατ' επέκταση των οδοστρωμάτων, επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία.

#### 3.2.2 Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού (back-analysis)

Τα δεδομένα που προκύπτουν από τις μετρήσεις του οδοστρώματος με το FWD μπορούν να συνδυαστούν με άλλα στοιχεία για τον προσδιορισμό της δομικής του κατάστασης. Πιο συγκεκριμένα απαιτείται ο προσδιορισμός του πάχους των στρώσεων και άλλα στοιχεία, όπως είναι τα υλικά του οδοστρώματος, οι κυκλοφοριακοί φόρτοι και θερμοκρασιακά δεδομένα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Τα παραπάνω στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για των προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών των επί μέρους στρώσεων του οδοστρώματος μέσω του ανάστροφου υπολογισμού με χρήση ειδικών λογισμικών, όπως το πρόγραμμα BAKFAA (Λοΐζος, 2011).

Το λογισμικό BAKFAA, που αναπτύχθηκε από την FAA, βασίζεται στη θεωρία των ελαστικών στρώσεων. Με βάση αυτή, τα μέτρα ελαστικότητας των στρώσεων του οδοστρώματος προσαρμόζονται ώστε να ελαχιστοποιηθεί η μέση τετραγωνική ρίζα (*Root Mean Square – RMS*, ή *Root Mean Square Error – RMSE*) των διαφορών μεταξύ των μετρημένων υποχωρήσεων στους αισθητήρες του FWD (measured deflections) και της λεκάνης υποχώρησης που υπολογίζεται με τη θεωρία των ελαστικών στρώσεων (calculated deflections) (εικόνα 3.13).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (d_{ci} - d_{mi})^2}$$
(3.19)

όπου:

*RMSE* = Root Mean Square Error

 $d_{ci}$  = η υπολογισμένη υποχώρηση (calculated deflection) στον αισθητήρα i

 $d_{mi}$  = η μετρημένη υποχώρηση (measured deflection) στον αισθητήρα *i* 

*n* = το πλήθος των αισθητήρων που λαμβάνονται υπόψη στον ανάστροφο υπολογισμό.

Ο έλεγχος της αποδεκτής τιμής του *RMSE* πραγματοποιείται με τον συντελεστή διακύμανσης (Coefficient of variation, CoV) του *RMSE*, που θα πρέπει να βρίσκεται στο διάστημα τιμών μεταξύ 2% και 5%.

$$CV(RMSE) = \frac{RMSE}{\overline{d}_m} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} (d_{ci} - d_{mi})^2}}{\overline{d}_m}$$
(3.20)

όπου:

d<sub>m</sub> = η μέση μετρημένη υποχώρηση κατά τη διάρκεια της περιόδου

Τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού είναι τα νέα, υπολογισμένα μέτρα ελαστικότητας των στρώσεων του οδοστρώματος, για τα οποία επιτυγχάνεται η σύγκλιση των παραπάνω διαφορών.



Εικόνα 3.13: Σύγκλιση μετρημένων και υπολογισμένων υποχωρήσεων

Για την έναρξη της διαδικασίας υπολογισμού είναι απαραίτητη η εισαγωγή κατάλληλων "σπερματικών τιμών" (seed values) των μέτρων δυσκαμψίας/ελαστικότητας των στρώσεων. Οι τιμές αυτές κυμαίνονται στο αναμενόμενο εύρος τιμών για το κάθε υλικό, έτσι ώστε να προσδιοριστεί το είδος του υλικού κάθε στρώσης, που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια από το λογισμικό στον περαιτέρω υπολογισμό των υποχωρήσεων. Οι υπολογισμένες αυτές υποχωρήσεις (calculated deflection basin) συγκρίνονται στη συνέχεια με τη μορφή που έχουν οι μετρημένες υποχωρήσεις (measured deflection basin) από την εφαρμογή του FWD (εικόνα 3.14).



Εικόνα 3.14: Καμπύλες μετρημένων και υπολογισμένων υποχωρήσεων

Αν οι διαφορές που προκύπτουν είναι σημαντικές, οι "σπερματικές τιμές" των μέτρων δυσκαμψίας/ελαστικότητας των στρώσεων επαναπροσδιορίζονται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται, σύμφωνα με το διάγραμμα ροής της εικόνας 3.15, έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση τιμών με έναν ικανοποιητικό δείκτη σύγκλισης (σφάλμα RMSE). Η προσαρμογή των τιμών γίνεται με μια πρότυπη πολυδιάστατη ρουτίνα βελτιστοποίησης με τη μέθοδο SIMPLEX (McQueen et al, 2001).



Εικόνα 3.15: Διάγραμμα ροής ανάστροφου υπολογισμού (back-analysis)



Εικόνα 3.16: Περιοχή καταπόνησης λόγω φόρτισης FWD.

Μια δύσκαμπτη στρώση (stiff layer) με μέτρο ελαστικότητας 6.895 MPa (1.000.000 psi) και λόγο Poisson 0,50 εισάγεται στον ανάστροφο υπολογισμό στη στάθμη μεταξύ στρώσης έδρασης και φυσικού εδάφους εικόνα 3.16). Προσοχή απαιτείται στην αποτίμηση των αποτελεσμάτων του ανάστροφου υπολογισμού, δηλαδή στα υπολογισμένα μέτρα δυσκαμψίας/ελαστικότητας των στρώσεων του οδοστρώματος. Το αποτέλεσμα του ανάστροφου υπολογισμού για τα τις δεδομένες παραμέτρους που έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα. Ουσιαστικά υπάρχει μια ομάδα αριθμητικών λύσεων (αποτελεσμάτων) που ικανοποιούν τις δεδομένες συνθήκες. Η πλέον κατάλληλη λύση θα προκύψει με επιλογή μιας λύσης από το σύνολο των αποτελεσμάτων, με βάση την εμπειρία και μετά από συνεκτίμηση όλων των άλλων στοιχείων του εξεταζόμενου οδοστρώματος (κατασκευαστικό προφίλ, ιστορικό φόρτισης, κ.λ.π.)

# 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΝΑΡΤΕ

## 4.1 Γενικά

Η εγκατάσταση National Airport Pavement Test Facility είναι μια πειραματική εγκατάσταση μεγάλης κλίμακας, που βρίσκεται στην Τεχνική Βάση William Hughes της FAA, στο διεθνές αεροδρόμιο Atlantic City του New Jersey των ΗΠΑ. Η εγκατάσταση κατασκευάσθηκε το 1999, με τη συγχρηματοδότηση της FAA και της εταιρείας Boeing, με σκοπό να διατεθεί η κατάλληλη υποδομή για να διεξαχθούν έλεγχοι και να παραχθούν πειραματικά αποτελέσματα υπό πραγματικές συνθήκες, έτσι ώστε να βελτιωθούν οι διαδικασίες σχεδιασμού των δαπέδων αεροδρομίων για την επόμενη γενεά των μεγάλων μεταφορικών αεροσκαφών της Πολιτικής Αεροπορίας (New Generation Aircraft, NGA).



Εικόνα 4.1: Η εγκατάσταση National Airport Pavement Test Facility (NAPTF).

Η εγκατάσταση αποτελείται από ένα δάπεδο δοκιμών, επί του οποίου επιβάλλονται δοκιμαστικές φορτίσεις μέσω ειδικά διαμορφωμένου οχήματος, κινούμενου επί σταθερών

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4° : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΝΑΡΤΕ

σιδηροτροχιών (Εικόνα 4.2), ενώ η εφαρμογή του φορτίου πάνω στα φορεία των τροχών πραγματοποιείται με ένα υδραυλικό σύστημα. Η διαμόρφωση των τροχών και το φορτίο κάθε τροχού μπορεί να ποικίλει. Οι αποκρίσεις των δαπέδων καταγράφονται από διαφόρων τύπων αισθητήρες, που έχουν εγκιβωτιστεί εντός των δαπέδων από τη φάση της κατασκευής και τα σχετικά δεδομένα συλλέγονται και αποθηκεύονται από ένα σύστημα διαχείρισης πληροφοριών, που αποτελείται από ένα δίκτυο Η/Υ.



Εικόνα 4.2: Το όχημα επιβολής πειραματικών φορτίσεων στην εγκατάσταση NAPTF.

Η εγκατάσταση της NAPTF είναι κλειστή (στεγασμένη), όχι όμως κλιματιζόμενη. Αυτό σημαίνει ότι οι περιβαλλοντικές συνθήκες (βροχή, παγετός, κ.λπ.) είναι σε μεγάλο βαθμό ελεγχόμενες και τα σχετικά φυσικά μεγέθη (θερμοκρασία, υγρασία) κυμαίνονται σε μικρότερο εύρος από οτι στο εξωτερικό φυσικό περιβάλλον.

## 4.2 Πειραματικές δοκιμές

Στην εγκατάσταση της NAPTF εφαρμόστηκαν, από την ημερομηνία κατασκευής της έως σήμερα, διάφορα πειραματικά προγράμματα επί διαφορετικής κάθε φορά υποδομής δαπέδων (Construction Cycles). Το πρόγραμμα στο οποίο βασίστηκε η παρούσα εργασία είναι το "Construction Cycle 1" (CC1). Η επιφάνεια του δαπέδου δοκιμών της NAPTF για το συγκεκριμένο πρόγραμμα, είχε μήκος 274,4 m (900ft) και πλάτος 18,4 m (60ft) και περιελάμβανε συνολικά εννέα δοκιμαστικές διατομές οδοστρωμάτων (εικόνα 4.3), που αποτελούνταν από τρία εύκαμπτα-ασφαλτικά δάπεδα, τρία ημιάκαμπτα ασφαλτικά δάπεδα σταθεροποιημένης βάσης και τρία δύσκαμπτα δάπεδα (σκυροδέματος), κατασκευασμένα με τρείς διαφορετικές συνθέσεις υλικών στρώσεων έδρασης, δηλαδή χαμηλής αντοχής (TIμή δείκτη φέρουσας ικανότητας CBR 4), μέσης αντοχής (CBR 8), και υψηλής αντοχής (CBR 20).



Εικόνα 4.3: Δάπεδα πειραματικών φορτίσεων του προγράμματος CC1 της NAPTF.

Η διατομή κάθε δαπέδου κωδικοποιείται με τη χρήση ενός κώδικα τριών χαρακτήρων του αγγλικού αλφαβήτου (π.χ. LFC, MFS, κ.λ.π.). Ο πρώτος χαρακτήρας δείχνει την αντοχή της στρώσης έδρασης ("L" για χαμηλή, "M" για μέση και "H" για υψηλή), ο δεύτερος χαρακτήρας δείχνει τον τύπο του δοκιμαστικού δαπέδου ("F" για εύκαμπτο και "R" για

δύσκαμπτο), και ο τρίτος χαρακτήρας υποδεικνύει ότι το υλικό κατασκευής της βάσης είναι συμβατικό, ασύνδετο κοκκώδες υλικό (C) ή σταθεροποιημένο ασφαλτικό (S). Έτσι, ένα εύκαμπτο δάπεδο, με συμβατική βάση από θραυστό υλικό, που βρίσκεται στην περιοχή της στρώσης έδρασης με CBR 4 ονομάζεται LFC, ενώ ένα δύσκαμπτο δάπεδο, με σταθεροποιημένη βάση στην περιοχή της στρώσης έδρασης με CBR 20 ονομάζεται HRS. Αντικείμενο της παρούσης εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση της συμπεριφοράς των εύκαμπτων δαπέδων της εγκατάστασης (εικόνα 4.4).



Εικόνα 4.4: Εύκαμπτα δάπεδα του προγράμματος CC1 της NAPTF.

Οι έλεγχοι κυκλοφοριακού φόρτου πραγματοποιήθηκαν με διαμόρφωση διπλού τροχού σε τρείς άξονες (έξι τροχοί-διαμόρφωση αεροσκάφους Boeing 777) στη βόρεια λωρίδα κυκλοφορίας (βόρεια της center-line) και διπλού τροχού σε δύο άξονες (τέσσερις τροχοί-διαμόρφωση αεροσκάφους Boeing 747) στη νότια λωρίδα (νότια της center-line). Το φορτίο του κάθε τροχού ήταν 20,4 t (204kN ή 45.000lbs) και η πίεση ελαστικού 1,295 Mpa (188 psi), ενώ η διάμετρος του τροχού ήταν 222 mm (Εικόνα 4.5). Η επιβολή της φόρτισης στις δύο λωρίδες του δαπέδου (βόρεια και νότια) πραγματοποιούνταν ταυτόχρονα, με ταχύτητα διέλευσης 8,0 km/h.



Εικόνα 4.5: Διαμόρφωση των φορείων τροχών των πειραματικών φορτίσεων.

Μια ακόμη από τις παραμέτρους των πειραματικών φορτίσεων, πέρα από το μέγεθος του φορτίου και τη διαμόρφωση των τροχών, αποτελεί η διακύμανση του ίχνους της διέλευσης ως προς το πλάτος του δαπέδου. Πιο συγκεκριμένα, οι δοκιμαστικές φορτίσεις πραγματοποιήθηκαν σε εννέα (9) διαφορετικά αλλά προδιαγεγραμμένα ίχνη (tracks), έτσι ώστε να προσομοιάζουν στην πραγματική κίνηση των αεροσκαφών στο δάπεδο του αεροδρομίου (Εικόνα 4.6).



Εικόνα 4.6: Τα ίχνη (tracks) των διελεύσεων στα δάπεδα της NAPTF.

Κάθε ίχνος κωδικοποιείται με έναν από τους αριθμούς "-4", "-3", "-2", "-1", "0", "1", "2", "3" και "4", ενώ η εφαρμογή των διακριτών διελεύσεων φόρτισης πραγματοποιείται σε ομάδες των 66 ιχνών, κάθε μια από τις οποίες ακολουθεί τα χαρακτηριστικά της κανονικής κατανομής (Εικόνα 4.7). Κάθε μια διέλευση από την ομάδα των 66 διελεύσεων, δηλαδή, ακολουθεί συγκεκριμένο ίχνος και έχει κατεύθυνση κίνησης Ανατολής-Δύσης. Με την ολοκλήρωση της διέλευσης, ακολουθεί η αντίστροφης κατεύθυνσης κίνηση του φορείου (κατεύθυνση Δύσης-Ανατολής) επί του ιδίου ίχνους. Στη συνέχεια η συσκευή επιβολής της φόρτισης μετακινείται στο επόμενο ίχνος, ακολουθεί πάλι ένα ζεύγος διελεύσεων κ.ο.κ. Με τον τρόπο αυτό, οι 33 από τις 66 διελεύσεις κάθε ομάδας έχουν κατεύθυνση κίνησης Ανατολής-Δύσης, ενώ οι υπόλοιπες 33 έχουν κατεύθυνση Δύσης-Ανατολής. Σημειώνεται επίσης ότι η μετατόπιση των δύο φορείων των τροχών στα διαφορετικά ίχνη (tracks) πραγματοποιείται ταυτόχρονα και στις δύο λωρίδες του δαπέδου, ώστε να αποφευχθεί η πιθανή αλληλεπίδραση των δύο συστημάτων τροχών λόγω προσέγγισης του ενός στο άλλο.



Εικόνα 4.7: Κανονική κατανομή των διελεύσεων στα δάπεδα της NAPTF.

Στα δάπεδα της NAPTF, πέρα από τα πειράματα κυκλοφοριακού φόρτου, πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές εκτίμησης της φέρουσας ικανότητας των δαπέδων με εφαρμογή μετρήσεων με παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (FWD). Οι δοκιμές έλαβαν χώρα κατά την ίδια χρονική περίοδο με τα πειράματα κυκλοφοριακού φόρτου, αλλά σε χρονικές στιγμές που δεν πραγματοποιούνταν φόρτιση με τα συστήματα των τροχών. Κατά συνέπεια δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία καταγραφών των αισθητήρων της εγκατάστασης για την απόκριση των δαπέδων στις φορτίσεις του FWD. Τα μόνα στοιχεία που είναι διαθέσιμα είναι οι παράμετροι πραγματοποίησης της δοκιμής, καθώς επίσης και οι ελαστικές υποχωρήσεις (deflections) των δαπέδων στην επιβαλλόμενη φόρτιση του FWD.

## 4.3 Τυπικές διατομές ευκάμπτων δαπέδων.

Οι δοκιμαστικές διατομές εύκαμπτων δαπέδου συμβατικής βάσης (MFC, LFC και HFC) κατασκευάστηκαν με ονομαστικό πάχος ασφαλτικής στρώσης 12,7mm (5 in). Σημειώνεται ότι αντικείμενο της παρούσης εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση των οριζόντιων παραμορφώσεων κατά τη διαμήκη διεύθυνση, στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης, των ευκάμπτων δαπέδων της εγκατάστασης της NAPTF, κατά το πρόγραμμα δοκιμών Construction Cycle 1 (CC1). Κατά συνέπεια, δεν αναφέρονται αναλυτικά οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες και τα λοιπά τεχνικά στοιχεία των διατομών των δυσκάμπτων και ημιακάμπτων δαπέδων της εγκατάστασης.

Στην εικόνα 4.8 φαίνονται οι τυπικές διατομές των τριών ευκάμπτων δαπέδων της εγκατάστασης, που εξετάζονται. Τα υλικά από τα οποία αποτελούνται οι επιμέρους στρώσεις είναι ασφαλτικό σκυρόδεμα τύπου P-401 για την ασφαλτική στρώση, θραυστό ασύνδετο αμμοχάλικο τύπου P-209 για τη βάση και χαρμάνι ηφαιστειακών υλικών και λεπτόκοκκων αδρανών λατομείου τύπου P-154 για την υπόβαση. Όλα τα υλικά είναι σύμφωνα με την πρότυπη τεχνική προδιαγραφή AC 150/5370-10A της FAA.



Εικόνα 4.8: Τυπικές διατομές ευκάμπτων δαπέδων της NAPTF (CC1).

Αναφορικά με τα υλικά των τριών τύπων των στρώσεων έδρασης, για τη στρώση έδρασης χαμηλής αντοχής (CBR 4) χρησιμοποιήθηκε ένα μίγμα ιλύος και αμμοχαλικώδους αργίλου (County Sand and Stone Clay, CSSC), με χαρακτηριστικά κατάταξη MH-CH κατά το Ενοποιημένο Σύστημα Κατάταξης Εδαφών (ASTM Unified Soil Classification System – USCS). Για την κατασκευή της στρώσης έδρασης μέσης αντοχής (CBR 8) χρησιμοποιήθηκε άργιλος DuPont (DPC), με χαρακτηριστικά κατάταξης CL-CH κατά ASTM-USCS. Το στρώμα άμμου, που αποτελούσε το φυσικό υπέδαφος κάτω από τις δύο προαναφερθείσες στρώσεις έδρασης (χαμηλής και μέσης αντοχής) ταξινομήθηκε ως SW-SM (καλά διαβαθμισμένη άμμος-ιλυώδης άμμος) κατά ASTM-USCS, με προσδοκώμενο CBR 20. Το στρώμα αυτό αποτέλεσε και τη στρώση έδρασης για το τρίτο εύκαμπτο δάπεδο της εγκατάστασης, δηλαδή το δάπεδο HFC.

## 4.4 Αισθητήρες μέτρησης της απόκρισης των δαπέδων

Κατά τη φάση της κατασκευής των δαπέδων του πειραματικού κύκλου CC1, αισθητήρες διαφόρων τύπων (αισθητήρες μέτρησης οριζόντιας παραμόρφωσης, τάσεων, υποχωρήσεων, θερμοκρασίας και υγρασίας) εγκιβωτίστηκαν στα δάπεδα της εγκατάστασης, σε διάφορες θέσεις και βάθη.

Η παρακολούθηση της θερμοκρασίας των δαπέδων έγινε με την τοποθέτηση ηλεκτρονικών αισθητήρων θερμοκρασίας (temperature gage, TG), βασισμένων στην τεχνολογία των ημιαγωγών (thermistors), οι οποίοι εγκαταστάθηκαν εντός της μάζας του ασφαλτοσκυροδέματος, σε βάθη 13mm, 64mm και 114mm κάτω από την επιφάνεια του δαπέδου. Για τα ημιάκαμπτα δάπεδα αισθητήρες θερμοκρασίας τοποθετήθηκαν και στον πυθμένα της σταθεροποιημένης βάσης (Garg και Hayhoe, 2001).

