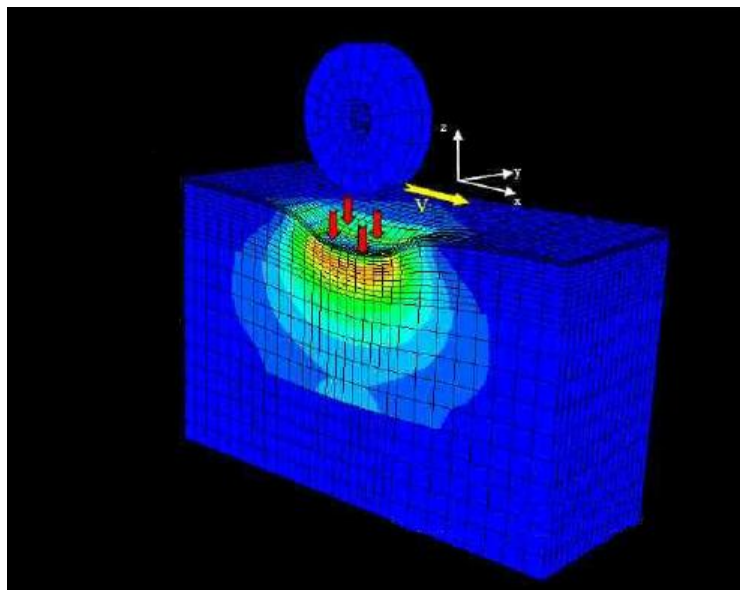




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΣΥ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΕΠΙΒΟΛΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ



ΤΣΑΠΑΚΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Α. ΛΟΪΖΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ
ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2013

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου και επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας κ. Ανδρέα Λοΐζο, για τις γνώσεις που μου παρείχε, καθώς επίσης και για τη συνεχή καθοδήγησή του κατά την εκπόνησή της.

Νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω επίσης την επιστημονική συνεργάτιδα του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ, κα Αγγελική Αρμένη, για την υπομονή που επέδειξε και για την πολύτιμη συμβολή της τόσο στην εκμάθηση του προγράμματος των πεπερασμένων στοιχείων, όσο και στην κατάστρωση των τρισδιάστατων προτύπων προσομοίωσης.

Τέλος, ευχαριστώ τη φίλη και συνάδελφο Σοφία για τις συμβουλές και τη συμπαράστασή της. Το μεγαλύτερο "ευχαριστώ" απευθύνεται στους γονείς μου Νίκο και Φερενίκη για την ηθική και υλική στήριξη που μου παρέχουν.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της συμπεριφοράς των εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που προέκυψαν από τις δοκιμές της πειραματικής εγκατάστασης οδοστρωμάτων αεροδρομίων μεγάλης κλίμακας, “National Airport Pavement Test Facility” (NAPTF), της Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας των Η.Π.Α (FAA). Διερευνήθηκαν τα δάπεδα με ασφαλική στρώση μεγάλου πάχους, αναφορικά με τις αναπτυσσόμενες ανηγμένες οριζόντιες εφελκυστικές παραμορφώσεις στον πυθμένα, αλλά και στο μέσον των ασφαλικών, κατά τη διεύθυνση κίνησης των φορείων. Η συμπεριφορά των δαπέδων κατά τις πειραματικές φορτίσεις εξετάστηκε ως προς πολλούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία. Επίσης, διενεργήθηκε συγκριτική ανάλυση της καταπόνησης των δαπέδων από τα δύο δοκιμαστικά φορεία, ενώ υπήρξε και σύγκριση των παραμορφώσεων μεταξύ των δαπέδων. Επόμενο στάδιο της εργασίας αποτελεί ο υπολογισμός των μέτρων δυσκαμψίας των υλικών των στρώσεων των δαπέδων, από την επεξεργασία των στοιχείων που συλλέχθηκαν κατά τις εφαρμογές μη καταστρεπτικών δοκιμών. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση των δοκιμών με τη βοήθεια προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, κατασκευάζοντας τρισδιάστατα πρότυπα προσομοίωσης των δαπέδων. Οι τιμές των παραμορφώσεων που προέκυψαν από την προσομοίωση συγκρίθηκαν με τις μετρημένες τιμές. Η στατιστική επεξεργασία που ακολούθησε φανέρωσε γενικώς υψηλές τιμές σφαλμάτων εκτίμησης και έτσι η χρήση των τρισδιάστατων προτύπων με τις συγκεκριμένες θεωρήσεις κρίθηκε επισφαλής, ιδίως για το δάπεδο με στρώση έδρασης χαμηλής φέρουσας ικανότητας.

Λέξεις κλειδιά: Οδοστρώματα αεροδρομίων, εύκαμπτα δάπεδα, ανηγμένες παραμορφώσεις ασφαλικής στρώσης, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

ABSTRACT

In the present diploma thesis is conducted a research about the asphalt concrete (AC) tensile strains in flexible airfield sections. For this purpose the database of National Airport Pavement Test Facility (NAPTF) was used. The National Airport Pavement Test Facility (NAPTF) is located at the FAA William J. Hughes Technical Center, Atlantic City International Airport, New Jersey. It is used to generate full-scale pavement response and performance data for development and verification of airport pavement design criteria. Asphalt Strain Gages (ASGs) embedded within the test sections were used to record the pavement structural responses. The AC tensile strains measured in the flexible pavement test sections during full-scale traffic testing at the FAA's National Airport Pavement Test Facility are discussed. This study was focused on analyzing the effect of AC temperature variations, the magnitude and the speed of load application on strain responses in asphalt concrete layer. There is also an analysis of comparative effect of two multiple wheel heavy aircraft gear loading and a comparison of AC strains among the sections. The NDT data acquired at the NAPTF were used. Specifically it is illustrated the use of backcalculated asphalt moduli as an indicator of the load-carrying capacity of the pavements. Linear elastic analyses using multilayer elastic theory and finite element (FE) techniques were carried out to simulate the tested structures and compare the computed results with actual field measurements. The results showed that the errors are not negligible, notably for the test section on subgrade material of low strength.

Keywords: Asphalt strain gage (ASG), Asphalt Concrete (AC), flexible airfield pavement, finite element modeling, multiple-wheel heavy aircraft gear loading

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1.1	ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ.....	6
1.2	ΣΤΟΧΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	6
1.3	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	7
1.4	ΔΟΜΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	7
2	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΑΝΑΦΟΡΙΚΑ ΜΕ ΤΙΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ	9
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
2.2	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗ ΣΤΡΩΣΗ ΑΣΦΑΛΤΙΚΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ.....	9
2.3	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΔΑΠΕΔΩΝ ΤΗΣ ΝΑΡΤΦ	11
2.3.1	Ανάπτυξη οριζόντιων παραμορφώσεων	11
2.3.2	Επιρροή του ίχνους διέλευσης στην καταπόνηση των δαπέδων.....	14
2.3.3	Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού.....	17
2.4	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΔΑΠΕΔΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ	26
3	ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΑΡΧΕΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ	29
3.1	ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	29
3.2	ΤΥΠΟΙ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ.....	30
3.3	ΦΟΡΤΙΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	32
3.4	ΦΘΟΡΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	36
4	ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ	38
4.1	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΕ ΕΥΚΑΜΠΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ.....	38
4.1.1	Βασικές θεωρίες υπολογισμού οδοστρωμάτων	38
4.1.1.1	Ελαστικός ημίχωρος – θεωρία Boussinesq.....	38
4.1.1.2	Συστήματα επάλληλων στρώσεων – θεωρία Burmister.....	41
4.1.1.3	Γενικευμένο ελαστικό σύστημα πολλαπλών στρώσεων	43
4.1.2	Στατικό πρότυπο εύκαμπτου οδοστρώματος.....	44
4.1.3	Τρόπος καταπόνησης οδοστρωμάτων	45
4.1.4	Κρίσιμες θέσεις για την εντατική κατάσταση εύκαμπτου οδοστρώματος	47
4.2	ΔΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	48
4.2.1	Αρχές δομικής αξιολόγησης	48
4.2.2	Εκτίμηση φέρουσας ικανότητας – Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους.....	48
4.2.3	Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού (Back-analysis).....	52
4.3	ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	56
5	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΝΑΡΤΦ.....	60
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	60
5.2	ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ	62
5.3	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΕΤΡΟΥ ΠΙΠΤΟΝΤΟΣ ΒΑΡΟΥΣ (FWD).....	68
5.4	ΤΥΠΙΚΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΔΑΠΕΔΩΝ	69
5.5	ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΩΝ ΔΑΠΕΔΩΝ	72

5.6	ΤΥΠΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΝΗΓΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ.....	77
6	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	82
6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	82
6.2	ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	83
6.2.1	Επιλογή αισθητήρων.....	83
6.2.2	Επιλογή ημερών.....	88
6.2.3	Ιστογράμματα παραμορφώσεων δαπέδου LFS.....	93
6.2.3.1	Διαδοχικές φορτίσεις.....	93
6.2.3.2	Ιστογράμματα μεμονωμένων ημερών.....	96
6.2.3.3	Επιρροή μεγέθους φορτίου ανά τροχό.....	101
6.2.3.3.1	Μεμονωμένες ημέρες φορτίσεων με το μέγιστο φορτίο ανά τροχό.....	103
6.2.3.4	Επιρροή ταχύτητας φορείων.....	108
6.2.3.4.1	Μεμονωμένες ημέρες φορτίσεων με το μέγιστο φορτίο τροχού και την ελάχιστη ταχύτητα φορείου.....	112
6.2.3.5	Σύγκριση αρχικής και τελικής κατάστασης δαπέδου.....	114
6.2.4	Ιστογράμματα παραμορφώσεων δαπέδου MFS.....	117
6.2.4.1	Διαδοχικές φορτίσεις.....	117
6.2.4.2	Ιστογράμματα μεμονωμένων ημερών.....	120
6.2.5	Ιστογράμματα παραμορφώσεων δαπέδου HFS.....	124
6.2.6	Επιρροή Θερμοκρασίας στην ανάπτυξη των παραμορφώσεων.....	128
6.2.7	Επιρροή διελεύσεων υπό σταθερή θερμοκρασία.....	131
6.2.8	Σύγκριση παραμορφώσεων πυθμένα επιφανειακής στρώσης – πυθμένα ασφαλτικής βάσης.....	133
6.2.9	Σύγκριση καταπόνησης ασφαλτικού σκυροδέματος από B-777 και B-747.....	135
6.2.10	Σύγκριση παραμορφώσεων μεταξύ των δαπέδων.....	137
7	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΑΠΕΔΩΝ.....	139
7.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	139
7.2	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΤΡΩΝ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ/ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΔΑΠΕΔΩΝ.....	139
7.2.1	Περιγραφή διαδικασίας ανάστροφου υπολογισμού (Back-analysis).....	139
7.2.2	Υπολογισμένα μέτρα ελαστικότητας υλικών δαπέδου LFS.....	145
7.2.3	Υπολογισμένα μέτρα ελαστικότητας υλικών δαπέδου MFS.....	148
7.2.4	Υπολογισμένα μέτρα ελαστικότητας υλικών δαπέδου HFS.....	149
7.2.5	Σύγκριση μέτρων ελαστικότητας ασφαλτικού σκυροδέματος στις τρεις θέσεις των δαπέδων.....	151
7.2.6	Σύγκριση μέτρων ελαστικότητας ασφαλτικού σκυροδέματος για διαφορετικές τιμές του συντελεστή διακύμανσης του RMSE.....	153
7.3	ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΜΕΣΩ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	157
7.3.1	Διαδικασία κατάστρωσης προτύπων προσομοίωσης.....	157
7.3.2	Υπολογισμένες παραμορφώσεις δαπέδου LFS.....	167
7.3.2	Υπολογισμένες παραμορφώσεις δαπέδου MFS.....	170
7.3.3	Υπολογισμένες παραμορφώσεις δαπέδου HFS.....	173
7.3.4	Απόκριση προτύπων προσομοίωσης συναρτήσει του χρόνου.....	175
7.3.5	Συγκριτική παρουσίαση μετρημένων και υπολογισμένων παραμορφώσεων συναρτήσει του χρόνου.....	181

7.3.6 Συγκριτική καταπόνηση ασφαλτικού σκυροδέματος προτύπων προσομοίωσης από τα Β-777 και Β-747.....	186
8 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ	188
8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	188
8.2 ΑΡΧΕΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ RMSPE	188
8.3 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	191
8.3.1 Εισαγωγή.....	191
8.3.2 Τιμές συντελεστών και συμπεράσματα για το δάπεδο LFS	192
8.3.3 Τιμές συντελεστών και συμπεράσματα για το δάπεδο MFS	193
8.3.4 Τιμές συντελεστών και συμπεράσματα για το δάπεδο HFS	194
8.3.5 Γενικά συμπεράσματα	196
9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	197
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΑΝΑΦΟΡΕΣ	205
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	211
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	232
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....	243
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ	263

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Χρησιμότητα πειραματικών διατάξεων μεγάλης κλίμακας

Η συνεχής αύξηση της μεταφορικής ζήτησης έχει οδηγήσει στην εισαγωγή νέων τύπων αεροσκαφών (New Generation Aircrafts – NGA), όπως αυτό του B-777, τα οποία είναι μεγαλύτερα και βαρύτερα. Οι καταπονήσεις των αεροσκαφών αυτών στα οδοστρώματα των αεροδρομίων είναι μεγαλύτερες και ως εκ τούτου απαιτείται μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα για τα δάπεδα. Κατ' επέκταση, προκύπτει η ανάγκη για την αξιολόγηση νέων μεθόδων σχεδιασμού, τον επανέλεγχο των ισχυόντων προδιαγραφών, καθώς επίσης και για τη δοκιμή νέων υλικών οδοστρωσίας.

Η ανάγκη αυτή μπορεί να εξυπηρετηθεί μόνο με τη συγκέντρωση δεδομένων σχετικά με τις αποκρίσεις των οδοστρωμάτων και τους μηχανισμούς κόπωσης αυτών, προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι σχετικές διερευνήσεις. Ο πλέον ιδανικός τρόπος παρακολούθησης της απόκρισής τους θα ήταν η "επιτόπου παρακολούθηση", υπό τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης. Ο τρόπος αυτός είναι εξαιρετικά δύσκολος και ασύμφορος στην εφαρμογή του, ιδίως μάλιστα για τα δάπεδα των αεροδρομίων.

Για το λόγο αυτό έχουν κατασκευαστεί πειραματικές διατάξεις επιταχυνόμενης φόρτισης (Accelerated Pavement Testing Facility – APTF) που έχουν ως στόχο τη ρεαλιστικότερη δυνατή προσομοίωση των οδοστρωμάτων και των συνθηκών φόρτισής τους. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την άμεση συλλογή δεδομένων, ούτως ώστε να πραγματοποιηθούν οι διάφορες αξιολογήσεις. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα διεξαγωγής μελετών της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων πριν την κατασκευή τους, για τις προσδοκώμενες κυκλοφοριακές συνθήκες. Επίσης, είναι εφικτός ο έλεγχος των περιβαλλοντικών συνθηκών (θερμοκρασία δαπέδων, υγρασία έδρασης), κάτω από τις οποίες θα πραγματοποιηθούν οι δοκιμαστικές φορτίσεις. Επιτυγχάνεται επιπροσθέτως, καλύτερος έλεγχος της δομικής κατάστασης των διατομών, λόγω του μικρότερου μεγέθους τους από τις πραγματικές.

Μια τέτοια διάταξη που αφορά αμιγώς στα οδοστρώματα των αεροδρομίων είναι η National Airport Pavement Test Facility (NAPTF), στις ΗΠΑ. Πρόκειται για στεγασμένη πειραματική εγκατάσταση μεγάλης κλίμακας (Large Scale Facility – LSF), η οποία παρέχει πλούσια βάση δεδομένων που αξιοποιείται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1.2 Στόχος εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στο να συνδράμει στη διερεύνηση της απόκρισης των εύκαμπτων οδοστρωμάτων των αεροδρομίων. Επικεντρώνεται στην εξέταση των αναπτυσσόμενων ανηγμένων οριζόντιων εφελκυστικών παραμορφώσεων, τόσο στον πυθμένα, όσο και στο μέσον των ασφαλτικών. Αρχικά, εξετάζονται οι πειραματικά μετρημένες τιμές, όπως κατεγράφησαν σε πειραματική διάταξη μεγάλης κλίμακας, υπό την καταπόνηση φορέων αεροσκαφών νέας γενιάς (B-777 και B-747). Έπειτα καταστρώνονται

τρισεδιάστατα πρότυπα προσομοίωσης, μέσω της θεωρίας των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία αυξάνεται ολοένα και περισσότερο σε εφαρμογή για προβλήματα προσομοίωσης κατασκευών. Στο αντικείμενο της εργασίας περιλαμβάνεται και η αξιολόγηση των προτύπων αυτών, με βάση τις αποκλίσεις μεταξύ των πειραματικά μετρημένων τιμών της εγκατάστασης και των αναλυτικά υπολογισμένων από τα πρότυπα προσομοίωσης. Από τη συγκριτική ανάλυση αυτών των τιμών προκύπτουν ενδιαφέροντα συμπεράσματα σχετικά με την ακρίβεια της συγκεκριμένης μεθόδου. Έτσι, δίδεται αφορμή για περαιτέρω διερεύνηση, ούτως ώστε να βελτιστοποιηθεί η διαδικασία προσομοίωσης και να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή ακρίβεια.

1.3 Μεθοδολογία

Αρχικά επεξεργάστηκαν τα δεδομένα των πειραματικών μετρήσεων της εγκατάστασης NARPF. Για τα υπό εξέταση δάπεδα, οργανώθηκαν οι τιμές των μετρημένων παραμορφώσεων σε μορφή ιστογραμμάτων και εξετάστηκε η συμπεριφορά τους με την πάροδο του χρόνου. Τα δάπεδα που μελετώνται, είναι τα εύκαμπτα δάπεδα με στρώση ασφαλτικού σκυροδέματος μεγάλου πάχους και με στρώσεις έδρασης χαμηλής, μέσης και υψηλής φέρουσας ικανότητας (CBR 4, CBR 8, CBR 20 αντίστοιχα). Ελέγχθηκε επίσης η επιρροή διαφόρων παραγόντων στην απόκριση των δαπέδων, όπως της θερμοκρασίας, του μεγέθους του φορτίου και της ταχύτητας.

Εν συνεχεία, αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα από τις δοκιμές με τη συσκευή του Παραμορφωσιμέτρου Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer – FWD). Τα στοιχεία αυτά, μαζί με μία σειρά άλλων δεδομένων, όπως τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι σπερματικές τιμές των δομικών χαρακτηριστικών των στρώσεων, εισήχθησαν σε κατάλληλο πρόγραμμα ανάλυσης υπολογισμού (back-analysis). Κατ' αυτόν τον τρόπο προέκυψαν οι τιμές των μέτρων δυσκαμψίας/ελαστικότητας των υλικών των δοκιμαστικών δαπέδων και αναλύθηκε η δομική τους κατάσταση σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και τον αριθμό των διελεύσεων. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το BAKFAA της Ομοσπονδιακής Υπηρεσίας Πολιτικής Αεροπορίας των ΗΠΑ (Federal Aviation Administration – FAA).

Έπειτα, τα μέτρα ελαστικότητας που προέκυψαν εισήχθησαν στο πρόγραμμα προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία, ABAQUS. Έτσι, καταστρώθηκαν τα τρισεδιάστατα πρότυπα προσομοίωσης των δαπέδων και υπολογίστηκαν οι ανηγμένες εφελκυστικές παραμορφώσεις στη διεύθυνση κίνησης των φορείων, στις επιθυμητές θέσεις των διατομών. Κατόπιν, τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα μετρημένα μεγέθη και προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα.

1.4 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η εργασία περιλαμβάνει εκτός από την παρούσα εισαγωγή, ακόμα οχτώ κεφάλαια, το περιεχόμενο των οποίων έχει ως εξής :

Στο **2^ο κεφάλαιο** λαμβάνει χώρα η βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο ασφαλτικό σκυρόδεμα. Αρχικά, γίνεται αναφορά σε εργασίες που αφορούν όχι μόνο στα οδοστρώματα αεροδρομίων, αλλά και οδών και

έπειτα παρατίθενται ευρήματα από έρευνες σχετικές με τα εύκαμπτα δάπεδα της NARTF. Καταγράφηκε επίσης η διεθνής πρακτική σε θέματα που αφορούν στον ανάστροφο υπολογισμό και στην τρισδιάστατη προτυποποίηση των δαπέδων.

Στο **3^ο κεφάλαιο** δίνονται συνοπτικά ορισμένες θεμελιώδεις αρχές των οδοστρωμάτων των αεροδρομίων.

Στο **4^ο κεφάλαιο** περιέχονται βασικές έννοιες και τρόποι αξιολόγησης των παραμορφώσεων στα εύκαμπτα οδοστρώματα. Αναλύονται κάποιες βασικές θεωρίες υπολογισμού οδοστρωμάτων, ενώ επίσης παρατίθενται και στοιχεία σχετικά με τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού. Τέλος, παρέχονται βασικές πληροφορίες σχετικά με τη μέθοδο προσομοίωσης των πεπερασμένων στοιχείων.

Στο **5^ο κεφάλαιο** περιγράφεται η πειραματική εγκατάσταση της NARTF. Παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τη διάταξη των δαπέδων, τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά, τη θέση των αισθητήρων, καθώς επίσης και με τον τρόπο διεξαγωγής των δοκιμαστικών φορτίσεων.

Το **6^ο κεφάλαιο** περιλαμβάνει τα δεδομένα των μετρήσεων που εξετάζονται από την παρούσα εργασία. Δηλαδή, περιλαμβάνονται οι τιμές των παραμορφώσεων σε μορφή ιστογραμμάτων και υφίστανται περαιτέρω επεξεργασία προκειμένου να φανεί η επιρροή διαφόρων παραγόντων στη συμπεριφορά των δαπέδων. Τέτοιοι παράγοντες είναι η θερμοκρασία, ο αριθμός των διελεύσεων, η ταχύτητα των φορείων και το μέγεθος του φορτίου. Επιπλέον, συγκρίνονται οι τιμές των παραμορφώσεων που προκαλούνται από τα δύο φορεία σε κάθε δάπεδο, καθώς επίσης και οι τιμές μεταξύ των δαπέδων.

Στο **7^ο κεφάλαιο** πραγματοποιείται η κατάστρωση των προτύπων προσομοίωσης των δαπέδων. Αρχικά, διενεργείται η διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού και υπολογίζονται τα μέτρα δυσκαμψίας/ελαστικότητας για τις διάφορες θέσεις των δαπέδων. Τα μέτρα ελαστικότητας που προκύπτουν στις διάφορες θέσεις συγκρίνονται μεταξύ τους για κάθε δάπεδο, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τη δομική κατάσταση των δαπέδων για τις θέσεις αυτές. Έπειτα, αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάστηκαν τα πρότυπα προσομοίωσης. Τέλος, παρατίθενται οι υπολογισμένες παραμορφώσεις των τρισδιάστατων προτύπων σε μορφή ιστογραμμάτων.

Το **8^ο κεφάλαιο** πραγματεύεται τη στατιστική επεξεργασία των πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων τιμών. Δημιουργούνται τα διαγράμματα διασποράς των παραμορφώσεων και υπολογίζονται οι τιμές του συντελεστή της τετραγωνικής ρίζας του μέσου τετραγωνικού ποσοστιαίου σφάλματος (RMSPE). Οι τιμές αυτές πινακοποιούνται και επιχειρείται μία προσπάθεια ερμηνείας των αποτελεσμάτων.

Τέλος, το **9^ο κεφάλαιο** περιέχει τα συμπεράσματα τόσο από τη συνολική διερεύνηση των μετρημένων παραμορφώσεων, όσο και από τη συγκριτική ανάλυση μετρημένων και υπολογισμένων. Καταλήγοντας, διατυπώνονται ορισμένες ενδιαφέρουσες σκέψεις για περαιτέρω έρευνα.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΑΝΑΦΟΡΙΚΑ ΜΕ ΤΙΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Σε μία μηχανιστική-εμπειρική διαδικασία σχεδιασμού οδοστρωμάτων, καθίσταται απαραίτητος ο προσδιορισμός ικανών παχών για καθεμία από τις επιμέρους στρώσεις, ούτως ώστε να περιορίζονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις σε αποδεκτά επίπεδα, βάσει των προβλεπόμενων συνθηκών φόρτισης. Η ρηγμάτωση λόγω κόπωσης, είτε εξαιτίας της χαμηλής θερμοκρασίας, καθώς επίσης και η αυλάκωση, λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση και το σχεδιασμό εύκαμπτων καταστρωμάτων (Thompson and Nauman, 1993).

Η κόπωση της στρώσης του ασφαλτικού σκυροδέματος, αποτελεί μία από τις βασικές παραμέτρους για το σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Η αστοχία της στρώσεως αυτής, σχετίζεται με το μέγεθος των οριζόντιων εφελκυστικών τάσεων (tensile strains) που αναπτύσσονται στον πυθμένα της. Ο μηχανισμός της κόπωσης συσχετίζει τις επαναλήψεις των φορτίσεων του οδοστρώματος με τη μέγιστη οριζόντια εφελκυστική τάση που λαμβάνει χώρα σε κάθε φόρτιση (Garg and Hayhoe, 2001).

Στα ίδια συμπεράσματα καταλήγουν τόσο οι έρευνες της Αμερικανικής Ένωσης Πολιτικών Μηχανικών (American Society of Civil Engineers-ASCE) (Rawe et al., 1991), όσο και οι μελέτες της Ομοσπονδιακής Διεύθυνσης Αεροπορίας (FAA), σχετικά με το "Δείκτη Κατάστασης Οδοστρωμάτων" (Pavement Condition Index-PCI) (Guo and Rice, 1999). Συγκεκριμένα, θεωρούν τη ρηγμάτωση λόγω κόπωσης και την αυλάκωση του ασφαλτικού σκυροδέματος, ως βασικούς παράγοντες για την αστοχία των εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Όμοια λοιπόν, με τις έρευνες των Garg & Hayhoe, προκύπτει ότι η κόπωση του ασφαλτικού σκυροδέματος συνδέεται πρωτίτως με το μέγεθος των οριζόντιων εφελκυστικών τάσεων στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης. Επομένως, η μέτρηση των τάσεων αυτών, καθώς και ο προσδιορισμός των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων, καθίστανται αναγκαίες προϋποθέσεις για την αξιολόγηση της απόκρισης του οδοστρώματος και της συμπεριφοράς του στη ρηγμάτωση λόγω κόπωσης (Gopalakrishnan and Thompson, 2006).

2.2 Μετρήσεις οριζόντιων παραμορφώσεων στη στρώση ασφαλτικού σκυροδέματος εύκαμπτων οδοστρωμάτων

Έχουν πραγματοποιηθεί πολυάριθμες μελέτες στο παρελθόν, οι οποίες βασίστηκαν στις μετρήσεις των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στις στρώσεις ασφαλτικού σκυροδέματος, όπως αυτές κατεγράφησαν από εγκιβωτισμένους αισθητήρες. Θα πρέπει να τονισθεί ότι οι έρευνες αυτές δεν αφορούν σε οδοστρώματα αεροδρομίων, αλλά οδών. Παρ' όλα αυτά, προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα, τα οποία μπορούν να συγκριθούν με τα αντίστοιχα για τα καταστρώματα αεροδρομίων.

Οι Ullidtz & Larsen (1989), Anderson & Sebaaly (1989), Vogelzang & Bouman (1991), Krarup (1991), Huhtala & Pihlajamäki (1991), Al-Qadi et al. (2000), είναι ορισμένοι από τους

ερευνητές που ασχολήθηκαν με το προαναφερθέν αντικείμενο. Ορισμένες μελέτες επικεντρώθηκαν στην επιρροή που έχει η ταχύτητα φόρτισης στην ανάπτυξη των παραμορφώσεων στα ασφαλτικά υλικά. Τα αποτελέσματα φανέρωσαν εξάρτηση των παραμορφώσεων τόσο με την ταχύτητα του φορτίου, όσο και με τη θερμοκρασία. Για παράδειγμα, οι Sebaaly & Tabatabaee (1991) ανέφεραν μείωση του μεγέθους των παραμορφώσεων έως και 50 με 70%, ως αποτέλεσμα της αύξησης της ταχύτητας του οχήματος από 32 σε 80 km/h. Βέβαια, επισημαίνεται και πάλι ότι οι προηγούμενες μελέτες αφορούν σε δάπεδα αυτοκινητοδρόμων με τις αντίστοιχες συνθήκες φόρτισης, δηλαδή φορτίο τροχού μικρότερο από 9 tons (20.000 lbs).

Μεγάλη γκάμα δεδομένων έχει συγκεντρωθεί μέσω εγκαταστάσεων επιταχυνόμενης φόρτισης οδοστρωμάτων (Accelerated Pavement Testing – APT), ούτως ώστε να αξιολογηθεί η επίδοση των δαπέδων.

Ο Groenendijk (1998) συνέκρινε τα αποτελέσματα των αισθητήρων παραμόρφωσης στην εγκατάσταση LINTRACK APT της Ολλανδίας. Τα δεδομένα κατέδειξαν ότι το μέγεθος των παραμορφώσεων κατά την εγκάρσια διεύθυνση ήταν μεγαλύτερο από αυτό κατά τη διαμήκη. Το ίδιο ίσχυσε και για τις μόνιμες παραμορφώσεις, οι οποίες κατά τη διαμήκη διεύθυνση είναι μειωμένες λόγω της ανάπτυξης εφελκυσμού και θλίψης, κάτι το οποίο δεν παρατηρείται εγκάρσιως (Bhattacharjee et al., 2004).

Ο Edwards et al. (2004) συνέκριναν την απόκριση τεσσάρων δαπέδων τόσο κάτω από πραγματικές συνθήκες φόρτισης, όσο και σε πειραματική εγκατάσταση επιταχυνόμενης φόρτισης στο Οχάιο των ΗΠΑ (Accelerated Pavement Loading Facility – APLF). Οι δοκιμές στην εγκατάσταση έγιναν με δίδυμο τροχό, ενώ πραγματοποιήθηκαν επίσης και μετρήσεις με το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer – FWD). Από τις εφαρμογές FWD, υπολογίστηκαν τα μέτρα ελαστικότητας κάθε στρώσης, μέσω της διαδικασίας του ανάστροφου υπολογισμού. Στη συνέχεια έγινε χρήση προγράμματος βασισμένου στη θεωρία των ελαστικών στρώσεων, για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων στον πυθμένα της ασφαλτικής επιφανειακής στρώσης. Υπολογίστηκε επίσης και το μέγεθος των υποχωρήσεων στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Η σύγκριση έδειξε ότι οι υπολογισμένες παραμορφώσεις ήταν ελαφρώς μικρότερες από τις μετρημένες, ενώ αντίστοιχα οι υπολογισμένες υποχωρήσεις ελαφρώς μεγαλύτερες.

Αντίστοιχες αναλύσεις έγιναν από τους Erlingsson & Ingason (2004). Οι δύο ερευνητές συνέκριναν τη συμπεριφορά δύο δαπέδων μικρού πάχους, όπως αυτή προέκυψε σε εγκατάσταση APT με τη βοήθεια προσομοιωτή φόρτισης, σε σχέση με αυτή που παρατηρήθηκε σε πραγματικές συνθήκες φόρτισης. Διενεργήθηκαν τόσο γραμμικές, όσο και μη γραμμικές ελαστικές αναλύσεις, βασισμένες στη θεωρία των ελαστικών στρώσεων. Επίσης, έγινε χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή προσομοίωση των υπό εξέταση δαπέδων. Κατ' αυτόν τον τρόπο κατάφεραν να συγκρίνουν τις υπολογισμένες τιμές των παραμορφώσεων, με αυτές που μετρήθηκαν στις πραγματικές συνθήκες καταπόνησης. Η σύγκριση έδειξε ότι οι υπολογισμένες τιμές από τις μη γραμμικές ελαστικές αναλύσεις, αποκλίνουν λιγότερο από τις μετρημένες τιμές, σε σχέση με αυτές που προέκυψαν από τις γραμμικές ελαστικές αναλύσεις.

2.3 Διερεύνηση των εύκαμπτων δαπέδων της NARTF

2.3.1 Ανάπτυξη οριζόντιων παραμορφώσεων

Όπως αναφέρθηκε, προκειμένου να διερευνηθεί διεξοδικά η συμπεριφορά των οδοστρωμάτων, έχουν κατασκευασθεί πειραματικές εγκαταστάσεις με τη δυνατότητα επιτυχούς προσομοίωσης των συνθηκών φόρτισης. Μία από αυτές τις εγκαταστάσεις είναι η εγκατάσταση της NARTF, η οποία αφορά σε καταστρώματα αεροδρομίων. Λεπτομέρειες για την εγκατάσταση δίδονται στο πέμπτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας. Στην εγκατάσταση πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από δοκιμές, τα αποτελέσματα των οποίων χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή πληθώρας ερευνών.

Από τον Αύγουστο του 1999 έως το Σεπτέμβριο του ίδιου έτους, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές-φορτίσεις (slow-rolling response tests), με την ταχύτητα του δοκιμαστικού οχήματος να κυμαίνεται σε πολύ χαμηλές τιμές (της τάξεως των 0,54 km/h), καθώς επίσης και καταπονήσεις με στατικό φορτίο (ακίνητο όχημα). Σκοπός αυτών των δοκιμών ήταν η μελέτη του φαινομένου της αλληλεπίδρασης μεταξύ των φορτίων των τροχών για τις χαμηλές ταχύτητες. Ενώ, οι καταπονήσεις υπό στατικό φορτίο έδωσαν χρήσιμα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των δαπέδων, ως προς το μέγεθος και την ακριβή θέση του φορτίου, καθώς και τις διάφορες διατάξεις των τροχών (π.χ. φορείο με διπλό τροχό, διπλό δίδυμο, διπλό τροχό-τριπλό άξονα). Παράλληλα, δόθηκε η δυνατότητα σύγκρισης της συμπεριφοράς των δαπέδων για κινούμενο και στατικό φορτίο. Οι αποκρίσεις των δαπέδων (παραμορφώσεις, τάσεις, κ.ά.) καταγράφηκαν αναλυτικά για όλα τα μεγέθη των φορτίων που επιβλήθηκαν και για όλες τις διατάξεις τροχών που εφαρμόστηκαν. Οι τιμές των παραμορφώσεων στους πυθμένες των ασφαλικών στρώσεων, παρατηρήθηκαν σημαντικά αυξημένες, κυμαινόμενες από 500 έως και 2000 microstrains (Garg and Hayhoe, 2001).

Μελετώντας τα δεδομένα των προαναφερθέντων δοκιμών, οι Gomez-Ramirez & Thompson (2002), κατέδειξαν μία μεγάλη γκάμα τιμών στις οριζόντιες παραμορφώσεις, τόσο στον πυθμένα, όσο και στο μέσον της ασφαλικής στρώσης. Το μέγεθος των παραμορφώσεων στον πυθμένα, ήταν μεγαλύτερο εν συγκρίσει με εκείνο στο μέσον. Για παράδειγμα, στη διατομή MFS, οι τιμές των παραμορφώσεων στον πυθμένα ασφαλικής στρώσης κυμάνθηκαν από 1700 έως 3500 microstrains, ενώ στον μέσον από 900 έως 1700 microstrains αντίστοιχα.

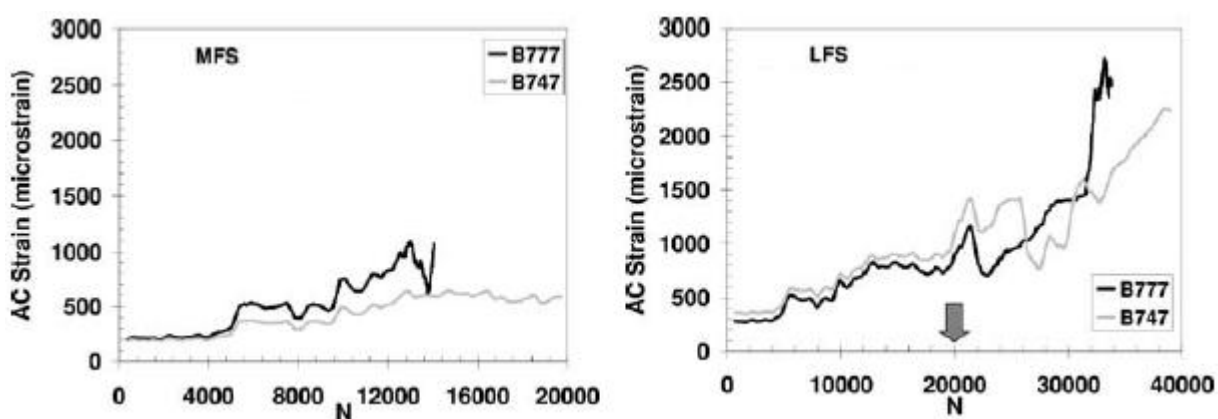
Οι Garg & Hayhoe (2001), προκειμένου να διερευνήσουν διεξοδικά την απόκριση των δαπέδων στις φορτίσεις, χρησιμοποίησαν τα δεδομένα από πρόσθετες δοκιμές. Οι δοκιμές αυτές έγιναν μόνο για τα εύκαμπτα δάπεδα, κατασκευασμένα σε στρώση έδρασης υψηλής φέρουσας ικανότητας (HFC και HFS). Διενεργήθηκαν σε δύο ημέρες (20-4-00 και 23-6-00), με διαφορετικές θερμοκρασίες (11,1 και 22,2 °C αντίστοιχα). Για κάθε διέλευση, η ταχύτητα του οχήματος καθορίζονταν εκ των προτέρων και κυμάνθηκε από 0,3 έως 8,0 km/h. Επιπλέον, το φορτίο ανά τροχό έπαιρνε κάθε φορά μία από τις τιμές των 106,8, 133,5 και 160,2 kN, για κάθε διαφορετική ταχύτητα οχήματος. Έτσι, κατάφεραν να εκτιμήσουν την επιρροή τόσο της θερμοκρασίας, όσο και της ταχύτητας του οχήματος στη συμπεριφορά των δαπέδων. Συγκεκριμένα, με την αύξηση της ταχύτητας από 0,3 σε 8,0 km/h, διαπίστωσαν μείωση των τιμών των παραμορφώσεων κατά 50 με 55%, για ένα συγκεκριμένο φορτίο τροχού. Με άλλα λόγια, η μείωση της διάρκειας φόρτισης (0,8 sec για 8,0 km/h και 18,6 sec για 0,3 km/h) προκαλεί μείωση του μεγέθους των αναπτυσσόμενων

παραμορφώσεων. Όσον αφορά στη θερμοκρασία, η αύξησή της (στο μέσο του πάχους της ασφαλτικής στρώσης) από 11,1 σε 22,2 °C, επέφερε αύξηση των παραμορφώσεων κατά 100 με 120 % (και για τα τρία φορτία τροχού, για όλες τις ταχύτητες διέλευσης).

Οι συστηματικές δοκιμές στην εγκατάσταση της NAPTF, ξεκίνησαν το Φεβρουάριο του 2000 και ολοκληρώθηκαν το Σεπτέμβριο του 2001. Τα φορεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκεκριμένη περίοδο ήταν τα φορεία των αεροσκαφών τύπου B-777 και B-747 αντίστοιχα. Αρχικά, η ταχύτητα τέθηκε ίση με 8 km/h και το φορτίο ανά τροχό στους 20,4 t (200,2 kN ή 45.000 lbs).

Οι Gopalakrishnan & Thompson (2006) μελέτησαν τις αποκρίσεις των εύκαμπτων δαπέδων καθώς αυξάνονταν ο αριθμός των διελεύσεων. Για τα εύκαμπτα καταστρώματα, επί στρώσης έδρασης με μέση φέρουσα ικανότητα (MFC, MFS), διαπίστωσαν ότι το μέγεθος των παραμορφώσεων επηρεάζεται σημαντικά από τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα, παρατήρησαν δραστική αύξηση των παραμορφώσεων, για μικρή διαφορά στον αριθμό των διελεύσεων (μεταξύ 4000 και 5000 επαναλήψεων), γεγονός που οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας του ασφαλτικού σκυροδέματος από 12,8 σε 20,6 °C. Επίσης, οι τιμές των παραμορφώσεων αυξάνονταν απότομα, καθώς τα δύο δάπεδα πλησίαζαν την αστοχία. Η σταθερή αύξηση των παραμορφώσεων στο βόρειο τμήμα των δαπέδων αυτών (B-777) είναι σύμφωνη και με άλλες μελέτες (Gopalakrishnan, 2004).

Σχετικά με τη διατομή LFS, από την έρευνα των ίδιων ερευνητών, διαπιστώθηκε αύξηση στις παραμορφώσεις με την αύξηση του φορτίου ανά τροχό στους 29,5 t (289,1 kN ή 65.000 lbs), κοντά στις 20.000 διελεύσεις. Μετά την αύξηση του φορτίου, οι παραμορφώσεις αυξάνονταν χωρίς η διαφορά στον αριθμό των επαναλήψεων να είναι μεγάλη και ενώ η θερμοκρασία παρέμενε σχετικά σταθερή. Η εικόνα 2.1 δείχνει τη μεταβολή των παραμορφώσεων συναρτήσει του αριθμού διελεύσεων για τα δάπεδα MFS και LFS, κατά τη διαμήκη διεύθυνση, συναρτήσει του αριθμού των επαναλήψεων. Τα συμπεράσματα αυτά συνάδουν με τα αποτελέσματα άλλων ερευνών, όπως των Gopalakrishnan & Thompson (2004), Mcqueen et al. (2001) και τέλος των Sharp & Johnson-Clarke (1997).



Εικόνα 2.1 Μεταβολή παραμορφώσεων συναρτήσει του αριθμού διελεύσεων για τα δάπεδα MFS και LFS, στη διαμήκη διεύθυνση (Gopalakrishnan and Thompson, 2006)

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών στην εγκατάσταση, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της εγκάρσιας επιφανειακής κατατομής (Transverse Surface Profile-TSP), ούτως ώστε να παρακολουθείται η εξέλιξη της αυλάκωσης. Με το πέρας των δοκιμών έγιναν μελέτες σχετικά με τις αυλακώσεις, προκειμένου να διερευνηθεί ο μηχανισμός αστοχίας των διατομών, ενώ παράλληλα εξετάστηκαν και οι ρωγμές που είχαν σχηματισθεί.

Ως κριτήριο αστοχίας για τα δάπεδα της NAPTF, χρησιμοποιήθηκε αυτό του Σώματος των Μηχανικών των Η.Π.Α (US Corps of Engineers) (Ahlin, 1991). Μόλις παρατηρηθεί ανύψωση (ήβωση) της επιφάνειας του οδοστρώματος κατά 25,4 mm (1 inch), θεωρείται ότι το οδόστρωμα αστοχεί. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ναι μεν η ανύψωση αυτή έχει όριο τα 25,4 mm, ωστόσο δεν υπάρχει κάποιο όριο σχετικά με το βάθος των αυλακώσεων. Κατ' αυτόν τον τρόπο, ανύψωση της τάξεως των 25,4 mm, μπορεί να συνοδεύεται από αυλάκωση με βάθος μεγαλύτερο από 50 ή και 75 mm. Παρ' όλα αυτά, τιμή του βάθους αυλάκωσης μεγαλύτερη από 25,4 mm, θεωρείται υψηλή και συνιστά λειτουργική αστοχία (US COE, 2001).

Αναφορικά με τις ρωγμές, διαπιστώθηκε ότι όλες είχαν σχηματισθεί στην επιφάνεια των δαπέδων και προχώρησαν προς την έδραση (top-down cracks). Επιπλέον, οι περισσότερες από αυτές είχαν διεύθυνση κατά μήκος των δοκιμαστικών καταστρωμάτων, δηλαδή παράλληλα στον άξονα συμμετρίας τους και πολύ κοντά στο ίχνος των τροχών του οχήματος. Τέτοιου τύπου ρωγμές αποτελούν φαινόμενο, το οποίο ακόμα δεν έχει κατανοηθεί πλήρως (Mohammad et al., 2005). Παρ' όλα αυτά, η εμφάνιση των ρωγμών σε αυτές τις θέσεις, ενδέχεται να οφείλεται στα υψηλά μεγέθη των βαθών των αυλακώσεων που παρατηρήθηκαν στην εγκατάσταση (Gopalakrishnan and Thompson, 2006).

Πολλές έρευνες, όπως αυτές των Garg (2001), Gervais et al. (2003), Hayhoe & Garg (2003) και Hayhoe (2004), πραγματοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των αυλακώσεων που δημιουργήθηκαν με το πέρας των δοκιμών στα δάπεδα της εγκατάστασης της NAPTF. Για την ακρίβεια, στις διατομές MFC και MFS, ο σχηματισμός των αυλακώσεων προέκυψε εξαιτίας της στρώσης έδρασης και της υπόβασης των δύο διατομών. Παρατηρήθηκε εισχώρηση του υλικού της στρώσης έδρασης, στην υπόβαση. Αντίθετα, στις διατομές LFC και LFS παρατηρήθηκαν αυλακώσεις μόνο στην επιφανειακή στρώση και στη βάση, κοντά στα ίχνη και των δύο φορέων (B-777, B-747).

Ενώ, λοιπόν, οι διατομές MFC και MFS αστόχησαν στη στρώση έδρασης με βάση το κριτήριο αστοχίας που χρησιμοποιήθηκε για τη NAPTF, οι LFC και LFS αστόχησαν μόνο στην επιφανειακή ασφατική τους στρώση. Σύμφωνα με τον Hayhoe (2004), δε συνέβη πλήρης αστοχία στις διατομές LFC και LFS, πιθανώς λόγω της σημαντικής ποσότητας αργίλου που περιείχε το υλικό της στρώσης έδρασης. Καθότι, τα ανώτερα στρώματα της έδρασης ξεράθηκαν στο διάστημα που μεσολάβησε μεταξύ κατασκευής οδοστρώματος και αρχής δοκιμών.

Οι δοκιμές στα οδοστρώματα επί στρώσης έδρασης υψηλής φέρουσας ικανότητας (HFC, HFS), τερματίστηκαν έπειτα από 5000 διελεύσεις, αφού δεν παρατηρήθηκε κανένα σημάδι σημαντικής φθοράς στα δάπεδα. Για παράδειγμα, η συνολική παραμένουσα παραμόρφωση στις 3400 επαναλήψεις ήταν μικρότερη από 5 mm (0,2 inch) (Garg and Hayhoe, 2008). Ο Gopalakrishnan (2009) μελέτησε αποκλειστικά την απόκριση αυτών των δύο δαπέδων. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το συμπέρασμά του σχετικά με τη δυνητική τους αστοχία, καθώς υποστήριξε ότι για να επιτευχθεί ήβωση της τάξεως των 25,4 mm, απαιτούνται 10^{10} διελεύσεις των φορέων (B-777, B-747), με φορτίο ανά τροχό στους 20,4 t

(200,2 kN). Επίσης, διαπίστωσε ότι ο ρυθμός αυλάκωσης μειωνόταν σταθερά με την αύξηση του αριθμού των διελεύσεων, κάτι το οποίο υποδεικνύει σταθερότητα στην επίδοσή τους ως προς την αυλάκωση που διαμορφώνεται. Με βάση τα παραπάνω, κατέληξε στο γεγονός ότι τα φορεία των αεροσκαφών τύπου B-777 και B-747 με το προαναφερθέν φορτίο ανά τροχό, δεν επιβάλλουν σημαντικές τάσεις και παραμορφώσεις στα οδοστρώματα με στρώση έδρασης υψηλής φέρουσας ικανότητας, ακόμα και αν τα βάθη των στρώσεων ασφατικού σκυροδέματος είναι μικρά.

Ένας από τους στόχους του δοκιμαστικού προγράμματος της NARTF, ήταν η αξιολόγηση της φθοράς που προκαλεί το φορείο του αεροσκάφους τύπου B-777, συγκριτικά με αυτό του B-747. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από τις μετρήσεις της εγκάρσιας επιφανειακής κατατομής, για την υλοποίηση μιας σειράς μελετών.

Οι Gopalakrishnan & Thompson (2003) αξιολόγησαν τη φθορά των δύο δοκιμαστικών φορειών στα τέσσερα εύκαμπτα δάπεδα με στρώση έδρασης χαμηλής και μέσης φέρουσας ικανότητας αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, διαπίστωσαν ότι οι μέσες τιμές των βαθών των αυλακώσεων που σχηματίστηκαν κοντά στα ίχνη των φορειών, δε διέφεραν σημαντικά μεταξύ τους. Δηλαδή, το μέγεθος της φθοράς που προξένησαν τα φορεία ήταν περίπου το ίδιο. Άλλωστε, στην εικόνα 2.1 φαίνεται ότι οι τιμές των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται από τα δύο φορεία δε διαφέρουν σημαντικά, ιδίως για τις πρώτες επαναλήψεις. Ο ένας εκ των δύο ερευνητών (Gopalakrishnan, 2009), κατέληξε στο ίδιο συμπέρασμα όσον αφορά στα εύκαμπτα δάπεδα με στρώση έδρασης υψηλής φέρουσας ικανότητας.

2.3.2 Επιρροή του ίχνους διέλευσης στην καταπόνηση των δαπέδων

Η φθορά των οδοστρωμάτων αεροδρομίων σχετίζεται άμεσα με τη διακύμανση της εγκάρσιας θέσης των φορτίων στο οδόστρωμα. Δηλαδή, η καταπόνηση των καταστρωμάτων διαφέρει στην περίπτωση κυκλοφορίας επί μεταβλητού ίχνους, σε σχέση με αυτήν της εγκιβωτισμένης κυκλοφορίας. Για τα δάπεδα της NARTF, δεν πραγματοποιήθηκε μεγάλος αριθμός ερευνών που να αφορά στη συγκριτική ανάλυση των δύο αυτών κυκλοφοριακών συνθηκών, ως προς την καταπόνηση που προκαλείται.

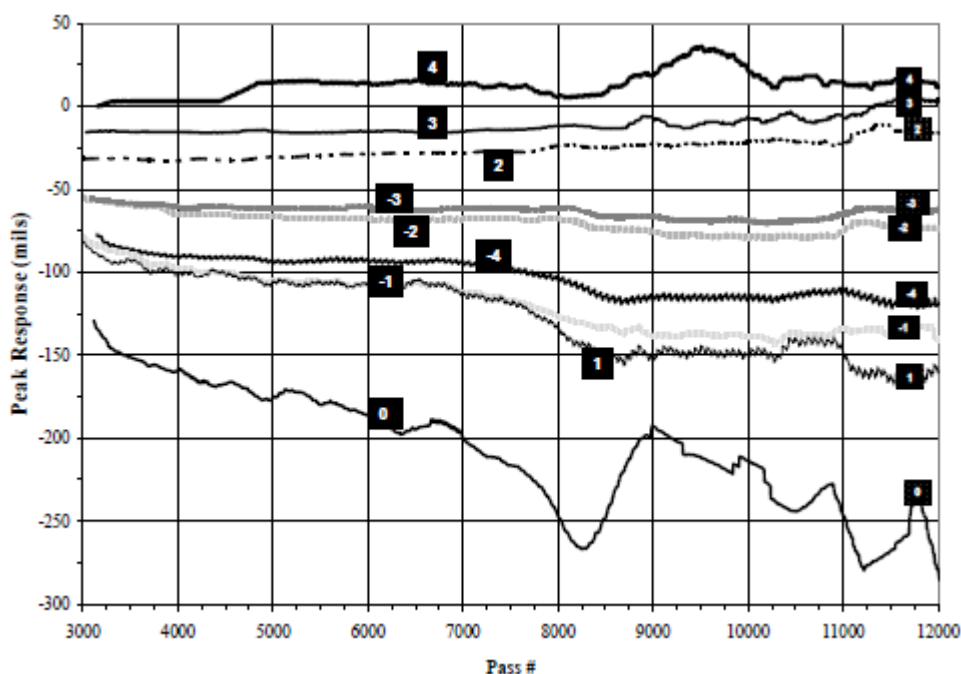
Οι Donovan & Tutumluer (2007) είναι από τους λίγους που διερεύνησαν το παραπάνω θέμα, επισημαίνοντας την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα. Βέβαια, συσχέτισαν το πρότυπο κίνησης (wander pattern) που επιβλήθηκε στο όχημα προσομοίωσης κατά τις δοκιμές, με τις κατακόρυφες παραμένουσες παραμορφώσεις και όχι με τις οριζόντιες, στον πυθμένα των ασφατικών στρώσεων. Παρ' όλα αυτά, προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα. Η ανάλυση των αισθητήρων των υποχωρήσεων έδειξε ότι οι παραμένουσες υποχωρήσεις στην επιφανειακή στρώση είναι μειωμένες όταν χρησιμοποιείται κάποιο πρότυπο κίνησης, εν συγκρίσει με την περίπτωση που δε γίνεται τέτοια χρήση.

Επίσης, από τις καταγραφές των αισθητήρων, προέκυψε ότι τα φορτία των τροχών των φορειών υπάρχει περίπτωση να αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους, ανάλογα με τη θέση τους ως προς τον αισθητήρα που εξετάζεται. Η αλληλεπίδραση αυτή επιφέρει ταυτόχρονα καταστάσεις συμπύκνωσης (συστολής-θλίψης) και διαστολής (εφελκυσμού) στο οδόστρωμα. Για την ακρίβεια, όταν ένας εκ των δύο τροχών βρεθεί ακριβώς πάνω από τη θέση του αισθητήρα, οπότε δεν υφίσταται αλληλεπίδραση μεταξύ των τροχών, τότε ολόκληρο το φορτίο προξενεί κατάσταση συμπύκνωσης στο οδόστρωμα. Από την άλλη

μεριά, όταν οι τροχοί ενός άξονα φορείου βρεθούν εκατέρωθεν του αισθητήρα, προκαλείται ταυτόχρονα το φαινόμενο της συμπύκνωσης και της διαστολής του οδοστρώματος. Η συμπύκνωση κατά τη δεύτερη περίπτωση είναι μικρότερης τάξης μεγέθους από αυτήν που προκαλείται στην πρώτη περίπτωση.

Η μελέτη των Thompson & Garg (1999) αφορά στην αλληλεπίδραση των τροχών για φορεία αποτελούμενα από πολλαπλούς τροχούς, όπως αυτό του αεροσκάφους τύπου B-777. Η ανάλυση έδειξε ότι η αλληλεπίδραση αυτή δεν επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τις εφελκυστικές παραμορφώσεις των στρώσεων από ασφαλτικό σκυρόδεμα. Η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση εμφανίζεται ακριβώς κάτω από τον τροχό. Το αποτέλεσμα της εγγύτητας των τροχών είναι η μείωση της εφελκυστικής παραμόρφωσης κάτω από τον τροχό.

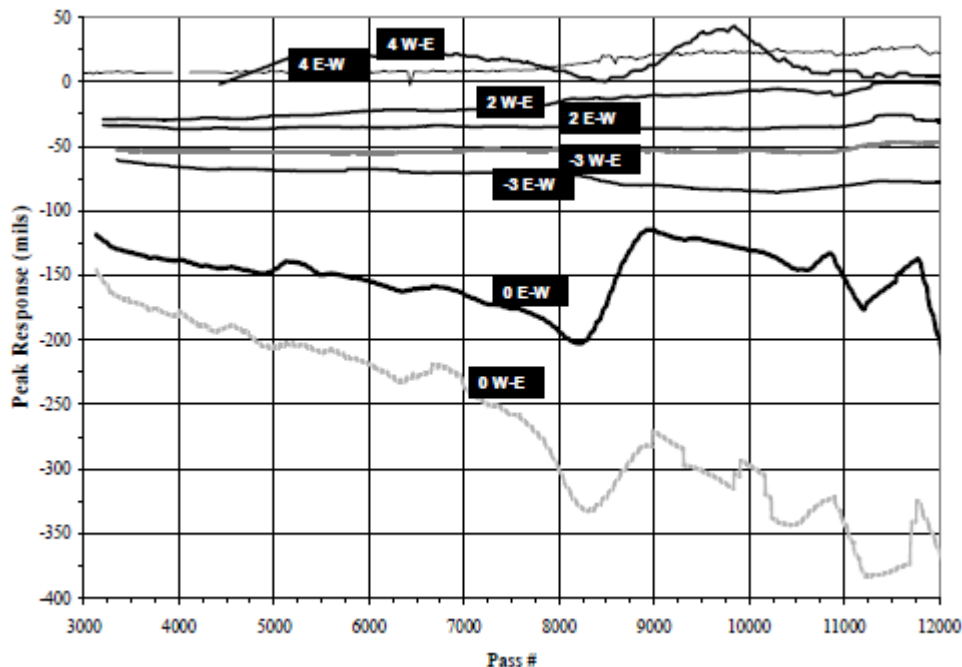
Κατά τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν εννέα διαφορετικά ίχνη διέλευσης του οχήματος. Κάθε ίχνος όριζε την εγκάρσια θέση των φορείων. Όπως αναμένονταν, η μελέτη των Donovan & Tutumluer (2007) που προαναφέρθηκε, έδειξε ότι οι παραμορφώσεις αυξάνονταν ανάλογα με την εγγύτητα του τροχού με τον αισθητήρα. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνονται οι τιμές των κατακόρυφων παραμορφώσεων της επιφάνειας του δαπέδου με συμβατική βάση και στρώση έδρασης μέσης φέρουσας ικανότητας (MFC), για κάθε ίχνος, στο βόρειο τμήμα του (B-777). Παρατηρείται μια έντονη διακύμανση τιμών. Οι μέγιστες παραμορφώσεις καταγράφονται για το ίχνος "0", κατά το οποίο ο τροχός διέρχεται ακριβώς πάνω από τον αισθητήρα, ενώ οι ελάχιστες για το "4", όπου η απόσταση τροχού-αισθητήρα μεγιστοποιείται.



Εικόνα 2.2 Απόκριση αισθητήρα κατακόρυφων παραμορφώσεων για κάθε ίχνος, στην επιφάνεια του δαπέδου MFC – βόρειο τμήμα (Donovan and Tutumluer, 2007)

Επιπροσθέτως, οι διελεύσεις από τα ίχνη “3” και “4” προκαλούσαν διαστολή της επιφάνειας του οδοστρώματος, υποδεικνύοντας έτσι ότι το μέγεθος των οριζόντιων δυνάμεων του εδάφους ήταν μεγαλύτερο από αυτό των καθέτων. Κατ’ επέκταση, η διαστολή του εδάφους επιφέρει και διαστολή των υπερκείμενων στρώσεων του οδοστρώματος.

Προέκυψε επίσης, ότι δεν επηρεάζει μόνο η θέση του φορτίου την απόκριση του οδοστρώματος, αλλά και η κατεύθυνση κίνησης του δοκιμαστικού οχήματος. Συγκεκριμένα, κατά τη διέλευση του οχήματος από το ίχνος “0”, ο αισθητήρας κατέγραψε μεγαλύτερη τιμή παραμόρφωσης για κατεύθυνση από Δύση προς Ανατολή (ο προσανατολισμός αφορά στη διάταξη της εγκατάστασης και αναλύεται εκτενέστερα στο πέμπτο κεφάλαιο). Έπειτα, κατά τη διέλευση του οχήματος με αντίθετη φορά κίνησης (Ανατολή προς Δύση), κατεγράφη μικρότερη τιμή. Το φαινόμενο αυτό προκαλείται εξαιτίας της σταθεροποίησης που συμβαίνει στο στοιχείο του οδοστρώματος που φορτίζεται, από την πρώτη διέλευση (Δύση - Ανατολή). Ταυτόχρονα, προκαλείται συμπύκνωση στα κοκκώδη υλικά, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυσή τους. Έτσι, παρατηρείται μικρότερη τιμή παραμόρφωσης στο ίδιο σημείο του δαπέδου, κατά τη δεύτερη κίνηση του οχήματος επί του ίδιου ίχνους, αλλά με αντίθετη κατεύθυνση. Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις της επιφάνειας του καταστρώματος MFC για ορισμένα ίχνη, στο βόρειο τμήμα του, ανάλογα με την κατεύθυνση κίνησης του οχήματος, όπου με W συμβολίζεται η δύση (West) και με E η ανατολή (East).



Εικόνα 2.3 Αναπτυσσόμενες κατακόρυφες παραμορφώσεις, ανάλογα με την κατεύθυνση κίνησης του οχήματος, στην επιφάνεια του δαπέδου MFC – βόρειο τμήμα (Donovan and Tutumluer, 2007)

Αντιθέτως, το μέγεθος των παραμορφώσεων για το ίχνος “-3” κατά τη δεύτερη διέλευση, με προσανατολισμό Ανατολή προς Δύση, ήταν μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό της πρώτης. Το γεγονός αυτό, υποδεικνύει ότι ένα σημείο του οδοστρώματος που βρίσκεται ανάμεσα στους τροχούς ενός άξονα, “αποσταθεροποιείται” κατά την πρώτη διέλευση, με συνέπεια η επόμενη να προκαλεί μεγαλύτερο μέγεθος παραμόρφωσης. Για την ακρίβεια, το πρώτο πέρασμα (Δύση προς Ανατολή) προκαλεί χαλάρωση εξαιτίας της οριζόντιας ώθησης, είτε και της ανάμιξης των υλικών του στοιχείου του οδοστρώματος που εξετάζεται. Ως εκ τούτου, η επόμενη διέλευση προκαλεί μεγαλύτερη τιμή παραμόρφωσης. Τα προηγούμενα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι για κάθε ολοκληρωμένο κύκλο διελεύσεων, συμβαίνει μια συνεχής ανάμιξη των υλικών των στρώσεων της βάσης και της υπόβασης, οι οποίες συνίστανται από ασύνδετα κοκκώδη υλικά.