Ιδιαίτερη δυσκολία στην εγκατάσταση παρουσιάζει ο αισθητήρας ASG, καταγραφής της οριζόντιας, ανηγμένης παραμόρφωσης του ασφαλτοσκυροδέματος, ο οποίος είναι πολύ ευαίσθητος, τόσο στην έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες, όσο και στην επίδραση από τις διαδοχικές διελεύσεις/δονήσεις πάνω στο όργανο μετά την τοποθέτηση. Για το λόγο αυτό, το προσδόκιμο επιβίωσης του αισθητήρα αυτού δεν είναι υψηλό, σε σχέση τουλάχιστον με τους αισθητήρες των άλλων τύπων, που τοποθετούνται στα ίδια δάπεδα (Weinmann et al, 2004).

Στα εύκαμπτα δάπεδα της NAPTF, αισθητήρες ASG, σχήματος "H", εγκαταστάθηκαν στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης, σε βάθος 11,43 cm (4,5 in) από την επιφάνεια. Οι αισθητήρες παραμόρφωσης προσαρμόσθηκαν στο μέσο του μήκους κυλινδρικών πολυεστερικών ράβδων με πατούρες στα άκρα τους. Τέσσερα ωμόμετρα κλίμακας 350Ω, δύο αξονικά και δύο εγκάρσια (προσανατολισμένα σε διεύθυνση 90°, κάθετα σε σχέση με τους ενεργούς αισθητήρες) χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε ράβδο. Τα ωμόμετρα συνδέθηκαν ηλεκτρικά με ένα πλήρες κύκλωμα γέφυρας Wheatstone, με σκοπό να μετρούν τη διαμήκη (οριζόντια) παραμόρφωση της πολυεστερικής ράβδου (Garg και Hayhoe, 2001). Τα κύρια χαρακτηριστικά σχεδιασμού και κατασκευής των ASGs, που εγκαταστάθηκαν στην NAPTF, φαίνονται στην Εικόνα 4.9.



Εικόνα 4.9: Σχηματική απεικόνηση αισθητήρα ASG.

Ολόκληρη η κυλινδρική, πολυεστερική ράβδος περικλείεται από πολυαμίδιο, με μεγάλες και ανθεκτικές επικασσιτερωμένες εσοχές, καλυμμένες από πάπλωμα άνθρακα. Η διάταξη του ηλεκτρικού κυκλώματος μέτρησης των παραμορφώσεων περιβάλλεται από κερί και εποξειδικά (ως φυσική και περιβαλλοντική προστασία). Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

Κατασκευαστής/Τύπος	CTL /Αισθητήρας ASG	
Ακρίβεια μέτρησης	1 microstrain	
Ανάλυση	0,1 microstrain	
Εύρος μέτρησης	2000 microstrain	
Εύρος θερμ/σίας λειτουργίας	0°C – 150°C	
Συχνότητα καταγραφής	>100 καταγραφές/sec	

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα ASG

Οι αισθητήρες ASG τοποθετήθηκαν τόσο στη διαμήκη (διεύθυνση κίνησης του φορτίου), όσο και στη εγκάρσια διεύθυνση. Στην εικόνα 4.10 φαίνονται οι θέσεις εγκατάστασης των αισθητήρων ASG στα δάπεδα LFC και MFC, ενώ στην εικόνα 4.11 οι θέσεις των αισθητήρων στο δάπεδο HFC.



Εικόνα 4.10: Θέσεις αισθητήρων ASG στα δάπεδα LFC και MFC.



Εικόνα 4.11: Θέσεις αισθητήρων ASG στο δάπεδο HFC.

Συνολικά τριάντα (30) αισθητήρες ASG τοποθετήθηκαν στα τρία εύκαμπτα δάπεδα της εγκατάστασης, εκ των οποίων δεκαπέντε (15) παρακολουθούσαν τη διαμήκη παραμόρφωση και οι υπόλοιποι την εγκάρσια.

#### 4.5 Καταγραφή παραμορφώσεων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί συνοπτικά στο κεφάλαιο 2 της παρούσας εργασίας, οι πειραματικές φορτίσεις της συστηματικής καταπόνησης των δαπέδων με επαναλαμβανόμενο

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΝΑΡΤΕ

κυκλοφοριακό φόρτο (trafficking tests) και διαμορφώσεις των συστημάτων τροχών αυτές των αεροσκαφών B-777 και B-747, πραγματοποιήθηκαν κατά το χρονικό διάστημα από το Φεβρουάριο του 2000 έως τον Σεπτέμβριο του 2001. Η εφαρμογή των δοκιμαστικών φορτίσεων πραγματοποιήθηκε μέχρις ότου κρίθηκε ότι οι περισσότερες των δοκιμαστικών διατομών αστόχησαν. Το δάπεδο LFC θεωρήθηκε ότι αστόχησε λόγω κόπωσης της ασφαλτικής στρώσης (ρηγμάτωση του ασφαλτοσκυροδέματος), ενώ το δάπεδο MFC θεωρήθηκε ότι αστόχησε στη στρώση έδρασης, σύμφωνα με τα κριτήρια του Σώματος Μηχανικών των ΗΠΑ (Ahlvin, Ulery, Hutchinson, and Rice, 1971), δηλαδή μόλις παρατηρήθηκε ανύψωση (ήβωση) της επιφανείας του οδοστρώματος της τάξης των 25,4 mm (1 in). Το δάπεδο HFC δεν αστόχησε μέχρι την ολοκλήρωση του προγράμματος.

Οι αισθητήρες μέτρησης της οριζόντιας παραμόρφωσης στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης ενεργοποιούνται με την κίνηση του φορείου των τροχών και καταγράφουν το μέγεθος της ανηγμένης παραμόρφωσης σε millistrain (milli-inch/inch) σε χρονικά διαστήματα των 0,05 sec. Τα διαγράμματα που προκύπτουν από τα χρονικά καταγραφής του σήματος απόκρισης των αισθητήρων είναι παρόμοια σε σχήμα, ακόμη και όταν ο τροχός δεν διέρχεται ακριβώς πάνω από τον αισθητήρα. Το διάγραμμα της εικόνας 4.12 παρουσιάζει ένα τυπικό σήμα απόκρισης ενός διαμήκους αισθητήρα με φορτίο διπλού τροχού σε τρείς άξονες (B-777).



Εικόνα 4.12: Τυπικό διάγραμμα παραμόρφωσης-χρόνου για φόρτιση διπλού τροχού σε τρείς άξονες (Β-777) - (θέση του αισθητήρα ASG κάτω από τον τροχό)

Στην αρχή υπάρχει πάντοτε θλιπτική παραμόρφωση, καθώς ο πρώτος άξονας του φορείου πλησιάζει τη θέση του αισθητήρα, κατόπιν εφελκυσμός, καθώς ο πρώτος άξονας

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4° : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΝΑΡΤΓ

διέρχεται πάνω από τη θέση του αισθητήρα, ξανά θλίψη όταν ο αισθητήρας βρίσκεται στο μεταξόνιο, κ.ο.κ.. Όταν ο άξονας του τροχού έχει διέλθει πάνω από τον αισθητήρα, η στάθμη της παραμόρφωσης μειώνεται απότομα και διαπιστώνεται πολύ μικρή ή μηδενική μόνιμη παραμόρφωση. Στην περίπτωση των φορτίσεων με φορτίο έξι τροχών σε τρία ζεύγη (B-777) και τεσσάρων τροχών σε δύο ζεύγη (B-747), η θλίψη παρατηρείται πάντοτε ανάμεσα στους άξονες των τροχών. Η απόκριση του διαμήκους αισθητήρα σε αξονική φόρτιση, με διαμόρφωση διπλού τροχού σε δύο άξονες (B-747), φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 4.13. Στα διαγράμματα των εικόνων 4.12 και 4.13 παρατηρείται μια φάση απόσβεσης της καταπόνησης (επαναφορά του συστήματος σε ισορροπία μετά την απότομη επιβολή των τάσεων), που οφείλεται στις ιξωδοελαστικές ιδιότητες των ασφαλτικών υλικών.



Εικόνα 4.13: Τυπικό διάγραμμα παραμόρφωσης-χρόνου για φόρτιση διπλού τροχού σε δύο άξονες (Β-747) - (θέση του αισθητήρα ASG κάτω από τον τροχό)

Στις ίδιες εικόνες παρατηρείται ότι οι μέγιστες τιμές της ανηγμένης εφελκυστικής παραμόρφωσης (χρονικά σημεία διέλευσης των αξόνων πάνω από τη θέση του αισθητήρα) δεν είναι ίδιες, γεγονός που υποδηλώνει τη δυναμική εντατική κατάσταση που επιβάλλει το κινούμενο φορτίο.

# 5 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

## 5.1 Γενικά

Οι καταγραφές των αισθητήρων, που εγκαταστάθηκαν στο πεδίο δοκιμών της NAPTF, διατίθενται ελεύθερα για δημόσια χρήση, μέσω της σχετικής ιστοσελίδας της FAA για τη NAPTF (FAA, 2012), που παρέχει πρόσβαση στη βάση δεδομένων των σχετικών πειραματικών μετρήσεων. Θα πρέπει ωστόσο να σημειωθεί, ότι ενώ ο όγκος των διαθέσιμων στοιχείων και πληροφοριών είναι πολύ μεγάλος, ο τρόπος οργάνωσης και διαχείρισης της βάσης δεδομένων είναι σχετικά ξεπερασμένος και διατίθενται ελάχιστα, στοιχειώδη εργαλεία διαχείρισης, με αποτέλεσμα η συλλογή και επεξεργασία των διαθέσιμων στοιχείων να καθίσταται μια εξαιρετικά επίπονη και χρονοβόρος διαδικασία.

## 5.2 Συλλογή και επεξεργασία παρατηρήσεων

Στην πορεία της παρούσας εργασίας, αρχικά εντοπίστηκαν και χαρτογραφήθηκαν όλες οι θέσεις των αισθητήρων καταγραφής της οριζόντιας παραμόρφωσης  $\varepsilon_{AC}$ , κατά τη διαμήκη διεύθυνση (longitudinal strain), στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στα εύκαμπτα δάπεδα της εγκατάστασης είχαν εγκιβωτιστεί δεκαπέντε (15) αισθητήρες ASG κατά τη διαμήκη διεύθυνση. Στη συνέχεια, εντοπίστηκαν και χαρτογραφήθηκαν οι θέσεις εφαρμογής των δοκιμών με FWD και καταρτίστηκε ο κοινός τόπος των θέσεων, για τις οποίες η εφαρμογή δοκιμής FWD πραγματοποιήθηκε ακριβώς πάνω από τη θέση αισθητήρα ASG.

Συνολικά εντοπίστηκαν τέσσερις (4) τέτοιες θέσεις από το σύνολο των δεκαπέντε (15) αισθητήρων. Για τους αισθητήρες των θέσεων αυτών επισημάνθηκαν οι χρονικές περίοδοι (ημέρες) κατά τις οποίες είχαμε εντός της ίδιας περιόδου πειραματική φόρτιση και δοκιμή FWD. Το κριτήριο της επιλογής μόνο χρονικών περιόδων, κατά τις οποίες πραγματοποιήθηκαν, εντός σύντομου χρονικού διαστήματος, πειραματική φόρτιση και δοκιμή FWD, κρίθηκε αναγκαίο, έτσι ώστε να διασφαλίζεται, κατά το δυνατόν, ότι οι δύο αυτές καταπονήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τμήμα του δαπέδου με τα ίδια χαρακτηριστικά και υπό τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας αυτής παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.

ΔΑΠΕΔΟ	ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ASG	ΧΡΟΝΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΙ (ΗΜΕΡΕΣ) ΜΕ ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ (ΓΕΓΟΝΟΤΑ) ΑΝΑ ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ	ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΑΝΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ
LFC	LSC3 LSC10	15 15	114 108	240 240
MFC	MSC1 MSC12	9 9	112 103	240 240
HFC	-	-	-	-
Σύνολο	4	48	5.265	

Πίνακας 5.1: Αισθητήρες	ASG σε θέσεις δοκιμών	FWD - Αρχικό δείγμα
-------------------------	-----------------------	---------------------

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.1, για το δάπεδο HFC δεν εντοπίστηκε θέση αισθητήρα ASG, επί της οποίας να έχει πραγματοποιηθεί δοκιμή FWD. Κατά συνέπεια τα πειραματικά καταγεγραμμένα στοιχεία παραμορφώσεων για το υπόψη δάπεδο αποκλείστηκαν από την περαιτέρω επεξεργασία.

Ακολούθησε η συγκέντρωση και πινακοποίηση των στοιχείων των καταγραφών των τεσσάρων αυτών αισθητήρων ASG, για κάθε μία από τις επιλεγείσες χρονικές περιόδους (ημέρες). Σημειώνεται ότι για κάθε έναν αισθητήρα ASG και κάθε διαφορετική χρονική περίοδο (ημέρα) συγκεντρώθηκαν περί τις εκατό διακριτές καταγραφές (γεγονότα), κάθε μία από τις οποίες έχει τη μορφή χρονοσειράς και αποτελείται από ένα πλήθος περίπου 240 μεμονωμένων παρατηρήσεων, που καταγράφονται από τον αισθητήρα, ανά 0,05 sec, εντός χρονικού διαστήματος περίπου 12sec, που διαρκεί η διέλευση του φορτίου πάνω από την περιοχή του αισθητήρα. Με βάση τις χρονοσειρές αυτές, καταρτίστηκαν, για κάθε μία διακριτή καταγραφή (γεγονός), τα διαγράμματα παραμόρφωσης-χρόνου, που έχουν τη μορφή που φαίνεται στις εικόνες 4.12 και 4.13. Επισημαίνεται, ότι όλα τα βήματα που

περιγράφονται παραπάνω, επαναλήφθηκαν για κάθε ένα από τα εννέα (9) διαφορετικά ίχνη (track) διέλευσης του φορτίου, σύμφωνα με τα όσα αναπτύχθηκαν στην παρ. 4.2 της παρούσης εργασίας.

Με βάση τη μορφή των διαγραμμάτων παραμόρφωσης-χρόνου για κάθε μία διακριτή καταγραφή (γεγονός), αλλά και τα απόλυτα μεγέθη των τιμών των παραμορφώσεων, αξιολογήθηκε η αξιοπιστία των καταγραφών για κάθε έναν από του τέσσερις αισθητήρες ASG. Το αποτέλεσμα αυτής της αξιολόγησης ήταν να αποκλειστούν από την περαιτέρω ανάλυση δύο από τους τέσσερις αισθητήρες (LSC10 και MSC1), λόγω αναξιόπιστων καταγραφών ή/και έλλειψης παρατηρήσεων, γεγονός που οφείλεται στην ελαττωματική λειτουργία κάποιων από τους εγκατεστημένους αισθητήρες (Gopalakrishnan και Thompson, 2006). Οι θέσεις των υπόλοιπων δύο, αξιόπιστων αισθητήρων, LSC3 και MSC12, φαίνονται στην εικόνα 5.1.



Εικόνα 5.1: Οι θέσεις των αισθητήρων LSC3 και MSC12.

Είναι αξιοσημείωτο, οτι μετά τους πρώτους τέσσερις μήνες περίπου από την έναρξη των πειραματικών φορτίσεων, ακόμη και οι δύο αυτοί, αξιόπιστοι αισθητήρες, LSC3 και MSC12 άρχισαν να παρέχουν αλλοιωμένες καταγραφές, γεγονός ενδεικτικό της ευαισθησίας των αισθητήρων ASG στις αλλαγές της γεωμετρίας των δαπέδων, κυρίως λόγω των παραμενουσών κατακόρυφων παραμορφώσεων (υποχωρήσεων). Για το λόγο αυτό, οι

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5° : ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

αξιοποιήσιμες χρονικές περίοδοι (ημέρες), για τις οποίες είχαμε εντός της ίδιας περιόδου καταγεγραμμένα στοιχεία παραμορφώσεων λόγω της πειραματικής φόρτισης και δοκιμή FWD, περιορίστηκαν στο αρχικό αυτό διάστημα των τεσσάρων (4) μηνών, ενώ οι υπόλοιπες απερρίφθησαν. Το τελικώς αξιοποιήσιμο δείγμα καταγραφών των αισθητήρων ASG φαίνεται στον πίνακα 5.2.

ΔΑΠΕΔΟ	ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ASG	ΧΡΟΝΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΙ (ΗΜΕΡΕΣ) ΜΕ ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ (ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ) ΑΝΑ ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ	ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΑΝΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ
LFC	LSC3	6	112	240
MFC	MSC12	7	102	240
Σύνολο	2	13	1.386	

WD – Τελικό δείγμα
1

Για τους εναπομένοντες δύο αυτούς αισθητήρες ASG, υπολογίστηκε, για κάθε μια χρονική περίοδο (ημέρα), η τιμή της μέσης ημερήσιας μέγιστης παραμόρφωσης (peak value), η οποία και αντιπροσωπεύει την απόκριση του συγκεκριμένου δαπέδου στην πειραματική φόρτιση για τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο (ημέρα). Ο έλεγχος της αποδεκτής μέσης τιμής έγινε για συντελεστή διακύμανσης (coefficient of variation, CoV) μικρότερο ή ίσο του 20%. Με τον τρόπο αυτό διαμορφώθηκε, για κάθε ένα από τα δύο εξεταζόμενα εύκαμπτα δάπεδα (LFC και MFC), ένα δείγμα αντιπροσωπευτικών τιμών οριζόντιων παραμορφώσεων στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης, για κάθε ένα από τα εννέα διαφορετικά ίχνη (track) διέλευσης του φορτίου.

Στην εικόνα 5.2 φαίνεται ένα τυπικό διάγραμμα της μέγιστης οριζόντιας παραμόρφωσης  $\varepsilon_m$  στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης του δαπέδου LFC, ως συνάρτηση του ίχνους διέλευσης του φορτίου, δηλαδή ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" του αισθητήρα από τον τροχό του φορείου. Σημειώνεται ότι, για λόγους ευκρίνειας, τα τριαξονικό φορείο τροχών εμφανίζεται στην εικόνα ως μονός άξονας. Στις εικόνες 5.3α και 5.3β φαίνονται τα διαγράμματα της οριζόντιας παραμόρφωσης  $\varepsilon_m$  του

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5° : ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

ασφαλτοσκυροδέματος του δαπέδου LFC, ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" του αισθητήρα από τον τροχό του φορείου για κάθε μια χρονική περίοδο (ημέρα) που εξετάστηκε. Είναι φανερό από τα διαγράμματα αυτά ότι η παραμόρφωση αυξάνεται σημαντικά με την πάροδο του χρόνου, δηλαδή με την αύξηση των διελεύσεων του φορτίου.



Εικόνα 5.2: Δάπεδο LFC - Τυπικό διάγραμμα οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" του αισθητήρα από τον τροχό του φορείου.



Εικόνα 5.3α: Δάπεδο LFC – Διαγράμματα οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" του αισθητήρα από τον τροχό του φορείου για κάθε μία από τις εξεταζόμενες χρονικές περιόδους 1<sup>η</sup> έως 3<sup>η</sup>.



Εικόνα 5.3β: Δάπεδο LFC – Διαγράμματα οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" του αισθητήρα από τον τροχό του φορείου για κάθε μία από τις εξεταζόμενες χρονικές περιόδους 4<sup>η</sup> έως 6<sup>η</sup>.