Μία ακόμα ενδιαφέρουσα ανάλυση είναι αυτή των Hayhoe et al. (2003). Οι ερευνητές αυτοί επεσήμαναν ορισμένα περίπλοκα στην ερμηνεία στοιχεία που παρατηρήθηκαν στα δάπεδα της NARTF, επίσης σε συνάρτηση με τις παραμένουσες παραμορφώσεις. Συγκεκριμένα, η συνολική παραμένουσα (μόνιμη) παραμόρφωση στο οδόστρωμα, μετά από την ολοκλήρωση ενός κύκλου διελεύσεων, ήταν μόνο ένα μικρό κλάσμα της αντίστοιχης παραμόρφωσης, μετά από μία μεμονωμένη διέλευση. Το γεγονός αυτό ερμηνεύεται ως αποτέλεσμα της αλληλοαναιρέσεως των παραμορφώσεων αυτών, εξαιτίας της κίνησης του οχήματος, το οποίο σε κάθε διέλευση έχει αντίθετη διεύθυνση από την προηγούμενη. Έτσι, με την ολοκλήρωση ενός κύκλου διελεύσεων, τα δάπεδα έχουν περίπου την ίδια παραμένουσα παραμόρφωση με την αρχική.

Άλλες προγενέστερες έρευνες, κατέδειξαν ότι η διέλευση καθενός από τους άξονες ενός φορείου, επιφέρει ολοένα και μεγαλύτερη παραμόρφωση στο οδόστρωμα. Δηλαδή, στην περίπτωση ενός φορείου με διπλό τροχό – τριπλό άξονα, ο τελευταίος άξονας θα προκαλέσει μεγαλύτερο μέγεθος παραμορφώσεων από το δεύτερο και ο δεύτερος αντίστοιχα από τον πρώτο. Το φαινόμενο αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα κατασκευαστικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία θεωρούν ότι ο μεσαίος άξονας του φορείου με την προαναφερθείσα διάταξη προκαλεί τη μέγιστη παραμόρφωση στο κατάστρωμα. Η ασυνέπεια αυτή μπορεί να αποδοθεί στα κινούμενα φορτία των τροχών, καθώς το οδόστρωμα δεν προλαβαίνει να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση (προ φόρτισης) πριν φορτιστεί εκ νέου (Gopalakrishnan and Thompson, 2004 και Gopalakrishnan et al., 2006).

2.3.3 Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού

Μέσω της διαδικασίας του ανάστροφου υπολογισμού εκτιμώνται τα μέτρα ελαστικότητας των επιμέρους στρώσεων των οδοστρωμάτων. Τα δεδομένα που προκύπτουν από τις μη καταστρεπτικές μετρήσεις (Non-Destructive Tests), όπως αυτή του παραμορφωσιμέτρου πίπτοντος βάρους (FWD), είναι απαραίτητα για την ενεργοποίηση των αλγόριθμων της ανάστροφης ανάλυσης.

Η ενεργοποίηση αυτή γίνεται μέσω ειδικά σχεδιασμένων λογισμικών, τα οποία αναλύουν τις υποχωρήσεις που προκύπτουν από τις μετρήσεις FWD και προχωρούν στην αξιολόγηση της δομικής κατάστασης των οδοστρωμάτων.

Παρόλο που υπάρχουν αρκετά προγράμματα που χρησιμοποιούν τα δεδομένα των μη καταστρεπτικών μετρήσεων για την αξιολόγηση των δαπέδων, θα πρέπει να επιλέγονται αυτά που έχουν το ίδιο θεωρητικό υπόβαθρο με τα προγράμματα σχεδιασμού. Επί

παραδείγματι, σε περίπτωση που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ένα πρόγραμμα σχεδιασμού, βασισμένο στη θεωρία των ελαστικών στρώσεων, τότε το πρόγραμμα που θα χρησιμοποιηθεί για τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού, θα πρέπει να βασίζεται στην ίδια θεωρία (FAA, Advisory Circular AC 150/5370-11 B, 2011).

Γενικά, τα λογισμικά που χρησιμοποιούνται για τον ανάστροφο υπολογισμό βασίζονται σε συμβατικά προγράμματα ελαστικών στρώσεων (Elastic Layer Program – ELP) και υποθέτουν ότι τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι γραμμικό-ελαστικά, ομογενή και ισότροπα. Παρ' όλα αυτά, έρευνες όπως αυτές του Hicks (1970) και των Thompson & Robnett (1979) φανερώνουν τη μη γραμμικότητα του μέτρου ελαστικότητας, καθώς και την εξάρτησή του από το μέγεθος της καταπόνησης, τόσο για τα ασύνδετα κοκκώδη υλικά, όσο και για τα συνεκτικά λεπτόκοκκα.

Αλλά και για τα δάπεδα της NAPTf, οι Gomez-Ramirez & Thompson (2002) ανέφεραν τη μη γραμμική συμπεριφορά των υλικών, αναλύοντας χωριστά για κάθε στρώση τις τιμές των αισθητήρων καταγραφής κατακόρυφων παραμορφώσεων. Ενώ, οι Garg & Marsey (2002) παρατήρησαν την εξάρτηση των στρώσεων της βάσης και της υπόβασης των εύκαμπτων δαπέδων της NAPTf, από το μέγεθος της επιβαλλόμενης έντασης. Ως εκ τούτου, κατέληξαν ότι η χρήση των μη γραμμικών μέτρων ελαστικότητας αποτελεί την πιο ρεαλιστική λύση για την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας των δαπέδων. Ενώ παράλληλα, επιτυγχάνεται αποδοτικότερα η παρακολούθηση της διακύμανσής τους σε σχέση με τις κυκλοφοριακές συνθήκες. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι περισσότερες ανάστροφες αναλύσεις σχετικά με τα δάπεδα της NAPTf, πραγματοποιήθηκαν μέσω τριών προγραμμάτων κυρίως.

Το πρόγραμμα BAKFAA αποτελεί ένα εκ των τριών προγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στα δάπεδα της NAPTf για την εκτίμηση των μέτρων ελαστικότητας κάθε στρώσης. Έχει σχεδιαστεί από την FAA και κάνει χρήση της υπορουτίνας (subroutine) LEAF. Βασίζεται στη θεωρία των ελαστικών στρώσεων και υπολογίζει τα μέτρα ελαστικότητας κάθε στρώσης, έπειτα από μία επαναληπτική διαδικασία. Μέσω της διαδικασίας αυτής, το πρόγραμμα επιτυγχάνει σύγκλιση μεταξύ των μετρημένων παραμορφώσεων, όπως καταγράφησαν από τη συσκευή FWD και αυτών που υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα. Με το πέρας της σύγκλισης αυτής, το λογισμικό σταματάει τις επαναλήψεις και δίδει τα νέα μέτρα ελαστικότητας (FAA, Advisory Circular AC 150/5370-11 B, 2011).

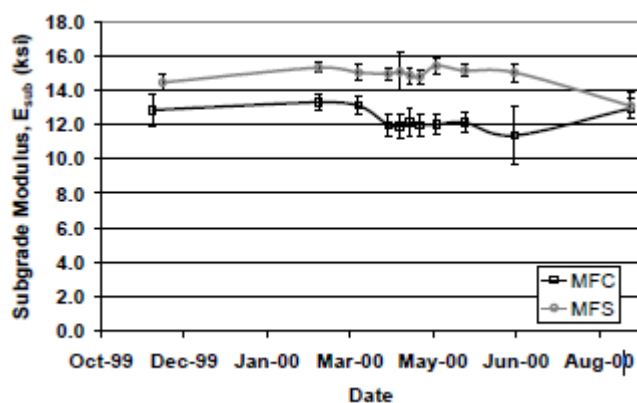
Ένα ακόμη πρόγραμμα ανάστροφης ανάλυσης είναι το WESDEF. Αναπτύχθηκε από τον Van Cauwelaert et al. (1989) και χρησιμοποιεί το λογισμικό πολλαπλών ελαστικών στρώσεων WESLEA. Η λειτουργία του βασίζεται σε μία επαναληπτική διαδικασία μέσω της οποίας υπολογίζει ένα σύνολο μέτρων ελαστικότητας. Για την ακρίβεια, παράγει τιμές υποχωρήσεων πολύ κοντά στις μετρημένες τιμές που προέκυψαν από τις μη καταστρεπτικές δοκιμές, βάσει γραμμικών ελαστικών υπολογισμών. Επιπλέον, το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει τα μέτρα ελαστικότητας, χρησιμοποιώντας τις τιμές που καταγράφουν οι αισθητήρες υποχωρήσεων στα διάφορα βάθη μιας διατομής οδοστρώματος (Gopalakrishnan and Thompson, 2004).

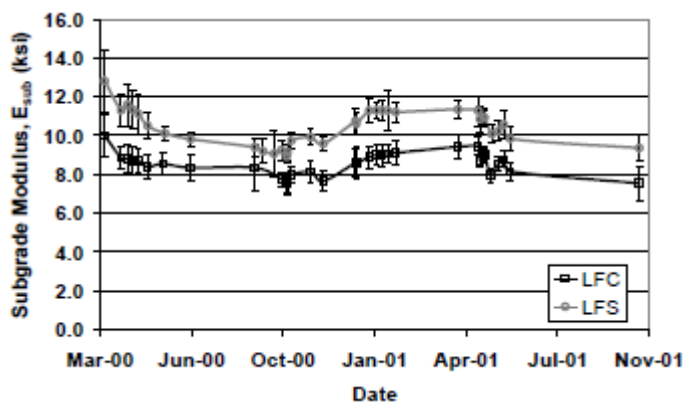
Το ILLI-PAVE αποτελεί άλλο ένα λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε ευρέως για την αξιολόγηση των δαπέδων της NAPTf. Αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο του Ιλινόι των ΗΠΑ (Raadand Figueroa, 1980) και πρόκειται επί της ουσίας για πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο προσομοιάζει το οδόστρωμα ως αξονο-συμμετρικό, δύο διαστάσεων (2 Dimensional – 2D). Κάνει χρήση μη γραμμικών μοντέλων, εξαρτώμενων από το μέγεθος των τάσεων που αναπτύσσονται, καθώς επίσης και κριτηρίων αστοχίας τόσο για τα κοκκώδη

υλικά των στρώσεων της βάσης και της υπόβασης, όσο και για τα λεπτόκοκκα των εδαφών. Έτσι, θεωρείται ότι παρέχει ρεαλιστική προσομοίωση του οδοστρώματος και της απόκρισής του στις διάφορες φορτίσεις (NCHRP, 1990). Βέβαια, το πρόγραμμα αυτό είναι σε θέση να χειριστεί μόνο φορτία μονού τροχού, σε αντίθεση με τα προγράμματα ελαστικών στρώσεων (ELPs) που έχουν τη δυνατότητα να χειριστούν φορτία πολλαπλών τροχών (Gopalakrishnan, 2008).

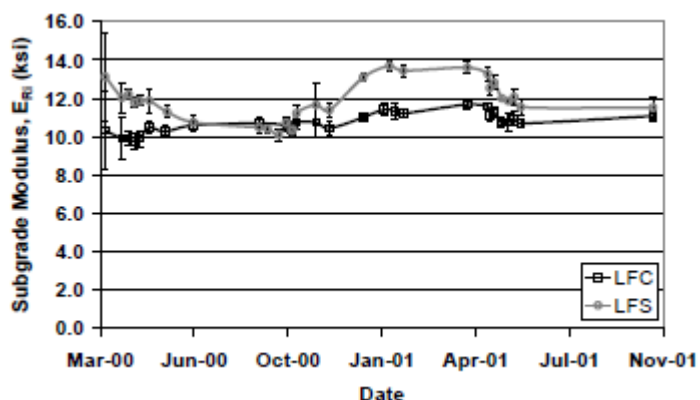
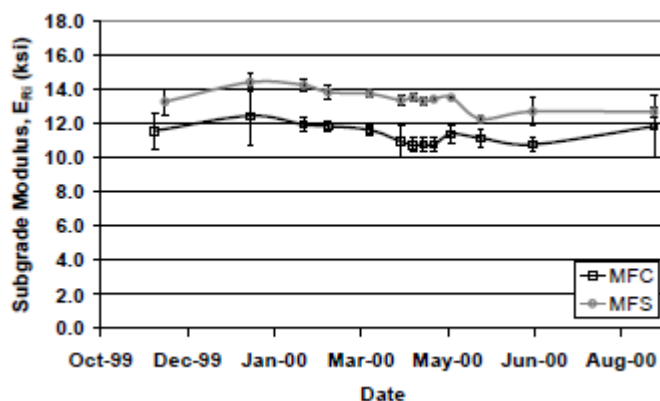
Τα μέτρα δυσκαμψίας που προκύπτουν, αποτελούν ικανοποιητικούς δείκτες σχετικά με τη δομική κατάσταση των στρώσεων των δαπέδων, καθώς επίσης και απαραίτητα στοιχεία εισαγωγής σε διαδικασίες μηχανιστικής ανάλυσης και σχεδιασμού εύκαμπτων καταστρωμάτων (Xu *et al.*, 2001). Επιπλέον, η προσέγγιση μέσω της διαδικασίας του ανάστροφου υπολογισμού, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για το χαρακτηρισμό των εδαφών στη στρώση έδρασης των οδοστρωμάτων. Καθώς, η στρώση αυτή παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση όσον αφορά στο μέτρο ελαστικότητας, συναρτήσει του μήκους του οδοστρώματος. Δηλαδή, δύο διατομές ενός οδοστρώματος απέχουσες λίγα μόνο χιλιόμετρα μεταξύ τους, μπορούν να παρουσιάσουν διαφορά στα μέτρα ελαστικότητας των στρώσεων έδρασής τους, της τάξεως του 35 με 50 % (Thompson *et al.*, 1998). Για τους λόγους αυτούς, κρίνεται χρήσιμη η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της διαδικασίας του ανάστροφου υπολογισμού και για τη στρώση έδρασης στις παρακάτω ερευνητικές εργασίες.

Με τη διακύμανση του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης, ασχολήθηκαν οι Gopalakrishnan & Thompson (2004). Οι δύο ερευνητές διερεύνησαν τα εύκαμπτα δάπεδα της NARTF, με στρώση έδρασης χαμηλής και μέσης φέρουσας ικανότητας. Για την ακρίβεια, συσχέτισαν τη διακύμανση του μέτρου ελαστικότητας με το χρόνο, καθώς επίσης και με την κυκλοφορία. Τα μέτρα ελαστικότητας υπολογίστηκαν από τα λογισμικά BAKFAA (E_{sub}) και ILLI-PAVE (E_{Ri}). Η διακύμανση που παρατηρήθηκε, διατηρήθηκε σε χαμηλές τιμές, με το συντελεστή διακύμανσης (Coefficient of Variation) να κυμαίνεται από 2 έως 8 %. Στις επόμενες εικόνες, φαίνεται για κάθε διατομή η διακύμανση του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης με το χρόνο. Τα διαγράμματα παρατίθενται ακριβώς όπως υπάρχουν στην προαναφερθείσα μελέτη, για καθένα από τα δύο προγράμματα ανάστροφου υπολογισμού που χρησιμοποιήθηκαν.





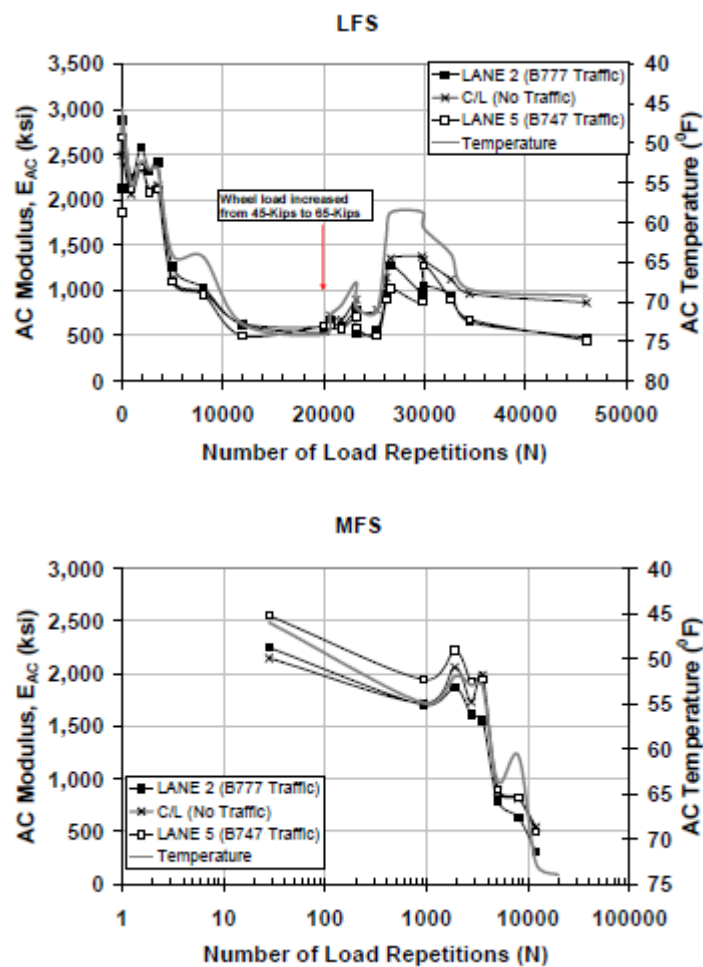
Εικόνα 2.4 Διακύμανση μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης με το χρόνο – Χρήση προγράμματος BAKFAA (E_{sub}) (Gopalakrishnan and Thompson, 2004)



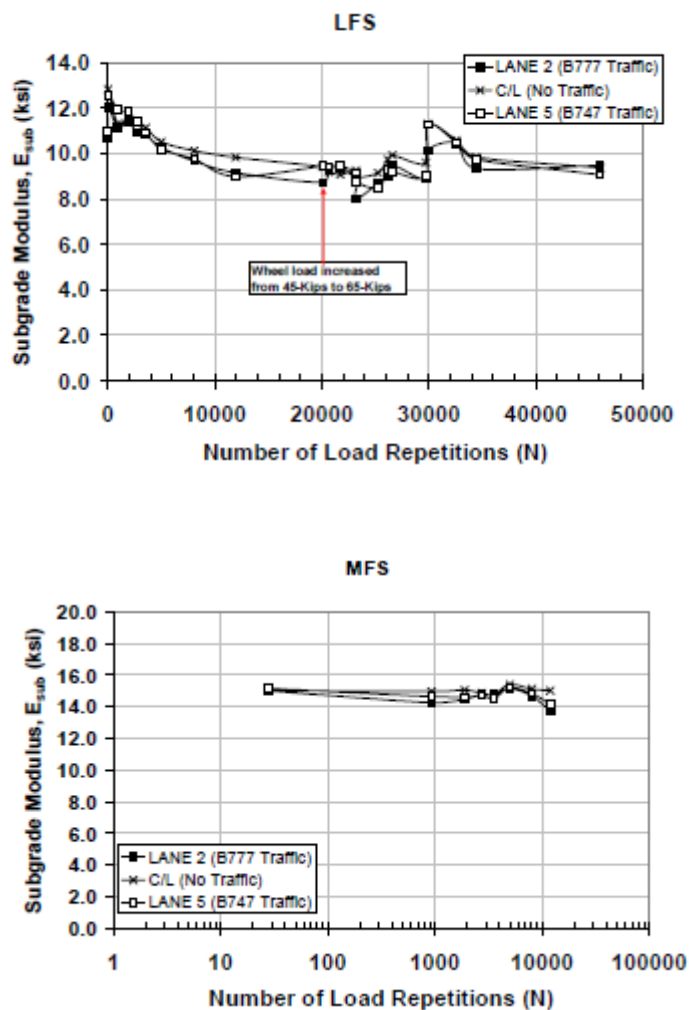
Εικόνα 2.5 Διακύμανση μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης με το χρόνο – Χρήση προγράμματος ILLI-PAVE (E_{Ri}) (Gopalakrishnan and Thompson, 2004)

Προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή της κυκλοφορίας στη δομική κατάσταση των οδοστρωμάτων, οι ίδιοι ερευνητές υπολόγισαν τα μέτρα ελαστικότητας των στρώσεων από ασφαλτικό σκυρόδεμα (E_{AC}) και αυτά των στρώσεων έδρασης (E_{sub}). Για τον υπολογισμό χρησιμοποίησαν αποκλειστικά το πρόγραμμα BAKFAA. Αξιοποίησαν τα δεδομένα των μετρήσεων FWD τόσο στο βόρειο τμήμα των δαπέδων (λωρίδα 2 – B-777), όσο και στο νότιο

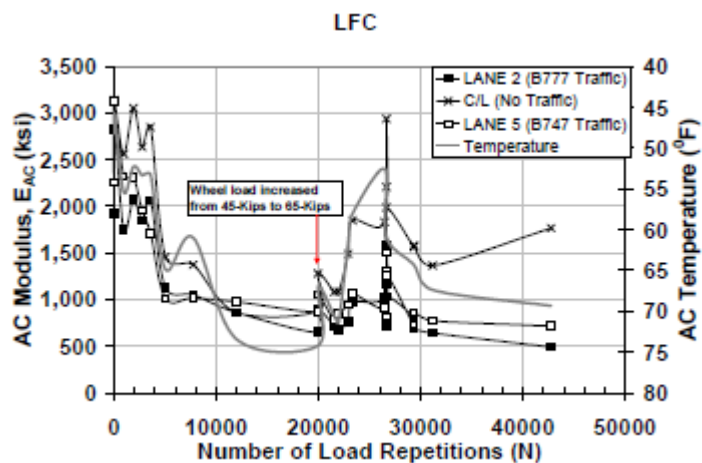
(λωρίδα 5 – B-747). Η αύξηση του αριθμού των φορτίσεων συνοδεύεται και με μεταβολή της θερμοκρασιακής κατάστασης. Για να απομονωθεί ο παράγοντας της κυκλοφορίας, έκαναν χρήση των δεδομένων των μετρήσεων FWD στους άξονες των δαπέδων (Centerline – CL), επί των οποίων δεν ασκήθηκε φόρτιση από το δοκιμαστικό όχημα. Θεώρησαν, λοιπόν, λογικό ότι οι μεταβολές των μέτρων ελαστικότητας στον άξονα είναι αποτέλεσμα κυρίως της θερμοκρασιακής μεταβολής. Κατ’ αυτόν τον τρόπο, η σύγκριση των διακυμάνσεων των τιμών των μέτρων ελαστικότητας στα δύο τμήματα των δαπέδων, με την αντίστοιχη διακύμανση στον άξονα, υπέδειξε αμιγώς την επιρροή της κυκλοφορίας στη μεταβολή των μέτρων ελαστικότητας και κατ’ επέκταση της δομικής κατάστασης των οδοστρωμάτων. Ταυτόχρονα, δόθηκε η δυνατότητα σύγκρισης της φθοράς που προκάλεσαν τα δύο φορεία αεροσκαφών (B-777 στο βόρειο τμήμα και B-747 στο νότιο) στα υπό εξέταση δάπεδα. Στις εικόνες 2.6 και 2.7 παρουσιάζονται τα διαγράμματα με τη μεταβολή των μέτρων ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων και της στρώσης έδρασης αντίστοιχα, σε συνάρτηση με την κυκλοφορία για τα υπό διερεύνηση δάπεδα, όπως ακριβώς υπάρχουν στη μελέτη. Για τις ασφαλτικές στρώσεις λαμβάνεται υπόψη και η θερμοκρασία του ασφαλτικού σκυροδέματος.

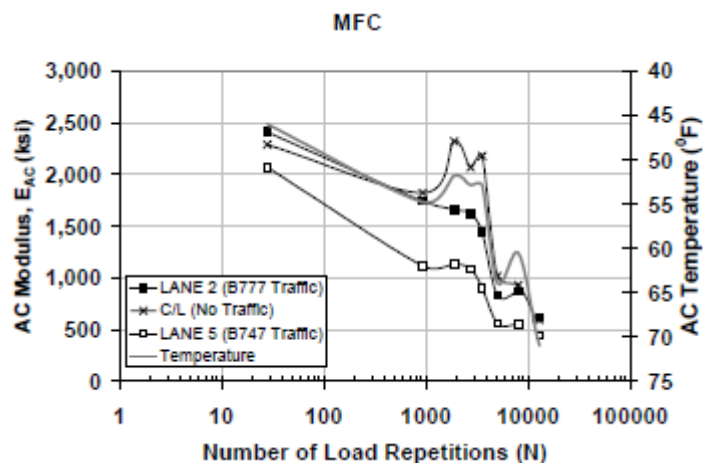


Εικόνα 2.6 Μεταβολή των μέτρων ελαστικότητας των στρώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος (E_{AC}), σε συνάρτηση με τον αριθμό των φορτίσεων και της θερμοκρασίας, για τα δάπεδα LFS και MFS (Gopalakrishnan and Thompson, 2004)

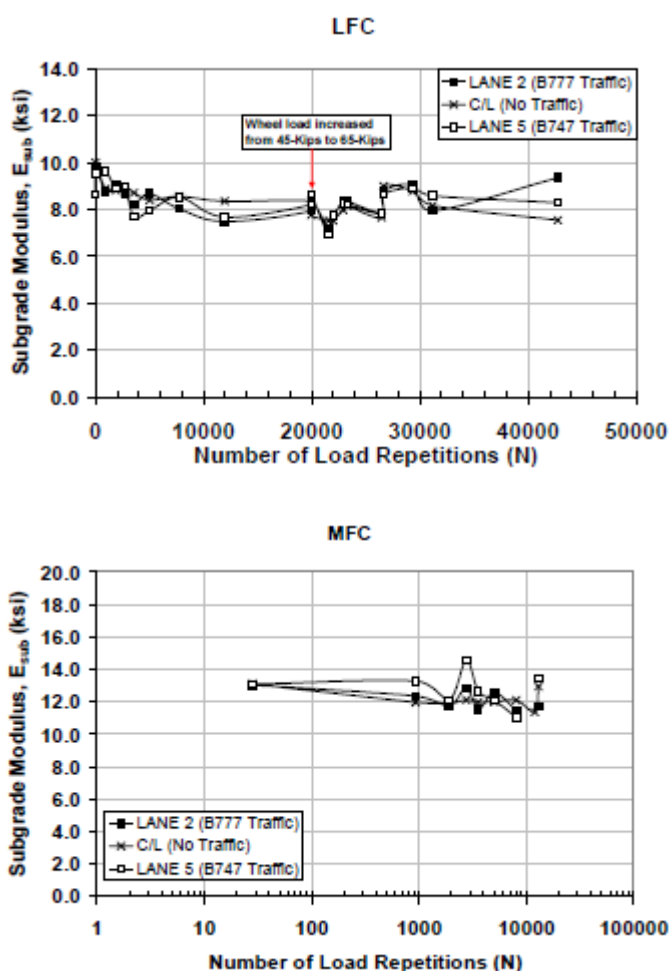


Εικόνα 2.7 Μεταβολή των μέτρων ελαστικότητας των στρώσεων έδρασης (E_{sub}), σε συνάρτηση με τον αριθμό των φορτίσεων, για τα δάπεδα LFS και MFS (Gopalakrishnan and Thompson, 2004)





Εικόνα 2.8 Μεταβολή των μέτρων ελαστικότητας των στρώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος (E_{AC}), σε συνάρτηση με τον αριθμό των φορτίσεων και της θερμοκρασίας, για τα δάπεδα LFC και MFC (Gopalakrishnan and Thompson, 2004)



Εικόνα 2.9 Μεταβολή των μέτρων ελαστικότητας των στρώσεων έδρασης (E_{sub}), σε συνάρτηση με τον αριθμό των φορτίσεων, για τα δάπεδα LFC και MFC (Gopalakrishnan and Thompson, 2004)

Από την ανάλυση των δύο ερευνητών προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα, για τα οποία αξίζει να γίνει εκτενής αναφορά. Για το δάπεδο MFC, οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας της στρώσης του ασφαλτικού σκυροδέματος στο νότιο τμήμα του δαπέδου (B-747) ήταν αρκετά χαμηλότερες από τις αντίστοιχες στο βόρειο (B-777). Το γεγονός αυτό φανερώνει ότι η φθορά που προξένησε το φορείο του αεροσκάφους τύπου B-747 ήταν μεγαλύτερη εν συγκρίσει με εκείνη του B-777. Στο αντίστοιχο διάγραμμα φαίνεται ότι για αριθμό διελεύσεων ίσο με 3.556 περίπου, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας της ασφαλτικής στρώσης στον άξονα είναι ίση με 2.180 ksi, στο βόρειο τμήμα είναι 1.440 ksi (δηλαδή το 66% της τιμής στον άξονα) και στο νότιο 900 ksi (δηλαδή το 41% της τιμής στον άξονα).

Σχετικά με τη διατομή MFS, οι τιμές των υπολογισμένων μέτρων ελαστικότητας των στρώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος (E_{AC}) ήταν στενά συνδεδεμένες με τη θερμοκρασία του οδοστρώματος. Οι τιμές τους στον άξονα ήταν παραπλήσιες με τις αντίστοιχες τιμές στα δύο τμήματα του δαπέδου. Όσον αφορά στις τιμές των μέτρων ελαστικότητας της στρώσης έδρασης, παρέμειναν σταθερά κοντά στην τιμή των 14 ksi καθ' όλη τη διάρκεια των δοκιμών και στα τρία σημεία του δαπέδου (άξονας, βόρειο και νότιο τμήμα). Μία ενδιαφέρουσα παρατήρηση για το δάπεδο αυτό, αποτελεί η μείωση της διαφοράς των τιμών των μέτρων ελαστικότητας μεταξύ του βόρειου και νότιου τμήματος μετά τις 3.000 με 4.000 διελεύσεις. Αίσθηση επίσης προκαλεί η απότομη μείωση του μέτρου ελαστικότητας στο βόρειο τμήμα μετά τις 5.000 διελεύσεις. Πιθανό αίτιο αποτελεί ο εντοπισμός αστοχίας στην υπόβαση του βόρειου τμήματος του δαπέδου, όπως διαπιστώθηκε από τις μελέτες αυλακώσεων μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών (Hayhoe and Garg, 2003).

Στα διαγράμματα των δαπέδων επί στρώσης έδρασης χαμηλής φέρουσας ικανότητας (LFC, LFS), το βέλος στις 20.000 διελεύσεις υποδεικνύει την αύξηση του φορτίου τροχού από τα 200,2 στα 289,1 kN. Παρατηρήθηκε και για αυτά τα δάπεδα εξάρτηση των μέτρων ελαστικότητας των ασφαλτικών στρώσεων με τη θερμοκρασία. Βέβαια, μετά την αύξηση του φορτίου, σημειώθηκε μείωση των τιμών των μέτρων ελαστικότητας στα δύο τμήματα των δαπέδων σε σχέση με αυτά στον άξονά τους. Η μείωση αυτή αποτυπώνεται εντονότερα για το δάπεδο LFC. Συγκεκριμένα, λίγο πριν την αύξηση του φορτίου, στις 19.937 διελεύσεις, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας της ασφαλτικής στρώσης στον άξονα ήταν 1280 ksi, ενώ στο βόρειο τμήμα 650 ksi (το 51 % της τιμής στον άξονα) και στο νότιο 870 ksi (το 68 % της τιμής στον άξονα). Οι αντίστοιχες τιμές μετά την αύξηση του φορτίου, στις 22.000 διελεύσεις, ήταν 1.770 ksi στον άξονα, 490 ksi στο βόρειο τμήμα (το 28 % της τιμής στον άξονα) και τέλος 720 ksi στο νότιο αντίστοιχα (το 41 % της τιμής στον άξονα). Αναφορικά με τις τιμές των μέτρων ελαστικότητας στη στρώση έδρασης των δύο δαπέδων, για το μεν LFC έμεινε σταθερή στα 8 ksi, ενώ για το LFS στα 9 ksi αντίστοιχα, καθ' όλη τη διάρκεια των δοκιμαστικών φορτίσεων.

Η παραπάνω έρευνα συμβάλλει στη συσχέτιση του μέτρου ελαστικότητας με την αστοχία των δαπέδων. Από σχετικές έρευνες που έχουν ήδη αναφερθεί, είναι γνωστός ο αριθμός των διελεύσεων κατά τον οποίο αστόχησαν ορισμένα εκ των εύκαμπτων δαπέδων, καθώς επίσης και ο τρόπος αστοχίας τους. Με δεδομένη, λοιπόν, τη διακύμανση των υπολογισμένων μέτρων ελαστικότητας σε σχέση με την κυκλοφορία, μπορούν να συγκριθούν οι αρχικές τιμές των μέτρων δυσκαμψίας με αυτές κατά την αστοχία των καταστρωμάτων. Τα αποτελέσματα μπορούν να συγκριθούν με διερευνήσεις συναφούς περιεχομένου.

Τέτοια έρευνα είναι αυτή των Ghuzlan & Carpenter (2000). Οι δύο ερευνητές αναφέρουν ότι σε εργαστηριακές δοκιμές κόπωσης δειγμάτων ασφαλτικού σκυροδέματος υπό συνεχή καταπόνηση, η αστοχία ορίστηκε ευρέως ως η μείωση του αρχικού μέτρου δυσκαμψίας, κατά το ήμισυ (50 %). Ομοίως, οι Sharp & Johnson-Clarke (1997) προτείνουν ότι ένα οδόστρωμα μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει αστοχήσει όταν τα μέτρα ελαστικότητας μειωθούν πλέον του 50 % σε σχέση με τα αρχικά.

Τα δεδομένα από τις μετρήσεις FWD στα δάπεδα της NAPTf αξιοποιήθηκαν και από τους McQueen et al. (2001), επιτυγχάνοντας την εξαγωγή μιας σειράς συμπερασμάτων. Για τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού, χρησιμοποίησαν τα προγράμματα BAKFAA και WESDEF. Οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας που εξήχθησαν μέσω των δύο προγραμμάτων έδειξαν να βρίσκονται σε συμφωνία. Επιπλέον, έγινε χρήση του δείκτη ακαμψίας (Impulse Stiffness Modulus – ISM) των οδοστρωμάτων.

Για την ακρίβεια, τόσο ο δείκτης ακαμψίας, όσο και τα υπολογισμένα μέτρα ελαστικότητας της στρώσης έδρασης, απεδείχθησαν ανεξάρτητα του μεγέθους του φορτίου πρόσπτωσης της συσκευής FWD. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι οι μη καταστρεπτικές συσκευές με φορτίο πρόσπτωσης μεγάλου μεγέθους (Heavy Weight Deflectometer), δε δίνουν κατ' ανάγκη πιο αξιόπιστα αποτελέσματα από τις συσκευές με χαμηλό μέγεθος φορτίου.

Εν συνεχεία προχώρησαν στη σύγκριση των τιμών των δεικτών ακαμψίας (ISM) μεταξύ των εύκαμπτων δαπέδων επί στρώσεως έδρασης ίδιας φέρουσας ικανότητας. Η σύγκριση έδειξε ότι οι τιμές των δαπέδων με ασφαλτική στρώση βάσης ήταν μεγαλύτερες από αυτές των δαπέδων με στρώση βάση από ασύνδετα υλικά.

Το τελικό συμπέρασμα της μελέτης αφορά στη δυνατότητα εφαρμογής της σχέσης των Huekelom & Klomp (1962) στα δάπεδα της NAPTf. Η σχέση αυτή συνδέει το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης με τον καλιφορνικό δείκτη (CBR) και εκφράζεται ως $E(\psi) = 1500 \times \text{CBR}$. Συγκεκριμένα, η επεξεργασία των δεδομένων από τις μη καταστρεπτικές δοκιμές, καθώς επίσης και τα δεδομένα των καλιφορνικών δεικτών, οδήγησαν τους ερευνητές στο συμπέρασμα ότι η σχέση μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία για τη στρώση έδρασης και για τιμές CBR στο διάστημα $3 < \text{CBR} < 20$. Μάλιστα, η σχέση αυτή στο διάστημα που προαναφέρθηκε έχει αμφίδρομη χρήση, καθότι μέσω αυτής μπορούν να υπολογιστούν τα μέτρα ελαστικότητας από τις τιμές CBR, αλλά και αντιστρόφως οι in situ τιμές CBR από τα υπολογισμένα μέτρα ελαστικότητας.

Μία άλλη “μη παραδοσιακή” μέθοδος προσέγγισης του ανάστροφου υπολογισμού των μέτρων ελαστικότητας, βασισμένη στις μετρήσεις των μη καταστρεπτικών δοκιμών, είναι μέσω της ανάπτυξης Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (Artificial Neural Networks – ANNs). Το πλεονέκτημα της μεθόδου έγκειται στο γεγονός ότι είναι σε θέση να ενσωματώσει πολύ πιο ρεαλιστικά μοντέλα απόκρισης δαπέδων σε σχέση με τα παραδοσιακά λογισμικά (όπως π.χ. το ILLI-PAVE).

Ο Ceylan (2002) απέδειξε ότι η χρήση αυτής της μεθόδου για την ανάλυση εύκαμπτων οδοστρωμάτων είναι επιτυχής. Επιπλέον και άλλες έρευνες (Ceylan et al., 2005) επαληθεύουν ότι η χρήση των μοντέλων αυτών για την πρόβλεψη της απόκρισης των δαπέδων στις κρίσιμες θέσεις, αλλά και των μέτρων ελαστικότητας των επιμέρους στρώσεων, είναι ικανοποιητική.

Στο ίδιο πλαίσιο ερευνών για τα δάπεδα της NARTF, οι Gopalakrishnan & Thompson (2004) αναφέρουν ότι η διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού βασισμένη σε νευρωνικά δίκτυα, εκτίμησε επιτυχώς τα μέτρα ελαστικότητας τόσο των στρώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος, όσο και της στρώσης έδρασης. Παρ' όλα αυτά, τα μέτρα ακαμψίας των στρώσεων της βάσης και της υπόβασης από ασύνδετα υλικά δεν υπολογίστηκαν με ικανοποιητική ακρίβεια. Πρόσθετες έρευνες που αφορούν στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι αυτές των Gopalakrishnan (2005), Gopalakrishnan et al. (2007), καθώς και Gopalakrishnan (2008), οι οποίες επιβεβαίωσαν τα παραπάνω συμπεράσματα.

2.4 Προσομοίωση εύκαμπτων δαπέδων αεροδρομίων

Η κατασκευή προτύπων προσομοίωσης τριών διαστάσεων (three dimensional – 3D), μέσω της θεωρίας των πεπερασμένων στοιχείων, αποτελεί μία ολοένα και ακριβέστερη μέθοδο προσέγγισης της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων. Στα πλαίσια αυτού του πεδίου διερεύνησης έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες και έχει προκύψει η ανάγκη για περαιτέρω έρευνα.

Ο Sukumaran et al. (2004) προχώρησαν στην κατάστρωση δύο 3D προτύπων προσομοίωσης, με βάση τα δομικά χαρακτηριστικά του εύκαμπτου δαπέδου της NARTF συμβατικής βάσεως από ασύνδετο υλικό και στρώσης έδρασης μέσης φέρουσας ικανότητας (MFC). Η προτυποποίηση επετεύχθη χρησιμοποιώντας το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Η μόνη διαφορά στα δύο πρότυπα προσομοίωσης αφορούσε στη γεωμετρία των δύο προτύπων. Συγκεκριμένα, το δεύτερο πρότυπο προσομοίωσης κατασκευάστηκε με μικρότερες διαστάσεις ως προς το πλάτος και το μήκος και επιπλέον τα φορτία των τροχών τοποθετήθηκαν με απόλυτη συμμετρία. Επίσης, δεν περιελάμβανε πεπερασμένα στοιχεία απείρων διαστάσεων (infinite elements), όπως το πρώτο μοντέλο προσομοίωσης. Τα υλικά και στα δύο πρότυπα θεωρήθηκαν ίδια. Για την ακρίβεια, το ασφαλτικό σκυρόδεμα θεωρήθηκε ως γραμμικό ελαστικό, ενώ τα κοκκώδη υλικά των στρώσεων της βάσης και της υπόβασης ικανοποιούσαν το κριτήριο Mohr – Coulomb. Επιπλέον, για το υλικό της στρώσης έδρασης χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Von-Mises. Οι αποκρίσεις των δύο προτύπων από τη στατική φόρτιση που τους επιβλήθηκε, συγκρίθηκαν με τις καταγραφές των αισθητήρων της πειραματικής εγκατάστασης. Από τα αποτελέσματα της σύγκρισης, φάνηκε ότι το μοντέλο με τις μειωμένες διαστάσεις και τη συμμετρική φόρτιση είναι ικανό να εκτιμήσει εξίσου καλά την απόκριση του δαπέδου σε σχέση με το πρώτο πρότυπο προσομοίωσης μεγαλύτερων διαστάσεων.

Ανάλογες διερευνήσεις διενεργήθηκαν από τους Kim (2007), καθώς επίσης και Kim et al. (2008). Χρησιμοποίησαν τα δεδομένα από τις πειραματικές μετρήσεις των εύκαμπτων δαπέδων της NARTF, προκειμένου να κατασκευάσουν τρισδιάστατα πρότυπα προσομοίωσης και να ελέγξουν τις διαφορές μεταξύ των εκτιμημένων και μετρημένων τιμών. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις και στις δύο μελέτες ήταν το ABAQUS. Τα δάπεδα που προσομοιάστηκαν ήταν τα εύκαμπτα δάπεδα συμβατικής βάσης, με στρώσεις έδρασης χαμηλής και μέσης φέρουσας ικανότητας (LFC και MFC αντίστοιχα). Όσον αφορά στα υλικά, το ασφαλτικό σκυρόδεμα θεωρήθηκε γραμμικά ελαστικό, ενώ τα υλικά των υπόλοιπων στρώσεων μη γραμμικά ελαστικά. Επιπλέον, τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν παραβολικά εξαεδρικά, είκοσι κόμβων.

Αν και δεν εξετάστηκαν οι ανηγμένες οριζόντιες παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλικών των προτύπων προσομοίωσης, εντούτοις προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν οι αναπτυσσόμενες τάσεις και οι κατακόρυφες παραμορφώσεις στη στρώση έδρασης και στην ασφαλική στρώση. Η σύγκριση των μετρημένων από τους αισθητήρες της εγκατάστασης τιμών, με αυτές που προέκυψαν από τα πρότυπα προσομοίωσης, έδειξε ότι σε γενικές γραμμές συμφωνούν ικανοποιητικά. Τα αποτελέσματα είχαν τις μικρότερες αποκλίσεις για το δάπεδο MFC σε σχέση με αυτές του LFC. Επιπλέον, παρατηρήθηκε η τάση τα μετρημένα μεγέθη να παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές από τα εκτιμημένα. Το γεγονός αυτό αποδόθηκε στο γεγονός ότι η φόρτιση των δαπέδων αποτελεί ένα δυναμικό φαινόμενο, εν αντιθέσει με τη θεώρηση του προγράμματος, το οποίο θεωρεί τα φορτία ως στατικά. Δεύτερο αίτιο θεωρήθηκε το γεγονός ότι το πρόγραμμα δίνει τις ίδιες τιμές μεγεθών για τον πρώτο και τον τελευταίο άξονα των φορείων, καθώς τα φορτία έχουν τοποθετηθεί σε απόλυτη συμμετρία. Παρ' όλα αυτά, οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η μέθοδος προσομοίωσης με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων, μπορεί να εφαρμοστεί στο σχεδιασμό των δαπέδων, κάτω από τη φόρτιση διατάξεων πολλαπλών τροχών. Τόνισαν, βέβαια, ότι μεγαλύτερη ακρίβεια παρέχεται για τις κρίσιμες θέσεις των διατομών και υπό τη θεώρηση των ασύνδετων υλικών ως μη γραμμικά ελαστικά.

Κάνοντας χρήση του ίδιου προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, ο Mojarrad (2011) διερεύνησε την επιρροή των διαφορετικών διατάξεων και αποτυπώσεων των τροχών στην απόκριση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων αεροδρομίων. Η προσομοίωση έγινε για τα ίδια εύκαμπτα δάπεδα της NARTF με αυτά των ερευνών που προαναφέρθηκαν (LFC, MFC) και ακολουθώντας την ίδια διαδικασία κατάστρωσης των προτύπων. Δηλαδή, το ασφαλικό σκυρόδεμα θεωρήθηκε ότι έχει γραμμική ελαστική συμπεριφορά, ενώ τα υλικά των υπόλοιπων στρώσεων μη γραμμική ελαστική. Η αξιολόγηση έγινε με βάση τις μετρήσεις των τάσεων και των κατακόρυφων παραμορφώσεων στην επιφάνεια των στρώσεων έδρασης και στον πυθμένα των ασφαλικών των δύο δαπέδων, όπως καταγράφηκαν από τους εγκιβωτισμένους αισθητήρες. Η σύγκριση και σε αυτήν τη μελέτη φανέρωσε ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ των πειραματικά μετρημένων και των αναλυτικά υπολογισμένων από τα πρότυπα τιμών.

Ο Rahman et al. (2011) διερεύνησαν την επιρροή του αποτυπώματος του τροχού, καθώς επίσης και της πίεσης του ελαστικού στην απόκριση των δαπέδων και συγκεκριμένα σε σχέση με τις τάσεις και τις ανηγμένες κατακόρυφες παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλικών. Προχώρησαν στην προσομοίωση ενός δαπέδου μέσω του ABAQUS, θεωρώντας όλα τα υλικά ως γραμμικά ελαστικά και χρησιμοποιώντας γραμμικά κυβικά πεπερασμένα στοιχεία οχτώ κόμβων (8 – node linear brick element). Έτσι, σχετικά με την επιφάνεια επαφής τροχού – καταστρώματος, χρησιμοποιήθηκαν διάφορα σχήματα, όπως τετραγωνικό, ελλειψοειδές, κυκλικό και φυσικά το πραγματικό σχήμα αποτύπωσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τη μεγαλύτερη απόκλιση την είχε η θεώρηση του τετραγωνικού αποτυπώματος σε σχέση με το πραγματικό. Κατέληξαν ότι αν επιθυμείται η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια, θα πρέπει να λαμβάνεται το πραγματικό σχήμα αποτύπωσης και όχι τα υπόλοιπα. Επίσης, θα πρέπει να χρησιμοποιείται ο μέγιστος δυνατός αριθμός πεπερασμένων στοιχείων, καθώς παρατηρήθηκε ότι όσο αυτός αυξάνει, τόσο αυξάνει και η ακρίβεια των εκτιμήσεων. Αναφορικά με την πίεση των ελαστικών, έγινε η θεώρηση τόσο ως ομοιόμορφα, όσο και ως μη ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου. Η διαφορά των τάσεων από τις δύο θεωρήσεις ήταν της τάξεως του 30 %, με τις τάσεις από το ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο να είναι μικρότερες. Αντίθετα, οι παραμορφώσεις παρουσίασαν τις

ίδιες τιμές και για τα δύο είδη του φορτίου, ή με άλλα λόγια οι παραμορφώσεις δεν επηρεάστηκαν από το πώς κατανέμεται (ομοιόμορφα ή μη) το φορτίο.

Τέλος, σε όλες τις έρευνες που πραγματοποιούνται, παρατηρείται η προσπάθεια της προσομοίωσης των μη συνεκτικών υλικών των στρώσεων της βάσης, της υπόβασης και της στρώσης έδρασης. Χαρακτηριστικά, οι Nazarian & Boddspati (1995) αναφέρουν ότι οι προσεγγίσεις των μη συνεκτικών υλικών με γραμμική ελαστική συμπεριφορά δε θα πρέπει να γίνεται αποδεκτή στην ανάλυση των οδοστρωμάτων. Αντιθέτως, προκρίνουν τη θεώρηση αυτών των υλικών ως μη γραμμικά ελαστικά υλικά, ούτως ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς.

3 ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΑΡΧΕΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ

3.1 Γενικά στοιχεία

Τα οδοστρώματα συνίστανται από μία, ή συνήθως περισσότερες στρώσεις πάνω από το φυσικό έδαφος, με υλικό ανώτερης ποιότητας. Έχουν ως κύριο στόχο να μεταφέρουν στο έδαφος σημαντικά μειωμένες τις τάσεις που προκαλούν τα οχήματα, ενώ παράλληλα να το προστατεύουν από τις καιρικές επιδράσεις (βροχή, παγετός, κ.ά.). Εντοπίζονται σε πληθώρα κατασκευαστικών έργων, συγκοινωνιακής υποδομής, όπως είναι οι δρόμοι, τα αεροδρόμια, τα λιμάνια, οι γέφυρες, κ.ά.

Τα οδοστρώματα αεροδρομίων αποτελούν μία από τις κατηγορίες των οδοστρωμάτων. Παρουσιάζουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά με τα οδοστρώματα των οδών, όσον αφορά στα υλικά των επιμέρους στρώσεών τους, στη δομή τους, στον τρόπο κατασκευής τους, στην επίδραση των κλιματολογικών συνθηκών σε αυτά, κ.ά. Εντούτοις, διαφοροποιούνται σε ορισμένες βασικές παραμέτρους σχεδιασμού και λειτουργίας. Για το λόγο αυτό, εξετάζονται χωριστά.

Οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των οδοστρωμάτων αεροδρομίων και αυτών των οδών, αφορούν κυρίως σε θέματα φόρτισης και καταπόνησης. Για παράδειγμα ο αριθμός των οχημάτων που κυκλοφορούν σε μία οδό, είναι κατά κανόνα πολύ μεγαλύτερος από τον αριθμό των αεροσκαφών που εξυπηρετεί ένα αεροδρόμιο. Ωστόσο, τα φορτία των αεροσκαφών, υπερβαίνουν κατά πολύ σε μέγεθος τα αντίστοιχα των οχημάτων. Επιπλέον, στα καταστρώματα των αεροδρομίων υπάρχει μεγάλη διακύμανση, τόσο ως προς το μέγεθος, όσο και ως προς τον τρόπο επιβολής των φορτίων, καθώς υπάρχει ποικιλία στους τύπους αεροσκαφών. Μία ακόμη σημαντική διαφορά είναι ο τρόπος φόρτισης των οδοστρωμάτων αεροδρομίων, ειδικά κατά την προσγείωση των αεροσκαφών.

Άλλες διαφοροποιήσεις αφορούν στη συχνότητα φόρτισης, στις ταχύτητες των αεροσκαφών, στην πίεση των ελαστικών, στην πολυπλοκότητα της διάταξης των τροχών των αεροσκαφών και στην κατανομή βάρους που παρουσιάζουν. Βασική, επίσης, διαφορά αποτελεί η διακύμανση της κυκλοφορίας κατά την εγκάρσια διεύθυνση του καταστρώματος (Λοϊζος, 2011). Διότι, η κυκλοφορία στα αεροδρόμια είναι τέτοια, ώστε η κατανομή συγκεντρώνεται κυρίως στο κέντρο, ενώ στις οδούς, στην άκρη του οδοστρώματος. Συγκεκριμένα, σ' ένα διάδρομο αεροδρομίου, η κυκλοφορία κατανέμεται πάνω σε 18,3 m οδοστρώματος, ενώ στις οδούς, σε μία λωρίδα 0,9 έως 1,2 m από την άκρη του οδοστρώματος.

Οι παραπάνω διαφοροποιήσεις, συντελούν στην απαίτηση διαφορετικών παχών μεταξύ των δύο τύπων οδοστρωμάτων. Αξίζει να σημειωθεί, ότι για ένα ορισμένο φορτίο τροχού και μία ορισμένη πίεση ελαστικού, τα οδοστρώματα οδών είναι παχύτερα από αυτά των αεροδρομίων, γιατί η επανάληψη της φόρτισης είναι πολύ μεγαλύτερη σε μία οδό και ακόμη επειδή τα φορτία ασκούνται κοντύτερα προς το άκρο του οδοστρώματος (Yoder/Witczak, 1975). Όμως, στην πράξη τα φορτία των αεροσκαφών είναι πολύ μεγαλύτερα από εκείνα των οχημάτων, οπότε απαιτούνται μεγαλύτερα πάχη, άρα και υψηλότερο κόστος κατασκευής.

3.2 Τύποι οδοστρωμάτων αεροδρομίων

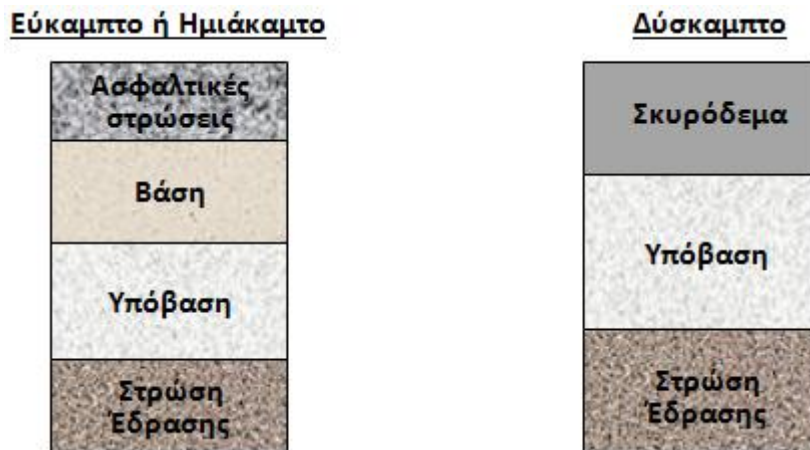
Ένα αεροδρόμιο καλείται να καλύψει πολλές λειτουργίες, όσον αφορά στην κυκλοφορία των αεροσκαφών. Για παράδειγμα, η λειτουργία του διαδρόμου προσγείωσης-απογείωσης είναι διαφορετική από τη λειτουργία του τροχόδρομου. Κατ' αυτόν τον τρόπο, σε ένα αεροδρόμιο διακρίνονται καταστρώματα που αφορούν στους διαδρόμους, στους τροχόδρομους, στους συνδετήριους διαδρόμους, στα δάπεδα στάθμευσης, στα δάπεδα αναμονής, στα δάπεδα συντήρησης, στα βοηθητικά δάπεδα και σε ειδικά δάπεδα. Ανάλογα με τις λειτουργίες αυτές, εντοπίζονται διάφορες κατηγορίες οδοστρωμάτων.

Κάθε μία λειτουργία, προκειμένου να πραγματοποιείται με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα, απαιτεί από τα καταστρώματα συγκεκριμένα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά. Γι αυτό, χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι οδοστρωμάτων. Για παράδειγμα, στα δάπεδα εκείνα που τα αεροσκάφη παρουσιάζουν στατικότητα ή πολύ χαμηλή ταχύτητα κίνησης, γίνεται χρήση δύσκαμπτων καταστρωμάτων. Τέτοια δάπεδα, είναι τα δάπεδα αναμονής, στάθμευσης και συντήρησης. Η κατασκευή δύσκαμπτων οδοστρωμάτων σε αυτά τα δάπεδα επιλέγεται, καθότι η συμπεριφορά τους έναντι των στατικών φορτίων και της χημικής διάβρωσης είναι καλύτερη από αυτή των εύκαμπτων, που παρουσιάζουν ιξωδοελαστική συμπεριφορά. Αντίθετα, σε διαδρόμους, τροχόδρομους και συνδετήριους διαδρόμους, επιλέγεται η κατασκευή εύκαμπτων ή ημιάκαμπτων (ασφαλτικά οδοστρώματα) οδοστρωμάτων. Αιτία αποτελεί το γεγονός ότι παρέχουν συγκριτικά καλύτερη ποιότητα κύλισης, απόσβεση κραδασμών, περισσότερη αντισιδηρή επιφάνεια και ευελιξία σε θέματα συντήρησης και αποκατάστασης βλαβών.

Τα οδοστρώματα που χρησιμοποιούνται στα αεροδρόμια, παρουσιάζουν την ίδια δομή με εκείνα των οδών και διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

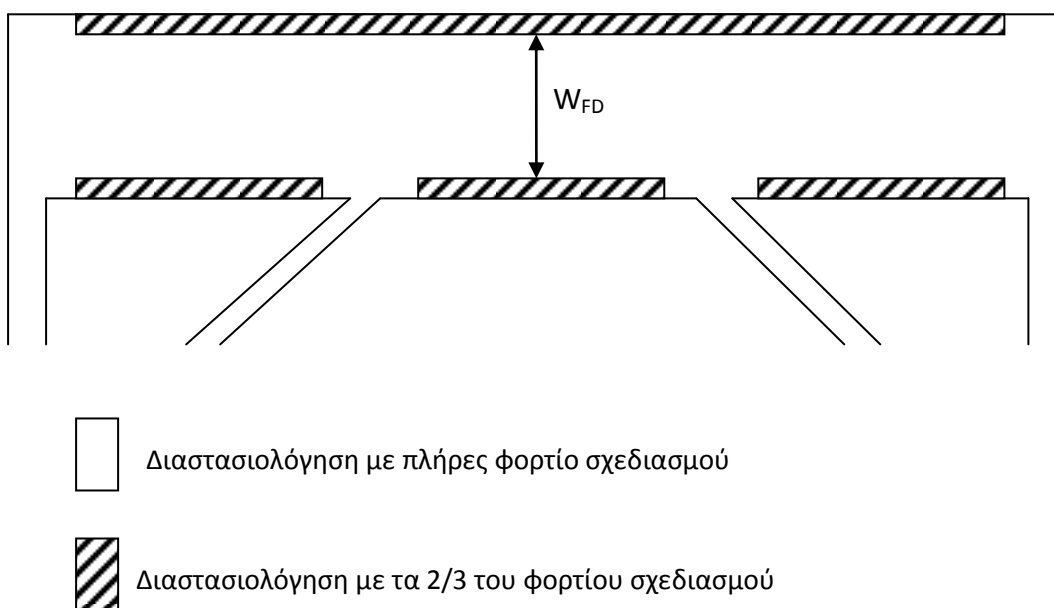
- Εύκαμπτα, τα οποία αποτελούνται από στρώσεις ασφαλτομίγματος, βάση και υπόβαση από ασύνδετο αμμοχάλικο.
- Ημιάκαμπτα, που αποτελούνται από στρώσεις ασφαλτομίγματος, βάση από κατεργασμένο υλικό με υδραυλικές κονίες και στραγγιστική στρώση από ασύνδετο αμμοχάλικο.
- Δύσκαμπτα, αποτελούμενα από πλάκα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

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τρεις διατομές των οδοστρωμάτων.



Εικόνα 3.1 Διατομές οδοστρωμάτων αεροδρομίων

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το πάχος των οδοστρωμάτων αεροδρομίων είναι μεγαλύτερο από το πάχος των οδοστρωμάτων οδών. Ωστόσο, για λόγους οικονομίας, δε διατηρείται σταθερό καθ' όλο το πλάτος του καταστρώματος. Οι τύποι των αεροσκαφών που πρόκειται να εξυπηρετηθούν από το εκάστοτε αεροδρόμιο, καθορίζουν τις κρίσιμες περιοχές. Για την ακρίβεια, η διάταξη των τροχών τους, παίζει καθοριστικό ρόλο στον προσδιορισμό του πλάτους κατά το οποίο το οδόστρωμα θα έχει το μέγιστο πάχος, δεδομένου ότι οι συνθήκες κυκλοφορίας στα αεροδρόμια είναι εγκιβωτισμένες και οι κινήσεις τους κατανέμονται σε μία ζώνη πλησίον του άξονα. Το πλάτος αυτό, είναι το πλάτος της κρίσιμης ζώνης (W_{FD}) και διαστασιολογείται με το πλήρες φορτίο σχεδιασμού. Παρακάτω παρουσιάζεται η κάτοψη με το πλάτος της κρίσιμης ζώνης (το σχέδιο δεν είναι υπό κλίμακα).