Στην εικόνα 5.4 φαίνεται το αντίστοιχο τυπικό διάγραμμα της μέγιστης οριζόντιας παραμόρφωσης στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης του δαπέδου MFC, ως συνάρτηση του ίχνους διέλευσης του φορτίου, δηλαδή ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" του αισθητήρα από τον τροχό του φορείου. Σημειώνεται ότι, για λόγους ευκρίνειας, τα διαξονικό φορείο τροχών εμφανίζεται στην εικόνα ως μονός άξονας. Στις εικόνες 5.5α, 5.5.β και 5.5γ φαίνονται τα διαγράμματα της οριζόντιας παραμόρφωσης του ασφαλτοσκυροδέματος του δαπέδου MFC, ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" του αισθητήρα από τον τροχό του φορείου για κάθε μια από τις συνολικά επτά χρονικές περιόδους (ημέρες), που εξετάστηκαν. Όπως και στην περίπτωση του δαπέδου LFC, έτσι κι εδώ είναι φανερό ότι η παραμόρφωση αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, δηλαδή με την αύξηση των διελεύσεων του φορτίου.


Εικόνα 5.4: Δάπεδο MFC - Τυπικό διάγραμμα οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" του αισθητήρα από τον τροχό του φορείου.



Εικόνα 5.5α: Δάπεδο MFC – Διαγράμματα οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" του αισθητήρα από τον τροχό του φορείου για κάθε μία από τις χρονικές περιόδους 1<sup>η</sup> έως 3<sup>η</sup>.





Εικόνα 5.5β: Δάπεδο MFC – Διαγράμματα οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" του αισθητήρα από τον τροχό του φορείου για κάθε μία από τις χρονικές περιόδους 4<sup>η</sup> έως 6<sup>η</sup>.



Εικόνα 5.5γ: Δάπεδο MFC – Διάγραμμα οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" του αισθητήρα από τον τροχό του φορείου για την 7<sup>η</sup> χρονική περίοδο.

Παράλληλα, στις εικόνες 5.6 και 5.7 φαίνεται για τα δάπεδα LFC και MFC αντίστοιχα ένα τυπικό διάγραμμα της μέγιστης οριζόντιας παραμόρφωσης στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης (*ε<sub>m</sub>*), στη θέση κάτω από τον τροχό του φορείου, ως συνάρτηση του χρόνου. Οι τιμές της τετμημένης (μέγεθος στον άξονα x) ανήκουν στον αύξοντα αριθμό των χρονικών περιόδων (ημερών) της πειραματικής φόρτισης.



Εικόνα 5.6: Δάπεδο LFC - Τυπικό διάγραμμα οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος στη θέση κάτω από τον τροχό του φορείου, ως συνάρτηση του χρόνου



Εικόνα 5.7: Δάπεδο MFC - Τυπικό διάγραμμα οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος στη θέση κάτω από τον τροχό του φορείου, ως συνάρτηση του χρόνου

Αξίζει να επισημανθεί η αυξητική τάση των παραμορφώσεων με την πάροδο του χρόνου, που οφείλεται, πέραν των περιβαλλοντικών παραγόντων (αύξηση θερμοκρασίας) και στην κόπωση του ασφαλτοσκυροδέματος λόγω της συστηματικής πειραματικής φόρτισης.

# 5.3 Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού (back-analysis).

Κατά τη δεύτερη φάση εκπόνησης της εργασίας, έγινε εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας των δαπέδων της NAPTF, με βάση τα αποτελέσματα των επι τόπου μετρήσεων με το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών, μαζί με μια σειρά άλλων στοιχείων (πάχη στρώσεων, θερμοκρασία, κ.λπ.) εισήχθησαν στον αλγόριθμο ανάστροφου υπολογισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών (back-analysis) του οδοστρώματος. Πρακτικά το αποτέλεσμα του ανάστροφου υπολογισμού είναι οι τιμές των τροποποιημένων μέτρων δυσκαμψίας/ελαστικότητας των στρώσεων του δαπέδου. Για τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό BAKFAA της FAA.

Οι δοκιμές παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους, που πραγματοποιήθηκαν στα δάπεδα της NAPTF κατά το πειραματικό πρόγραμμα CC1, έγιναν με το FWD της FAA (εικόνα 5.8). Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί έναν κυκλικό δίσκο επιβολής του φορτίου στο δάπεδο, διαμέτρου 15cm (5,91 in), ενώ πραγματοποιούνται τρείς δοκιμές σε κάθε θέση, με φορτίο 53kN (12.000lbs), 106kN (24.000lbs) και 160kN (36.000lbs). Πριν ξεκινήσει η δοκιμή σε κάθε θέση πραγματοποιείται μια αρχική φόρτιση με φορτίο 160kN (36.000lbs), με σκοπό την εξισορρόπηση τυχόν προγενέστερων παραμορφώσεων του δαπέδου. Η αρχική αυτή φόρτιση δεν λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυση.



Εικόνα 5.8: Παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους της FAA.

Το σύστημα χρησιμοποιεί επτά (7) επιταχυνσιόμετρα για την καταγραφή των ελαστικών υποχωρήσεων του δαπέδου ως συνέπεια της φόρτισης. Παράλληλα η συσκευή καταγράφει το φορτίο της δοκιμής και τις θερμοκρασίες του αέρα και της επιφάνειας του ασφαλτοσκυροδέματος. Τα επιταχυνσιόμετρα τοποθετούνται επί του κυκλικού δίσκου φόρτισης ( $D_o$ ), σε απόσταση 30 cm (12 in) πίσω από το σημείο επιβολής του φορτίου ( $D_1$ ), σε απόσταση 30 cm (12 in) εμπρός από το σημείο επιβολής του φορτίου ( $D_2$ ) και τα υπόλοιπα σε αποστάσεις 60 cm (24 in) ( $D_3$ ), 90 cm (36 in) ( $D_4$ ), 120 cm (48 in) ( $D_5$ ) και 150 cm (60 in) ( $D_6$ ) πίσω από το κέντρο φόρτισης.

Τα σημεία εφαρμογής των δοκιμών FWD βρίσκονταν επί του άξονα των δαπέδων (center line), επί της λωρίδας No 2 (απόσταση 3,9 m βόρεια του άξονα των δαπέδων), που είναι η λωρίδα κίνησης του τριαξονικού φορείου (B 777) και επί της λωρίδας No 5 (απόσταση 3,9 m νότια του άξονα των δαπέδων), που είναι η λωρίδα κίνησης του διαξονικού φορείου (B 747), όπως φαίνεται στην εικόνα 5.9. Τα κέντρα φόρτισης απείχαν μεταξύ τους 9,15 m κατά την διαμήκη διεύθυνση.



Θέση εφαρμογής FWD

Εικόνα 5.9: Περιοχή εφαρμογής των δοκιμών FWD.

Όλα τα στοιχεία των δοκιμών FWD του πειραματικού προγράμματος CC1 ελήφθησαν από τη βάση δεδομένων της NAPTF, που είναι προσβάσιμη μέσω της σχετικής ιστοσελίδας της FAA. Τα στοιχεία συγκεντρώθηκαν, πινακοποιήθηκαν και στη συνέχεια έγινε η απαραίτητη διαλογή, ώστε να παραμείνουν για επεξεργασία αυτά που αφορούσαν τις ήδη επιλεγείσες θέσεις των αισθητήρων ASG (LSC3 και MSC12) και τις συγκεκριμένες χρονικές περιόδους (ημέρες) για τις οποίες σχηματίστηκαν τα δείγματα των πειραματικά μετρημένων τιμών οριζόντιων παραμορφώσεων στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5° : ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Ακολούθως δημιουργήθηκαν τα αρχεία δεδομένων, που στην παρούσα διπλωματική εργασία, ήταν απαραίτητα για την ενεργοποίηση της διαδικασίας ανάστροφου υπολογισμού (back-analysis). Τα αρχεία αυτά αποτελούν την πηγή εισαγωγής κωδικοποιημένων δεδομένων για το λογισμικό BAKFAA, που χρησιμοποιήθηκε στον ανάστροφο υπολογισμό. Η μία ομάδα των αρχείων εισαγωγής αφορούσε στα στοιχεία των μετρήσεων των δοκιμών FWD (φορτία, θέσεις επιταχυνσιομέτρων, μεγέθη ελαστικών υποχωρήσεων, γεωμετρικά στοιχεία παραμορφωσίμετρου, κ.λ.π.). Η άλλη ομάδα των αρχείων αφορούσε στα γεωμετρικά και δομικά χαρακτηριστικά των προς διερεύνηση δαπέδων (πάχη στρώσεων, λόγοι Poisson, σπερματικές τιμές μέτρων δυσκαμψίας/ελαστικότητας των υλικών των στρώσεων, κ.λ.π.). Ειδικά για τα στοιχεία των ελαστικών υποχωρήσεων (deflections), πραγματοποιήθηκε μια ακόμη σειρά ελέγχων για ύπαρξη σφαλμάτων, που είναι γνωστά ως σφάλματα Τύπου Ι, ΙΙ και ΙΙΙ. Οι έλεγχοι αυτοί συνίστανται στον εντοπισμό των μη αναμενόμενων (ασύμβατων) τιμών ελαστικών υποχωρήσεων, που μπορεί να οφείλονται σε διάφορα αίτια (ρωγμή κοντά στον κυκλικό δίσκο φόρτισης, δυσλειτουργία αισθητήρα, λανθασμένη διακρίβωση συσκευής FWD, κ.α.) και στον αποκλεισμό τους από την περαιτέρω επεξεργασία. Συνοπτικά, οι έλεγχοι αυτοί αφορούν στα ακόλουθα σφάλματα:

**Τύπου Ι**: Η τιμή της ελαστικής υποχώρησης σε κάποιον εξωτερικό αισθητήρα είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή στο κέντρο της φόρτισης. Το σφάλμα αυτό μπορεί να προκαλέσει τη μεγαλύτερη απόκλιση στα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού.

**Τύπου ΙΙ**: Πολύ μεγάλη μείωση της τιμής της ελαστικής υποχώρησης μεταξύ δύο διαδοχικών αισθητήρων. Η θεωρία των ελαστικών στρώσεων προβλέπει ότι οι τιμές των ελαστικών υποχωρήσεων θα πρέπει να μειώνονται όσο αυξάνει η απόσταση του αισθητήρα από το κέντρο φόρτισης, αλλά η μείωση αυτή θα πρέπει να είναι σταδιακή και ομοιόμορφα κατανεμημένη μεταξύ των αισθητήρων.

**Τύπου III**: Παρόμοια με το σφάλμα Τύπου Ι, εξετάζοντας ένα οποιοδήποτε ζεύγος διαδοχικών αισθητήρων, η τιμή της ελαστικής υποχώρησης στον αισθητήρα, που βρίσκεται στην εξωτερική πλευρά είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή του άλλου αισθητήρα.

Σφάλματα όπως τα παραπάνω δεν βρέθηκαν στα στοιχεία των μετρήσεων των δοκιμών FWD, που εξετάστηκαν. Τα στοιχεία των δαπέδων, όπως αυτά εισήχθησαν στο λογισμικό του ανάστροφου υπολογισμού, φαίνονται στην εικόνα 5.10.



Εικόνα 5.10: Τα πρότυπα των δαπέδων LFC και MFC, όπως αυτά εισήχθησαν στο λογισμικό ανάστροφου υπολογισμού BAKFAA.

Στον υπολογισμό ελήφθη υπόψη μια δύσκαμπτη στρώση (stiff layer) με μέτρο ελαστικότητας 6.895 Mpa (1.000.000 psi) και λόγο Poisson 0,50, η οποία θεωρήθηκε υποκείμενη της στρώσης έδρασης στις στάθμες 3,70 m και 3,00 m από την επιφάνεια, για τα δάπεδα LFC και MFC αντίστοιχα (Gopalakrishnan and Thompson, 2004). Ως σπερματικές τιμές (seed values) των μέτρων δυσκαμψίας/ελαστικότητας για τα υλικά των στρώσεων των δαπέδων, ελήφθησαν οι τιμές που φαίνονται στην εικόνα 5.10, οι οποίες αποτελούν την προτεινόμενη σύνθεση τιμών, τόσο σύμφωνα με τη σχετική εγκύκλιο οδηγία της FAA για το λογισμικό BAKFAA (FAA, 2011), όσο και τη Διεθνή, Αμερικανική Εταιρεία, Δομικών Υλικών (American Society for Testing and Materials - ASTM International), για τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού (ASTM International, 2008). Στην εικόνα 5.11 φαίνεται η αρχική οθόνη του λογισμικού BAKFAA, με τα δεδομένα εισαγωγής από τις μετρήσεις του FWD και τις σπερματικές τιμές για το δάπεδο LFC.

			ocumento (i	IVITIONAL IT_	DACKANALT	SIS/Dack-dridiy	sis_NAPTE_Input	t\LSC3_FWD	_Raw(		
Layer Number	Young's Modulus	Poisson's Ratio	Interface Parameter (0 to 1.0)	Thickness inches	Layer Changeable	e <u>L</u> oad F	WD File	KU No Di 1	AB FWD stance 255	File Load	
2	30.000	0,3500	1,0000	7,8000	<b>V</b>	Load 9	tructure	2	255 255	22.705 34.540	
4	5.801	0,3500	1,0000	94,7000	v V	C au a d	2hu.eh.u.e	Comment	at 25	5 +T :LFG I	
5	1.000.000	0,5000	1,0000	0,0000		5a <u>v</u> e:	structure				
6		0,0000	0,0000	0,0000		<u>B</u> ackc	alculate				
8	0	0,0000	0,0000	0,0000		Stop Bac	kcalculate				
9		0,0000	0,0000	0,0000		Show	Output				
Sensor Offset, in Defl, mils Calc, mils	1         2           -11,81         0,00           36,11         44,20	3 4 11,81 23, 35,29 24,	5 62 35,43 49 16,39	6 7 47,24 58 11,38 6	7 3.06 3.13	ste Badiue in	Delete negative offset sensors Evaluation Depth, inches 25.0001				
					Fu	5,91 Inction RMS, mils Func RMS	34.540 Iteration Number Iter No		Select L and <u>R</u> ur <u>E</u> xit	oad n LEAF	

Εικόνα 5.11: Η αρχική οθόνη του λογισμικού ΒΑΚΓΑΑ, με τα δεδομένα εισαγωγής από τις μετρήσεις του FWD και τις σπερματικές τιμές για το δάπεδο LFC.

Για κάθε μία από τις δύο περιπτώσεις δαπέδων (LFC και MFC), το πρόγραμμα Η/Υ BAKFAA ενεργοποιήθηκε (έτρεξε) επαναλληπτικά αρκετές φορές για κάθε συνδυασμό των δεδομένων εισαγωγής, ανά χρονική περίοδο (ημέρα). Στην εικόνα 5.12 φαίνεται η οθόνη εξόδου του λογισμικού BAKFAA, με τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού για το δάπεδο LFC.

```
📀 Image of FWD File - C:\Users\Rena\Documents\EMΠ\NAPTF_BACKANALYSIS\Back-analysis_NAPTF_Input\LSC3_FWD_Ra... 📼 🔳
               <u>C</u>lose
                             FWD File Image
                                             Backcalculation Results
                                                                         LEAF Output
     Structure Information
                                Poisson's Interface Thickness Changeable?
      Layer
                     Е
                1.406.012
                                                 1,00
                                                                 5,10
7,80
                                   0,35
                                                                                Yes
                                                                                Yes
        2
                    51.873
                                   0,35
                                                 1,00
        3
                                   0,35
                    16.658
                                                 1.00
                                                                36.40
                                                                                Yes
                     8.551
                                   0,35
                                                  1,00
                                                                94,70
        4
                                                                                Yes
                                                                                 No
        5
                1.000.000
                                   0.50
                                                 1,00
                                                                 0.00
     FWD Information
     Plate Radius = 5,91 in
Plate Load = 34.540 lb
ISM = 781 kip/in
     Sensor
                                       2
                                                 3
                                                          4
                                                                    5
                                                                             6
     Xensor
Offset, in -11,81 0,00 11,81 23,62 35,43
Calc Defl, mils 36,11 44,20 35,29 24,49 16,39
Meas Defl, mils 34,90 44,86 34,90 24,21 16,89
                                                                          47,24
                                                                                    59,06
                                                                           11,38
                                                                                     8,13
                                                                          12,02
                                                                                     8,72
     Function RMS, mils
                                - 0,0000
     Number of Iterations = 3
```

Εικόνα 5.12: Η οθόνη του λογισμικού ΒΑΚFAA, με τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού για το δάπεδο LFC.

Με τον τρόπο αυτό, σχηματίστηκε για κάθε χρονική περίοδο (ημέρα) μια ομάδα αριθμητικών αποτελεσμάτων (υπολογισμένες ελαστικές υποχωρήσεις και υπολογισμένα μέτρα δυσκαμψίας/ελαστικότητας των υλικών των στρώσεων των δαπέδων), τα οποία πληρούν το βασικό κριτήριο του αλγόριθμου υπολογισμού, που είναι η τιμή του συντελεστή διακύμανσης (Coefficient of variation, CoV) του σφάλματος των ελαχίστων τετραγώνων να κυμαίνεται στο διάστημα μεταξύ 2% και 5%. Από το σύνολο αυτό των αποτελεσμάτων, επελέγησαν εκείνα, που με βάση την εμπειρία και μετά από συνεκτίμηση όλων των άλλων στοιχείων του εξεταζόμενου οδοστρώματος (κατασκευαστικό προφίλ, ιστορικό φόρτισης, περιβαλλοντικές συνθήκες περιόδου) θεωρήθηκαν τα πλέον αντιπροσωπευτικά. Τα μέτρα δυσκαμψίας/ελαστικότητας, που επελέγησαν κατ΄αυτό τον τρόπο φαίνονται στις εικόνες 5.13 και 5.14 για τα δάπεδα LFC και MFC αντίστοιχα.

	Υπολογισμένα Μέτρα Ελαστκότητας	ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ FWD						
<u>ΜΟΝΤΕΛΟ</u> ΔΑΠΕΔΟΥ LFC		1	2	3	4	5	6	
Ασφαλτική στρώση	h <sub>1</sub> = 13 cm E <sub>1</sub> = 3.448 Mpa v <sub>1</sub> = 0,35	Е AC {Мра}	9.710	10.219	10.501	10.421	<mark>6.139</mark>	4.559
Βάση	$h_2$ = 19,8 cm $E_2$ = 207 Mpa $v_2$ = 0,35	E Base (Mpa)	401	199	253	229	355	164
Υπόβαση	h <sub>3</sub> = 92,5 cm E <sub>1</sub> = 103 Mpa v <sub>1</sub> = 0,35	E Subbase (Mpa)	114	160	114	146	87	111
Στρώση έδρασης	$h_4$ = 240,5 cm $E_4$ = 40 Mpa $v_4$ = 0,35 CBR 4	E Subgrade (Mpa)	57	50	60	47	68	53
Stiff Layer	Στάθμη: 370 cm E <sub>5</sub> = 6.895 Mpa ν <sub>5</sub> = 0,50	RMSE	0,80	0,92	0,59	0,93	0,57	0,66
		CV(RMSE)	3,2%	3,6%	2,3%	3,6%	2,0%	2,1%
		T <sub>AC</sub> (°C)	13	11	12	12	16	22

....





Εικόνα 5.14: Υπολογισμένα μέτρα δυσκαμψίας/ελαστικότητας των υλικών των στρώσεων του δαπέδου MFC (ανάστροφος υπολογισμός).

Είναι αξιοσημείωτη η μεταβολή των μέτρων δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του ασφαλτοσκυροδέματος. Επισημαίνεται, ότι όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφ 4, η εγκατάσταση της NAPTF είναι κλειστή (στεγασμένη), όχι όμως κλιματιζόμενη. Κατά συνέπεια το εύρος διακύμανσης των περιβαλλοντικών φυσικών μεγεθών είναι σχετικά περιορισμένο. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι καθ' όλη τη διάρκεια του πειραματικού κύκλου Construction Cycle 1 (CC1) η θερμοκρασία του ασφαλτοσκυροδέματος κυμάνθηκε μεταξύ 8°C και 22°C.