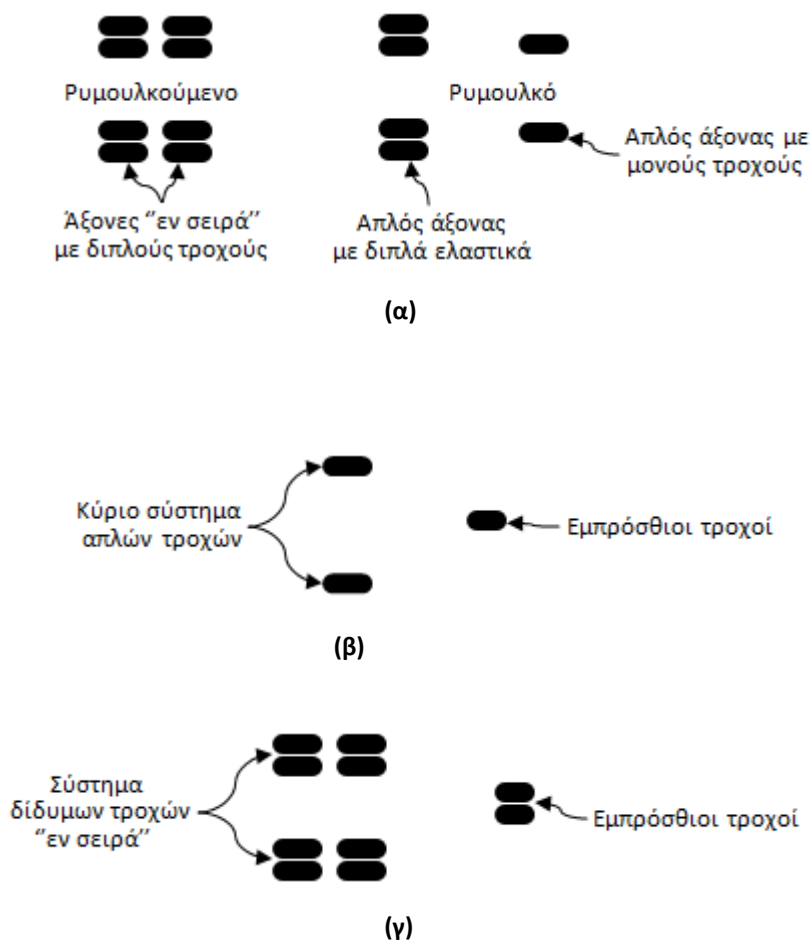
Εικόνα 3.2 Πλάτος κρίσιμης ζώνης για οδόστρωμα τυπικού διαδρόμου

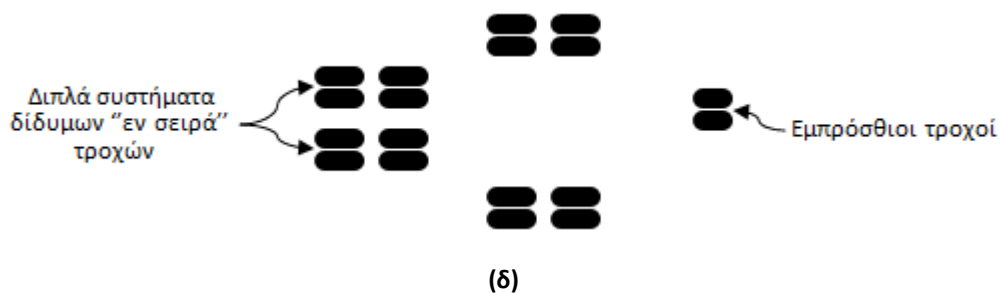
3.3 Φορτία αεροσκαφών και φόρτιση οδοστρωμάτων

Η διαφορά στην τάξη μεγέθους των φορτίων τροχού μεταξύ των αεροσκαφών και των οχημάτων στις οδούς είναι μεγάλη. Πιο συγκεκριμένα, το φορτίο σχεδιασμού μιας κύριας οδού είναι περίπου 4.082 kg (9.000 lbs) για δίδυμους τροχούς και ο αναμενόμενος αριθμός επαναλήψεων ενδέχεται να είναι 1.000 έως 2.000 φορτηγά ανά ημέρα. Αντίθετα, ένα βαρύ αεροπλάνο ενδέχεται να έχει φορτία τροχού μεγαλύτερα από 45.359 kg (100.000 lbs), αλλά μόνο 20.000 έως 40.000 ισοδύναμες διελεύσεις καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος (Yoder/Witczak, 1975).

Τα φορτία των αεροσκαφών αποτελούν τον κύριο παράγοντα καταπόνησης για τα οδοστρώματα των αεροδρομίων. Στη γενική περίπτωση, τ' αεροσκάφη αποτελούνται από ένα ριναίο φορείο και δύο ή τέσσερα φορεία τροχών. Εν γένει, το βάρος του αεροσκάφους μεταβιβάζεται στο οδόστρωμα μέσω των πίσω φορειών, τα οποία φέρουν το 90-95 % του συνολικού φορτίου του αεροσκάφους, ενώ το ριναίο μόλις το 5-10 %. Βέβαια, σε πολλά αεροσκάφη ευρείας ατράκτου, τα οποία είναι από τα μεγαλύτερα και βαρύτερα (A380, B7-47, κ.ά.), ισοκατανέμεται το βάρος τους σε όλα τα φορεία.

Εξαιτίας των πολλών τύπων αεροσκαφών, παρουσιάζεται ποικιλία όσον αφορά στα φορεία. Τα φορεία διαφοροποιούνται σχετικά με τον αριθμό των τροχών που φέρουν και τον αριθμό των αξόνων. Επίσης, οι αποστάσεις μεταξύ των τροχών, η πίεση των ελαστικών και προφανώς το φορτίο τροχού διαφοροποιούνται ανάλογα με τον τύπο του αεροσκάφους. Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζονται οι κατόψεις ενδεικτικών τύπων διάταξης τροχών (σχεδιασμένες χωρίς κλίμακα).





Εικόνα 3.3 Κάτοψη βασικών τύπων διάταξης τροχών. (α) Απλή μονάδα ρυμουλκού-ρυμουλκούμενου, (β) Τρίκυκλο σύστημα προσγείωσης, με απλούς τροχούς, (γ) Δίδυμο “εν σειρά” σύστημα προσγείωσης, (δ) Διπλό δίδυμο “εν σειρά” σύστημα (Yoder/Witczak, 1975)

Όπως και για τα οδοστρώματα οδών, έτσι και στα οδοστρώματα αεροδρομίων, είναι απαραίτητη η εύρεση της μορφής του φορτίου που εφαρμόζεται στην επιφάνεια του καταστρώματος. Για το σκοπό αυτό, λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως το μέγεθος του φορτίου, η πίεση του ελαστικού του τροχού και η επιφάνεια επαφής μεταξύ τροχού και οδοστρώματος. Η ακριβής απεικόνιση της επιφάνειας επαφής είναι ελλειπτικής μορφής. Όμως, η μορφή αυτή αυξάνει το βαθμό δυσκολίας στον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών. Για το λόγο αυτό, μπορεί να θεωρηθεί στις περισσότερες εφαρμογές οδοστρωμάτων ως κυκλική, με ομοιόμορφη κατανομή της πίεσης, χωρίς αυτό να συνεπάγεται σημαντικά σφάλματα κατά το σχεδιασμό (Λοΐζος, 2011).

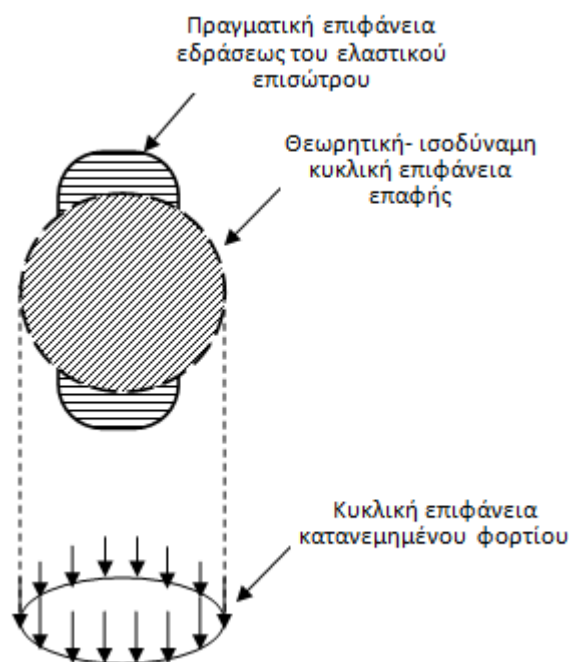
Για ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο σε κυκλική επιφάνεια επαφής τροχού-οδοστρώματος και με την παραδοχή ότι η πίεση επαφής είναι ίση με την εσωτερική πίεση του ελαστικού, υπολογίζεται η ακτίνα της κυκλικής επιφάνειας επαφής:

$$R = \left(\frac{P}{p\pi} \right)^{1/2} \quad (3.1)$$

όπου R: η ακτίνα επαφής της κυκλικής επιφάνειας (mm)

P: το φορτίο του τροχού (N)

p: η εσωτερική πίεση του ελαστικού (Mpa)

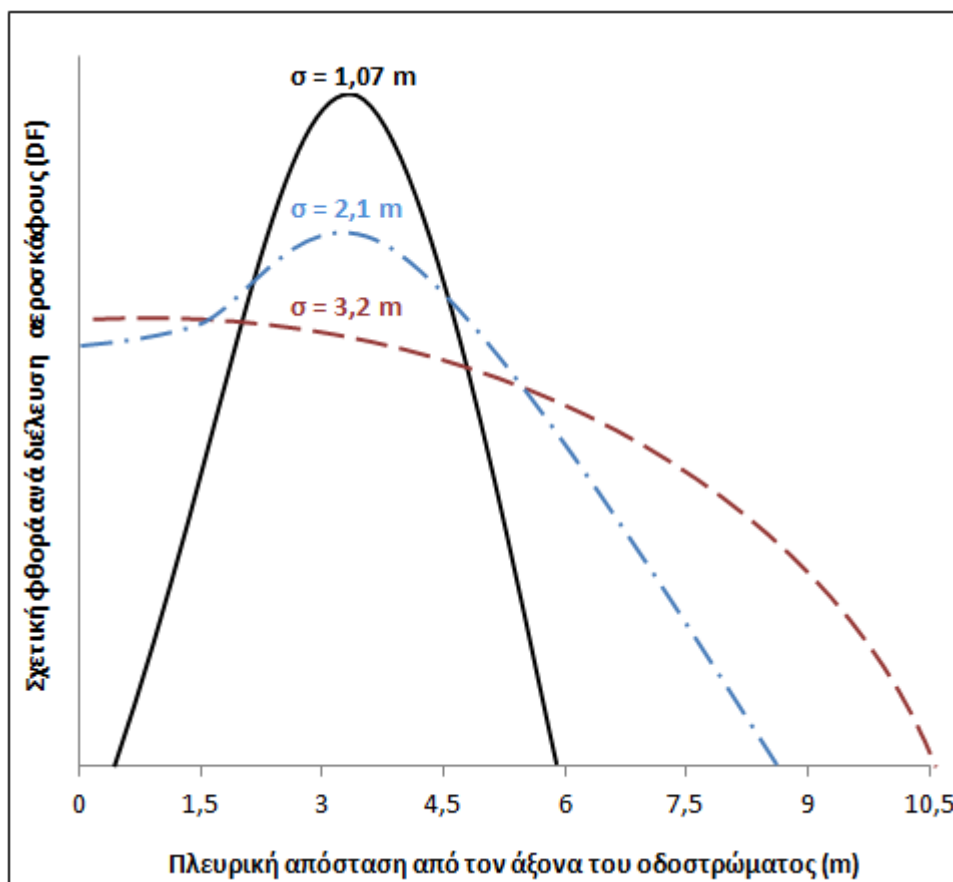


Εικόνα 3.4 Επιφάνεια επαφής τροχού στην επιφάνεια του οδοστρώματος-Κατανομή εξασκούμενης πίεσης

Τα οχήματα που κινούνται κατά μήκος μιας οδού ή ενός αεροδρομίου, δε διατρέχουν το οδόστρωμα στην ίδια εγκάρσια θέση κάθε φορά. Υπόκεινται σε πλευρική μετατόπιση, ο βαθμός της οποίας ποικίλει ανάλογα με τον τύπο του οδοστρώματος. Η τυπική απόκλιση (σ) της εγκάρσιας θέσης των οχημάτων παίρνει τιμές από 0,305 m σε οδούς, ενώ σε διαδρόμους αεροδρομίων φτάνει έως και 6,1 m. Συγκεκριμένα, στους διαδρόμους προσγειώσης-απογείωσης, η τιμή της τυπικής απόκλισης εξαρτάται από τον τύπο του αεροσκάφους και από το αν το αεροσκάφος προσγειώνεται ή απογειώνεται. Σε τροχόδρομους, που η κυκλοφορία είναι εγκιβωτισμένη, καθώς χρησιμοποιούνται χρωματισμένες γραμμές, η τυπική απόκλιση παίρνει τιμές από 0,61 έως 1,07 m. Συνηθισμένες τιμές είναι 1,07 m για τροχόδρομους και 4,9 m για διαδρόμους αντίστοιχα (Yoder/Witczak, 1975).

Ως αποτέλεσμα των προαναφερθέντων και σε συνδυασμό με τις διαφορετικές αποστάσεις φορέων και τροχών στους διάφορους τύπους αεροσκαφών, είναι το γεγονός ότι η μέγιστη φόρτιση δεν ασκείται πάντοτε στο ίδιο σημείο ή περιοχή του οδοστρώματος. Έτσι, το πλάτος στο οποίο παρουσιάζεται η κατανομή της φόρτισης και της φθοράς του δαπέδου, εξαρτάται από τη λειτουργία του δαπέδου, τους τύπους των αεροσκαφών που το χρησιμοποιούν και κατ' επέκταση τη διακύμανση της εγκάρσιας μετατόπισης της κίνησής τους.

Εξετάζοντας την επίδραση της πλευρικής μετατόπισης των αεροσκαφών σε σχέση με τη φθορά που προκαλούν, ενδιαφέρει κυρίως η πιθανή θέση των επαναλήψεων μέγιστης φόρτισης, άρα και μέγιστης ζημιάς, αλλά και ο σχετικός βαθμός ζημιάς ανά διέλευση. Η επόμενη εικόνα φανερώνει την επίδραση της τυπικής απόκλισης των κινήσεων των αεροσκαφών, στη μέγιστη φθορά που προκαλείται στο οδόστρωμα.



Εικόνα 3.5 Επίδραση της τυπικής απόκλισης της πλευρικής μετατόπισης του αεροσκάφους, στη βλάβη του οδοστρώματος (Deacon, 1971)

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για $\sigma = 1,07$ m (χειρισμοί τροχοδρόμων), η μεγαλύτερη φθορά παρατηρείται στο κέντρο των πίσω φορείων και σε κάποια απόσταση από τον άξονα των καταστρωμάτων. Με την αύξηση του σ , η φθορά μετακινείται προς το κέντρο του άξονα των οδοστρωμάτων. Έτσι, μπορεί να συμπεράνει κανείς ότι η θέση της μέγιστης φθοράς στο οδόστρωμα των διαδρόμων προσγείωσης-απογείωσης βρίσκεται πλησίον του άξονα. Διότι, όσο αυξάνεται η τυπική απόκλιση της πλευρικής θέσης, οι επαναλήψεις από τις κύριες ομάδες τροχών στις δύο πλευρές του αεροσκάφους, επικαλύπτονται στον άξονα και προκαλούν συνδυασμένη ζημιά. Όμως, η μεγαλύτερη φθορά προξενείται σε συνθήκες εγκιβωτισμένης κυκλοφορίας, δηλαδή αυτές που επικρατούν σε τροχόδρομους (Yoder/Witczak, 1975).

Εξαιτίας της διακύμανσης που παρουσιάζει η εγκάρσια θέση των φορείων των αεροσκαφών, δεν προκαλείται σε κάθε διεύθυνση η μέγιστη καταπόνηση. Για την εύρεση του αριθμού των διελεύσεων που προκαλούν τη μέγιστη καταπόνηση, έχει υιοθετηθεί διεθνώς από διάφορες μεθοδολογίες, ο ορισμός κάποιας μορφής “ισοδύναμων διελεύσεων” (coverages) των αεροσκαφών. Σύμφωνα με αυτόν τον ορισμό, μία ισοδύναμη διεύθυνση ενός αεροσκάφους προκαλεί τη μέγιστη επιπόνηση σε ένα συγκεκριμένο σημείο του οδοστρώματος, η οποία προκύπτει έπειτα από πολλές διελεύσεις (κινήσεις) του συγκεκριμένου αεροσκάφους στο υπόψη οδόστρωμα. Δηλαδή, αν θεωρήσουμε ως N τον αριθμό των απλών διελεύσεων που απαιτούνται για την πραγματοποίηση μίας ισοδύναμης

διέλευσης, τότε για κάθε N επαναλήψεις του αεροσκάφους, επιβάλλεται μία φορά η μέγιστη καταπόνηση στο κρίσιμο σημείο του οδοστρώματος. Εύκολα προκύπτει ότι η σχέση μεταξύ διελεύσεων και ισοδύναμων διελεύσεων δεν είναι σταθερή. Μεταβάλλεται από αεροσκάφος σε αεροσκάφος και συγκεκριμένα εξαρτάται από το φορτίο του αεροσκάφους, την κατανομή του βάρους του, τον τύπο του φορείου, καθώς επίσης και τις αποστάσεις μεταξύ των φορείων του (Λοΐζος, 2011).

3.4 Φθορά οδοστρωμάτων

Η φθορά για ένα οδόστρωμα εκφράζεται συναρτήσει του “δείκτη αθροιστικής φθοράς” (Cumulative Damage Factor- CDF):

$$CDF = \sum \left(\frac{n_i}{N_i} \right) \quad (3.2)$$

όπου n_i : προβλεπόμενος αριθμός διελεύσεων για κάθε τύπο αεροσκάφους (ή άλλου οχήματος)

N_i : επιτρεπόμενος αριθμός επαναλήψεων έως την αστοχία

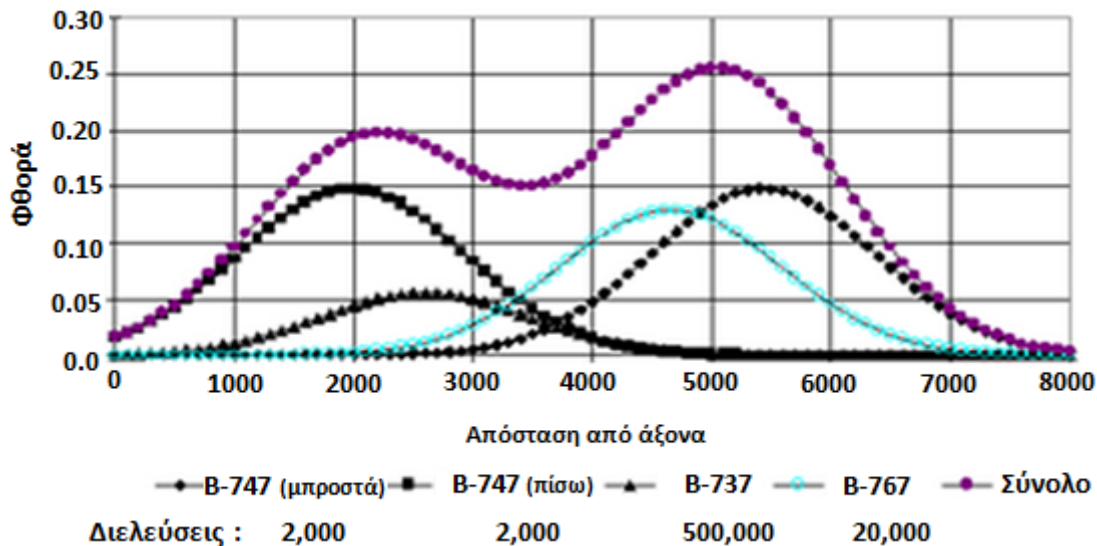
Ο δείκτης αυτός προκύπτει όπως φαίνεται και από την παραπάνω σχέση, από την αθροιστική φθορά όλων των αεροσκαφών που χρησιμοποιούν το υπό μελέτη οδόστρωμα. Η φθορά που προκαλεί κάθε αεροσκάφος εκφράζεται από το “δείκτη φθοράς” (Damage Factor-DF):

$$DF = \left(\frac{n_i}{N_i} \right) \quad (3.3)$$

όπου n_i : προβλεπόμενος αριθμός διελεύσεων για κάθε τύπο αεροσκάφους (ή άλλου οχήματος)

N_i : επιτρεπόμενος αριθμός επαναλήψεων έως την αστοχία

Στην εικόνα 3.6 φαίνεται η φθορά του οδοστρώματος, κατά πλάτος του διαδρόμου, για διάφορους τύπους αεροσκαφών, καθώς και η συνολική φθορά που προκύπτει. Σημειώνεται, ότι η φθορά εξετάζεται στο μισό πλάτους του.



Εικόνα 3.6 Φθορά οδοστρώματος για διάφορους τύπους αεροσκαφών (Leigh and Roadway, 1998)

Αξίζει να γίνει αναφορά στα επιφανειακά χαρακτηριστικά των οδοστρωμάτων αεροδρομίων που παίζουν καθοριστικό ρόλο τόσο στη διαμόρφωση του λειτουργικού επιπέδου των οδοστρωμάτων, όσο και στην ασφάλεια της κυκλοφορίας των αεροσκαφών. Οι απαιτήσεις στα δάπεδα των αεροδρομίων είναι αυστηρότερες, δεδομένου των υψηλών ταχυτήτων που αναπτύσσονται κυρίως στις απογειώσεις και προσγειώσεις των αεροσκαφών, αλλά και λόγω των υψηλών επιπέδων ασφαλείας που επιδιώκονται κατά τη λειτουργία του αεροδρομίου εν γένει.

Τα κύρια χαρακτηριστικά που ελέγχονται, ιδίως στους διαδρόμους, είναι η ολισθηρότητα και η επιπεδότητα-ομαλότητα. Η αντιολισθητική ικανότητα του οδοστρώματος είναι βαρύνουσας σημασίας, αφού παρέχει ασφάλεια κατά την κίνηση των αεροσκαφών και ταυτόχρονα συμβάλλει σημαντικά στην πέδησή τους. Βασική παράμετρος από την οποία εξαρτάται η ολισθηρότητα των διαδρόμων και των τροχοδρόμων είναι το βάθος της επιφανειακής υφής. Το βάθος αυτό, μειώνεται εξαιτίας του ελαστικού που στρώνεται στο διάδρομο, κατά την πέδηση των αεροσκαφών στην προσγείωση.

Μία ακόμα απαίτηση κρίσιμης σημασίας, είναι η ποιότητα κύλισης. Καθότι η μειωμένη ομαλότητα των καταστρωμάτων, συμβάλλει στην αύξηση του μήκους πέδησης των αεροσκαφών και κατ' επέκταση μειώνει την ασφάλεια έναντι ατυχημάτων. Επίσης, έχει δυσμενείς επιπτώσεις στην καταπόνηση των οδοστρωμάτων και συνεπικουρεί στη μείωση της διάρκειας ζωής τους. Τέλος, τίθεται θέμα κόστους, αφού το λειτουργικό κόστος και η φθορά των αεροσκαφών εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα κύλισης (Λοΐζος, 2011).

4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

4.1 Ανάπτυξη παραμορφώσεων σε εύκαμπτα οδοστρώματα

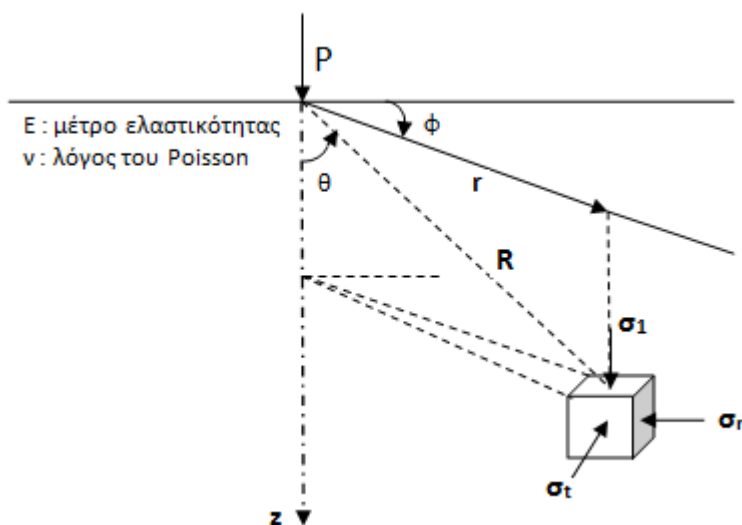
4.1.1 Βασικές θεωρίες υπολογισμού οδοστρωμάτων

Για τον υπολογισμό των τάσεων σε ένα οδόστρωμα, γίνεται χρήση διαφόρων θεωριών, ανάλογα με τον αριθμό των στρώσεων που συνθέτουν το υπό διερεύνηση οδόστρωμα. Στα ασφαλτικά οδοστρώματα (εύκαμπτα και ημιάκαμπτα), ο υπολογισμός επιτυγχάνεται κυρίως με τη θεωρία του ελαστικού, ομογενούς και ισότροπου ημίσφαιρου (Boussinesq), καθώς επίσης και με τη θεωρία των πολλαπλών ελαστικών στρώσεων, εδραζόμενων επί ελαστικού εδαφικού ημίσφαιρου (Burmister) (Λοΐζος, 2011).

4.1.1.1 Ελαστικός ημίσφαιρος – θεωρία Boussinesq

Η θεωρία αυτή αποτελεί τη βάση για την ανάπτυξη όλων των μεταγενέστερων θεωριών κατανομών τάσεων. Σε έναν ομοιογενή ημίσφαιρο μπορούν να ασκηθούν διάφορες χαρακτηριστικές φορτίσεις. Δύο τέτοιες περιπτώσεις αποτελούν η εξάσκηση συγκεντρωμένης ορθής δύναμης P , καθώς επίσης και η ομοιόμορφη ορθή πίεση p σε κυκλική επιφάνεια. Άλλες χαρακτηριστικές φορτίσεις, είναι η ομοιόμορφη ορθή φόρτιση q σε απειρομήκη γραμμή και τέλος η ομοιόμορφη ορθή πίεση σε απειρομήκη λωρίδα. Παρακάτω εξετάζονται οι δύο πρώτες φορτίσεις.

Σύμφωνα με τη θεωρία του Boussinesq, για ελαστικό, ομογενές και ισότροπο υλικό, του οποίου η μάζα εκτείνεται στο άπειρο τόσο κατά την οριζόντια, όσο και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, οι τάσεις που αναπτύσσονται σε οποιοδήποτε σημείο υπό την άσκηση σημειακού φορτίου P , μπορούν να υπολογιστούν από τις εξισώσεις που ακολουθούν (Λοΐζος, 2011). Παρουσιάζεται πρώτα η εικόνα με τις τάσεις που αναπτύσσονται κάτω από την επίδραση σημειακού φορτίου στον ομοιογενή ημίσφαιρο, κατά Boussinesq (το σχήμα έγινε κατά προσέγγιση).



Εικόνα 4.1 Αναπτυσσόμενες τάσεις κατά Boussinesq – Σημειακό φορτίο P

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi R^2} \sigma \nu^3 \theta, \quad \text{για } \theta=0 \quad \sigma_z = \frac{3P}{2\pi z^2}, \quad \text{αφού } (R=z) \quad (4.1)$$

$$\sigma_z = \frac{P}{2\pi R^2} \left[\frac{3\sigma \nu \theta \eta \mu^2 \theta - (1-2\nu)}{1 + \sigma \nu \theta} \right] \quad (4.2)$$

$$\sigma_t = \frac{P}{2\pi R^2} (1-2\nu) \left(\frac{1 - \sigma \nu \theta}{1 + \sigma \nu \theta} \right) \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_z = \frac{(1+\nu)P}{2\pi R^2 E} (3\sigma \nu^3 \theta - 2\nu \sigma \nu \theta), \quad \text{για } \theta=0 \quad \varepsilon_z = (1+\nu)(3-2\nu) \frac{P}{2\pi z^2 E} \quad (4.4)$$

$$w_z = (1+\nu) \frac{P}{2\pi R E} (2(1-\nu) + \sigma \nu^2 \theta) \quad (4.5)$$

Όπου:

σ_z : η κατακόρυφη τάση

ε_z : η κατακόρυφη παραμόρφωση

σ_r : η ακτινική οριζόντια τάση

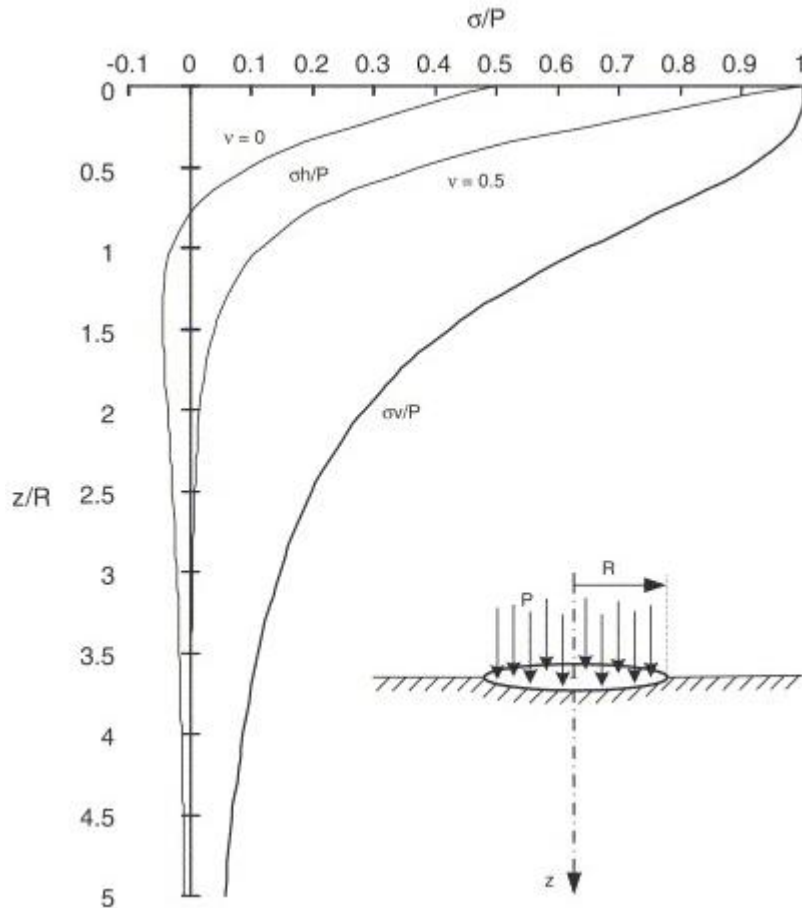
ε_r : η ακτινική οριζόντια παραμόρφωση

σ_t : η εφαπτομενική οριζόντια τάση

ε_t : η εφαπτομενική οριζόντια παραμόρφωση

w_z : η υποχώρηση

Στην περίπτωση που ασκείται ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο, οι αντίστοιχες τάσεις εξαγονται, ολοκληρώνοντας τις παραπάνω σχέσεις. Για την ομοιόμορφη φόρτιση κατανεμημένης σε επιφάνεια κύκλου, οι τάσεις σε οποιοδήποτε βάθος z, δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις. Απαιτείται προσοχή, καθώς οι επόμενες εξισώσεις δίδουν τις τάσεις επί του άξονα συμμετρίας της επιφάνειας φόρτισης, δηλαδή στον κατακόρυφο άξονα που περνάει από το κέντρο του φορτίου (Λοΐζος, 2011). Ακολουθεί η εικόνα 4.2 με τις αναπτυσσόμενες τάσεις, υπό την επιβολή ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου, κυκλικής επιφάνειας, σε ομογενή ημίχωρο.



Εικόνα 4.2 Αναπτυσσόμενες τάσεις κατά Boussinesq – Κυκλικό φορτίο

$$\sigma_z = p \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{a}{z} \right)^2 \right)^{2/3}} \right] \quad (4.6)$$

$$\varepsilon_z = \frac{p(1+\nu)}{E} \left[\frac{z/a}{\left[1 + \left(\frac{z}{a} \right)^2 \right]^{3/2}} - (1-2\nu) \left[\frac{z/a}{\left[1 + \left(\frac{z}{a} \right)^2 \right]^{1/2}} - 1 \right] \right] \quad (4.7)$$

$$\sigma_t = \sigma_r = p \left[\frac{1+2\nu}{2} - \frac{1+\nu}{\left[1+\left(\frac{a}{z}\right)^2\right]^{1/2}} + \frac{1}{2\left[1+\left(\frac{a}{z}\right)^2\right]^{3/2}} \right] \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_r = \frac{1}{E} \left[\frac{1-\nu}{2\nu} (\sigma_z - E\varepsilon_z) - \nu\sigma_z \right] \quad (4.9)$$

$$w_z = \frac{(1+\nu)pa}{E} \left[\frac{1}{\left[1+\left(\frac{z}{a}\right)^2\right]^{1/2}} + (1-2\nu) \left\{ \left(1+\left(\frac{z}{a}\right)^2\right)^{1/2} - \frac{z}{a} \right\} \right] \quad (4.10)$$

Όπου :

σ_z : η κατακόρυφη τάση

ε_z : η κατακόρυφη παραμόρφωση

σ_r : η ακτινική οριζόντια τάση

ε_r : η ακτινική οριζόντια παραμόρφωση

σ_t : η εφαπτομενική οριζόντια τάση

ε_t : η εφαπτομενική οριζόντια παραμόρφωση

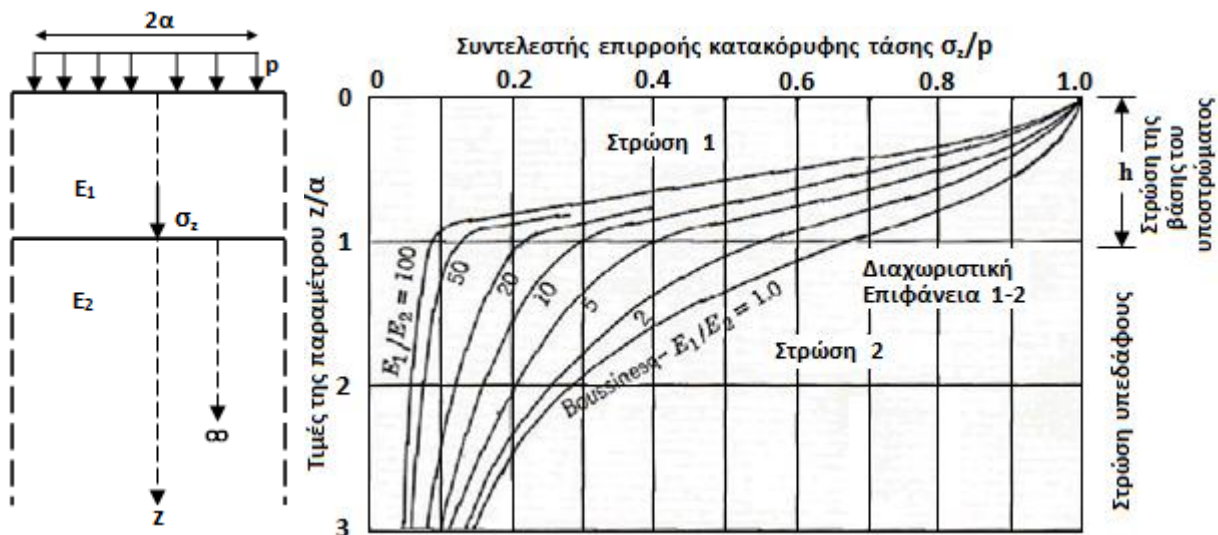
w_z : η υποχώρηση

4.1.1.2 Συστήματα επάλληλων στρώσεων – θεωρία Burmister

Η μετάβαση από τη θεωρία του ελαστικού ημιχώρου στη θεωρία δύο ή τριών επάλληλων στρώσεων ενός οδοστρώματος, βασίζεται στη θεμελιώδη αρχή των γραμμικώς ελαστικών μέσων (Burmister). Τα μέτρα ελαστικότητας στα συνηθισμένα εύκαμπτα οδοστρώματα, ελαττώνονται με το βάθος. Εξαιτίας αυτής της μείωσης, οι τάσεις και οι υποχωρήσεις στο υπέδαφος είναι μειωμένες σε σχέση με τις τιμές που προκύπτουν σε ιδεατό, ομοιογενές μέσο.

Η θεωρία του Burmister προσεγγίζει τις πραγματικές συνθήκες κάνοντας ορισμένες αναγκαίες παραδοχές. Οι παραδοχές αυτές γίνονται κατά τη λύση του προβλήματος δύο στρώσεων και αφορούν στις οριακές συνθήκες, καθώς επίσης και στις συνθήκες συνέχειας. Θεωρεί ότι τα υλικά των στρώσεων είναι ομοιογενή, ισότροπα και ελαστικά. Επίσης, η επιφανειακή στρώση θεωρείται ότι εκτείνεται απείρωσ πλευρικά, ενώ το βάθος είναι πεπερασμένο. Η υποκείμενη στρώση θεωρείται ότι εκτείνεται μέχρι το άπειρο τόσο πλευρικά, όσο και κατακόρυφα.

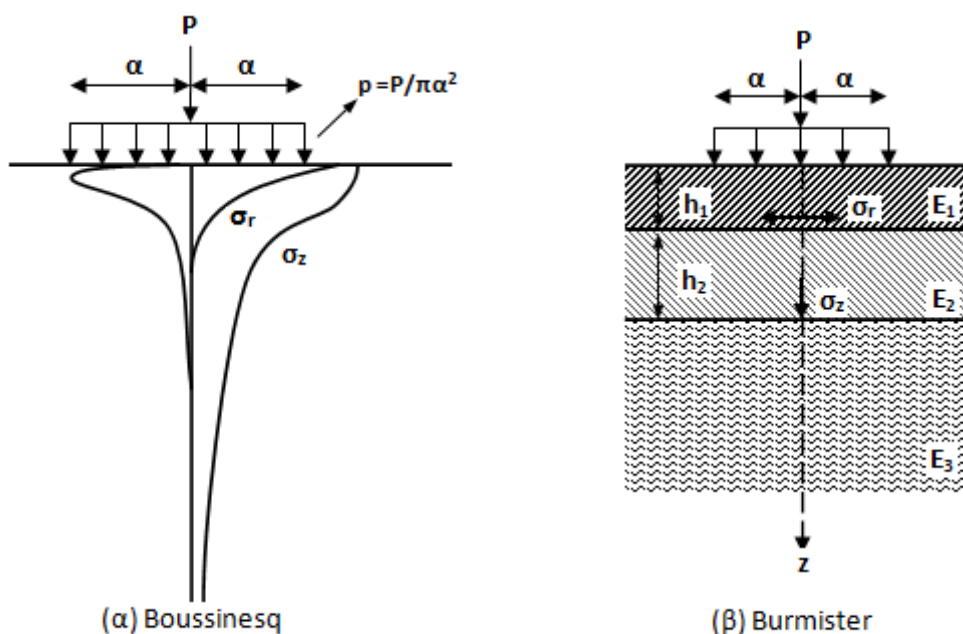
Οι οριακές συνθήκες και οι συνθήκες συνέχειας επιβάλλουν οι στρώσεις να είναι σε συνεχή επαφή και στην επιφανειακή στρώση να μην αναπτύσσονται διατμητικές και ορθές τάσεις εκτός περιοχής φόρτισης. Οι τιμές των τάσεων και των βελών κάμψεως εξαρτώνται από το λόγο αντοχής των δύο στρώσεων, δηλαδή το λόγο των μέτρων ελαστικότητάς τους, E_1/E_2 , όπου E_1 και E_2 είναι τα μέτρα ελαστικότητας της στρώσης βάσης και του υπεδάφους αντίστοιχα (Λοΐζος, 2011). Στην επόμενη εικόνα φαίνονται οι τιμές της κατακόρυφης τάσης κάτω από το κέντρο μιας κυκλικής πλάκας, για το σύστημα δύο στρώσεων (η διατομή δεν είναι υπό κλίμακα. Το βάθος a δεν είναι το μισό της διαμέτρου $2a$ του κυκλικού φορτίου).



Εικόνα 4.3 Επίδραση του λόγου των μέτρων ελαστικότητας σε σύστημα δύο στρώσεων, στις κατακόρυφες τάσεις που αναπτύσσονται στον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας της κυκλικής επιφάνειας φόρτισης

Από το διάγραμμα των κατακόρυφων τάσεων, προκύπτει ότι ο λόγος σ_z/ρ εν συγκρίσει με το λόγο z/a , επηρεάζεται από το λόγο των μέτρων ελαστικότητας E_1/E_2 των δύο στρώσεων. Διότι για το ίδιο βάθος, οι τιμές του λόγου σ_z/ρ μεταβάλλονται αισθητά για τις διάφορες τιμές του λόγου των μέτρων ελαστικότητας.

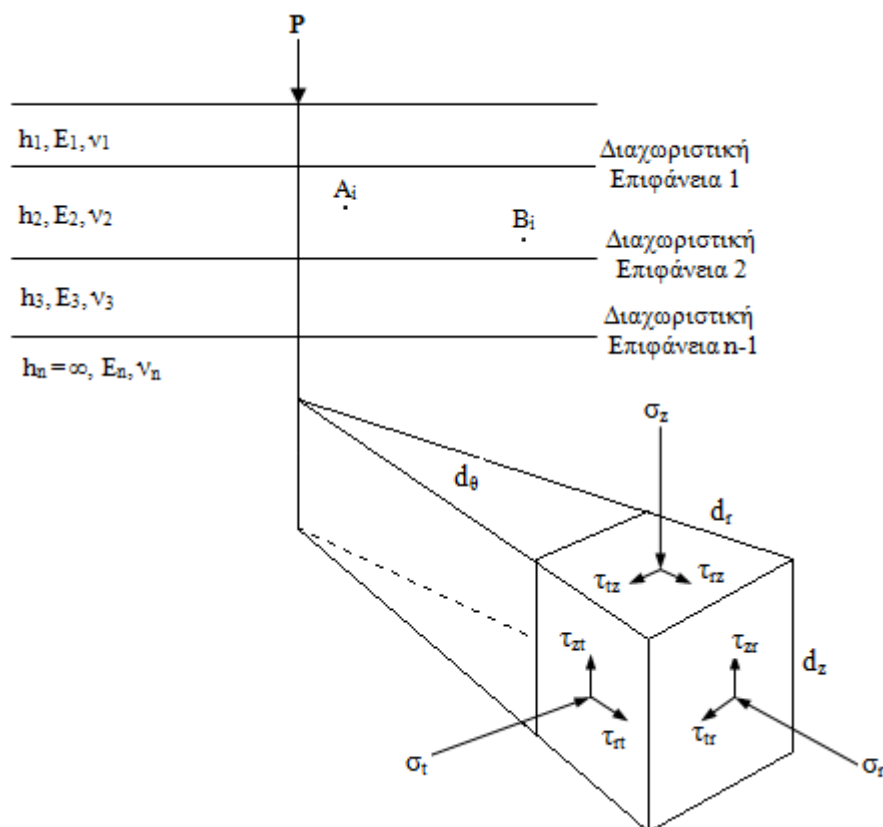
Στην ίδια εικόνα φαίνεται η κατανομή της κατακόρυφης τάσης για $E_1=E_2$, δηλαδή για την περίπτωση ομοιογενούς ημχώρου (Boussinesq). Παρατηρείται ότι οι τάσεις κατά Boussinesq είναι μεγαλύτερες, αφού για το ίδιο βάθος, οποιαδήποτε τιμή του λόγου των μέτρων ελαστικότητας, δίδει μικρότερη τιμή τάσεως. Δηλαδή, η παρεμβολή μιας στρώσης μεταξύ της επιφάνειας φόρτισης (επίπεδο φόρτισης) και της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος, έχει ευνοϊκά αποτελέσματα. Για την ακρίβεια, η στρώση που παρεμβάλλεται, με το μέτρο ελαστικότητάς της (E_1), να είναι μεγαλύτερο από αυτό της στρώσης έδρασης (E_2), οδηγεί σε μείωση της αναπτυσσόμενης κατακόρυφης τάσης σ_z στην επιφάνεια έδρασης. Άρα, η ύπαρξη μιας στρώσης, ανακουφίζει το υπέδαφος, κάτι που ικανοποιεί και την κυριότερη αρχή κατασκευής οδοστρωμάτων. Στην επόμενη εικόνα παρατίθενται τα στατικά πρότυπα των δύο θεωριών.



Εικόνα 4.4 Στατικά πρότυπα των δύο βασικών θεωριών υπολογισμού οδοστρωμάτων

4.1.1.3 Γενικευμένο ελαστικό σύστημα πολλαπλών στρώσεων

Στην εικόνα 4.5 απεικονίζεται η γενική μορφή ενός ελαστικού συστήματος πολλαπλών στρώσεων.



Εικόνα 4.5 Γενικευμένο ελαστικό σύστημα πολλαπλών στρώσεων

Η αναλυτική λύση της κατάστασης τάσης ή παραμόρφωσης, στηρίζεται σε διάφορες παραδοχές, οι οποίες είναι :

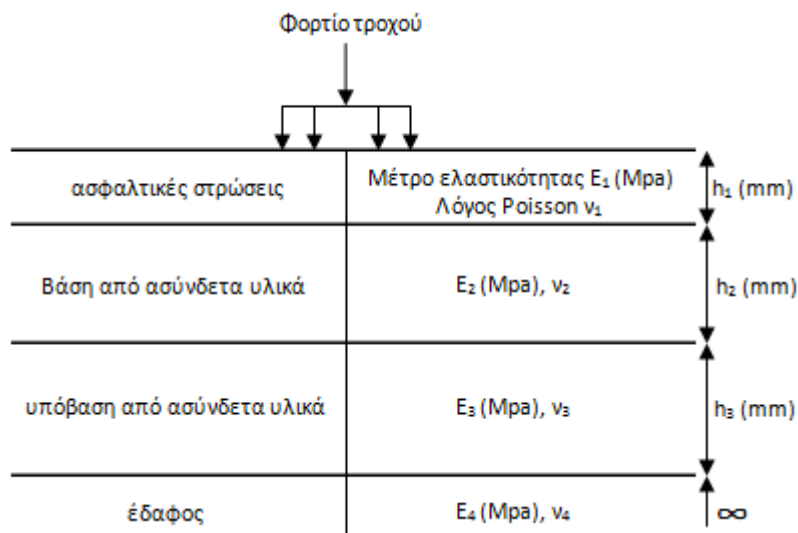
- Οι ιδιότητες του υλικού κάθε στρώσης είναι ομογενείς. Δηλαδή η ιδιότητα στο σημείο A_i είναι ίδια, όπως στο σημείο B_i .
- Κάθε στρώση έχει πεπερασμένο πάχος, εκτός από την κατώτερη στρώση, ενώ όλες έχουν άπειρη πλευρική διάσταση.
- Όλες οι στρώσεις είναι ισότροπες. Δηλαδή η ιδιότητα σ' ένα σημείο A_i είναι ίδια σε κάθε διεύθυνση ή προσανατολισμό.
- Στις διαχωριστικές επιφάνειες των στρώσεων, αναπτύσσεται πλήρης τριβή.
- Απουσιάζουν οι διατμητικές δυνάμεις στην επιφάνεια.
- Οι λύσεις των τάσεων χαρακτηρίζονται από δύο ιδιότητες του υλικού για κάθε στρώση και συγκεκριμένα, το λόγο Poisson ν , καθώς επίσης και το μέτρο ελαστικότητας E .

Από τη θεωρία προκύπτει ότι σε ένα σημείο μιας οποιασδήποτε στρώσης, αναπτύσσονται εννέα τάσεις. Οι τρεις από αυτές είναι ορθές (σ_z , σ_r , σ_t), ενεργώντας κάθετα στις έδρες του στοιχείου και οι υπόλοιπες έξι είναι διατμητικές τάσεις (τ_{rt} , τ_{tr} , τ_{rz} , τ_{zr} , τ_{tz} , τ_{zt}), οι οποίες ενεργούν παράλληλα προς τις έδρες. Οι συνθήκες στατικής ισορροπίας του στοιχείου, δείχνουν ότι οι διατμητικές τάσεις σε δύο τεμνόμενες έδρες είναι ίσες. Δηλαδή, $\tau_{rz} = \tau_{zr}$, $\tau_{rt} = \tau_{tr}$ και $\tau_{tz} = \tau_{zt}$. Στις συνθήκες εκείνες, όπου οι διατμητικές τάσεις είναι μηδενικές, οι ορθές χαρακτηρίζονται ως κύριες. Για κάθε σημείο του συστήματος, υπάρχει ένας ορισμένος προσανατολισμός τέτοιος, ώστε οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται σε κάθε έδρα να μηδενίζονται.

Στα συστήματα πολλαπλών στρώσεων, οι αναπτυσσόμενες τάσεις, υπό την επίδραση φορτίου P και ακτίνας a , εξαρτώνται από τους λόγους των μέτρων ελαστικότητας, καθώς και τους λόγους Poisson. Όσον αφορά στις παραμορφώσεις, εξαρτώνται από το μέγεθος και την ακτίνα του φορτίου, τα πάχη των στρώσεων, τα μέτρα ελαστικότητας και τέλος, το λόγο του Poisson (Λοΐζος, 2011).

4.1.2 Στατικό πρότυπο εύκαμπτου οδοστρώματος

Ένα εύκαμπτο οδοστρώματος μπορεί να προσομοιωθεί από ένα στατικό πρότυπο τριών στρώσεων πεπερασμένου πάχους (h_i) και απείρων διαστάσεων κατά την οριζόντια διεύθυνση. Δηλαδή, προσομοιάζονται επί της ουσίας οι ασφατικές στρώσεις, η στρώση βάσης και η υπόβαση. Οι στρώσεις αυτές εδράζονται πάνω σε μία στρώση με απεριόριστες οριζόντιες διαστάσεις και απεριόριστο πάχος (στρώση έδρασης), αποτελώντας τελικά ένα σύστημα τεσσάρων στρώσεων. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το στατικό πρότυπο που περιγράφηκε.



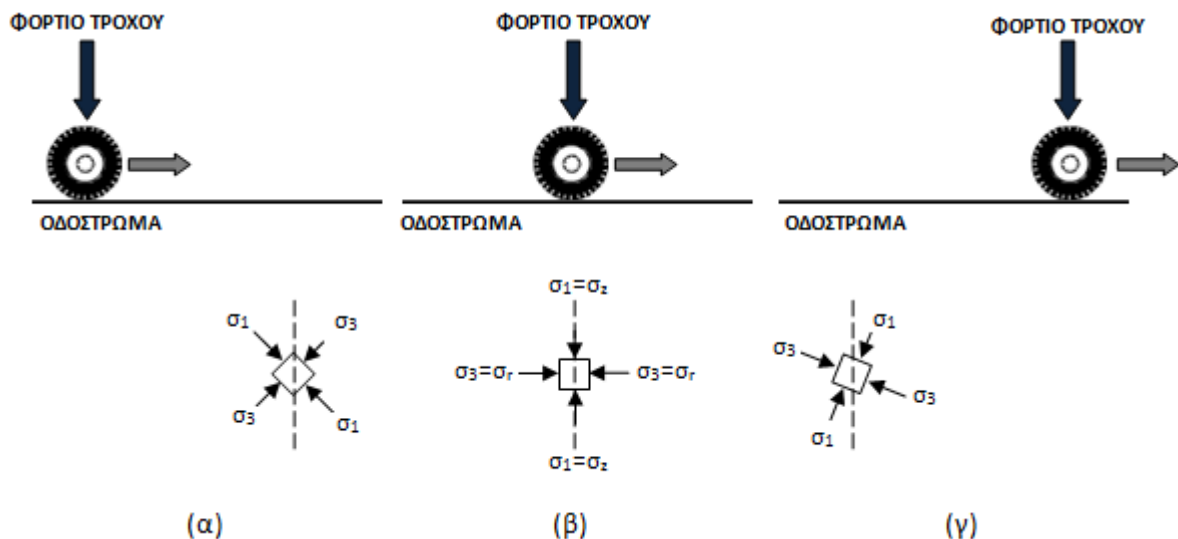
Εικόνα 4.6 Στατικό πρότυπο μελέτης εύκαμπτου οδοστρώματος - σύστημα τεσσάρων στρώσεων

Το στατικό πρότυπο ορίζεται πλήρως, αν εκτός από τα πάχη των στρώσεων, δοθούν και οι σταθερές που χαρακτηρίζουν το υλικό κάθε στρώσης, δηλαδή το μέτρο ελαστικότητας (E) και ο λόγος Poisson (ν).

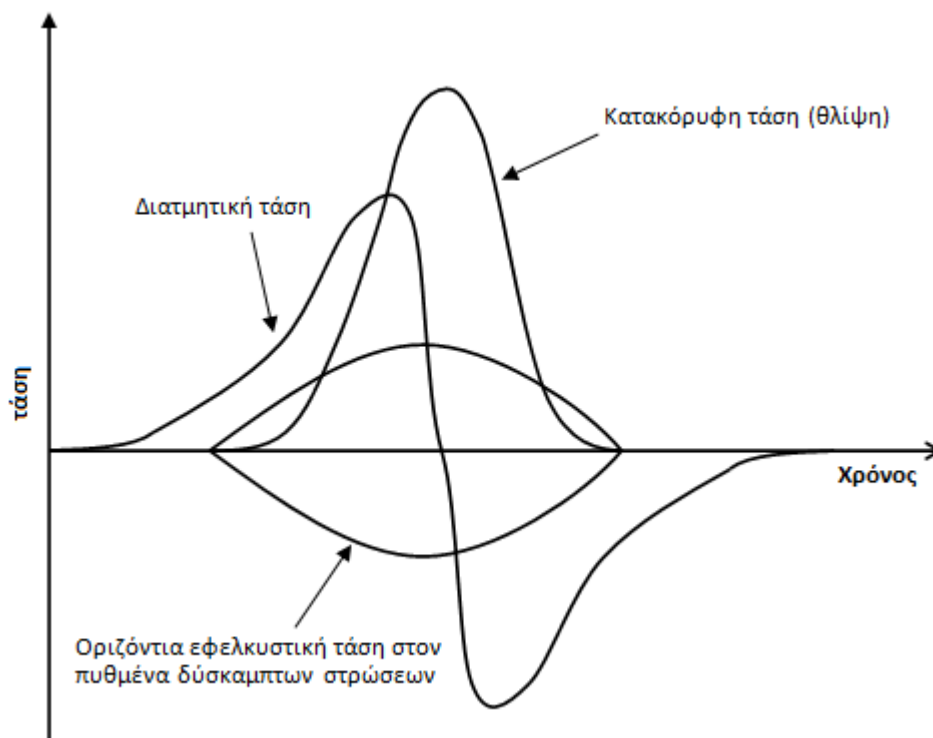
Όπως έχει αναφερθεί, το σύστημα των επάλληλων ελαστικών στρώσεων που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των τάσεων και παραμορφώσεων, βασίζεται στην παραδοχή ότι τα υλικά είναι ελαστικά, ομογενή και ισότροπα. Καμία από αυτές τις παραδοχές δεν είναι αληθής. Εντούτοις, έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι υπό τις δυναμικές συνθήκες φόρτισης των οδοστρωμάτων, τα υλικά συμπεριφέρονται με αρκετά καλή προσέγγιση σαν ελαστικά στρώματα, δεδομένου του μικρού χρόνου φόρτισης (Λοΐζος, 2011).

4.1.3 Τρόπος καταπόνησης οδοστρωμάτων

Κατά τη διέλευση ενός τροχού από ένα σημείο του οδοστρώματος, η επιφάνεια επαφής μεταβάλλεται συνεχώς από μία ελάχιστη τιμή, σε μία μέγιστη και στη συνέχεια παίρνει πάλι μια ελάχιστη τιμή. Ανάλογη διαδικασία με αυτήν της επιφάνειας επαφής, συμβαίνει και με τη φόρτιση του οδοστρώματος, η οποία φτάνει σε μία μέγιστη τιμή όταν ο τροχός βρεθεί ακριβώς πάνω από το σημείο, ενώ με την απομάκρυνσή του ακολουθεί η αποφόρτιση. Σε κάθε επανάληψη της φόρτισης, δηλαδή για κάθε διέλευση του τροχού από ένα σημείο της διατομή ενός οδοστρώματος, οι αναπτυσσόμενες τάσεις μεταβάλλονται όπως φαίνεται στις επόμενες εικόνες (Λοΐζος, 2011).



Εικόνα 4.7 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε σημείο του οδοστρώματος κατά τη διέλευση του φορτίου – (α) καθώς ο τροχός προσεγγίζει το σημείο, (β) όταν ο τροχός βρίσκεται ακριβώς πάνω από το σημείο, (γ) όταν ο τροχός απομακρύνεται από το σημείο



Εικόνα 4.8 Μεταβολή των τάσεων που αναπτύσσονται σε ένα τυχαίο σημείο κατά τη διάρκεια της διελεύσεως φορτίου (ποιοτικό διάγραμμα)

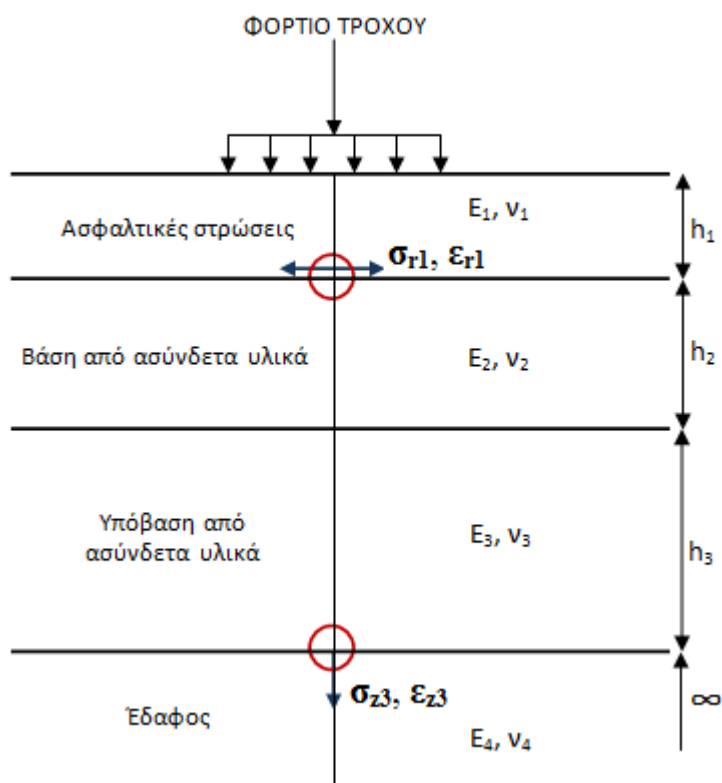
Στην εικόνα 4.8 παρουσιάζονται ποιοτικά οι τάσεις που αναπτύσσονται σε ένα σημείο του οδοστρώματος κατά τη διάρκεια διελεύσεως ενός τροχού. Προκύπτει ότι γενικά οι κατακόρυφες, αλλά και οι οριζόντιες τάσεις, μεταβάλλονται κατά παρόμοιο τρόπο. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός, ότι το κύμα φορτίσεως για τις οριζόντιες τάσεις είναι

μεγαλύτερο, με μικρότερη ένταση από το κύμα των κατακόρυφων τάσεων. Επίσης, στο κάτω μέρος των δύσκαμπτων στρώσεων, οι οριζόντιες τάσεις είναι εφελκυστικές, εν αντιθέσει με τις κατακόρυφες που είναι αποκλειστικά θλιπτικές. Όσον αφορά στη διατμητική τάση, παρουσιάζει μια αντιστροφή του προσήμου, δηλαδή από θλίψη σε εφελκυσμό, στο σημείο όπου ο τροχός διέρχεται πάνω από το σημείο (Λοΐζος, 2011).

4.1.4 Κρίσιμες θέσεις για την εντατική κατάσταση εύκαμπτου οδοστρώματος

Η κρίσιμη θέση φόρτισης για ένα σημείο οδοστρώματος είναι όταν το φορτίο βρεθεί πάνω ακριβώς από το σημείο. Η θέση αυτή απεικονίζεται στην εικόνα 4.7-(β), όπου οι ορθές τάσεις μετατρέπονται σε κύριες (σ_1, σ_3).

Οι κρίσιμες θέσεις για την εντατική κατάσταση ενός εύκαμπτου οδοστρώματος, είναι ο πυθμένας των ασφαλτικών στρώσεων και η επιφάνεια της στρώσης έδρασης (εικόνα 4.9).



Εικόνα 4.9 Κρίσιμες θέσεις εύκαμπτου οδοστρώματος

Τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στις παραπάνω κρίσιμες θέσεις, είναι οι εφελκυστικές τάσεις και παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων, καθώς και οι κατακόρυφες τάσεις και παραμορφώσεις στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης, αντίστοιχα. Κατ' αυτόν τον τρόπο προκύπτουν τα κριτήρια αστοχίας για τα εύκαμπτα οδοστρώματα (Λοΐζος, 2011) :

$\sigma_{r1}, \varepsilon_{r1}$: κριτήρια για την αντοχή σε ρηγμάτωση του ασφαλτομίγματος

$\sigma_{z3}, \varepsilon_{z3}$: κριτήρια για την αστοχία - παραμορφωσιμότητα της στρώσης έδρασης.

4.2 Δομική αξιολόγηση οδοστρώματος

4.2.1 Αρχές δομικής αξιολόγησης

Στο πλαίσιο της διαχείρισης της συντήρησης ενός οδοστρώματος οδού ή αεροδρομίου κρίνεται απαραίτητη η αξιολόγηση της δομικής κατάστασης αυτού. Η αξιολόγηση της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος επιτυγχάνεται με την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητάς του (Φ.Ι). Με τον όρο φέρουσα ικανότητα, εννοείται η ικανότητα ενός οδοστρώματος να φέρει τα προβλεπόμενα επιβαλλόμενα φορτία κυκλοφορίας, για τη χρονική περίοδο που έχει σχεδιαστεί. Η φέρουσα ικανότητα εξετάζεται τόσο για κάθε μία από τις επιμέρους στρώσεις του οδοστρώματος, όσο και για το σύνολό του.

Η εκτίμηση της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος, καθίσταται αναγκαία για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων, καθότι υπό την επίδραση διαφόρων παραγόντων όπως η κυκλοφορία, οι καιρικές συνθήκες και η γήρανση των υλικών, μειώνεται η φέρουσα ικανότητά του και κατ' επέκταση υποβαθμίζεται το επίπεδο εξυπηρέτησης. Επομένως, θα πρέπει να ελέγχεται η φέρουσα ικανότητα του δαπέδου επί τόπου (in situ) και να συσχετίζεται με αυτήν που προβλεπόταν από το σχεδιασμό.

Για τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας ενός καταστρώματος, απαιτείται η συνεκτίμηση διαφόρων χαρακτηριστικών του, όπως τα πάχη των επιμέρους στρώσεων και τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους (μέτρα ελαστικότητας και λόγοι του Poisson). Αξίζει να σημειωθεί ότι η φέρουσα ικανότητα ενός δαπέδου εκφράζει μια δυναμική κατάσταση, η οποία μεταβάλλεται συνεχώς υπό την επίδραση των προαναφερθέντων παραγόντων. Έτσι, μαζί με τη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος, μεταβάλλονται και τα επιμέρους χαρακτηριστικά του (πάχη στρώσεων, μέτρα ελαστικότητας και λόγοι Poisson). Οπότε, η συνεχής παρακολούθηση ενός οδοστρώματος είναι επιβεβλημένη για την αξιολόγηση της δομικής του κατάστασης, ούτως ώστε να ακολουθήσει αργότερα και η εκτίμηση της λειτουργικής του κατάστασης.