#### 5.4 Αναλυτικός υπολογισμός των παραμορφώσεων

Στην τρίτη φάση της εργασίας αναπτύσσεται, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, ένα πρότυπο τριών διαστάσεων, για την προσομοίωση των δαπέδων της NAPTF. Μέσω του προτύπου αυτού επιτυγχάνεται ο υπολογισμός της οριζόντιας παραμόρφωσης στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης του οδοστρώματος. Στη συνέχεια το πρότυπο αξιολογείται συγκρίνοντας τα υπολογισμένα στοιχεία των παραμορφώσεων με τα πειραματικά μετρηθέντα από τις δοκιμαστικές φορτίσεις των δαπέδων, όπως αυτά αναπτύχθηκαν στην παρ. 5.2 της παρούσας εργασίας.

Ο προγραμματισμός του προτύπου έγινε με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (ABAQUS/CAE User's manual, 2004). Το ABAQUS είναι μια ακολουθία από ισχυρά προγράμματα προσομοίωσης εφαρμοσμένης μηχανικής, βασισμένα στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Το ABAQUS περιέχει μια εκτενή βιβλιοθήκη στοιχείων, τα οποία μπορούν να διαμορφώσουν ουσιαστικά οποιαδήποτε γεωμετρία. Έχει έναν εξίσου εκτενή κατάλογο πρότυπων υλικών, τα οποία μπορούν να προσομοιώσουν τη συμπεριφορά των περισσότερων χαρακτηριστικών υλικών εφαρμοσμένης μηχανικής συμπεριλαμβανομένων των μετάλλων, ελαστικών, πολυμερών, σύνθετων υλικών, οπλισμένου σκυροδέματος και γεωτεχνικών υλικών όπως το έδαφος και ο βράχος. Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε η έκδοση ABAQUS 6.5, σε λειτουργικό περιβάλλον Windows XP.

Η παραμετροποίηση του προτύπου έγινε με εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία τριών διαστάσεων (3D), που αποτελούνται από είκοσι (20) κόμβους (εικόνα 3.9). Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ελήφθησαν από τα στοιχεία των δαπέδων της NAPTF. Για το αποτύπωμα του τροχού, μέσω του οποίου επιβάλλεται η φόρτιση, έγινε η παραδοχή ότι αυτό έχει σχήμα κύκλου, ακτίνας R=222cm (Kim, 2007), ενώ το φορτίο κάθε τροχού έχει μέγεθος

204 kN (20,4 t ή 45.000 lbs) και θεωρείται ομοιόμορφα κατανεμημένο στην κυκλική αυτή επιφάνεια, δηλαδή ισοδυναμεί με ομοιόμορφη πίεση 1,295 Mpa, όση είναι η πίεση του ελαστικού (188 psi), (Λοϊζος, 2011), δηλαδή:

$$R = \left(\frac{P}{p\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{5.1}$$

όπου

R = η ακτίνα του κυκλικού αποτυπώματος του τροχού

Ρ = το φορτίο του τροχού

*p* = η πίεση του ελαστικού

Αναφορικά με τις διαστάσεις του προτύπου, (μήκος x πλάτος), η πρακτική των περισσοτέρων ερευνητών είναι για το πρότυπο, που, λόγω συμμετρίας, προσομοιάζει το ένα τεταρτημόριο του δαπέδου, να λαμβάνεται διάσταση πλευράς το εικοσαπλάσιο τη ακτίνας του επιβαλλόμενου φορτίου (20R). Για τη συγκεκριμένη περίπτωση, ένα τέτοιο πρότυπο τεταρτημορίου θα είχε διαστάσεις 4,440 m x 4,440 m (20 R = 20 x 2,220 m = 4,440 m). Η επιλογή όμως του τεταρτημορίου δεν προσφέρεται στην περίπτωσή μας, δεδομένου ότι υπάρχει η ανάγκη να διερευνηθεί η εντατική κατάσταση του δαπέδου σε σχέση με εννέα (9) διαφορετικά ίχνη (track) διέλευσης του φορτίου, κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Η απαίτηση αυτή δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί με τη θεώρηση συμμετρίας. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκε να καταστρωθεί το πρότυπο του πλήρους δαπέδου, διαστάσεων 8,890 m x 8,890 m (Kim, 2007), επί του οποίου προσομοιάστηκε ολόκληρο το φορείο τροχών με διαμόρφωση διπλού τροχού σε τρείς άξονες (Β 777) για το δάπεδο LFC, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.15 ή διπλού τροχού σε δύο άξονες (Β 747) για το δάπεδο MFC, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.16. Τα υλικά όλων των στρώσεων των δαπέδων θεωρήθηκαν ισότροπα, γραμμικώς ελαστικά και ως μέτρα δυσκαμψίας/ελαστικότητας χρησιμοποιήθηκαν τα υπολογισμένα μέτρα ελαστικότητας, τα οποία προέκυψαν από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού, που αναπτύχθηκε στην παρ. 5.3 της παρούσας εργασίας. Στις εικόνες 5.17 και 5.18 παρουσιάζονται λεπτομέρειες αυτών των προτύπων. Το πρότυπο για το δάπεδο LFC αποτελείται από 20.748 πεπερασμένα στοιχεία (elements) και 90.759 κόμβους (nodes), ενώ το αντίστοιχο πρότυπο για το δάπεδο MFC αποτελείται από 14.819 πεπερασμένα στοιχεία και 67.620 κόμβους.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5° : ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ



Εικόνα 5.15: Τρισδιάστατο πρότυπο προσομοίωσης του δαπέδου LFC.



Εικόνα 5.16: Τρισδιάστατο πρότυπο προσομοίωσης του δαπέδου MFC.



Εικόνα 5.17: Λεπτομέρεια του πλέγματος του 3D προτύπου για το δάπεδο LFC.



Εικόνα 5.18: Λεπτομέρεια του πλέγματος του 3D προτύπου για το δάπεδο MFC.

Με την επίλυση των προτύπων υπολογίστηκε η μέγιστη οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση ε<sub>AC</sub> στη βάση της ασφαλτικής στρώσης, κατά τη διαμήκη πάντα διεύθυνση, που είναι η διεύθυνση κίνησης του φορτίου. Ο υπολογισμός έγινε για κάθε μία από τις δύο εξεταζόμενες θέσεις δαπέδων (LFC και MFC) και για κάθε ένα από τα εννέα (9) διαφορετικά ίχνη (track) δοκιμαστικών φορτίσεων ανά χρονική περίοδο (ημέρα), έτσι ώστε να προκύψουν πληθυσμοί υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων, αντίστοιχοι με αυτούς των μετρημένων παραμορφώσεων από την πειραματική φόρτιση. Οι αναπτυσσόμενες 5.19 και 5.20 αντίστοιχα.



Εικόνα 5.19: Αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στο 3D πρότυπο του δαπέδου LFC



Εικόνα 5.20: Αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στο 3D πρότυπο του δαπέδου MFC

Στην εικόνα 5.21 φαίνεται ένα τυπικό διάγραμμα της υπολογισμένης, μέγιστης, οριζόντιας παραμόρφωσης στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης του δαπέδου LFC, ως συνάρτηση του ίχνους διέλευσης του φορτίου ή αλλιώς ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" της θέσης μέτρησης από τον τροχό του φορείου. Σημειώνεται ότι στην εικόνα αυτή, για λόγους ευκρίνειας, τα τριαξονικό φορείο τροχών εμφανίζεται ως μονός άξονας. Στις εικόνες 5.22α και 5.22β φαίνονται τα διαγράμματα της υπολογισμένης οριζόντιας παραμόρφωσης του ασφαλτοσκυροδέματος του δαπέδου LFC, ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" της θέσης μέτρησης από τον τροχό του φορείου για κάθε μια από τις έξι χρονικές περιόδους (ημέρες) που εξετάστηκαν. Επισημαίνεται ότι η παραμόρφωση αυξάνεται σημαντικά με την πάροδο του χρόνου, δηλαδή με την αύξηση των διελεύσεων του φορτίου.



Εικόνα 5.21: Δάπεδο LFC - Τυπικό διάγραμμα υπολογισμένης οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" από τον τροχό του φορείου.



Εικόνα 5.22α: Δάπεδο LFC – Διαγράμματα οριζόντιας υπολογισμένης παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" από τον τροχό του φορείου για κάθε μία από τις εξεταζόμενες χρονικές περιόδους 1<sup>η</sup> έως 3<sup>η</sup>.







Εικόνα 5.22β: Δάπεδο LFC – Διαγράμματα οριζόντιας υπολογισμένης παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" από τον τροχό του φορείου για κάθε μία από τις εξεταζόμενες χρονικές περιόδους 4<sup>η</sup> έως 6<sup>η</sup>. Στην εικόνα 5.23 φαίνεται, για το δάπεδο MFC, ένα τυπικό διάγραμμα της υπολογισμένης, μέγιστης, οριζόντιας παραμόρφωσης στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης, ως συνάρτηση του ίχνους διέλευσης του φορτίου ή αλλιώς ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" της θέσης μέτρησης από τον τροχό του φορείου. Σημειώνεται ότι στην εικόνα αυτή, για λόγους ευκρίνειας, τα διαξονικό φορείο τροχών εμφανίζεται ως μονός άξονας. Στις εικόνες 5.24α, 5.24β και 5.24γ φαίνονται τα διαγράμματα της υπολογισμένης οριζόντιας παραμόρφωσης του ασφαλτοσκυροδέματος του δαπέδου MFC, ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" της θέσης μέτρησης από τον τροχό του φορείου. Σημειώνεται ότι στην εικόνα αυτή, για λόγους ευκρίνειας, τα διαξονικό φορείο τροχών εμφανίζεται ως μονός άξονας. Στις εικόνες 5.24α, 5.24β και 5.24γ φαίνονται τα διαγράμματα της υπολογισμένης οριζόντιας παραμόρφωσης του ασφαλτοσκυροδέματος του δαπέδου MFC, ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" της θέσης μέτρησης από τον τροχό του φορείου για κάθε μια από τις επτά χρονικές περιόδους (ημέρες) που εξετάστηκαν. Αξίζει να σημειωθεί ότι, όπως στην περίπτωση του δαπέδου LFC, κατά τον ίδιο τρόπο κι εδώ η παραμόρφωση αυξάνεται σημαντικά με την πάροδο του χρόνου, δηλαδή με την αύξηση των διελεύσεων του φορτίου.



Εικόνα 5.23: Δάπεδο MFC - Τυπικό διάγραμμα υπολογισμένης οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" από τον τροχό του φορείου.



Εικόνα 5.24α: Δάπεδο MFC – Διαγράμματα οριζόντιας υπολογισμένης παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" από τον τροχό του φορείου για τις εξεταζόμενες χρονικές περιόδους (ημέρες) 1<sup>η</sup> έως 3<sup>η</sup>.



Εικόνα 5.24β: Δάπεδο MFC – Διαγράμματα οριζόντιας υπολογισμένης παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" από τον τροχό του φορείου για τις εξεταζόμενες χρονικές περιόδους (ημέρες) 4<sup>η</sup> έως 6<sup>η</sup>.





Εικόνα 5.24γ: Δάπεδο MFC – Διάγραμμα οριζόντιας υπολογισμένης παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" από τον τροχό του φορείου για την 7<sup>η</sup> χρονική περίοδο.

Παράλληλα, στις εικόνες 5.25 Και 5.26 φαίνεται για τα δάπεδα LFC και MFC αντίστοιχα ένα τυπικό διάγραμμα της υπολογισμένης, μέγιστης οριζόντιας παραμόρφωσης στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης, στη θέση κάτω από τον τροχό του φορείου, ως συνάρτηση του χρόνου. Αξίζει να επισημανθεί η αυξητική τάση των παραμορφώσεων με την πάροδο του χρόνου, που οφείλεται στη μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτοσκυροδέματος, ως συνέπεια των περιβαλλοντικών παραγόντων (αύξηση θερμοκρασίας) και στην αύξηση των διελεύσεων.



Εικόνα 5.25: Δάπεδο LFC - Τυπικό διάγραμμα υπολογισμένης, οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος στη θέση κάτω από τον τροχό του φορείου, ως συνάρτηση του χρόνου



Εικόνα 5.26: Δάπεδο MFC - Τυπικό διάγραμμα υπολογισμένης, οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος στη θέση κάτω από τον τροχό του φορείου, ως συνάρτηση του χρόνου

Στην εικόνα 5.27 φαίνεται ένα τυπικό διάγραμμα που παρουσιάζει συνδυαστικά την πειραματικά μετρημένη και την υπολογισμένη οριζόντια παραμόρφωση στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης του δαπέδου LFC, ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης από τον τροχό του φορείου. Σημειώνεται ότι στην εικόνα αυτή, για λόγους ευκρίνειας, τα τριαξονικό φορείο τροχών εμφανίζεται ως μονός άξονας. Στην εικόνα 5.28α και 5.28β φαίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για όλες τις χρονικές περιόδους (ημέρες) που εξετάστηκαν.





Εικόνα 5.27: Δάπεδο LFC - Τυπικό διάγραμμα σύγκρισης πειραματικά μετρημένης και αναλυτικά υπολογισμένης οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" από τον τροχό του φορείου.



Εικόνα 5.28α: Δάπεδο LFC – Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικά μετρημένης και αναλυτικά υπολογισμένης οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" από τον τροχό του φορείου για τις εξεταζόμενες χρονικές περιόδους 1<sup>η</sup> έως 3<sup>η</sup>.



Εικόνα 5.28β: Δάπεδο LFC – Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικά μετρημένης και αναλυτικά υπολογισμένης οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" από τον τροχό του φορείου για τις εξεταζόμενες χρονικές περιόδους 4<sup>η</sup> έως 6<sup>η</sup>.

Στην εικόνα 5.29 φαίνεται, το αντίστοιχο τυπικό διάγραμμα, για το δάπεδο MFC, που παρουσιάζει συνδυαστικά την πειραματικά μετρημένη και την υπολογισμένη οριζόντια παραμόρφωση στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης, ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" από τον τροχό του φορείου. Σημειώνεται ότι στην εικόνα αυτή, για λόγους ευκρίνειας, τα διαξονικό φορείο τροχών εμφανίζεται ως μονός άξονας. Στις εικόνες 5.30α, 5.30β και 5.30γ φαίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για όλες τις χρονικές περιόδους (ημέρες) που εξετάστηκαν.



Εικόνα 5.29: Δάπεδο MFC - Τυπικό διάγραμμα σύγκρισης πειραματικά μετρημένης και αναλυτικά υπολογισμένης οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης από τον τροχό του φορείου.



Εικόνα 5.30α: Δάπεδο MFC – Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικά μετρημένης και αναλυτικά υπολογισμένης οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" από τον τροχό του φορείου για τις εξεταζόμενες χρονικές περιόδους 1<sup>η</sup> έως 3<sup>η</sup>.



Εικόνα 5.30β: Δάπεδο MFC – Συγκριτικά διαγράμματα πειραματικά μετρημένης και αναλυτικά υπολογισμένης οριζόντιας παραμόρφωσης ασφαλτοσκυροδέματος ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης "β" από τον τροχό του φορείου για τις εξεταζόμενες χρονικές περιόδους 4<sup>η</sup> έως 6<sup>η</sup>.





Από την άλλη πλευρά, στις εικόνες 5.31 Και 5.32 φαίνεται για τα δάπεδα LFC και MFC αντίστοιχα ένα τυπικό διάγραμμα σύγκρισης της πειραματικά μετρημένης με την αναλυτικά υπολογισμένη οριζόντια παραμόρφωση στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης, στη θέση κάτω από τον τροχό του φορείου, ως συνάρτηση του χρόνου.



Εικόνα 5.31: Δάπεδο LFC - Τυπικό διάγραμμα σύγκρισης της πειραματικά μετρημένης με την αναλυτικά υπολογισμένη οριζόντια παραμόρφωση ασφαλτοσκυροδέματος στη θέση κάτω από τον τροχό του φορείου, ως συνάρτηση του χρόνου



Εικόνα 5.32: Δάπεδο MFC - Τυπικό διάγραμμα σύγκρισης της πειραματικά μετρημένης με την αναλυτικά υπολογισμένη οριζόντια παραμόρφωση ασφαλτοσκυροδέματος στη θέση κάτω από τον τροχό του φορείου, ως συνάρτηση του χρόνου

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5° : ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Επισημαίνεται και εδώ η παρατηρούμενη αυξητική τάση των παραμορφώσεων με την πάροδο του χρόνου, που οφείλεται στη μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτοσκυροδέματος, ως συνέπεια των περιβαλλοντικών παραγόντων (αύξηση θερμοκρασίας) και στην αύξηση των διελεύσεων.
## 6 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

## 6.1 Γενικά

Σε αυτό το κεφάλαιο θα συγκριθούν οι τιμές των παραμορφώσεων στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης, όπως μετρήθηκαν κατά τις πειραματικές φορτίσεις από τους αισθητήρες ASG, με τις τιμές των παραμορφώσεων, όπως προέκυψαν από τον αναλυτικό υπολογισμό μέσω του 3D προτύπου. Η σύγκριση αυτή θα γίνει με τη βοήθεια δύο στατιστικών ελέγχων. Αρχικά θα εξεταστεί η ύπαρξη ή μη γραμμικής συσχετίσεως μεταξύ των δύο μεθόδων εκτίμησης παραμορφώσεων (πειραματική και αναλυτική), με τη βοήθεια της γραμμικής παλινδρόμησης. Στη συνέχεια θα ελεγχθούν οι πιθανές διαφορές στις μετρούμενες με τις δύο μεθόδους τιμές, κάνοντας χρήση του στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη. Τέλος θα γίνει μια προσπάθεια ερμηνείας των αποτελεσμάτων και ιδιαίτερα τυχόν αποκλίσεων που μπορεί να προκύψουν από τη σύγκριση ώστε να γίνει εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

## 6.2 Γραμμική συσχέτιση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων

### 6.2.1 Αρχές γραμμικής συσχέτισης με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης

Μία μέθοδος σύγκρισης είναι να εξετάσουμε τη γραμμική συσχέτιση της πειραματικά μετρημένης παραμόρφωσης μέσω αισθητήρων ASG, με την αντίστοιχη αναλυτικά υπολογισμένη μέσω των 3D μοντέλων. Ο έλεγχος γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των πειραματικών και των αναλυτικών αποτελεσμάτων θα γίνει με τη χρήση του συντελεστή προσδιορισμού R<sup>2</sup>, για κάθε μία από τις ομάδες παραμορφώσεων των δύο εξεταζόμενων δαπέδων LFC και MFC, που προέκυψαν για κάθε χρονική περίοδο (ημέρα) πειραματικών δοκιμών. Από όλες τις δυνατές καμπύλες παλινδρόμησης, η καμπύλη ελαχίστων τετραγώνων (x<sup>2</sup>) έχει το μικρότερο "τυπικό σφάλμα εκτίμησης" *s*<sub>y,x</sub>, της *y* από τη *x*. Το σφάλμα αυτό αποτελεί ένα μέτρο του πόσο διασπαρμένα είναι τα σημεία γύρω από την καμπύλη και δίδεται από τη σχέση:

$$S_{y,x} = \sqrt{\frac{\sum \left(y - \hat{y}\right)^2}{n}}$$

(6.1)

όπου  $y = \alpha + \beta x$  η τιμή εκτίμησης του y για δεδομένο x από την καμπύλη παλινδρόμησης των δεδομένων x, y. Αποδεικνύεται ότι, ειδικά για την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων, το  $s_{y,x}^2$ μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της διασποράς  $s_y^2$  και του "δειγματικού συντελεστή συσχέτισης" r, ως εξής:

$$\mathbf{S}_{y,x}^{2} = \mathbf{S}_{y}^{2} (1 - r^{2})$$
(6.2)

Όπου το r, ορίζεται από τη σχέση

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \tag{6.3}$$

όπου  $s_x$  και  $s_y$  είναι οι διασπορές του x και y (δεδομένων) αντίστοιχα, ενώ  $s_{xy}$  είναι η συνδιασπορά τους. Η εξίσωση (6.3) γίνεται:

$$r = \frac{\sum \left[ \left( x_i - \overline{x} \right) \left( y_i - \overline{y} \right) \right]}{\sqrt{\sum x_i^2 - n \ \overline{x}} \cdot \sqrt{\sum y_i^2 - n \ \overline{y}}}$$
(6.4)

Το μέγεθος αυτό εκφράζει το βαθμό προσαρμογής της ευθείας παλινδρόμησης στα δεδομένα, ενώ η περιοχή των τιμών του r είναι -1  $\leq r \leq$  1 ή αλλιώς  $r^2 \leq$  1. Όσο το r προσεγγίζει τη θετική ή την αρνητική μονάδα, τόσο η ευθεία προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα. Στην περίπτωση που  $r = \pm 1$  (ή  $r^2 = 1$ ), τότε λέμε ότι υπάρχει πλήρης γραμμική συσχέτιση και πλήρης γραμμική παλινδρόμηση. Η απόκλιση του  $r^2$  από την μονάδα, σύμφωνα με την εξίσ. (6.2), συνεπάγεται την ανάλογη αύξηση του τυπικού σφάλματος εκτίμησης (Μαλτέζος, 2002).

Ο συντελεστής προσδιορισμού R<sup>2</sup> είναι το πηλίκο :

$$R^{2} = \frac{n \sum x_{i} y_{i} - (\sum x_{i}) \sum y_{i}}{\sqrt{n \sum x_{i}^{2} - (\sum x_{i})^{2}} \cdot \sqrt{n \sum y_{i}^{2} - (\sum y_{i})^{2}}}$$
(6.5)

Και με αυτόν μπορούμε να ελέγξουμε την αξία του απλού γραμμικού προτύπου, το οποίο προσαρμόζουμε στα δεδομένα. Ο συντελεστής προσδιορισμού εκφράζει το ποσοστό της

μεταβλητότητας της μεταβλητής της *y*, που εξηγείται από την μεταβλητή *x*. Όσο πιο κοντά βρίσκεται η τιμή του R<sup>2</sup> στην μονάδα, τόσο πιο ισχυρή γίνεται η γραμμική σχέση εξάρτησης των μεταβλητών *x* και *y*.

## 6.2.2 Γραμμική συσχέτιση των παραμορφώσεων του δαπέδου LFC

Στη συνέχεια αντιπαρατίθενται στις πειραματικά μετρημένες τιμές των παραμορφώσεων ( $\mathcal{E}_m$ ) οι αντίστοιχες αναλυτικά υπολογισμένες τιμές ( $\mathcal{E}_c$ ). Με τη χρήση του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης R<sup>2</sup> γίνεται στατιστική σύγκριση μεταξύ των πειραματικών και των αναλυτικών αποτελεσμάτων. Σε κάθε θέση παραμόρφωσης σχεδιάζεται το διάγραμμα διασποράς πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παραμόρφωσης. Σε κάθε διάγραμμα υπολογίζεται και παρουσιάζεται η γραμμή τάσης, η οποία μας υποδεικνύει το κατά πόσο υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο διαφορετικών ειδών δεδομένων. Η αξιοπιστία της γραμμής τάσης ελέγχεται με την τιμή του συντελεστή R<sup>2</sup>. Ακολουθούν τα αποτελέσματα για το δάπεδο LFC:

Πίνακας 6.1: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 1<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

ΔΑΠΕΔΟ: LFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 1
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m (microstrains)	<b>E</b> c (microstrains)
-589	173,59	84,39
-523	178,59	96,16
-340	279,44	144,09
-265	295,83	189,31
0	473,36	266,50
253	313,15	173,15
515	142,21	93,15
777	74,41	24,47
1.036	43,66	13,87
Μέσος όρος	219,36	120,56
Τυπική απόκλιση	134,33	81,10



Εικόνα 6.1: Διάγραμμα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 1<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

Πίνακας 6.2: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 2<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

ΔΑΠΕΔΟ: LFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 2
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m (microstrains)	<b>E</b> c (microstrains)
-589	151,08	94,78
-523	165,21	108,51
-340	251,60	162,76
-265	272,69	212,88
0	420,66	298,33
253	263,16	195,95
515	129,20	105,64
777	69,56	26,72
1.036	42,26	13,90
Μέσος όρος	196,16	135,50
Τυπική απόκλιση	117,80	91,37



Εικόνα 6.2: Διάγραμμα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 2<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

Πίνακας 6.3: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 3<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

ΔΑΠΕΔΟ: LFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 3
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m (microstrains)	<b>E</b> c (microstrains)
-589	155,82	99,76
-523	172,35	112,68
-340	259,35	163,80
-265	282,18	211,22
0	550,85	291,53
253	302,22	193,50
515	142,55	106,80
777	70,96	30,38
1.036	43,69	16,70
Μέσος όρος	220,00	136,26
Τυπική απόκλιση	153,02	88,05



Εικόνα 6.3: Διάγραμμα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 3<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

Πίνακας 6.4: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 4<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

ΔΑΠΕΔΟ: LFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 4
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m (microstrains)	<b>E</b> c (microstrains)
-589	165,77	93,75
-523	178,58	106,91
-340	269,10	159,04
-265	297,69	207,32
0	578,44	289,52
253	312,30	190,51
515	141,18	103,33
777	67,35	27,10
1.036	43,60	14,46
Μέσος όρος	228,22	132,44
Τυπική απόκλιση	162,07	88,30



Εικόνα 6.4: Διάγραμμα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 4<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

Πίνακας 6.5: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 5<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

ΔΑΠΕΔΟ: LFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 5
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m (microstrains)	<b>E</b> c (microstrains)
-589	203,26	102,22
-523	201,66	118,21
-340	337,58	185,10
-265	358,03	249,22
0	659,21	359,48
253	358,96	227,96
515	173,13	118,39
777	84,39	26,91
1.036		15,39
Μέσος όρος	297,03	155,87
Τυπική απόκλιση	176,81	110,84



Εικόνα 6.5: Διάγραμμα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 5<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

Πίνακας 6.6: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 6<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

ΔΑΠΕΔΟ: LFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 6
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m	<b>E</b> c (microstrains)
-589	(microstrains)	
-509		134,03
-523	234,49	159,22
-340	348,01	262,66
-265	390,11	360,25
0	905,47	529,50
253	452,50	332,40
515	247,74	166,98
777	97,69	29,55
1.036		15,00
Μέσος όρος	382,29	221,06
Τυπική απόκλιση	258,47	166,62



Εικόνα 6.6: Διάγραμμα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 6<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

Τα αποτελέσματα των παραπάνω διαγραμμάτων συνοψίζονται στον πίνακα 6.7, όπου παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης R<sup>2</sup>, των παραμορφώσεων του δαπέδου LFC, για το σύνολο των χρονικών περιόδων. Στην εικόνα 6.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με τη μορφή ραβδογράμματος.

ΔΑΠΕΔΟ: LFC		
Χρονική περίοδος	Συντελεστής R <sup>2</sup>	
1	0,98	
2	0,98	
3	0,94	
4	0,94	
5	0,95	
6	0,90	

Πίνακας 6.7: Συντελεστής γραμμικής συσχέτισης R<sup>2</sup> της παραμόρφωσης του δαπέδου LFC.



Εικόνα 6.7: Ραβδόγραμμα συντελεστή γραμμικής συσχέτησης R<sup>2</sup> της παραμόρφωσης του δαπέδου LFC

Είναι φανερό ότι, για το σύνολο των περιπτώσεων του δαπέδου LFC, ο δείκτης R<sup>2</sup> επιτρέπει τον ισχυρισμό για πολύ καλή γραμμική συσχέτιση μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών τιμών παραμόρφωσης. Πιο συγκεκριμένα, η μικρότερη τιμή, που λαμβάνει ο δείκτης R<sup>2</sup> είναι η τιμή 0,90 για την έκτη (6<sup>n</sup>) εξεταζόμενη χρονική περίοδο (ημέρα).

### 6.2.3 Γραμμική συσχέτιση των παραμορφώσεων του δαπέδου MFC

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα της σχέσης των πειραματικά μετρημένων τιμών των παραμορφώσεων ( $\mathcal{E}_m$ ) με τις αναλυτικά υπολογισμένες τιμές ( $\mathcal{E}_c$ ) για το δάπεδο MFC:

Πίνακας 6.8: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 1<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

$\Delta A \Pi E \Delta O$ : MFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 1
		-
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m (microstrains)	<b>E</b> c (microstrains)
-589	149,72	77,53
-523	213,66	120,26
-340	221,42	143,84
-265	335,48	206,70
0	240,05	131,72
253	108,95	60,56
515	47,35	7,00
777	27,85	8,59
1.036	15,13	2,74
Μέσος όρος	151,07	84,33
Τυπική απόκλιση	110.11	71.62



Εικόνα 6.8: Διάγραμμα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 1<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

Πίνακας 6.9: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 2<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

ΔΑΠΕΔΟ: MFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 2
	-	
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m (microstrains)	<b>E</b> c (microstrains)
-589	132,44	168,86
-523	197,18	254,55
-340	243,15	301,52
-265	421,60	426,34
0	292,47	275,44
253	133,58	128,83
515	50,41	16,59
777	29,43	17,85
1.036	19,13	4,97
Μέσος όρος	168,82	177,22
Τυπική απόκλιση	134,14	148,50



Εικόνα 6.9: Διάγραμμα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 2<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

Πίνακας 6.10: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 3<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

ΔΑΠΕΔΟ: MFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 3
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m (microstrains)	<b>E</b> c (microstrains)
-589	124,47	163,47
-523	207,68	243,46
-340	211,02	287,39
-265	340,94	403,62
0	274,42	261,84
253	123,93	123,86
515	43,67	17,97
777	25,74	18,37
1.036	16,50	5,60
Μέσος όρος	152,04	169,51
Τυπική απόκλιση	114,49	140,31



Εικόνα 6.10: Διάγραμμα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 3<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

Πίνακας 6.11: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 4<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

ΔΑΠΕΔΟ: MFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 4
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m (microstrains)	<b>E</b> c (microstrains)
-589	129,37	179,79
-523	220,86	267,31
-340	218,06	315,24
-265	357,03	442,20
0	292,12	287,38
253	130,28	135,80
515	45,76	19,05
777	27,17	19,31
1.036	16,84	5,38
Μέσος όρος	159,72	185,72
Τυπική απόκλιση	120,60	154,14



Εικόνα 6.11: Διάγραμμα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 4<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

Πίνακας 6.12: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 5<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

ΔΑΠΕΔΟ: MFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 5
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m (microstrains)	<b>E</b> c (microstrains)
-589	148,76	205,84
-523	250,94	311,25
-340	251,76	368,98
-265	416,92	522,57
0	326,71	337,31
253	146,77	157,15
515	54,86	19,19
777	31,29	20,96
1.036	21,24	5,39
Μέσος όρος	183,25	216,52
Τυπική απόκλιση	138,20	182,30



Εικόνα 6.12: Διάγραμμα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 5<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

Πίνακας 6.13: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 6<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

ΔΑΠΕΔΟ: MFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 6
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m (microstrains)	<b>E</b> c (microstrains)
-589	179,31	217,098
-523	291,31	358,475
-340	300,61	436,168
-265	547,30	646,116
0	384,95	403,593
253	170,24	175,893
515	64,08	6,55434
777	42,98	17,0761
1.036	32,37	2,58043
Μέσος όρος	223,68	251,51
Τυπική απόκλιση	173,49	225,89



Εικόνα 6.13: Διάγραμμα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 6<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

Πίνακας 6.14: Πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 7<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

ΔΑΠΕΔΟ: MFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 7
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m (microstrains)	<b>E</b> c (microstrains)
-589	213,11	295,15
-523	341,32	461,63
-340	351,42	552,60
-265	619,54	796,85
0	415,15	508,42
253	237,48	230,33
515	77,18	19,17
777	43,81	26,10
1.036	41,36	5,16
Μέσος όρος	260,04	321,71
Τυπική απόκλιση	193,32	278,76



Εικόνα 6.14: Διάγραμμα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 7<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

Г

Τα αποτελέσματα των παραπάνω διαγραμμάτων συνοψίζονται στον πίνακα 6.15, όπου παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης R<sup>2</sup>, των παραμορφώσεων του δαπέδου MFC, για το σύνολο των χρονικών περιόδων. Στην εικόνα 6.15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με τη μορφή ραβδογράμματος.

ΔΑΠΕΔΟ: ΜFC		
Χρονική περίοδος	Συντελεστής R <sup>2</sup>	
1	0,99	
2	0,95	
3	0,96	
4	0,95	
5	0,96	
6	0,97	
7	0,97	

Πίνακας 6.15: Συντελεστής γραμμικής συσχέτισης R<sup>2</sup> της παραμόρφωσης του δαπέδου MFC.



Εικόνα 6.15: Ραβδόγραμμα συντελεστή γραμμικής συσχέτισης R<sup>2</sup> της παραμόρφωσης του δαπέδου MFC

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, για το σύνολο των περιπτώσεων του δαπέδου MFC, ο δείκτης R<sup>2</sup> τεκμηριώνει τον ισχυρισμό για πολύ καλή γραμμική συσχέτιση μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών τιμών παραμόρφωσης.

## 6.2.4 Συγκεντρωτικά συμπεράσματα από τα αποτελέσματα της γραμμικής συσχέτισης

Από την στατιστική επεξεργασία με τη χρήση του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης R<sup>2</sup> έγινε μια πρώτη σύγκριση των τιμών των μετρημένων παραμορφώσεων, όπως προκύπτουν από το σύστημα των αισθητήρων ASG, με τις τιμές των παραμορφώσεων οι οποίες προκύπτουν μέσω των αναλυτικών μεθόδων.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, σε όλες τις εξεταζόμενες θέσεις των δύο δαπέδων (LFC και MFC), ο δείκτης R<sup>2</sup> επιτρέπει τον ισχυρισμό για πολύ καλή γραμμική συσχέτιση μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών τιμών παραμόρφωσης. Πιο συγκεκριμένα, η μικρότερη τιμή, που λαμβάνει ο δείκτης R<sup>2</sup> είναι η τιμή 0,90 για την έκτη (6<sup>n</sup>) εξεταζόμενη χρονική περίοδο (ημέρα) του δαπέδου LFC.

# 6.3 Στατιστικό t-test κατά ζεύγη πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων

#### 6.3.1 Αρχές στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη παρατηρήσεων

Μία από τις πλέον συχνά χρησιμοποιούμενες επαγωγικές διαδικασίες στη στατιστική συμπερασματολογία, είναι η σύγκριση των μέσων τιμών δύο ομάδων. Οι ομάδες αυτές μπορούν να αποτελούνται από παρατηρήσεις οι οποίες είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους ή να αποτελούνται από παρατηρήσεις συσχετιζόμενες κατά ζεύγη. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, η σύγκριση των μέσων τιμών γίνεται με το *t-test*. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο έλεγχος αφορά στη σύγκριση των μέσων τιμών δύο ομάδων παρατηρήσεων (πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων) εξαρτημένων κατά ζεύγη (paired-samples t-test), αφού κάθε ζεύγος παραμορφώσεων αφορά στιο ίδιο σημείο του δαπέδου και στην ίδια χρονική περίοδο. Ο έλεγχος αφορά στις διαφορές των μέσων τιμών των των δύο δειγμάτων και αποσκοπεί στο να διαπιστωθεί αν οι διαφορές αυτές και κατά συνέπεια και οι διαφορές μεταξύ των πειραματικών και αναλυτικά υπολογισμένων και αναλυτικά σημαντικές.

Από τα ζεύγη των παρατηρήσεων ( $x_{Ai}$ ,  $x_{Bi}$ ), που προέρχονται από τα δύο δείγματα τιμών  $x_{Ai}$  και  $x_{Bi}$ , δημιουργείται ένα νέο σύνολο μετρήσεων που αποτελείται από τις διαφορές των ζευγών  $D_i = x_{Ai}$  -  $x_{Bi}$ . Οι διαφορές  $D_i$  ορίζουν μια νέα μεταβλητή δια μέσου της οποίας θα γίνει ο έλεγχος. Η σύγκριση των μέσων τιμών των δύο ομάδων γίνεται συγκρίνοντας την πληθυσμιακή μέση τιμή των διαφορών με την τιμή 0, δηλαδή ελέγχεται η μηδενική υπόθεση:

$$H_0: (\mu_A - \mu_B = 0)$$
  
έναντι της  
 $H_1: (\mu_A - \mu_B \neq 0)$ 

Η μέση τιμή D των διαφορών όλων των ζευγών  $D_i$ 

$$\overline{D} = \frac{\sum_{i=1}^{n} D_i}{n}$$
(6.5)

αποτελεί σημειακή εκτίμηση της διαφοράς των πληθυσμιακών μέσων  $\mu_A - \mu_B$ . Επιπλέον, η τυπική απόκλιση των διαφορών όλων των ζευγών ορίζεται από τη γνωστή ποσότητα

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( D_i - \bar{D} \right)^2}{n-1}}$$
(6.6)

Συμβολίζοντας τη διαφορά των πληθυσμιακών μέσων  $\mu_D = \mu_A - \mu_B$  οι υποθέσεις, που διαμορφώνονται είναι :

$$H_0: (\mu_D = 0)$$
  
έναντι της  
 $H_1: (\mu_D \neq 0)$ 

Υποθέτοντας ότι η κατανομή των πληθυσμιακών διαφορών είναι κανονική, ο έλεγχος της μηδενικής υπόθεσης *H*<sub>0</sub> μπορεί να γίνει με τη βοήθεια του κριτηρίου

$$t_{stat} = \frac{\bar{D} - \mu_D}{S_D / \sqrt{n}}$$
(6.7)

όπου  $s_D$  είναι η τυπική απόκλιση και  $\frac{S_D}{\sqrt{n}}$  το τυπικό σφάλμα της δειγματικής διαφοράς  $\bar{D}$ .

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6° : ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

Αν η μηδενική υπόθεση είναι αληθής, η παραπάνω ποσότητα ακολουθεί την κατανομή *t* του Student, με *n-1* βαθμούς ελευθερίας. Αν η πιθανότητα του ελέγχου, δηλαδή η πιθανότητα να προκύψει μια τιμή για την κατανομή *t* τόσο μεγάλη όσο αυτή του κριτηρίου  $t_{stat}$  της εξίσ. (6.7), είναι p < 0,05, η μηδενική υπόθεση της ισότητας της μέσης διαφοράς με το 0 απορρίπτεται. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε συγκρίνοντας την τιμή του κριτηρίου  $t_{stat}$  με τη θεωρητική  $t_{critical}$  που αντιστοιχεί σε *n-1* βαθμούς ελευθερίας, για το δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης (συνήθως 95%). Αν είναι  $t_{stat} \ge t_{critical}$ , τότε η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται στη δεδομένη στάθμη εμπιστοσύνης. Σε αντίθετη περίπτωση, οι όποιες διαφορές μεταξύ των συγκρινόμενων ζευγών θεωρούνται τυχαίες (Μπένος, 1991).

#### 6.3.2 Στατιστικός έλεγχος t-test κατά ζεύγη παραμορφώσεων του δαπέδου LFC

Η εφαρμογή της δοκιμασίας t-test κατά ζεύγη, πραγματοποιείται μεταξύ των αποτελεσμάτων των παραμορφώσεων από το πείραμα και αυτών που προκύπτουν από την εφαρμογή της αναλυτικής μεθόδου ώστε να γίνει συγκριτική ανάλυση των διαφορών των δύο μεθόδων. Θεωρούμε ως μηδενική υπόθεση το ότι η αναλυτική μέθοδος υπολογισμού της παραμόρφωσης δεν διαφέρει από την πειραματική και όποιες διαφορές είναι τυχαίες, δηλαδή η διαφορά των μέσων τιμών των δύο πληθυσμών είναι μηδενική. Αρχικά θα αναφερθούμε στις παραμορφώσεις του δαπέδου LFC.