Για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών ενός οδοστρώματος έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι. Συγκεκριμένα, ο προσδιορισμός του πάχους κάθε στρώσης επιτυγχάνεται είτε με τη λήψη πυρήνων, είτε με γεωφυσικές μεθόδους, όπως μετρήσεις με γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar- GPR), το οποίο αποτελεί μη καταστρεπτικό σύστημα. Για την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των επιμέρους στρώσεων πραγματοποιούνται μετρήσεις με συσκευές σύγχρονης τεχνολογίας. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η εκτίμηση μέσω του Παραμορφωσιμέτρου Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer – FWD), το οποίο ανήκει επίσης στην κατηγορία των μη καταστρεπτικών συστημάτων (Non Destructive Testing – NDT).

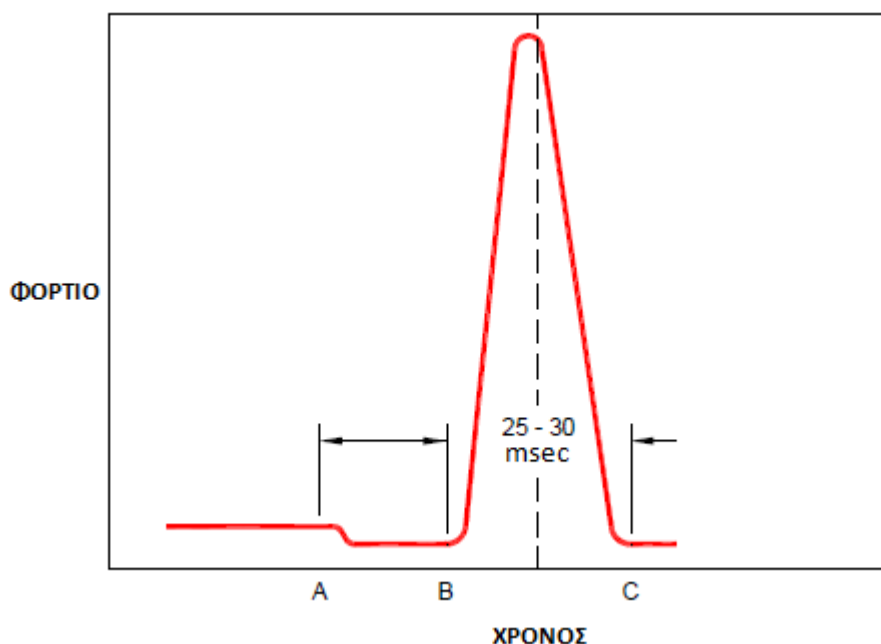
4.2.2 Εκτίμηση φέρουσας ικανότητας – Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους

Ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών του οδοστρώματος με το σύστημα του παραμορφωσιμέτρου πίπτοντος βάρους (FWD), αποτελεί το πιο εξελιγμένο σύστημα συλλογής στοιχείων για την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας του δαπέδου. Διαφορές μεταξύ των διαφόρων συστημάτων (δοκός Benkelman, Road Rater, Deflectograph), αφορούν κυρίως στον τρόπο επιβολής του φορτίου επί του οδοστρώματος (δυναμικό ή στατικό) και στη μεθοδολογία καταγραφής. Στην εικόνα 4.10 παρουσιάζεται η συσκευή παραμορφωσιμέτρο πίπτοντος βάρους.



Εικόνα 4.10 Συσκευή παραμορφωσιμέτρου πίπτοντος βάρους (FWD)

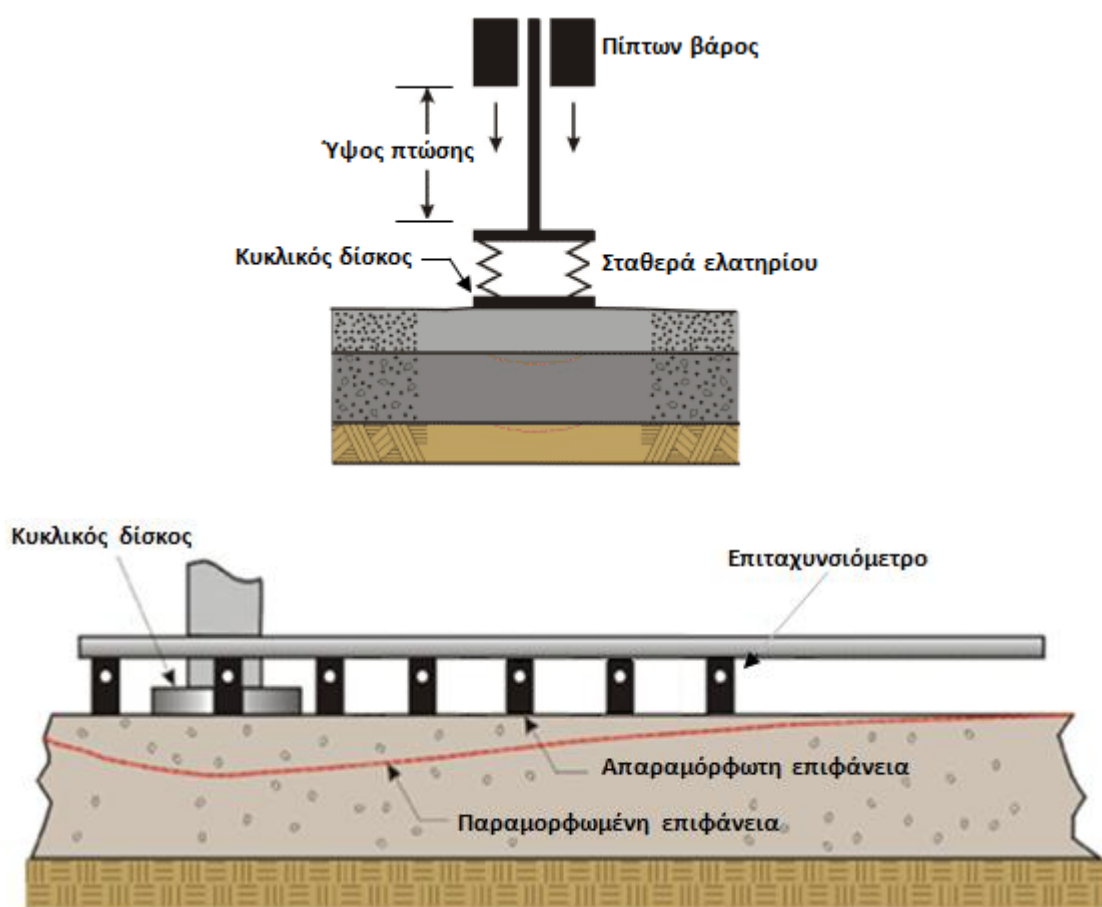
Η βασική λειτουργία της συσκευής FWD περιγράφεται από το βάρος που αφήνεται να πέσει κάθετα (falling weight) υπό την επίδραση της βαρύτητας. Το βάρος αυτό πέφτοντας, προσκρούει σε μια ειδικά σχεδιασμένη επιφάνεια, δημιουργώντας μια παλμική φόρτιση. Η φόρτιση αυτή μεταβιβάζεται σε έναν κυκλικό δίσκο, ο οποίος βρίσκεται σε επαφή με το οδόστρωμα. Η διάρκεια της φόρτισης αυτής είναι συνήθως 25-30 msec ή 45-60 msec, ανάλογα με τη συσκευή και το υλικό στο οποίο επιβάλλεται η φόρτιση. Έτσι, προσομοιάζεται σε μεγάλο βαθμό η πραγματική φόρτιση που υφίσταται το οδόστρωμα από τη διέλευση ενός τροχού. Ενδεικτικά αναφέρεται, ότι η φόρτιση από τη διέλευση ενός φορτηγού με ταχύτητα 50 km/h, διαρκεί περίπου 20 msec (Λοΐζος, 2011). Το μέγεθος του φορτίου πρόσκρουσης μπορεί να μεταβληθεί, επιλέγοντας το κατάλληλο πίπτων βάρος ή/και αλλάζοντας το ύψος της πτώσης. Κατ' αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνονται προσομοιώσεις τροχών για διάφορα οχήματα (π.χ. τροχός αεροσκάφους). Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η παλμική φόρτιση που προκύπτει από την πτώση του πίπτοντος βάρους .



Εικόνα 4.11 Παλμική φόρτιση παραμορφωσιμέτρου πίπτοντος βάρους (FAA, Advisory Circular AC 150/5370-11 B, 2011)

Ο χρόνος που μεσολαβεί από το σημείο Α έως το Β στο παραπάνω σχήμα, αντιπροσωπεύει το χρόνο που απαιτείται για να σηκωθεί το βάρος της συσκευής στο απαραίτητο ύψος. Η φόρτιση ξεκινάει από το σημείο Β και τελειώνει στο σημείο C. Το μέγεθος του φορτίου εξαρτάται από το πύπτων βάρος και το ύψος που επιλέγεται να αφεθεί.

Κατά τη διάρκεια της φόρτισης που προκαλεί το FWD στο οδόστρωμα, καταγράφονται οι μέγιστες ελαστικές υποχωρήσεις ακριβώς κάτω από το σημείο πρόσπτωσης και σε ορισμένες αποστάσεις από αυτό. Η μέτρηση των υποχωρήσεων αυτών γίνεται από επιταχυνσιόμετρα, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.12 Σχηματική περιγραφή της συσκευής του παραμορφωσιμέτρου πίπτοντος βάρους (FWD)

Η επόμενη εικόνα παρουσιάζει τη ζώνη επιρροής του φορτίου, η οποία δημιουργείται από την πτώση του βάρους.

ISM : Impulse Stiffness Modulus (kips/inch)

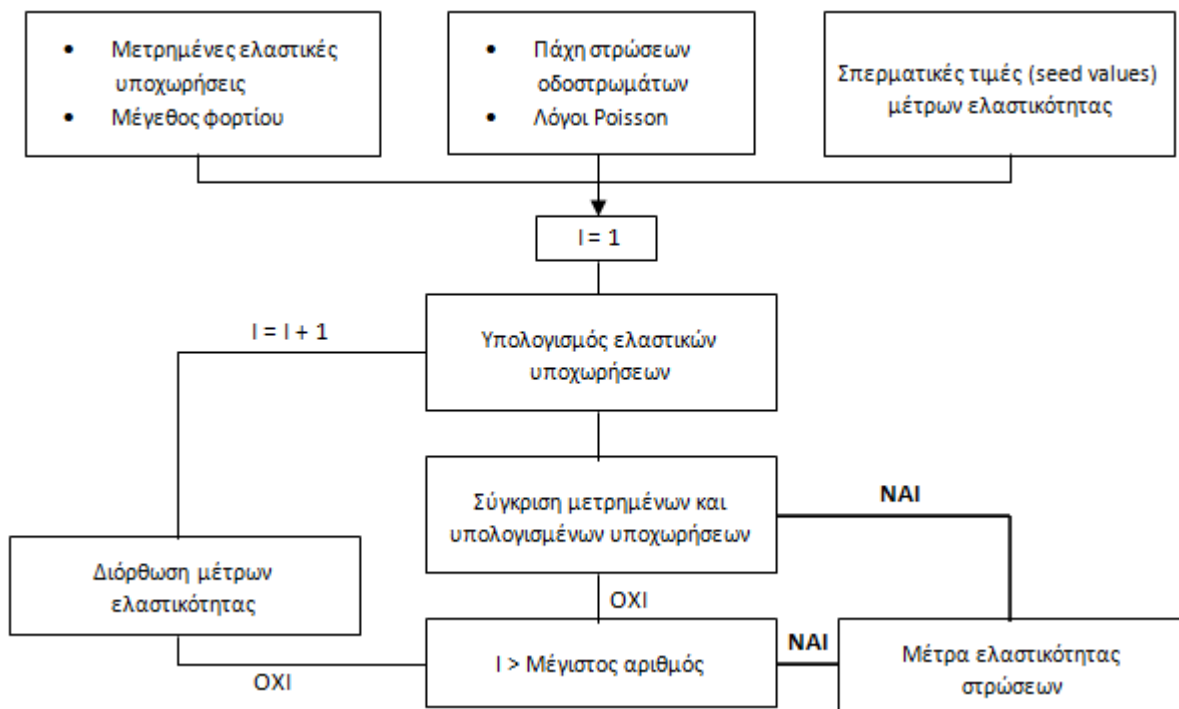
L : φορτίο κατά την εφαρμογή μέτρησης FWD (kips)

D₀ : παραμόρφωση κάτω από το κέντρο φόρτισης (inch)

Τα δεδομένα που προκύπτουν από τις μετρήσεις με το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους, μπορούν να συνδυαστούν με άλλα στοιχεία, προκειμένου να προσδιοριστεί η δομική κατάσταση του οδοστρώματος. Συγκεκριμένα, απαιτείται ο προσδιορισμός του πάχους των επιμέρους στρώσεων, τα υλικά του οδοστρώματος, οι κυκλοφοριακοί φόρτοι και θερμοκρασιακά δεδομένα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Έτσι, τα προαναφερθέντα στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών κάθε στρώσης χωριστά, μέσω του ανάστροφου υπολογισμού (back-analysis), με τη βοήθεια ειδικά σχεδιασμένων λογισμικών.

4.2.3 Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού (Back-analysis)

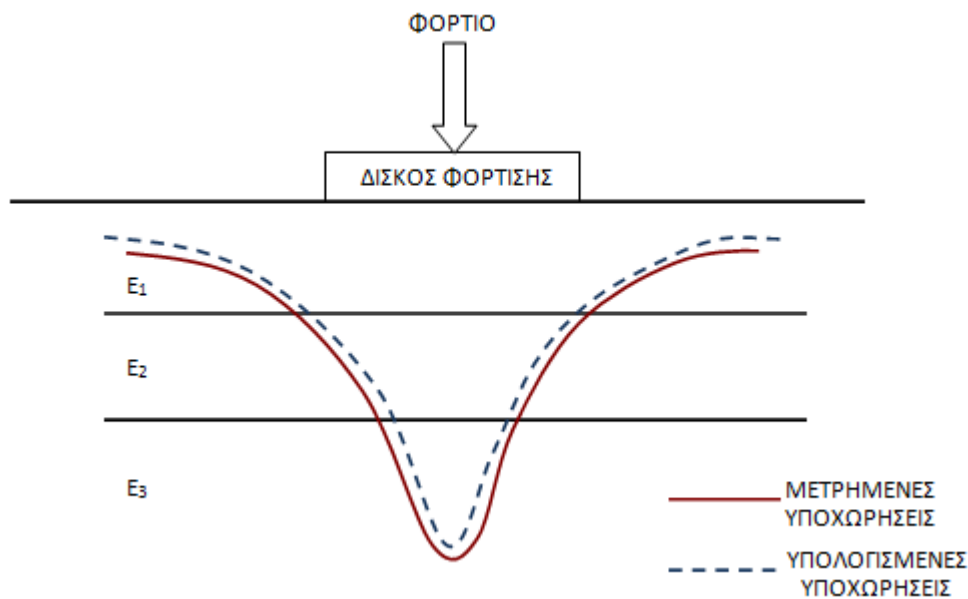
Μέσω της διαδικασίας του ανάστροφου υπολογισμού, πραγματοποιείται ο προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών των στρώσεων του οδοστρώματος που εξετάζεται. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στην ενεργοποίηση αλγορίθμων, μέσω της χρήσης των στοιχείων από τις μετρήσεις FWD και άλλων στοιχείων που μετρώνται επί τόπου (πάχη στρώσεων, θερμοκρασία, κ.ά.). Για τη λειτουργία των αλγορίθμων αυτών, γίνεται χρήση κατάλληλων προσομοιώσεων οδοστρωμάτων. Η συνολική διαδικασία ανάλυσης επιτυγχάνεται με βάση ένα διάγραμμα ροής, το οποίο αποτελείται από βρόχο υπολογισμών (εικόνα 4.14).



Εικόνα 4.14 Διάγραμμα ροής ανάστροφου υπολογισμού

Για την εύρεση των μηχανικών χαρακτηριστικών, μέσω του ανάστροφου υπολογισμού είναι απαραίτητη η χρήση ειδικών λογισμικών. Η ομοσπονδιακή διεύθυνση αεροπορίας (FAA) των Η.Π.Α έχει σχεδιάσει πληθώρα τέτοιων προγραμμάτων, καθένα από τα οποία βασίζεται σε συγκεκριμένη θεωρία (π.χ. CBR, θεωρία ελαστικών στρώσεων και Winkler). Για τα ασφαλτικά οδοστρώματα χρησιμοποιούνται λογισμικά που βασίζονται στη θεωρία ελαστικών στρώσεων ή σε αυτήν του CBR (καλιφορνιακός δείκτης). Ένα από αυτά τα λογισμικά, είναι το ΒΑΚFΑΑ.

Το πρόγραμμα ΒΑΚFΑΑ έχει σχεδιαστεί από την FAA και κάνει χρήση της υπορουτίνας (subroutine) LEAF. Βασίζεται στη θεωρία των ελαστικών στρώσεων και υπολογίζει τα μέτρα ελαστικότητας κάθε στρώσης, έπειτα από μία επαναληπτική διαδικασία. Μέσω της διαδικασίας αυτής, το πρόγραμμα επιτυγχάνει σύγκλιση μεταξύ των μετρημένων παραμορφώσεων, όπως κατεγράφησαν από τη συσκευή FWD και αυτών που υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα. Με το πέρας της σύγκλισης αυτής, το λογισμικό σταματάει τις επαναλήψεις και δίδει τα νέα μέτρα ελαστικότητας (FAA, Advisory Circular AC 150/5370-11 B, 2011). Στην επόμενη εικόνα συγκρίνονται οι μετρημένες, με τις υπολογισμένες υποχωρήσεις.



Εικόνα 4.15 Σύγκριση μετρημένων (συσκευή FWD) - υπολογισμένων (πρόγραμμα ανάστροφου υπολογισμού) (FAA, Advisory Circular AC 150/5370-11 B, 2011)

Η ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων εξαρτάται από την ανοχή της διαδικασίας, όσον αφορά στην απόκλιση ανάμεσα στις μετρημένες υποχωρήσεις και τις υπολογισμένες. Προκειμένου, λοιπόν, να αξιολογηθεί η σύγκλιση-απόκλιση, γίνεται χρήση της τετραγωνικής ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error - RMSE) των διαφορών μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων υποχωρήσεων. Η σχέση του RMSE είναι :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_{calci} - d_{measi})^2} \quad (4.12)$$

Όπου :

RMSE : Root Mean Square Error

d_{calci} : υπολογισμένη υποχώρηση (calculated) κάτω από τον i αισθητήρα

d_{measi} : μετρημένη υποχώρηση (measured) κάτω από τον i αισθητήρα

n : αριθμός αισθητήρων

Για την τελική επιλογή των μέτρων ελαστικότητας απαιτείται ο συντελεστής διακύμανσης (Coefficient of Variation – CoV) του RMSE να βρίσκεται μεταξύ του 2 και 5%. Η σχέση του CoV είναι η ακόλουθη :

$$CoV(RMSE) = \frac{RMSE}{\bar{d}_{meas}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_{calci} - d_{measi})^2}}{\bar{d}_{meas}} \quad (4.13)$$

Όπου :

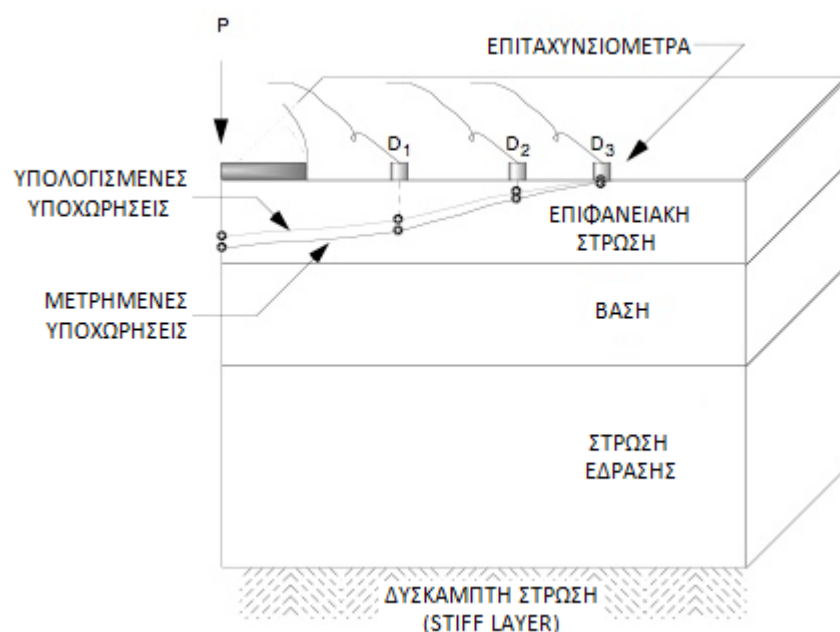
\bar{d}_{meas} : Μέση τιμή των μετρημένων υποχωρήσεων

Το μέγιστο όριο ανοχής για το RMSE κυμαίνεται μεταξύ 1 έως 2% (American Society for Testing and Materials, ASTM, 2008). Το μέγεθος του σφάλματος σύγκλισης και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον ανάστροφο υπολογισμό, βάσει της θεωρίας των ελαστικών στρώσεων, επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των ακολούθων (FAA, Advisory Circular AC 150/5370-11 B, 2011) :

- Τον αριθμό των στρώσεων. Όσο περισσότερες στρώσεις εισαχθούν στο πρόγραμμα, τόσο αυξάνεται η πιθανότητα για μεγαλύτερο σφάλμα.
- Τα πάχη στρώσεων. Καθώς μειώνεται το πάχος μιας στρώσης, το σφάλμα αυξάνεται.
- Τη διεπιφάνεια μεταξύ δύο οποιονδήποτε στρώσεων, η οποία μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα και κατ' επέκταση το μέγεθος του σφάλματος.
- Τη θερμοκρασία των ασφαλικών στρώσεων, η οποία επηρεάζει πολύ την τιμή των μέτρων ελαστικότητας. Η αλλαγή στις τιμές των μέτρων δυσκαμψίας, "αντανακλάται" στα επίπεδα του σφάλματος και των αποτελεσμάτων.
- Τις σπερματικές τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών των στρώσεων, οι οποίες έχουν σημαντική επιρροή.
- Την παράλειψη της δύσκαμπτης στρώσης, υποκείμενης της στρώσης έδρασης, ή ακόμα και τον λάθος προσδιορισμό της στάθμης αυτής της στρώσεως.
- Την ύπαρξη ρωγμών στο οδόστρωμα. Η ελαστική θεωρία υποθέτει ότι δεν υπάρχει ασυνέχεια σε καμία από τις στρώσεις του οδοστρώματος. Επομένως, αν ο κυκλικός δίσκος τοποθετηθεί κοντά σε οποιουδήποτε τύπου ρωγμή, προκαλούνται σφάλματα.
- Τα σφάλματα από τους αισθητήρες της συσκευής FWD.
- Τον κυκλικό δίσκο φόρτισης. Συγκεκριμένα, αν ο δίσκος δεν τοποθετηθεί ομοιόμορφα στην επιφάνεια του οδοστρώματος, το σφάλμα αυξάνει.

- Τη χρονική διάρκεια της φόρτισης.
- Τέλος, από εποχιακές επιπτώσεις. Ιδίως για βόρεια κλίματα, ο παγετός επηρεάζει τη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων και μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα.

Προκειμένου να ενεργοποιηθεί ο αλγόριθμος του προγράμματος ΒΑΚFΑΑ απαιτείται, εκτός από τα δεδομένα των μετρήσεων FWD και τα πάχη των στρώσεων, η εισαγωγή κατάλληλων σπερματικών τιμών (seed values) για τα μηχανικά χαρακτηριστικά κάθε στρώσης. Οι τιμές αυτές υποδεικνύονται από σχετικές εγκυκλίους της FΑΑ και είναι διαφορετικές για κάθε υλικό οδοστρώσης. Έπειτα, ξεκινάει η επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού μέχρι να επιτευχθεί η σύγκλιση των παραμορφώσεων. Η παρακάτω εικόνα αποτελεί την γραφική απεικόνιση της διαδικασίας του ανάστροφου υπολογισμού, σχετικά με τη σύγκλιση των μετρημένων και υπολογισμένων υποχωρήσεων.



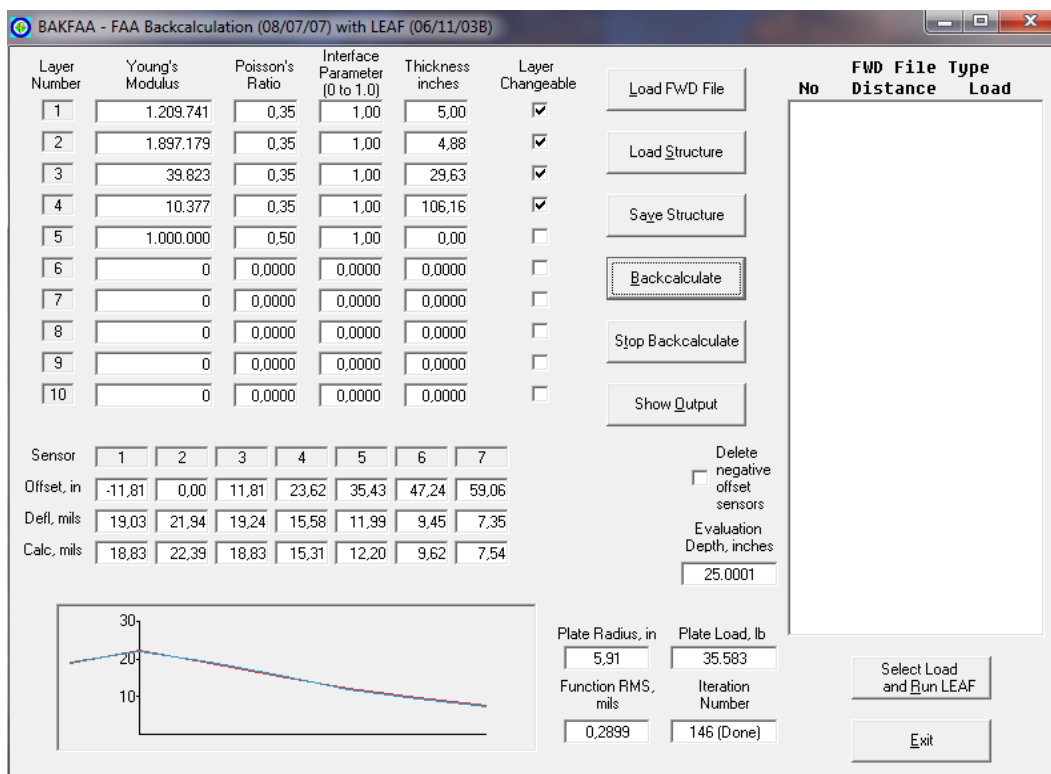
Εικόνα 4.16 Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού – Σύγκλιση μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων υποχωρήσεων (ASHTO Guide for design of Pavement Structures, 1986)

Σε περίπτωση που προκύψει σφάλμα μεγαλύτερο από το επιτρεπόμενο όριο ($RMSE > 2\%$), η επαναληπτική διαδικασία επαναλαμβάνεται μεταβάλλοντας τις σπερματικές τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών των στρώσεων. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να προκύψει η σύγκλιση των παραμορφώσεων μέσα στα επιτρεπτά όρια σφάλματος. Παράλληλα, βέβαια, εξετάζεται η ύπαρξη τυχόν σφαλμάτων από άλλους παράγοντες, όπως αυτούς που περιγράφηκαν παραπάνω.

Θα πρέπει να τονισθεί ότι το πρόγραμμα απαιτεί την εισαγωγή ακόμα μίας δύσκαμπτης στρώσης, υποκείμενης της στρώσης έδρασης, όπως φαίνεται στις εικόνες 4.13 και 4.16). Η στρώση αυτή χρησιμοποιείται για να προσομοιάσει είτε ένα βραχύδες υπόστρωμα, είτε το βάθος εκείνο στο οποίο οι κατακόρυφες παραμορφώσεις γίνονται αμελητέες. Η παράλειψη της στρώσεως αυτής ή ακόμα και ο λανθασμένος προσδιορισμός του βάθους της στάθμης της, αποτελεί έναν από τους παράγοντες που προκαλούν

σφάλματα κατά τον ανάστροφο υπολογισμό. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά της στρώσης αυτής ορίζονται από σχετικές εγκυκλίους. Για την ακρίβεια, το μέτρο ελαστικότητας είναι 6.895 Mpa (1.000.000 psi) και ο λόγος του Poisson 0,50 (American Society for Testing and Materials, ASTM, 2008).

Τέλος, στην εικόνα που ακολουθεί παρατίθεται η αρχική οθόνη του προγράμματος ΒΑΚFΑΑ, μετά την ολοκλήρωση των επαναλήψεων. Στην εικόνα διακρίνεται και το γράφημα, το οποίο παρουσιάζει το βαθμό ταύτισης μεταξύ των μετρημένων από τη συσκευή FWD παραμορφώσεων και των αντίστοιχων υπολογισμένων από το πρόγραμμα.



Εικόνα 4.17 Οθόνη προγράμματος ΒΑΚFΑΑ, αμέσως μετά την ολοκλήρωση του ανάστροφου υπολογισμού

4.3 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει ως βασική έννοια τη δυνατότητα προσομοίωσης μιας κατασκευής, με συστατικά στοιχεία που συνδέονται σε ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Σε μία όμως συνεχή κατασκευή δεν υπάρχουν φυσικοί διαχωρισμοί και συνεπώς απαιτείται να γίνει τεχνητός διαχωρισμός σε στοιχεία, τα οποία να συνδέονται κατά μήκος των άκρων (πλευρών) τους. Τα τεχνητά αυτά στοιχεία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία.

Η μέθοδος αυτή είναι μία μέθοδος της αριθμητικής ανάλυσης. Μέσω αυτής επιτυγχάνεται η φυσική προσέγγιση του προβλήματος, με τη διαμέριση του φυσικού χώρου

στα επιμέρους διακριτά πεπερασμένα στοιχεία που αναφέρθηκαν παραπάνω, στα οποία ορίζονται οι εξισώσεις που έχουν ακριβή λύση.

Οπότε η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση των οδοστρωμάτων, προκειμένου να βρεθεί προσεγγιστικά για κάθε στοιχείο μία αριθμητική λύση, αντί μιας ακριβούς λύσης για όλη την κατασκευή του οδοστρώματος.