Οι επιμέρους πίνακες των παρατηρήσεων (Πίνακες Π6.1, Π6.3, Π6.5, Π6.7, Π6.9 και Π6.10) και τα αντίστοιχα αποτελέσματα του ελέγχου t-test (Πίνακες Π6.2, Π6.4, Π6.6, Π6.8 Π6.10 και Π6.12), για κάθε μια χρονική περίοδο (ημέρα), φαίνονται στο Παράρτημα Α της παρούσα εργασίας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του ελέγχου, για τις ομάδες παρατηρήσεων όλων των εξεταζόμενων χρονικών περιόδων, η απόλυτη τιμή του κριτηρίου  $t_{stat}$  είναι μεγαλύτερη από την τιμή του  $t_{critical}$  (δίπλευρο), επομένως η μηδενική υπόθεση  $H_0$ : ( $\mu_D = 0$ ) απορρίπτεται για το δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (α=0,05). Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε και από την παρατήρηση ότι η πιθανότητα να ισχύει η μηδενική υπόθεση (P(T<=t)) είναι μικρότερη από το α (α=0,05).

Αν επαναλάβουμε τον έλεγχο θεωρώντας ως μηδενική υπόθεση ότι η διαφορά των μέσων τιμών των δύο πληθυσμών δεν είναι μηδενική, αλλά ισούται με τη μέση τιμή των επί μέρους διαφορών των παρατηρήσεων,  $H_0$ : ( $\mu_D = \bar{D}$ ), με εναλλακτική υπόθεση την  $H_1$ : ( $\mu_D \neq \bar{D}$ ), τότε από τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε (βλέπε πίνακες Π6.2, Π6.4, Π6.6, Π6.8, Π6.10 και Π6.12 του Παραρτήματος Α), για κάθε μια χρονική περίοδο (ημέρα), φαίνεται ότι, για τις ομάδες παρατηρήσεων όλων των εξεταζόμενων χρονικών περιόδων, η απόλυτη τιμή του κριτηρίου  $t_{stat}$  είναι μικρότερη από την τιμή του  $t_{critical}$  (δίπλευρο), επομένως η μηδενική υπόθεση  $H_0$ : ( $\mu_D = \overline{D}$ ) ισχύει για το δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (α=0,05). Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε και από την παρατήρηση ότι η πιθανότητα να ισχύει η μηδενική υπόθεση (P(T<=t)) είναι μεγαλύτερη από το α (α=0,05).

Παρατηρούμε επίσης ότι η μηδενική υπόθεση  $H_0$ : ( $\mu_D = D$ ) ισχύει ακόμα και για επίπεδο εμπιστοσύνης 99% (α=0,01) (βλέπε πίνακες Π6.2, Π6.4, Π6.6, Π6.8, Π6.10 και Π6.12 του Παραρτήματος Α). Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το δάπεδο LFC φαίνονται στον Πίνακα 6.16.

Πίνακας 6.16: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων για το δάπεδο LFC.

ΔΑΠΕΔΟ: LFC			
Χρονική περίοδος	Διαφορές στατιστικά μη σημαντικές	Διαφορές στατιστικά σημαντικές	Ποσοτικοποίηση διαφορών (microstrain)
1	Х	✓	99
2	Х	✓	61
3	Х	✓	84
4	Х	✓	96
5	Х	✓	124
6	Х	✓	119

Συμπερασματικά, για το δάπεδο LFC, οι διαφορές, μεταξύ των πειραματικών και των αναλυτικά υπολογισμένων τιμών των παραμορφώσεων, είναι στατιστικά σημαντικές, αλλά μπορούν να ποσοτικοποιηθούν και είναι της τάξης των 84-124 microstrains.

### 6.3.3 Στατιστικός έλεγχος t-test κατά ζεύγη παραμορφώσεων του δαπέδου MFC

Και στην περίπτωση του δαπέδου MFC, θεωρούμε αρχικά ως μηδενική υπόθεση το ότι η αναλυτική μέθοδος υπολογισμού της παραμόρφωσης δεν διαφέρει από την πειραματική και όποιες διαφορές είναι τυχαίες, δηλαδή η διαφορά των μέσων τιμών των δύο πληθυσμών είναι μηδενική. Η μηδενική υπόθεση  $H_0$ : ( $\mu_D = 0$ ) ελέγχεται για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (α=0,05).

Τα στοιχεία των παρατηρήσεων για την πρώτη (1<sup>η</sup>) χρονική περίοδο και τα αποτελέσματα του ελέγχου t-test, φαίνονται στους πίνακες Π6.13 και Π6.14 αντίστοιχα, του Παραρτήματος Α της παρούσα εργασίας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του ελέγχου, για την πρώτη (1<sup>ης</sup>) χρονική περίοδο, η απόλυτη τιμή του κριτηρίου  $t_{stat}$  είναι μεγαλύτερη από την τιμή του  $t_{critical}$  (δίπλευρο), επομένως η μηδενική υπόθεση  $H_0$ : ( $\mu_D = 0$ ) απορρίπτεται για το δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (α=0,05). Αν επαναλάβουμε τον έλεγχο θεωρώντας ως μηδενική υπόθεση ότι η διαφορά των μέσων τιμών των δύο πληθυσμών δεν είναι μηδενική, αλλά ισούται με τη μέση τιμή των επί μέρους διαφορών των παρατηρήσεων,  $H_0$ : ( $\mu_D = \overline{D}$ ), με εναλλακτική υπόθεση την  $H_1$ : ( $\mu_D \neq \overline{D}$ ), τότε από τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε, φαίνεται ότι η απόλυτη τιμή του κριτηρίου  $t_{stat}$  είναι μικρότερη από την τιμή του  $t_{critical}$  (δίπλευρο), επομένως η μηδενική υπόθεση  $H_0$ : ( $\mu_D = \overline{D}$ ) ισχύει για το δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Παρατηρούμε επίσης ότι η μηδενική υπόθεση  $H_0$ : ( $\mu_D = \overline{D}$ ) ισχύει ακόμα και για επίπεδο εμπιστοσύνης 99% (α=0,01).

Αντίθετα, με βάση τα αποτελέσματα του ελέγχου t-test για τις υπόλοιπες χρονικές περιόδους (ημέρες), από την 2<sup>η</sup> έως και την 7<sup>η</sup>, ο έλεγχος για τη μηδενική υπόθεση  $H_0$ : ( $\mu_D = 0$ ) δείχνει οτι η απόλυτη τιμή του κριτηρίου  $t_{stat}$  είναι μικρότερη από την τιμή του  $t_{critical}$  (δίπλευρο), επομένως η μηδενική υπόθεση  $H_0$ : ( $\mu_D = 0$ ) θεωρούμε ότι ισχύει για όλες αυτές τις χρονικές περιόδους, για το δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Γι' αυτές δηλαδή τις περιόδους δεν υπάρχει στατιστική διαφορά μεταξύ των δύο ομάδων παρατηρήσεων και επομένως η αναλυτικά υπολογισμένων παρατηρήσεων για τις χρονικές αυτές περιόδους (2<sup>η</sup> έως και 7<sup>η</sup>) φαίνονται στους πίνακες Π6.15, Π6.17, Π6.19, Π6.21 και Π6.23 του Παραρτήματος Α, ενώ τα αποτελέσματα του ελέγχου t-test παρουσιάζονται στους πίνακες Π6.16, Π6.18, Π6.20 Π6.22 και Π6.24 για κάθε μία χρονική περίοδο αντίστοιχα. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το δάπεδο LFC φαίνονται στον Πίνακα 6.17.

ΔΑΠΕΔΟ: MFC

Πίνακας 6.17: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων για το δάπεδο MFC.

Χρονική περίοδος	Διαφορές στατιστικά μη σημαντικές	Διαφορές στατιστικά σημαντικές	Ποσοτικοποίηση διαφορών (microstrain)
1	Х	$\checkmark$	67
2	$\checkmark$	Х	-
3	$\checkmark$	Х	-
4	$\checkmark$	X	-
5	$\checkmark$	X	-
6	$\checkmark$	X	-
7	$\checkmark$	Х	-

Συμπερασματικά, για το δάπεδο MFC, εξαιρουμένης της πρώτης χρονικής περιόδου, οι διαφορές, μεταξύ των πειραματικών και των αναλυτικά υπολογισμένων τιμών των παραμορφώσεων, δεν είναι στατιστικά σημαντικές και επομένως οφείλονται σε τυχαία και όχι συστηματικά σφάλματα.

## 6.4 Γενικά συμπεράσματα στατιστικής επεξεργασίας

Από τη σύγκριση της πειραματικής και της αναλυτικής μεθόδου μέσω στατιστικών ελέγχων προέκυψε ότι, σε όλες τις εξεταζόμενες θέσεις των δύο δαπέδων (LFC και MFC), ο δείκτης R<sup>2</sup> δικαιολογεί τον ισχυρισμό περί πολύ καλής γραμμικής συσχέτισης μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών τιμών παραμόρφωσης. Από τους στατιστικούς ελέγχους t-test κατά ζεύγη παρατηρήσεων, που πραγματοποιήθηκαν στις διάφορες ομάδες παραμορφώσεων των δαπέδων LFC και MFC, προέκυψε ότι για το δάπεδο LFC, οι διαφορές, μεταξύ των πειραματικών και των αναλυτικά υπολογισμένων τιμών των παραορφώσεων, είναι στατιστικά σημαντικές, αλλά μπορούν να ποσοτικοποιηθούν και είναι της τάξης των 84-124 microstrains. Αντίθετα, για το δάπεδο MFC, εξαιρουμένης της πρώτης χρονικής περιόδου, οι διαφορές, μεταξύ των πειραραφώσεων, δεν είναι στατιστικά σημαντικές.

### 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο να συνεισφέρει στη διερεύνηση της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων των αεροδρομίων. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται οι αποκλίσεις μεταξύ της συμπεριφοράς που προβλέπει οι αναλυτικός υπολογισμός και αυτής που συμβαίνει στην πράξη κατά την επί τόπου επιβολή της φόρτισης. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε διερεύνηση των οριζόντιων παραμορφώσεων, που αναπτύχθηκαν κατά την διαμήκη διεύθυνση, στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης των ευκάμπτων αεροπορικών δαπέδων της πειραματικής εγκατάστασης μεγάλης κλίμακας NAPTF, υπό την επίβολή ευρείας κλίμακας δοκιμαστικών φορτίσεων. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε η απόκριση της ασφαλτικής στρώσης στη φόρτιση με διαμορφώσεις συστημάτων τροχών, που προσομοιάζουν αυτά των αεροσκαφών νέας γενιάς, της πολιτικής αεροπορίας (Β 777 και Β 747).

Επιπρόσθετα, μέσω των μη καταστρεπτικών ελέγχων με το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (FWD), της FAA, ελήφθησαν τα απαραίτητα πειραματικά στοιχεία απόκρισης των οδοστρωμάτων, από τα οποία στη συνέχεια με την κατάλληλη επεξεργασία και με εφαρμογή του αλγόριθμου του ανάστροφου υπολογισμού (back-analysis), προσδιορίστηκαν τα απαιτούμενα δομικά χαρακτηριστικά των στρώσεων των δαπέδων, που ήταν απαραίτητα για την προσομοίωση του πειράματος με αναλυτικές μεθόδους. Για τους σκοπούς της προσομοίωσης αναπτύχθηκε ένα τρισδιάστατο πρότυπο των οδοστρωμάτων της NAPTF, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και υπολογίστηκαν οι αναμενόμενες παραμορφώσεις στις αντίστοιχες θέσεις με τις πειραματικά καταγεγραμμένες. Τα αποτελέσματα της αναλυτικής προσέγγισης τέθηκαν σε συγκριτική ανάλυση με τα αντίστοιχα πειραματικά και εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα.

Αρχικά, από την ανάλυση των πειραματικά καταγεγραμμένων παραμορφώσεων στα δάπεδα της εγκατάστασης, προέκυψαν κάποια συμπεράσματα σχετικά με τη συμπεριφορά των δύο δαπέδων υπό τη συγκεκριμένη φόρτιση. Επισημαίνεται ότι τα τμήματα των δυο ευκάμπτων οδοστρωμάτων που αποτέλεσαν αντικείμενο της διερεύνησης δεν έχουν την ίδια δομή και γεωμετρία, ενώ καταπονήθηκαν από διαφορετικές διατάξεις συστημάτων τροχών. Το δάπεδο LFC, που διαθέτει στρώση έδρασης με CBR 4 φορτίστηκε με διάταξη τροχών τύπου B 777, ενώ το δάπεδο MFC, που είναι κατασκευασμένο σε στρώση έδρασης με CBR 8 καταπονήθηκε από σύστημα τροχών τύπου B 747.

Στα δύο δάπεδα παρατηρήθηκε ότι, κάτω από τον άξονα του διερχόμενου φορτίου, οι αναπτυσσόμενες οριζόντιες παραμορφώσεις (κατά τη διαμήκη διεύθυνση) στον πυθμένα

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7° : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

της ασφαλτικής στρώσης, είναι εφελκυστικές καθ' όλο το πλάτος των δαπέδων. Η τιμή της παραμόρφωσης γίνεται μέγιστη στη θέση κάτω από τον τροχό και μειώνεται καθώς αυξάνει η απόσταση από τον τροχό. Η κλίση της μεταβολής της τιμής της παραμόρφωσης είναι μικρότερη στην κατεύθυνση προς το εσωτερικό του φορείου (κέντρο βάρους φόρτισης), σε σχέση με την αντίθετη κατεύθυνση (εξωτερικά του φορείου). Αυτή η διαφορά είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του έτερου τροχού στην εσωτερική περιοχή μεταξύ των δύο τροχών. Η κλίση της μεταβολής της τιμής της παραμόρφωσης αυξάνει σημαντικά με την αύξηση των διελεύσεων του φορτίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κλίση της εγκάρσιας μεταβολής της τιμής της παραμόρφωσης είναι στο δάπεδο LFC από ότι στο δάπεδο MFC.

Το μέγεθος της πειραματικά μετρημένης παραμόρφωσης αυξάνει σημαντικά ως συνάρτηση των διελεύσεων και στα δύο δάπεδα (LFC και MFC). Η παρατήρηση αυτή συνάδει με τη δραστική μείωση του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτοσκυροδέματος με την πάροδο του χρόνου και την αύξηση των διελεύσεων, όπως αυτό υπολογίστηκε με τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού. Θα πρέπει εδώ, βέβαια, να επισημανθεί και ο ρόλος της αύξησης της θερμοκρασίας του ασφαλτοσκυροδέματος (λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών), η οποία έχει επιδράσει στη μείωση του μέτρου δυσκαμψίας της ασφαλτικής στρώσης. Για να επιμεριστεί η επίδραση της φόρτισης και της αύξησης της θερμοκρασίας στη μείωση του μέτρου δυσκαμψίας που ασφαλτοσκυροδέματος η οποία έχει του ασφαλτοσκυροδέματος απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση, η οποία εκφεύγει του στόχου της παρούσας εργασίας.

Η διαφορετική διαμόρφωση των συστημάτων τροχών στα δύο εξεταζόμενα δάπεδα (διπλός τροχός σε τρείς άξονες για το δάπεδο LFC και διπλός τροχός σε δύο άξονες για το δάπεδο MFC) δεν επιτρέπει την πραγματοποίηση συγκριτικής ανάλυσης των στοιχείων παραμορφώσεων μεταξύ των δύο δαπέδων. Γενικά ωστόσο μπορεί να αναφερθεί ότι οι τιμές των μετρημένων παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC είναι κατά περίπου 35% υψηλότερες από αυτές των παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC. Η παρατήρηση αυτή είναι συμβατή με τα αντίστοιχα ευρήματα άλλων ερευνών για τα δύο αυτά είδη δαπέδων της NAPTF (Gopalakrishnan και Thompson, 2006).

Αναφορικά με τα αποτελέσματα των αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων, επισημαίνεται ότι η διακύμανση των υπολογισμένων παραμορφώσεων είναι αντίστοιχη με αυτή των πειραματικά καταγεγραμμένων. Οι αναπτυσσόμενες οριζόντιες παραμορφώσεις (κατά τη διαμήκη διεύθυνση) στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης, είναι εφελκυστικές καθ' όλο το πλάτος των δαπέδων, κάτω από τον άξονα του διερχόμενου φορτίου. Η τιμή της παραμόρφωσης γίνεται μέγιστη στη θέση κάτω από τον τροχό και μειώνεται καθώς αυξάνει η απόσταση εκατέρωθεν του τροχού. Η κλίση της μεταβολής της τιμής της παραμόρφωσης είναι και εδώ μικρότερη στην κατεύθυνση προς το εσωτερικό του φορείου (κέντρο βάρους φόρτισης), σε σχέση με την αντίθετη κατεύθυνση (εξωτερικά του φορείου των τροχών), γεγονός, που όπως προαναφέρθηκε, οφείλεται στην αλληλεπίδραση του απέναντι τροχού. Η κλίση αυξάνει σημαντικά με την αύξηση των διελεύσεων του φορτίου.

Από τη σύγκριση των στοιχείων των αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων με αυτά των αντίστοιχων πειραματικά καταγεγραμμένων, διαπιστώθηκε ότι στο δάπεδο LFC επικρατεί η τάση οι πειραματικά μετρημένες τιμές των παραμορφώσεων να είναι υψηλότερες των προβλεπόμενων από τον αναλυτικό υπολογισμό. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι για τη θέση κάτω από τον τροχό, που αποτελεί και τη δυσμενέστερη θέση από πλευράς εφελκυστικής παραμόρφωσης, η διαφορά είναι της τάξης του 43%, κατά μέσο όρο. Η διαφορά αυτή πιθανολογείται ότι μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η φόρτιση των πειραματικών δοκιμών είναι δυναμικό φαινόμενο (κινούμενο φορτίο, ανάπτυξη διατμητικών τάσεων), ενώ το αναλυτικό πρότυπο λαμβάνει υπόψη του στατική φόρτιση. Αντίθετα, στο δάπεδο MFC δεν στοιχειοθετήθηκε μια ενιαία τάση ως προς τη σχέση των πειραματικά μετρημένων τιμών των παραμορφώσεων με αυτές των προβλεπόμενων από τον αναλυτικό υπολογισμό.

Επιπρόσθετα, οι προβλεπόμενες από το αναλυτικό πρότυπο αποκρίσεις, δεδομένης της συμμετρίας των φορτίων των τροχών, παρέχουν ίδιες τιμές παραμόρφωσης κατά τη διέλευση του πρώτου και τελευταίου άξονα του φορείου πάνω από τη θέση μέτρησης. Αντίθετα, σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα η μετρημένη παραμόρφωση κατά τη διέλευση του πρώτου άξονα του φορείου είναι πάντα μεγαλύτερη από αυτή που παρατηρείται κατά τη διέλευση των λοιπών αξόνων. Τα αποτελέσματα του αναλυτικού υπολογισμού, στην περίπτωση αυτή, είναι αναμενόμενα καθ' ότι το αναλυτικό πρότυπο λαμβάνει υπόψη του στατικά φορτία σε απόλυτη συμμετρία. Στην πειραματική διάταξη, όμως, το κινούμενο φορτίο επιβάλλει δυναμική καταπόνηση στο δάπεδο και δημιουργεί διατμητικές τάσεις, οι οποίες, λόγω των ιξωδοελαστικών ιδιοτήτων των ασφαλτικών υλικών, δεν επιτρέπουν στο δάπεδο να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση μετά την διέλευση του πρώτου άξονα του φορτιστεί εκ νέου από τον επόμενο άξονα. Έτσι η παρατηρούμενη παραμόρφωση κατά τη διέλευση του δεύτερου άξονα είναι μικρότερη.

Τα αποτελέσματα των πειραματικών παραμορφώσεων υποβλήθηκαν σε στατιστική σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των παραμορφώσεων από τη χρήση αναλυτικών μεθόδων, μέσω της μεθόδου της γραμμικής συσχέτησης και του ελέγχου t-test κατά ζεύγη παρατηρήσεων. Τα αποτελέσματα της γραμμικής συσχέτησης έδειξαν ότι, υφίσταται πολύ καλή γραμμική συσχέτιση μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών τιμών παραμόρφωσης και

στα δύο δάπεδα (LFC και MFC). Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού R<sup>2</sup> ήταν σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερη της τιμής 0,90.

Από την άλλη πλευρά, τα αποτελέσματα του στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη έδειξαν ότι, για το δάπεδο MFC, οι διαφορές, μεταξύ των πειραματικά καταγεγραμμένων και των αναλυτικά υπολογισμένων τιμών των παραορφώσεων, είναι στατιστικά σημαντικές, αλλά μπορούν να ποσοτικοποιηθούν και είναι της τάξης των 61-124 microstrains. Αντίθετα, για το δάπεδο MFC, εξαιρουμένης της πρώτης χρονικής περιόδου, οι διαφορές, μεταξύ των πειραματικά μετρηθέντων και των αναλυτικά υπολογισμένων τιμών των παραμορφώσεων, δεν είναι στατιστικά σημαντικές και επομένως οφείλονται σε τυχαία και όχι συστηματικά σφάλματα.

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης, πρέπει να επισημανθεί ότι η διερεύνηση, που πραγματοποιήθηκε με την παρούσα εργασία, δεν απέδωσε μονοσήμαντα αποτελέσματα. Γενικά διαπιστώθηκε ικανοποιητική σύγκλιση των πειραματικά μετρημένων τιμών των παραμορφώσεων με τις αντίστοιχες τιμές των αναλυτικά υπολογισμένων. Υπό την προϋπόθεση οτι τα πειραματικά αποτελέσματα είναι αξιόπιστα, τα τρισδιάστατα πρότυπα, που αναπτύχθηκαν είναι δυνατόν να ενταχθούν στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων των αεροδρομίων.

Θα πρέπει, ωστόσο, να αναφερθεί ότι τα πειραματικά αποτελέσματα προέρχονται από μια εγκατάσταση, που λειτουργεί υπό μερικώς ελεγχόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες, καθ' ότι είναι κλειστή (στεγασμένη). Εκτιμάται ότι τα αποτελέσματα των πειραματικών φορτίσεων θα ήταν οπωσδήποτε διαφορετικά αν η εγκατάσταση ήταν εκτεθειμένη στο ελεύθερο φυσικό περιβάλλον, όπως όλα τα οδοστρώματα των αεροδρομίων.

Παράλληλα, από τα αποτελέσματα διαφαίνεται ότι, η χρησιμοποίηση των υπολογισμένων με αναλυτικές μεθόδους παραμορφώσεων στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων, θα οδηγούσε σε περισσότερο ευοίωνες εκτιμήσεις ως προς τη μηχανική επάρκεια των ασφαλτομιγμάτων.

Εν κατακλείδι, τα αποτελέσματα της παρούσας διερεύνησης καταδεικνύουν την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα, προκειμένου να τεκμηριωθούν επαρκέστερα οι πτυχές των αποκλίσεων στη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων των αεροδρομίων, μεταξύ αυτής που προβλέπει οι αναλυτικός υπολογισμός και αυτής που συμβαίνει στην πράξη κατά την επί τόπου επιβολή της φόρτισης. Θα ήταν σκόπιμο να διερευνηθεί η επίδραση, που θα είχαν τα αποτελέσματα της παρούσας διερεύνησης στις εξισώσεις κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων των διατομών της συγκεκριμένης εγκατάστασης (NAPTF). Θα ήταν επίσης χρήσιμο, η έρευνα να επεκταθεί και στις αντίστοιχες διατομές των ημιακάμπτων δαπέδων της ίδιας πειραματικής εγκατάστασης (NAPTF), ώστε να καταστεί δυνατή η σύγκριση της συμπεριφοράς των δύο ειδών δαπέδων, ευκάμπτων-ημιακάμπτων (ημιευκάμπτων).

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ABAQUS Inc, (2004). "ABAQUS/CAE 6.5 User's manual", Providence, RI, USA.

- Ahlvin, R. G., Ulery, H. H., Hutchinson, R. L., and Rice, J. L. (1971). "Multiple-Wheel Heavy Gear Load Pavement Tests", Vol. 1: Basic Report, Technical Report No. AFWL-TR-70-113, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississipi, USA.
- Applied Pavement Technology Inc. (2010). "Assessment of FAA HMA Overlay Procedures",Vol. II: Guide for HMA Overlay Design, Airfield Asphalt Pavement Technology Program,Project 06-07, Final Report, Urbana, Illinois, USA.
- American Society for Testing and Materials (ASTM) International (2008). "Standard Guide for Calculating In Situ Equivalent Elastic Moduli of Pavement Material Using Layered Elastic Theory", Standard D5858-96 (Reapproved 2008).
- Donoval, P., and Tutumluer, E. (2007). "Analysis of NAPTF Trafficking Response Data for Pavement Foundation Deformation Behavior", Proceedings of the FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference and Exposition, Atlantic City, New Jersey, USA.
- Edwards, W. F., Green, R. L., and Sargand, S. M. (2004). "Comparison of Dynamic Responses from Four LTPP-SPS Sections in the Field and in the Accelerated Pavement Loading Facility in Ohio," Proceedings of the Second International Conference on Accelerated Pavement Testing, University of Minnesota, Minneapolis, USA.
- Federal Aviation Administration (FAA), National Airport Pavement Test Facility (NAPTF) webpage <u>http://www.airporttech.tc.faa.gov/naptf/index.asp</u>, FAA Airport Technology, Research and Technology Branch, AAR-410, William J. Hughes Technical Center, Atlantic City International Airport, New Jersey.
- Federal Aviation Administration (FAA) (2011). "Use of Nondestructive Testing in the Evaluation of Airport Pavements", Advisory Circular AC 150/5370-11B/9-30-11/AAS-100.
- Garg, N., and Hayhoe, G. F. (2001). "Asphalt Concrete Strain Responses at High Loads and Low Speeds at the National Airport Pavement Test Facility (NAPTF)" Proceedings of the 2001 ASCE Airfield Pavement Specialty Conference, Chicago, IL, USA.
- Garg, N., and Marsey, W. H. (2002). "Comparison Between Falling Weight Deflectometer and Static Deflection Measurements on Flexible Pavements at the National Airport

Pavement Test Facility (NAPTF)", Proceedings of the FAA Airport Technology Transfer Conference, Atlantic City, New Jersey, USA.

- Gomez-Ramirez, F. M., and Thompson, M. R. (2002). "Characterizing Aircraft Multiple Wheel Load Interaction for Airport Flexible Pavement Design," FAA COE Research Report No. 20, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA.
- Gopalakrishnan, K. (2004). "Performance Analysis of Airport Flexible Pavements Subjected to New Generation Aircraft," PhD Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA.
- Gopalakrishnan, K., and Thompson, M. R. (2004). "Comparative Effect of B777 and B747 Trafficking on Elastic Layer Moduli of NAPTF Flexible Pavements", Proceedings of the FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference, Atlantic City, New Jersey, USA.
- Gopalakrishnan, K., and Thompson, M. R. (2006). "Effect of Dynamic Aircraft Gear Loads on Asphalt Concrete Strain Responses", Journal of ASTM International, Vol. 3, No. 8.
- Guo, E. and Rice, J.(1999). "General Statistic Performance Analysis of Asphalt Airport Pavements", *Proceedings of the 1999 FAA Airport Technology Transfer Conference*, Atlantic City, NJ, USA.
- Hayhoe, G. F., and Garg, N. (2002). "Subgrade Strains Measured in Full-Scale Traffic Tests with Four- and Six-Wheel Landing Gears", Proceedings of the Federal Aviation Administration Airport Technology Transfer Conference, Atlantic City, New Jersey, USA.
- Huang Y.H. (2004). "Pavement Analysis and Design", 2<sup>nd</sup> Edition, New Jersey, Pearson Prentice Hall, pp. 4, 45-47, 94-98.
- Huebner K.H. et al. (2001). "The Finite Element Method for Engineers", 4th Edition, New York, John Wiley & Sons, Inc.
- Kim, M. W., (2007). "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Flexible Pavements Considering Nonlinear Pavement Foundation Behavior", PhD Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.
- Kim, M. W., Tutumluer E. and Mishra D., (2008). "Flexible Pavement Response to Multiple Wheel Loading using Nonlinear Three-dimensional Finite Element Analysis", Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India.

- McQueen, R. D., Marsey, M., and Arze, J. M. (2001). "Analysis of Nondestructive Test Data on Flexible Pavement Acquired at the National Airport Pavement Test Facility". In Proceedings of the 2001 ASCE Airfield Pavement Specialty Conference, Chicago, IL.
- Mojarrad, H. (2011). "Three-Dimensional Nonlinear Finite Element Analysis of Airport Pavements", PhD Dissertation, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina.

Pavement Interactive website (2012). Available on http://www.pavementinteractive.org.

- Rawe, R. P., Ruhl, T. A., and Sunta, R. J. (1991). "Results of the 1989 ASCE Airfield Pavement Survey", *Proceedings of the 1991 ASCE Airfield Pavement Specialty Conference*, New York, NY, USA.
- Sharp, K. G., and Johnson-Clarke, J. R. (1997). "Australian Experience in the Accelerated Testing of Pavements", Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Road Federation (IRF) World Meeting, Toronto, Canada.
- Teubert, C. A., Brill, D. R. and Jia, Q. (2002). "Data Management at the National Airport Test Facility (NAPTF)", Proceedings of the 2002 Federal Aviation Administration Airport Technology Transfer Conference.
- Thompson, M. R. (1987). "ILLI-PAVE Based Full-Depth Asphalt Concrete Pavement Design Procedure", Proceedings of the Sixth International Conference of Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, USA.
- Van Cauwelaert F. J., Alexander D. R., White T. D., and Barker W. R. (1989). "Multilayer elastic program for elastic program for backcalculating layer moduli in pavement evaluation", *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli*, ASTM STP 1026, Philadelphia, USA.
- Weinmann, T. L., Lewis, A. E., and Tayabji, S. D. (2004). "Pavement Sensors used at Accelerated Pavement Test Facilities," *Proceedings of the Second International Conference on Accelerated Pavement Testing*, University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA.
- Yoder, E. J., and Witczak, M. W. (1975). "Principles of Pavement Design", New York, Wiley. Ελλ. Μετάφραση (1987), "Αρχές Σχεδιασμού Οδοστρωμάτων", (Μετάφραση Χρυσάφης & Καργοπούλου), Αθήνα, Εκδότης Μόσχος Γκιούρδας.
- Λοΐζος, Α., (2011). "Οδοστρώματα Σημειώσεις Μαθήματος", Αθήνα, Έκδοση ΕΜΠ.
- Λοΐζος, Α., (2011). "Οδοστρώματα Οδών και Αεροδρομίων" Σημειώσεις Μαθήματος", Αθήνα, Έκδοση ΕΜΠ.

- Μπένος, Β. Κ. (1991). "Μεθοδολογία Αξιοποιήσεως των Αποτελεσμάτων της Δειγματοληψίας", Πειραιάς, Εκδόσεις ΣΤΑΜΟΥΛΗ.
- ΜΑΛΤΕΖΟΣ Σ., (2002). "Προσαρμογή της ευθείας με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων στο περιβάλλον του excel", Αθήνα.
- Νικηφόρου-Τασόπουλος Σ. (2012). "Αισθητήρες Οπτικών Ινών για την Αξιολόγηση των Οδοστρωμάτων", Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Σακελλαρίου Μ. Γ. και Κοζάνης Σ. (1997). "Ανάπτυξη Προγράμματος Πεπερασμένων Στοιχείων", Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΠΙΝΑΚΕΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ *t-test*

Πίνακας Π6.1: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 1<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

ΔΑΠΕΔΟ: LFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 1
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m (microstrains)	<b>E</b> c (microstrains)
-589	173,59	84,39
-523	178,59	96,16
-340	279,44	144,09
-265	295,83	189,31
0	473,36	266,50
253	313,15	173,15
515	142,21	93,15
777	74,41	24,47
1.036	43,66	13,87
Μέσος όρος	219,36	120,56
Τυπική απόκλιση	134,33	81,10

Πίνακας Π6.2: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 1<sup>η</sup> χρονική περίοδο

ΔΑΠΕΔΟ: LFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 1
$H_0$ : ( $\mu_D$ = 0)	Πειραματική τιμή	Αναλυτικά
α=0,05		υπολογισμένη τιμή
Μέσος	219,3580926	120,563567
Διακύμανση	18045,05168	6577,057799
Μέγεθος δείγματος	9	9
Συσχέτηση Pearson	0,988046729	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων $\stackrel{-}{D}$	0	
Βαθμοί ελευθερίας	8	
t <sub>stat</sub>	5,32821497	
Ρ(Τ≤t)μονόπλευρη	0,00035202	
<i>t<sub>critical</sub></i> μονόπλευρο	1,859548038	
Ρ ( Τ ≤ t ) δίπλευρη	0,00070404	
<i>t<sub>critical</sub></i> δίπλευρο	2,306004135	

$H_0:(\mu_D = \overline{D})$ $\alpha=0.05$	Πειραματική τιμή	Αναλυτικά υπολογισμένη τιμή
Μέσος	219,3580926	120,563567
Διακύμανση	18045,05168	6577,057799
Μέγεθος δείγματος	9	9
Συσχέτηση Pearson	0,988046729	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων $\stackrel{-}{D}$	98,79	
Βαθμοί ελευθερίας	8	
t <sub>stat</sub>	0,000244074	
Ρ(Τ ≤ t)μονόπλευρη	0,499905617	
<i>t<sub>critical</sub></i> μονόπλευρο	1,859548038	
P ( T ≤ t ) δίπλευρη	0,999811234	
<i>t<sub>critical</sub></i> δίπλευρο	2,306004135	

$H_0:(\mu_D = \overline{D})$ $\alpha=0,01$	Πειραματική τιμή	Αναλυτικά υπολογισμένη τιμή
Μέσος	219,3580926	120,563567
Διακύμανση	18045,05168	6577,057799
Μέγεθος δείγματος	9	9
Συσχέτηση Pearson	0,988046729	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων $\stackrel{-}{D}$	98,79	
Βαθμοί ελευθερίας	8	
t <sub>stat</sub>	0,000244074	
Ρ(Τ≤t)μονόπλευρη	0,499905617	
<i>t<sub>critical</sub></i> μονόπλευρο	2,896459448	
Ρ(Τ≤t)δίπλευρη	0,999811234	
<i>t<sub>critical</sub></i> δίπλευρο	3,355387331	
ΔΑΠΕΔΟ: LFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 2
--------------------------------	------------------------------	------------------------------
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m (microstrains)	<b>Е</b> с (microstrains)
-589	132,44	168,86
-523	197,18	254,55
-340	243,15	301,52
-265	421,60	426,34
0	292,47	275,44
253	133,58	128,83
515	50,41	16,59
777	29,43	17,85
1.036	19,13	4,97
Μέσος όρος	168,82	177,22
Τυπική απόκλιση	134,14	148,50

Πίνακας Π6.3: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 2<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

Πίνακας Π6.4: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 2<sup>η</sup> χρονική περίοδο

ΔΑΠΕΔΟ: LFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 2
	·	
$H_0$ : ( $\mu_D$ = 0)		Αναλυτικά
α=0,05	Πειραματική τιμή	υπολογισμένη τιμή
Μέσος	196,157853	135,4974194
Διακύμανση	13875,99621	8349,323859
Μέγεθος δείγματος	9	9
Συσχέτηση Pearson	0,989381209	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων $\stackrel{-}{D}$	0	
Βαθμοί ελευθερίας	8	
t <sub>stat</sub>	5,978005942	
Ρ(Τ≤t)μονόπλευρη	0,000165714	
<i>t<sub>critical</sub></i> μονόπλευρο	1,859548038	
P ( T ≤ t ) δίπλευρη	0,000331428	
<i>t<sub>critical</sub></i> δίπλευρο	2,306004135	

$H_0:(\mu_D = \overline{D})$ $\alpha=0,05$	Πειραματική τιμή	Αναλυτικά υπολογισμένη τιμή
Μέσος	196,157853	135,4974194
Διακύμανση	13875,99621	8349,323859
Μέγεθος δείγματος	9	9
Συσχέτηση Pearson	0,989381209	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων $\stackrel{-}{D}$	60,66	
Βαθμοί ελευθερίας	8	
t <sub>stat</sub>	4,27285E-05	
Ρ(Τ ≤ t)μονόπλευρη	0,499983477	
<i>t<sub>critical</sub></i> μονόπλευρο	1,859548038	
P ( T ≤ t ) δίπλευρη	0,999966954	
<i>t<sub>critical</sub></i> δίπλευρο	2,306004135	

$H_0:(\mu_D = \overline{D})$ $\alpha=0,01$	Πειραματική τιμή	Αναλυτικά υπολογισμένη τιμή
Μέσος	196,157853	135,4974194
Διακύμανση	13875,99621	8349,323859
Μέγεθος δείγματος	9	9
Συσχέτηση Pearson	0,989381209	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων $\stackrel{-}{D}$	60,66	
Βαθμοί ελευθερίας	8	
t <sub>stat</sub>	4,27285E-05	
Ρ(Τ≤t)μονόπλευρη	0,499983477	
t <sub>critical</sub> μονόπλευρο	2,896459448	
Ρ(Τ≤t)δίπλευρη	0,999966954	
<i>t<sub>critical</sub></i> δίπλευρο	3,355387331	

ΔΑΠΕΔΟ: LFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 3
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m (microstrains)	<b>E</b> c (microstrains)
-589	155,82	99,76
-523	172,35	112,68
-340	259,35	163,80
-265	282,18	211,22
0	550,85	291,53
253	302,22	193,50
515	142,55	106,80
777	70,96	30,38
1.036	43,69	16,70
Μέσος όρος	220,00	136,26
Τυπική απόκλιση	153,02	88,05

Πίνακας Π6.5: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 3<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα) Πίνακας Π6.6: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 3<sup>η</sup> χρονική περίοδο

ΔΑΠΕΔΟ: LFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 3
	·	
$H_0$ : ( $\mu_D$ = 0)		Αναλυτικά
α=0,05	Πειραματική τιμή	υπολογισμένη τιμή
Μέσος	219,9973006	136,2628167
Διακύμανση	23415,49909	7752,889663
Μέγεθος δείγματος	9	9
Συσχέτηση Pearson	0,968831796	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων $\stackrel{-}{D}$	0	
Βαθμοί ελευθερίας	8	
t <sub>stat</sub>	3,53104658	
Ρ(Τ≤t)μονόπλευρη	0,003860092	
<i>t<sub>critical</sub></i> μονόπλευρο	1,859548038	
Ρ ( Τ ≤ t ) δίπλευρη	0,007720184	
$t_{critical}$ δίπλευρο	2,306004135	

$H_0:(\mu_D = \overline{D})$ $\alpha=0,05$	Πειραματική τιμή	Αναλυτικά υπολογισμένη τιμή
Μέσος	219,9973006	136,2628167
Διακύμανση	23415,49909	7752,889663
Μέγεθος δείγματος	9	9
Συσχέτηση Pearson	0,968831796	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων $\bar{D}$	83,73	
Βαθμοί ελευθερίας	8	
t <sub>stat</sub>	0,000189087	
Ρ(Τ ≤ t)μονόπλευρη	0,49992688	
<i>t<sub>critical</sub></i> μονόπλευρο	1,859548038	
P ( T ≤ t ) δίπλευρη	0,99985376	
<i>t<sub>critical</sub></i> δίπλευρο	2,306004135	

$H_0:(\mu_D = \overline{D})$ $\alpha=0,01$	Πειραματική τιμή	Αναλυτικά υπολογισμένη τιμή
Μέσος	219,9973006	136,2628167
Διακύμανση	23415,49909	7752,889663
Μέγεθος δείγματος	9	9
Συσχέτηση Pearson	0,968831796	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων $\stackrel{-}{D}$	83,73	
Βαθμοί ελευθερίας	8	
$t_{stat}$	0,000189087	
Ρ(Τ≤t)μονόπλευρη	0,49992688	
<i>t<sub>critical</sub></i> μονόπλευρο	2,896459448	
Ρ(Τ≤t)δίπλευρη	0,99985376	
$t_{critical}$ δίπλευρο	3,355387331	

ΔΑΠΕΔΟ: LFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 4
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m (microstrains)	<b>E</b> c (microstrains)
-589	165,77	93,75
-523	178,58	106,91
-340	269,10	159,04
-265	297,69	207,32
0	578,44	289,52
253	312,30	190,51
515	141,18	103,33
777	67,35	27,10
1.036	43,60	14,46
Μέσος όρος	228,22	132,44
Τυπική απόκλιση	162,07	88,30

Πίνακας Π6.7: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 4<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα) Πίνακας Π6.8: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 4<sup>η</sup> χρονική περίοδο

ΔΑΠΕΔΟ: LFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 4
	·	
$H_0$ : ( $\mu_D$ = 0)		Αναλυτικά
α=0,05	Πειραματική τιμή	υπολογισμένη τιμή
Μέσος	228,2242506	132,4362093
Διακύμανση	26265,73948	7796,602248
Μέγεθος δείγματος	9	9
Συσχέτηση Pearson	0,970711227	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων $\bar{D}$	0	
Βαθμοί ελευθερίας	8	
t <sub>stat</sub>	3,626184195	
Ρ(Τ≤t)μονόπλευρη	0,003361042	
<i>t<sub>critical</sub></i> μονόπλευρο	1,859548038	
P ( T ≤ t ) δίπλευρη	0,006722083	
$t_{critical}$ δίπλευρο	2,306004135	

$H_0:(\mu_D = \overline{D})$ $\alpha=0,05$	Πειραματική τιμή	Αναλυτικά υπολογισμένη τιμή
Μέσος	228,2242506	132,4362093
Διακύμανση	26265,73948	7796,602248
Μέγεθος δείγματος	9	9
Συσχέτηση Pearson	0,970711227	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων $\bar{D}$	95,79	
Βαθμοί ελευθερίας	8	
t <sub>stat</sub>	-7,4149E-05	
Ρ(Τ ≤ t)μονόπλευρη	0,499971326	
<i>t<sub>critical</sub></i> μονόπλευρο	1,859548038	
P ( T ≤ t ) δίπλευρη	0,999942653	
<i>t<sub>critical</sub></i> δίπλευρο	2,306004135	

$H_0:(\mu_D = \overline{D})$ $\alpha=0,01$	Πειραματική τιμή	Αναλυτικά υπολογισμένη τιμή
Μέσος	228,2242506	132,4362093
Διακύμανση	26265,73948	7796,602248
Μέγεθος δείγματος	9	9
Συσχέτηση Pearson	0,970711227	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων $\stackrel{-}{D}$	95,79	
Βαθμοί ελευθερίας	8	
t <sub>stat</sub>	-7,4149E-05	
Ρ(Τ≤t)μονόπλευρη	0,499971326	
$t_{critical}$ μονόπλευρο	2,896459448	
Ρ(Τ≤t)δίπλευρη	0,999942653	
$t_{critical}$ δίπλευρο	3,355387331	

ΔΑΠΕΔΟ: LFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 5
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m (microstrains)	<b>E</b> c (microstrains)
-589	203,26	102,22
-523	201,66	118,21
-340	337,58	185,10
-265	358,03	249,22
0	659,21	359,48
253	358,96	227,96
515	173,13	118,39
777	84,39	26,91
1.036		
Μέσος όρος	297,03	173,43
Τυπική απόκλιση	176,81	104,26

Πίνακας Π6.9: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 5<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

ΔΑΠΕΔΟ: LFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 5
$H_0:(\mu_D = 0)$		Αναλυτικά
α=0,05	Πειραματική τιμή	υπολογισμένη τιμή
Μέσος	297,0271314	173,4341167
Διακύμανση	31261,98127	10869,256
Μέγεθος δείγματος	8	8
Συσχέτηση Pearson	0,97475117	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων $\bar{D}$	0	
Βαθμοί ελευθερίας	7	
t <sub>stat</sub>	4,441363132	
Ρ(Τ ≤ t)μονόπλευρη	0,00150138	
<i>t<sub>critical</sub></i> μονόπλευρο	1,894578605	
Ρ ( Τ ≤ t ) δίπλευρη	0,00300276	
<i>t<sub>critical</sub></i> δίπλευρο	2,364624252	

Πίνακας Π6.10: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 5<sup>η</sup> χρονική περίοδο

$H_0:(\mu_D = \overline{D})$ $\alpha=0.05$	Πειραματική τιμή	Αναλυτικά υπολογισμένη τιμή
Μέσος	297,0271314	173,4341167
Διακύμανση	31261,98127	10869,256
Μέγεθος δείγματος	8	8
Συσχέτηση Pearson	0,97475117	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων $\stackrel{-}{D}$	123,59	
Βαθμοί ελευθερίας	7	
t <sub>stat</sub>	0,000108336	
Ρ(Τ≤t)μονόπλευρη	0,499958292	
<i>t<sub>critical</sub></i> μονόπλευρο	1,894578605	
Ρ(Τ≤t)δίπλευρη	0,999916583	
<i>t<sub>critical</sub></i> δίπλευρο	2,364624252	

$H_0:(\mu_D = \overline{D})$ $\alpha=0.01$	Πειραματική τιμή	Αναλυτικά υπολογισμένη τιμή
Μέσος	297,0271314	173,4341167
Διακύμανση	31261,98127	10869,256
Μέγεθος δείγματος	8	8
Συσχέτηση Pearson	0,97475117	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων ${\bar D}$	123,59	
Βαθμοί ελευθερίας	7	
t <sub>stat</sub>	0,000108336	
Ρ(Τ≤t)μονόπλευρη	0,499958292	
$t_{critical}$ μονόπλευρο	2,997951567	
Ρ(Τ≤t)δίπλευρη	0,999916583	
$t_{critical}$ δίπλευρο	3,499483297	

ΔΑΠΕΔΟ: LFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 6
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m (microstrains)	<b>E</b> c (microstrains)
-589		
-523	234,49	159,22
-340	348,01	262,66
-265	390,11	360,25
0	905,47	529,50
253	452,50	332,40
515	247,74	166,98
777	97,69	29,55
1.036		
Μέσος όρος	382,29	262,94
Τυπική απόκλιση	258,47	163,19

Πίνακας Π6.11: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 6<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

ΔΑΠΕΔΟ: LFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 6
$H_0:(\mu_D = 0)$		Αναλυτικά
α=0,05	Πειραματική τιμή	υπολογισμένη τιμή
Μέσος	382,2887743	262,9363667
Διακύμανση	66805,18361	26631,17887
Μέγεθος δείγματος	7	7
Συσχέτηση Pearson	0,947435104	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων $\bar{D}$	0	
Βαθμοί ελευθερίας	6	
t <sub>stat</sub>	2,716577206	
Ρ(Τ ≤ t)μονόπλευρη	0,017400307	
<i>t<sub>critical</sub></i> μονόπλευρο	1,943180281	
P ( T ≤ t ) δίπλευρη	0,034800614	
<i>t<sub>critical</sub></i> δίπλευρο	2,446911851	

Πίνακας Π6.12: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο LFC, κατά την 6<sup>η</sup> χρονική περίοδο

$H_0:(\mu_D = \overline{D})$ $\alpha=0.05$	Πειραματική τιμή	Αναλυτικά υπολογισμένη τιμή
Μέσος	382,2887743	262,9363667
Διακύμανση	66805,18361	26631,17887
Μέγεθος δείγματος	7	7
Συσχέτηση Pearson	0,947435104	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων $\stackrel{-}{D}$	119,35	
Βαθμοί ελευθερίας	6	
t <sub>stat</sub>	5,48E-05	
Ρ(Τ≤t)μονόπλευρη	0,499979026	
<i>t<sub>critical</sub></i> μονόπλευρο	1,943180281	
Ρ(Τ≤t)δίπλευρη	0,999958053	
<i>t<sub>critical</sub></i> δίπλευρο	2,446911851	

$H_0:(\mu_D = \overline{D})$ $\alpha=0,01$	Πειραματική τιμή	Αναλυτικά υπολογισμένη τιμή
Μέσος	382,2887743	262,9363667
Διακύμανση	66805,18361	26631,17887
Μέγεθος δείγματος	7	7
Συσχέτηση Pearson	0,947435104	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων $\stackrel{-}{D}$	119,35	
Βαθμοί ελευθερίας	6	
t <sub>stat</sub>	5,48E-05	
Ρ(Τ ≤ t)μονόπλευρη	0,499979026	
<i>t<sub>critical</sub></i> μονόπλευρο	3,142668403	
Ρ ( Τ ≤ t ) δίπλευρη	0,999958053	
$t_{critical}$ δίπλευρο	3,707428021	

ΔΑΠΕΔΟ: MFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 1
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m (microstrains)	<b>E</b> c (microstrains)
-589	149,72	77,53
-523	213,66	120,26
-340	221,42	143,84
-265	335,48	206,70
0	240,05	131,72
253	108,95	60,56
515	47,35	7,00
777	27,85	8,59
1.036	15,13	2,74
Μέσος όρος	151,07	84,33
Τυπική απόκλιση	110,11	71,62

Πίνακας Π6.13: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 1<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

ΔΑΠΕΔΟ: MFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 1
$H_0:(\mu_D = 0)$		Αναλυτικά
α=0,05	Πειραματική τιμή	υπολογισμένη τιμή
Μέσος	151,0673876	84,32579667
Διακύμανση	12123,53833	5129,722447
Μέγεθος δείγματος	9	9
Συσχέτηση Pearson	0,99342253	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων $ar{D}$	0	
Βαθμοί ελευθερίας	8	
t <sub>stat</sub>	5,029526386	
Ρ(Τ ≤ t)μονόπλευρη	0,000507382	
<i>t<sub>critical</sub></i> μονόπλευρο	1,859548038	
P ( T ≤ t ) δίπλευρη	0,001014763	
<i>t<sub>critical</sub></i> δίπλευρο	2,306004135	

Πίνακας Π6.14: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 1<sup>η</sup> χρονική περίοδο

$H_0:(\mu_D = \overline{D})$ $\alpha=0.05$	Πειραματική τιμή	Αναλυτικά υπολογισμένη τιμή
Μέσος	151,0673876	84,32579667
Διακύμανση	12123,53833	5129,722447
Μέγεθος δείγματος	9	9
Συσχέτηση Pearson	0,99342253	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων $\stackrel{-}{D}$	66,74	
Βαθμοί ελευθερίας	8	
t <sub>stat</sub>	0,000119887	
Ρ(Τ≤t)μονόπλευρη	0,49995364	
<i>t<sub>critical</sub></i> μονόπλευρο	1,859548038	
Ρ(Τ≤t)δίπλευρη	0,999907279	
$t_{critical}$ δίπλευρο	2,306004135	

$H_0:(\mu_D = \overline{D})$ $\alpha=0,01$	Πειραματική τιμή	Αναλυτικά υπολογισμένη τιμή
Μέσος	151,0673876	84,32579667
Διακύμανση	12123,53833	5129,722447
Μέγεθος δείγματος	9	9
Συσχέτηση Pearson	0,99342253	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων $\stackrel{-}{D}$	66,74	
Βαθμοί ελευθερίας	8	
t <sub>stat</sub>	0,000119887	
Ρ(Τ≤t)μονόπλευρη	0,49995364	
$t_{critical}$ μονόπλευρο	2,896459448	
Ρ(Τ≤t)δίπλευρη	0,999907279	
<i>t<sub>critical</sub></i> δίπλευρο	3,355387331	

-

Πίνακας Π6.15: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 2<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

-

ΔΑΠΕΔΟ: MFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 2
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m (microstrains)	<b>E</b> c (microstrains)
-589	132,44	168,86
-523	197,18	254,55
-340	243,15	301,52
-265	421,60	426,34
0	292,47	275,44
253	133,58	128,83
515	50,41	16,59
777	29,43	17,85
1.036	19,13	4,97
Μέσος όρος	168,82	177,22
Τυπική απόκλιση	134,14	148,50

Πίνακας Π6.16: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 2<sup>η</sup> χρονική περίοδο

ΔΑΠΕΔΟ: MFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 2
$H_0:(\mu_D = 0)$		Αναλυτικά
α=0,05	Πειραματική τιμή	υπολογισμένη τιμή
Μέσος	168,8212222	177,2159789
Διακύμανση	17992,36795	22052,72248
Μέγεθος δείγματος	9	9
Συσχέτηση Pearson	0,976300205	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων $ar{D}$	0	
Βαθμοί ελευθερίας	8	
t <sub>stat</sub>	-0,742466085	
Ρ(Τ ≤ t)μονόπλευρη	0,239517793	
t <sub>critical</sub> μονόπλευρο	1,859548038	
P ( T ≤ t ) δίπλευρη	0,479035585	
t <sub>critical</sub> δίπλευρο	2,306004135	

Πίνακας Π6.17: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 3<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

ΔΑΠΕΔΟ: MFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 3
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m (microstrains)	<b>ε</b> c (microstrains)
-589	124,47	163,47
-523	207,68	243,46
-340	211,02	287,39
-265	340,94	403,62
0	274,42	261,84
253	123,93	123,86
515	43,67	17,97
777	25,74	18,37
1.036	16,50	5,60
Μέσος όρος	152,04	169,51
Τυπική απόκλιση	114,49	140,31

Πίνακας Π6.18: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 3<sup>η</sup> χρονική περίοδο

ΔΑΠΕΔΟ: MFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 3
$H_0:(\mu_D = 0)$		Αναλυτικά
<b>α=0,05</b>	Πειραματική τιμή	υπολογισμένη τιμή
Μέσος	152,0418355	169,50755
Διακύμανση	13106,91621	19686,66682
Μέγεθος δείγματος	9	9
Συσχέτηση Pearson	0,97870746	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων $\bar{D}$	0	
Βαθμοί ελευθερίας	8	
t <sub>stat</sub>	-1,425581275	
Ρ ( Τ ≤ t ) μονόπλευρη	0,095908913	
<i>t<sub>critical</sub></i> μονόπλευρο	1,859548038	
Ρ ( Τ ≤ t ) δίπλευρη	0,191817826	
t <sub>critical</sub> δίπλευρο	2,306004135	

Πίνακας Π6.19: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 4<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

ΔΑΠΕΔΟ: MFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 4
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m (microstrains)	<b>ε</b> c (microstrains)
-589	129,37	179,79
-523	220,86	267,31
-340	218,06	315,24
-265	357,03	442,20
0	292,12	287,38
253	130,28	135,80
515	45,76	19,05
777	27,17	19,31
1.036	16,84	5,38
Μέσος όρος	159,72	185,72
Τυπική απόκλιση	120,60	154,14

Πίνακας Π6.20: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 4<sup>η</sup> χρονική περίοδο

\_

ΔΑΠΕΔΟ: MFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 4
$H_0$ : ( $\mu_D$ = 0)		Αναλυτικά
<b>α=0,05</b>	Πειραματική τιμή	υπολογισμένη τιμή
Μέσος	159,7215593	185,7161156
Διακύμανση	14545,03561	23759,05835
Μέγεθος δείγματος	9	9
Συσχέτηση Pearson	0,975535949	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων $ar{D}$	0	
Βαθμοί ελευθερίας	8	
t <sub>stat</sub>	-1,729011461	
Ρ(Τ≤t)μονόπλευρη	0,061032473	
<i>t<sub>critical</sub></i> μονόπλευρο	1,859548038	
Ρ ( Τ ≤ t ) δίπλευρη	0,122064945	
<i>t<sub>critical</sub></i> δίπλευρο	2,306004135	

\_

Πίνακας Π6.21: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 5<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

ΔΑΠΕΔΟ: MFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 5
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m (microstrains)	<b>Е</b> с (microstrains)
-589	148,76	205,84
-523	250,94	311,25
-340	251,76	368,98
-265	416,92	522,57
0	326,71	337,31
253	146,77	157,15
515	54,86	19,19
777	31,29	20,96
1.036	21,24	5,39
Μέσος όρος	183,25	216,52
Τυπική απόκλιση	138,20	182,30

Πίνακας Π6.22: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 5<sup>η</sup> χρονική περίοδο

ΔΑΠΕΔΟ: MFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 5
$H_0:(\mu_D = 0)$		Αναλυτικά
α=0,05	Πειραματική τιμή	υπολογισμένη τιμή
Μέσος	183,2496011	216,5151678
Διακύμανση	19100,40645	33233,44107
Μέγεθος δείγματος	9	9
Συσχέτηση Pearson	0,979828294	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων $ar{D}$	0	
Βαθμοί ελευθερίας	8	
t <sub>stat</sub>	-1,834016707	
Ρ(Τ ≤ t)μονόπλευρη	0,051997486	
<i>t<sub>critical</sub></i> μονόπλευρο	1,859548038	
P ( T ≤ t ) δίπλευρη	0,103994972	
<i>t<sub>critical</sub></i> δίπλευρο	2,306004135	

\_

Πίνακας Π6.23: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 6<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

ΔΑΠΕΔΟ: ΜFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 6
Γ	ſ	
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m (microstrains)	<b>ε</b> (microstrains)
-589	179,31	217,098
-523	291,31	358,475
-340	300,61	436,168
-265	547,30	646,116
0	384,95	403,593
253	170,24	175,893
515	64,08	6,55434
777	42,98	17,0761
1.036	32,37	2,58043
Μέσος όρος	223,68	251,51
Τυπική απόκλιση	173,49	225,89

Πίνακας Π6.24: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 6<sup>η</sup> χρονική περίοδο

ΔΑΠΕΔΟ: MFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 6
$H_0:(\mu_D = 0)$ a=0.05	Πειραματική τιμή	Αναλυτικά υπολογισμένη
Μέσος	223,6842398	251,5059856
Διακύμανση	30097,45232	51026,72478
Μέγεθος δείγματος	9	9
Συσχέτηση Pearson	0,98343022	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων <i>D</i>	0	
Βαθμοι ελευθερίας	8	
$t_{stat}$	-1,312345491	
Ρ(Τ ≤ t)μονόπλευρη	0,112901537	
<i>t<sub>critical</sub></i> μονόπλευρο	1,859548038	
Ρ ( Τ ≤ t ) δίπλευρη	0,225803073	
<i>t<sub>critical</sub></i> δίπλευρο	2,306004135	

\_\_\_\_

Πίνακας Π6.25: Κατά ζεύγη πειραματικά μετρημένες και αναλυτικά υπολογισμένες τιμές παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 7<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ημέρα)

ΔΑΠΕΔΟ: MFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 7
Απόσταση "β" από τροχό (mm)	<b>E</b> m (microstrains)	<b>E</b> c (microstrains)
-589	213,11	295,15
-523	341,32	461,63
-340	351,42	552,60
-265	619,54	796,85
0	415,15	508,42
253	237,48	230,33
515	77,18	19,17
777	43,81	26,10
1.036	41,36	5,16
Μέσος όρος	260,04	321,71
Τυπική απόκλιση	193,32	278,76

Πίνακας Π6.26: Αποτελεσμάτα στατιστικού ελέγχου t-test κατά ζεύγη πειραματικών και υπολογισμένων τιμών παραμορφώσεων στο δάπεδο MFC, κατά την 7<sup>η</sup> χρονική περίοδο

ΔΑΠΕΔΟ: MFC		ΠΕΡΙΟΔΟΣ: 7
$H_0:(\mu_D = 0)$ $\alpha = 0,05$	Πειραματική τιμή	Αναλυτικά υπολογισμένη τιμή
Μέσος	260,0392272	321,7125267
Διακύμανση	37372,74824	77709,40645
Μέγεθος δείγματος	9	9
Συσχέτηση Pearson	0,983508096	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων $\bar{D}$	0	
Βαθμοί ελευθερίας	8	
t <sub>stat</sub>	-1,941867616	
Ρ(Τ≤t)μονόπλευρη	0,044045936	
<i>t<sub>critical</sub></i> μονόπλευρο	1,859548038	
Ρ ( Τ ≤ t ) δίπλευρη	0,088091873	
$t_{critical}$ δίπλευρο	2.306004135	