Όλα τα προβλήματα των παραμορφωσίμων, όπως άλλωστε και όλα τα προβλήματα του συνεχούς μέσου, περιγράφονται με διαφορικές εξισώσεις με μερικές παραγώγους. Επομένως, είναι εφικτή η επίλυσή τους μέσω της διακριτοποίησής τους σε πεπερασμένα στοιχεία.

Οι διαφορικές εξισώσεις για τα προβλήματα της μηχανικής των παραμορφωσίμων, προκύπτουν από εξισώσεις όπως αυτές των μετατοπίσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων (4.14), (4.15), συμβιβαστού των παραμορφώσεων (4.16), καθώς επίσης και από τις εξισώσεις ισορροπίας στο χώρο (4.17). Όπως κάθε πρόβλημα που εκφράζεται με διαφορικές εξισώσεις, έτσι και σε αυτήν την περίπτωση υπάρχουν συνοριακές συνθήκες, όπως φυσικές συνοριακές συνθήκες (φορτίσεις κλπ), καθώς και βασικές συνοριακές συνθήκες (δεσμεύσεις, στηρίξεις, κλπ) ή συνθήκες Dirichlet (4.18) και Neumann (4.19). Στη συνέχεια παρατίθενται ορισμένες βασικές διαφορικές σχέσεις.

Σύνδεση ανηγμένων παραμορφώσεων – μετατοπίσεων :

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (4.14)$$

και

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \quad (4.15)$$

Εξισώσεις συμβιβαστού παραμορφώσεων :

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_i}{\partial j^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_j}{\partial i^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{ij}}{\partial i \partial j} \quad (4.16)$$

όπου τα i, j είναι τα x, y ή y, z ή z, x

Εξισώσεις ισορροπίας :

$$\frac{\partial \sigma_{ix}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{iy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{iz}}{\partial z} + F_i = 0 \quad (4.17)$$

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

Οριακές συνθήκες :

$$\sigma_{ij}v_j = G_i \quad (4.18)$$

όπου v είναι η κλίση στο σύνορο και G_i η δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας στο σύνορο.

Επιπλέον :

$$u_i = F_i \quad (4.19)$$

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

Προκειμένου να επιτευχθεί η αριθμητική λύση του προβλήματος, χρησιμοποιείται η αρχή των δυνατών έργων. Αν σ_{ij} και ε_{ij} είναι αντίστοιχα οι ταυιστές των τάσεων και των ανηγμένων παραμορφώσεων, ενώ P_i και δ_i είναι τα φορτία και οι δυνατές μετακινήσεις, τότε το έργο που προκαλείται από τα φορτία πρέπει να ισούται με το δυνατό έργο των παραμορφώσεων. Δηλαδή θα πρέπει να ισχύει η σχέση :

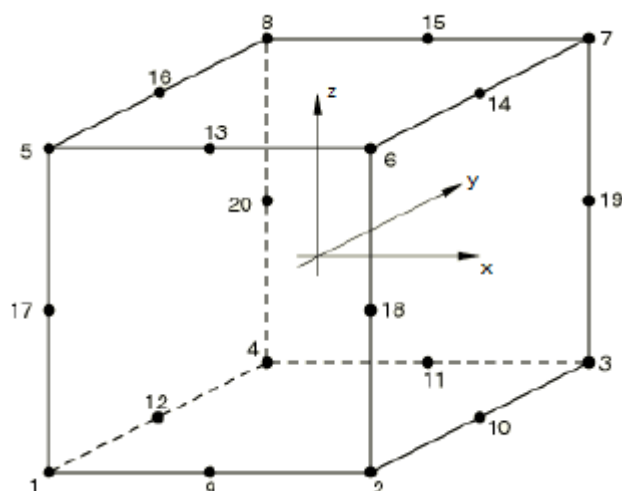
$$\sum P_i \delta_i = \int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV \quad (4.20)$$

Όπως προαναφέρθηκε, προκειμένου 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.

Κάθε πεπερασμένο στοιχείο αποτελείται από κάποιον αριθμό κόμβων (όπως 8 κόμβοι για ένα απλό κυβικό στοιχείο), όπου κάθε κόμβος έχει κάποιους βαθμούς ελευθερίας (3 μετακινήσεις x, y, z για προβλήματα της μηχανικής των παραμορφωσίμων). Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε τρισδιάστατο, εξαεδρικό στοιχείο που αποτελείται από 20 κόμβους, με κάθε κόμβο να έχει ως βαθμούς ελευθερίας τις τρεις μετακινήσεις που αναφέρονται παραπάνω (εικόνα 4.18). Ως εκ τούτου, 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 εξής :

$$[K]u = F \quad (4.21)$$

όπου u διάνυσμα διάστασης n ίσης με τους βαθμούς ελευθερίας του προβλήματος, όπου κάποιες από αυτές είναι δεσμευμένες ($u_i = \text{δέσμευση}$) 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 $n \times n$ και ονομάζεται πίνακας δυσκαμψίας. Στον πίνακα αυτόν περιέχεται η γεωμετρία του προβλήματος καθώς και οι φυσικές ιδιότητες των υλικών. Ονομάζεται πίνακας δυσκαμψίας διότι δείχνει τη δυσκαμψία του συστήματος στο 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 τις τιμές των u . Στη συνέχεια με κατάλληλες αναγωγές μπορούμε από τα u να βγάλουμε και άλλα παράγωγα μεγέθη όπως τις τάσεις. Είναι προφανές ότι η γεωμετρία του στοιχείου, δηλαδή το μέγεθος και το σχήμα του, όπως επίσης και οι συναρτήσεις παρεμβολής, επηρεάζουν την τελική συμπεριφορά του προσομοιώματος (Σακελλαρίου και Κοζάνης, 1997).



Εικόνα 4.18 Εξαεδρικό τρισδιάστατο στοιχείο είκοσι κόμβων

Τα βήματα που περιλαμβάνονται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι τα ακόλουθα (Huebner et al., 2001) :

- Διαίρεση του φυσικού χώρου: Η περιοχή προσομοίωσης διαιρείται στα πεπερασμένα διακριτά στοιχεία.
- Εκλογή συναρτήσεων παρεμβολής : Επιλέγονται οι κόμβοι σε κάθε στοιχείο και εν συνεχεία η συνάρτηση που θα παρεμβάλει την παραλλαγή της μεταβλητής στο στοιχείο.
- Καθορισμός ιδιοτήτων των στοιχείων : Χρησιμοποιείται το καθορισμένο πρότυπο πεπερασμένων στοιχείων, προκειμένου να καθοριστούν οι εξισώσεις των πινάκων που εκφράζουν τις ιδιότητες των ανεξάρτητων στοιχείων.
- Συγκρότηση των ιδιοτήτων των στοιχείων για τον προσδιορισμό των εξισώσεων του συστήματος : Οι εξισώσεις των πινάκων που εκφράζουν τις ιδιότητες των στοιχείων συνδυάζονται ούτως ώστε να προκύψει η εξίσωση πίνακα που εκφράζει τη συμπεριφορά ολόκληρου του συστήματος.
- Ορισμός των συνοριακών συνθηκών : Ορίζονται τιμές για συγκεκριμένες μεταβλητές σε κομβικές θέσεις ορίων (π.χ. πλευρές περιοχής ανάλυσης).
- Επίλυση συστήματος εξισώσεων : Από τον ορισμό των συνοριακών συνθηκών, προκύπτει μία ομάδα εξισώσεων, ικανή να επιλυθεί.
- Περαιτέρω υπολογισμοί : Από τις άγνωστες τιμές των μετατοπίσεων μπορούν να προκύψουν οι τάσεις και οι παραμορφώσεις.

5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΝΑΡΤΦ

5.1 Εισαγωγή

Η “εθνική πειραματική εγκατάσταση οδοστρωμάτων αεροδρομίων” (National Airport Pavement Test Facility, NARTF) είναι μια πειραματική εγκατάσταση μεγάλης κλίμακας, η οποία βρίσκεται στο τεχνολογικό κέντρο William Hughes της “Ομοσπονδιακής Διεύθυνσης Αεροπορίας” (Federal Aviation Administration, FAA), κοντά στο διεθνές αεροδρόμιο Atlantic City του New Jersey των ΗΠΑ. Η περάτωση των εργασιών για την κατασκευή των υποδομών έγινε τον Απρίλιο του 1999, με τη συγχρηματοδότηση της FAA, καθώς και της εταιρείας Boeing, έχοντας κοινούς στόχους.



Εικόνα 5.1 Η υπό ανέγερση εγκατάσταση National Airport Pavement Test Facility (NARTF)

Απαραίτητη προϋπόθεση ήταν η υποδομή να παρέχει τη δυνατότητα διεξαγωγής ελέγχων και παροχής πειραματικών αποτελεσμάτων γρήγορα και με μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας, τόσο για εύκαμπτα, όσο και για δύσκαμπτα οδοστρώματα, υπό συνθήκες που προσομοιάζουν ικανοποιητικά τις πραγματικές. Έτσι, η συλλογή των δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για έρευνα, προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα. Πεδία τέτοιων ερευνών αφορούν στην βελτίωση των διαδικασιών σχεδιασμού δαπέδων αεροδρομίων, την αξιολόγηση της επίδοσης των ήδη υπαρχόντων στις φθορές, κυρίως κάτω από τα φορεία της επόμενης γενεάς των μεταφορικών αεροσκαφών της Πολιτικής Αεροπορίας (New Generation Aircraft, NGA), όπως το Boeing-777 και τέλος, την επανεξέταση της μεθόδου σχεδιασμού CBR εύκαμπτων καταστρωμάτων.

Η εγκατάσταση της NARTF είναι πλήρως στεγασμένη και αποτελείται από ένα δάπεδο δοκιμών, το οποίο περιλαμβάνει πολλούς τύπους οδοστρωμάτων. Αξίζει να

σημειωθεί το γεγονός ότι η εγκατάσταση είναι “προστατευμένη” από περιβαλλοντικές συνθήκες όπως χιόνι, βροχή, παγετός, κ.ά., αφού όπως προαναφέρθηκε, είναι στεγασμένη. Φυσικά μεγέθη όπως η θερμοκρασία, επηρεάζονται από το φυσικό εξωτερικό περιβάλλον, διότι ο χώρος δεν είναι κλιματιζόμενος, αλλά παρουσιάζουν μικρότερο εύρος από αυτό του φυσικού εξωτερικού περιβάλλοντος.

Οι δοκιμαστικές φορτίσεις επιβάλλονται μέσω ενός ειδικά διαμορφωμένου οχήματος, το οποίο λειτουργεί ως προσομοιωτής φορέων αεροσκαφών. Κινείται επί σταθερών σιδηροτροχιών και έχει τη δυνατότητα να προσομοιάσει αεροσκάφη με βάρος πάνω από 589,7 t (5783 kN ή 1.300.000 lbs). Η εφαρμογή του φορτίου στους τροχούς των φορέων πραγματοποιείται μέσω κατάλληλα προσαρμοσμένου υδραυλικού συστήματος, με ικανότητα επιβολής πάνω από 34 t (333,6 kN ή 75.000 lbs) ανά τροχό. Επιπλέον, το όχημα είναι σε θέση να φέρει ταυτοχρόνως δύο διαφορετικά φορεία αποτελούμενα από έναν έως δέκα τροχούς. Οι αποστάσεις των τροχών ρυθμίζονται κατά το δοκούν, ενώ επίσης προγραμματίζεται και η εγκάρσια απόσταση των φορέων από τον άξονα του δαπέδου για κάθε διέλευση (εικόνα 5.2).



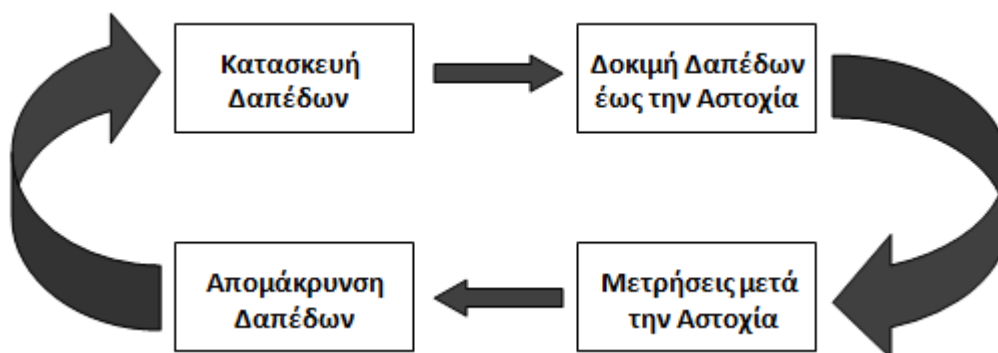
Εικόνα 5.2 Όχημα προσομοίωσης φορέων αεροσκαφών

Δύο τύποι αισθητήρων έχουν εγκιβωτιστεί σε πολλές θέσεις εντός των δαπέδων κατά τη φάση κατασκευής και χωρίζονται σε στατικούς και δυναμικούς. Οι μεν στατικοί αισθητήρες μετρούν τη θερμοκρασία, την υγρασία και την κατάσταση των ρωγμών (αντοχή) σε ωριαία βάση, ενώ οι δυναμικοί καταγράφουν τις αποκρίσεις των οδοστρωμάτων για μεγέθη που προκύπτουν από τα επιβαλλόμενα φορτία, όπως οι τάσεις κατά τη διαμήκη και

την εγκάρσια διεύθυνση του οδοστρώματος, οι παραμορφώσεις, κ.ά. και τίθενται σε εφαρμογή με την έναρξη των λειτουργιών του οχήματος. Τα δεδομένα που προκύπτουν συλλέγονται, αποθηκεύονται και ανακτώνται για επεξεργασία από ένα δίκτυο ηλεκτρονικών υπολογιστών (H/Y), ενώ διατίθενται ελεύθερα για δημόσια χρήση και από την σχετική ιστοσελίδα της FAA για τη NARTF.

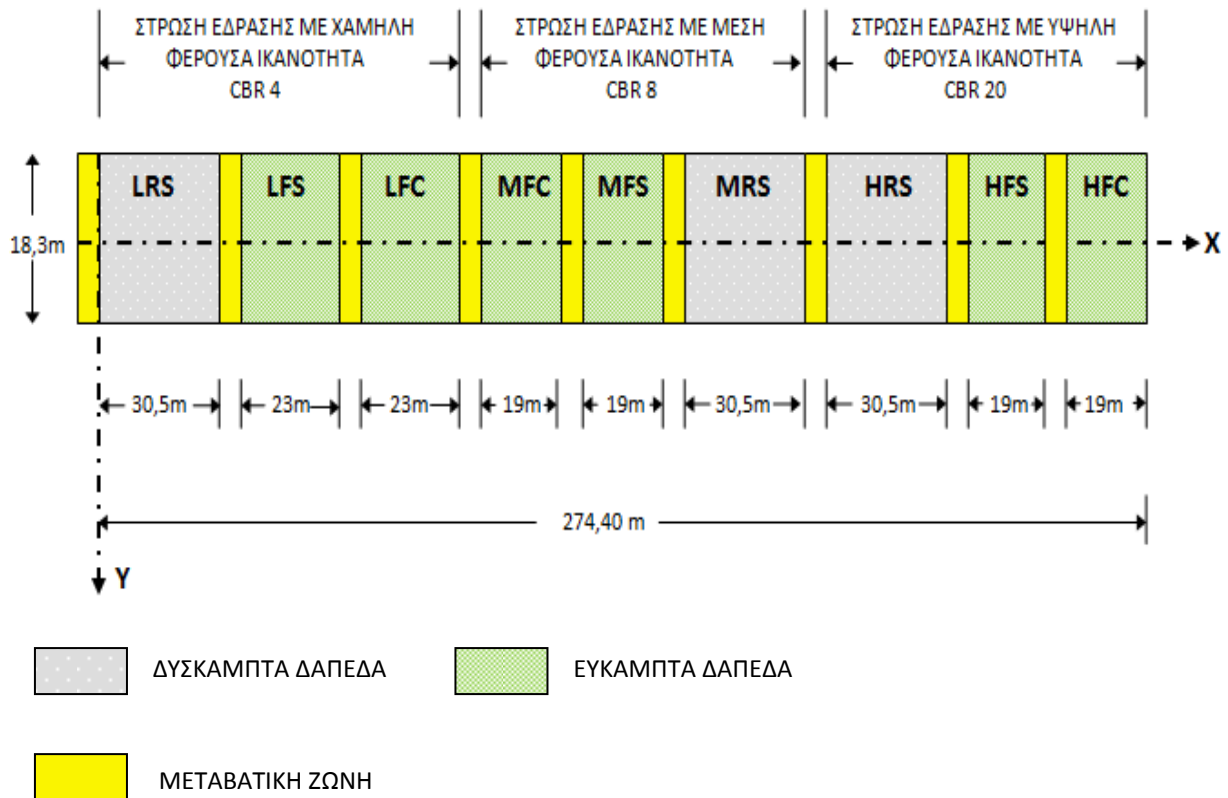
5.2 Οργάνωση πειραματικών δοκιμών

Όλα τα δεδομένα και οι σχετικές πληροφορίες που συλλέγονται στην NARTF είναι οργανωμένα σε “κατασκευαστικούς κύκλους” (Construction Cycles). Κάθε τέτοιος “κύκλος” περιλαμβάνει την κατασκευή των οδοστρωμάτων με τον ταυτόχρονο εγκιβωτισμό των αισθητήρων, τις δοκιμές των δαπέδων με την επιβολή φορτίων έως την αστοχία τους, μετρήσεις αφότου πραγματοποιηθεί η αστοχία (αυλακώσεις, ρωγμές κ.ά.) και έπειτα την απομάκρυνση των κατεστραμμένων δαπέδων (εικόνα 5.3). Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι κάθε ένας τέτοιος “κύκλος” περιλαμβάνει διαφορετική υποδομή και κωδικοποιείται με τα γράμματα CC (Construction Cycle) και έναν αριθμό από το ένα έως το πέντε. Η παρούσα εργασία βασίστηκε στο “Construction Cycle 1” (CC1), από τους πέντε συνολικά που έχουν ολοκληρωθεί.



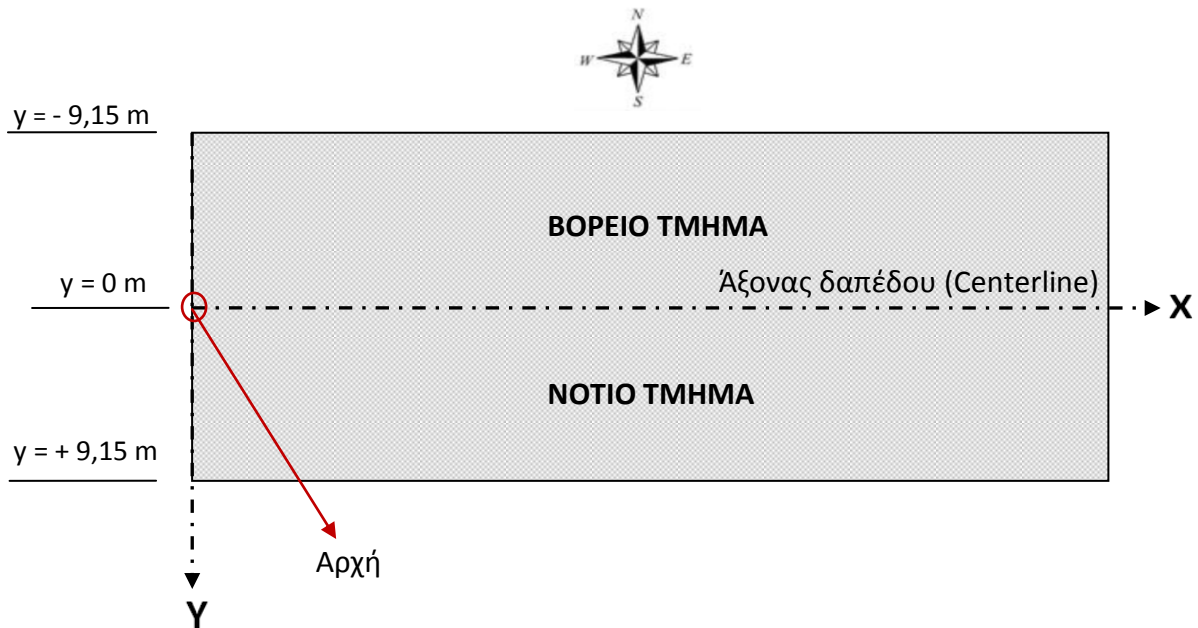
Εικόνα 5.3 Τυπικός “κατασκευαστικός κύκλος”

Για τον συγκεκριμένο κύκλο δοκιμών, η επιφάνεια του δαπέδου της εγκατάστασης έχει διαστάσεις 274,4 m (900 ft) μήκος και 18,3 m (60 ft) πλάτος και μπορεί να διαιρεθεί σε εννέα ανεξάρτητες δοκιμαστικές διατομές οδοστρωμάτων. Από αυτές, οι έξι είναι διατομές εύκαμπτων-ασφαλτικών οδοστρωμάτων, και οι τρεις δύσκαμπτων (πλάκα από σκυρόδεμα), κατασκευασμένες σε τρία διαφορετικά υλικά στρώσης έδρασης, τα οποία καθορίζουν την αντοχή της. Συγκεκριμένα, χαμηλής αντοχής με δείκτη φέρουσας ικανότητας CBR 4, μέσης αντοχής με CBR 8 και υψηλής αντοχής με CBR 20 (εικόνα 5.4).



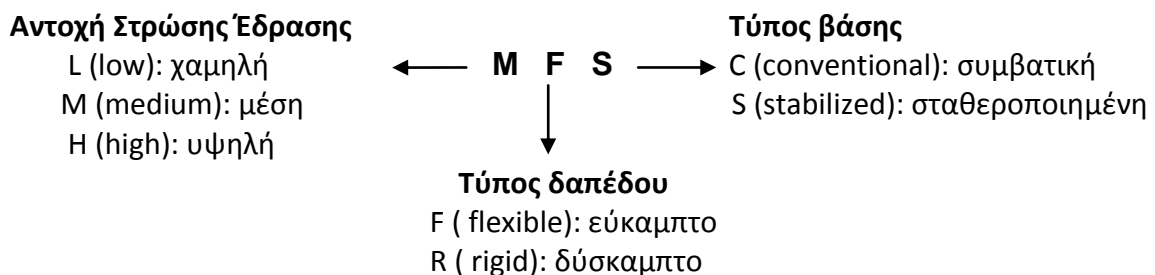
Εικόνα 5.4 Κάτοψη πειραματικών δαπέδων του κύκλου CC1

Τα δάπεδα δοκιμής, οι θέσεις των αισθητήρων, καθώς επίσης και οι θέσεις των φορείων είναι προσανατολισμένα σε μία κατεύθυνση, Δυτικό-Ανατολική, ενώ οι ακριβείς τους θέσεις καθορίζονται από ένα σύστημα συντεταγμένων x, y, z . Συγκεκριμένα, ο άξονας που διατρέχει τα δάπεδα κατά τη διαμήκη διεύθυνση είναι ο άξονας των x , έχοντας την αρχή του στο δυτικότερο άκρο και αυξάνει κατευθυνόμενος ανατολικά έως τα 274,40 m. Ο άξονας αυτός ταυτίζεται με τον άξονα των δαπέδων (Centerline) και τα χωρίζει σε δύο τμήματα, το βόρειο και το νότιο. Η εγκάρσια απόσταση καθορίζεται από τον άξονα των y , με αρχή η οποία βρίσκεται επί του άξονα των x , παίρνοντας θετικές τιμές στο νότιο τμήμα και αρνητικές στο βόρειο αντίστοιχα (εικόνα 5.5). Ο κατακόρυφος άξονας των z αρχίζει από την επιφάνεια του οδοστρώματος και έχει θετικές τιμές προς τις υποκείμενες στρώσεις, καθορίζοντας τη θέση-βάθος των αισθητήρων στις διατομές.

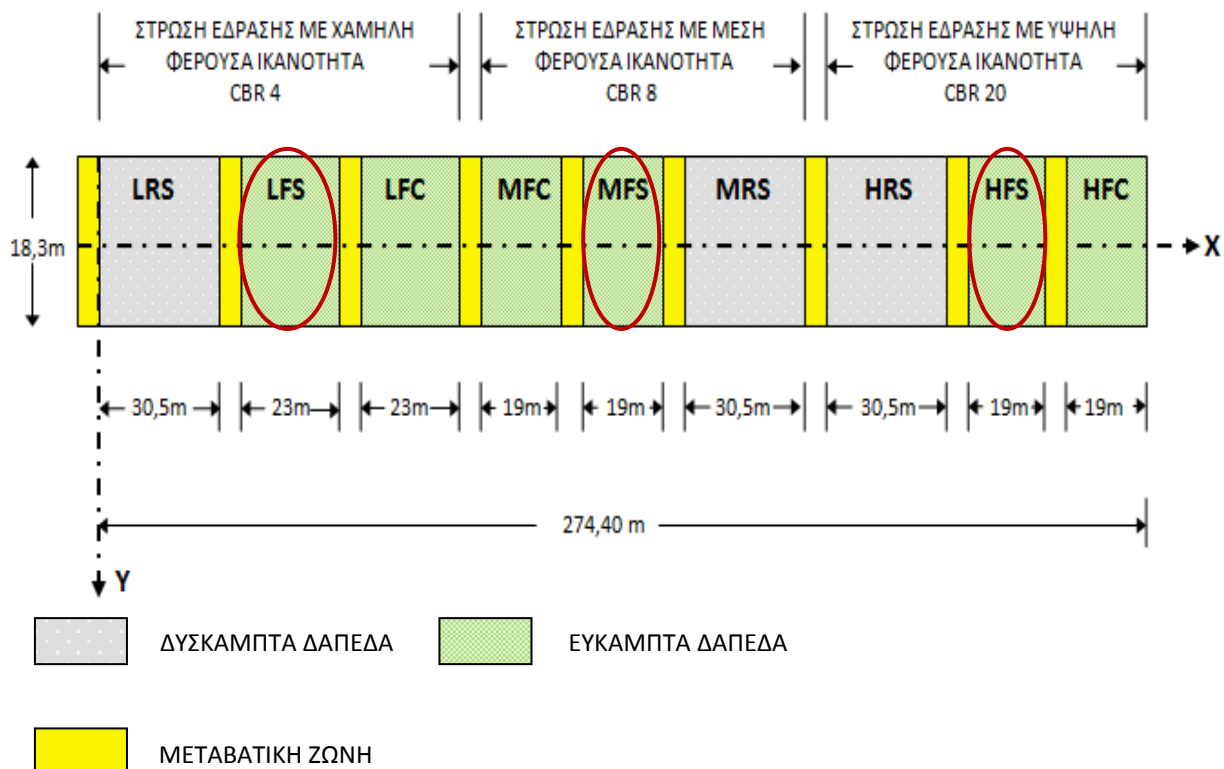


Εικόνα 5.5 Σύστημα Συντεταγμένων x, y των δαπέδων

Προκειμένου να διαχωρίζονται εύκολα οι διατομές μεταξύ τους, κωδικοποιούνται με τη βοήθεια τριών χαρακτήρων του αγγλικού αλφαβήτου (εικόνα 5.6). Ο πρώτος χαρακτήρας φανερώνει την αντοχή της στρώσης έδρασης (“L” για χαμηλή, “M” για μέση και “H” για υψηλή), ο δεύτερος δείχνει τον τύπο του δοκιμαστικού δαπέδου (“F” για εύκαμπτο και “R” για δύσκαμπτο) και ο τρίτος υποδεικνύει αν το υλικό της βάσης είναι συμβατικό, ασύνδετο κοκκώδες (Conventional, “C”) ή σταθεροποιημένο ασφαλτικό (Stabilized, “S”). Έτσι, το δάπεδο με τον κωδικό LRC είναι δύσκαμπτο, κατασκευασμένο σε στρώση έδρασης με χαμηλή αντοχή (CBR 4) και η βάση αποτελείται από συμβατικό, ασύνδετο κοκκώδες υλικό. Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετάει τα εύκαμπτα δάπεδα, με στρώση βάσης ασφαλτικού σκυροδέματος (εικόνα 5.7). Θα πρέπει να τονισθεί ότι επί της ουσίας η στρώση βάσης απουσιάζει, έχοντας αντικατασταθεί από τη μεγαλύτερου πάχους στρώση ασφαλτικού σκυροδέματος. Εντούτοις, θα αναφέρεται ως στρώση βάσης, καθότι έτσι παρουσιάζεται σε όλες τις σχετικές με την εγκατάσταση αναφορές. Επιπλέον, το ασφαλτικό υλικό δεν είναι σταθεροποιημένο όπως αρχικά προόριζαν οι κατασκευαστές, αλλά συμβατικό. Παρ’ όλα αυτά, η ορολογία αυτή θα διατηρηθεί, χάριν διάκρισης από τα υπόλοιπα δάπεδα της εγκατάστασης.

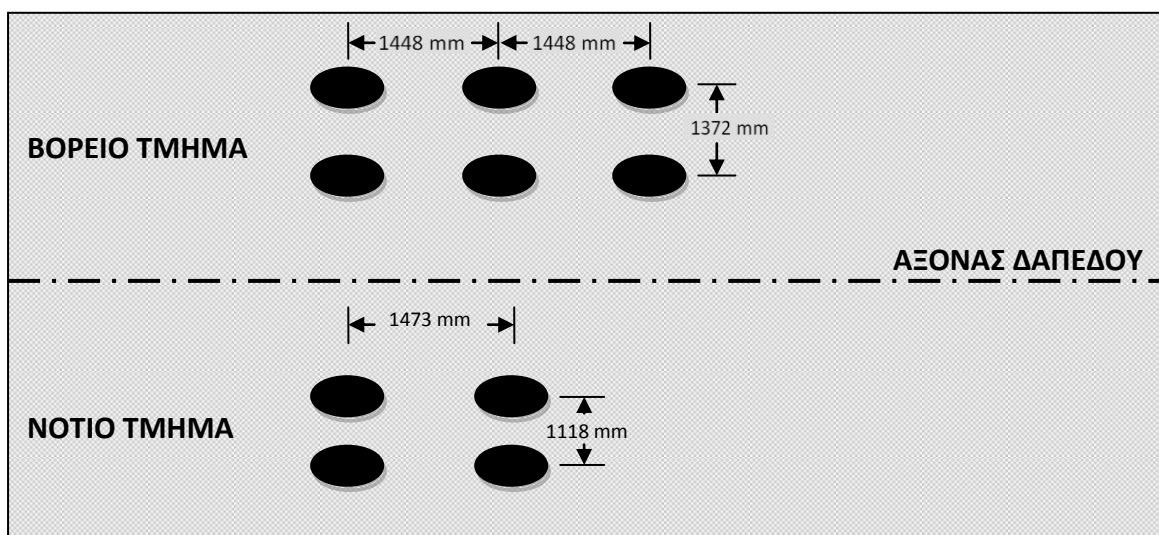


Εικόνα 5.6 Κωδικοποίηση δοκιμαστικών δαπέδων



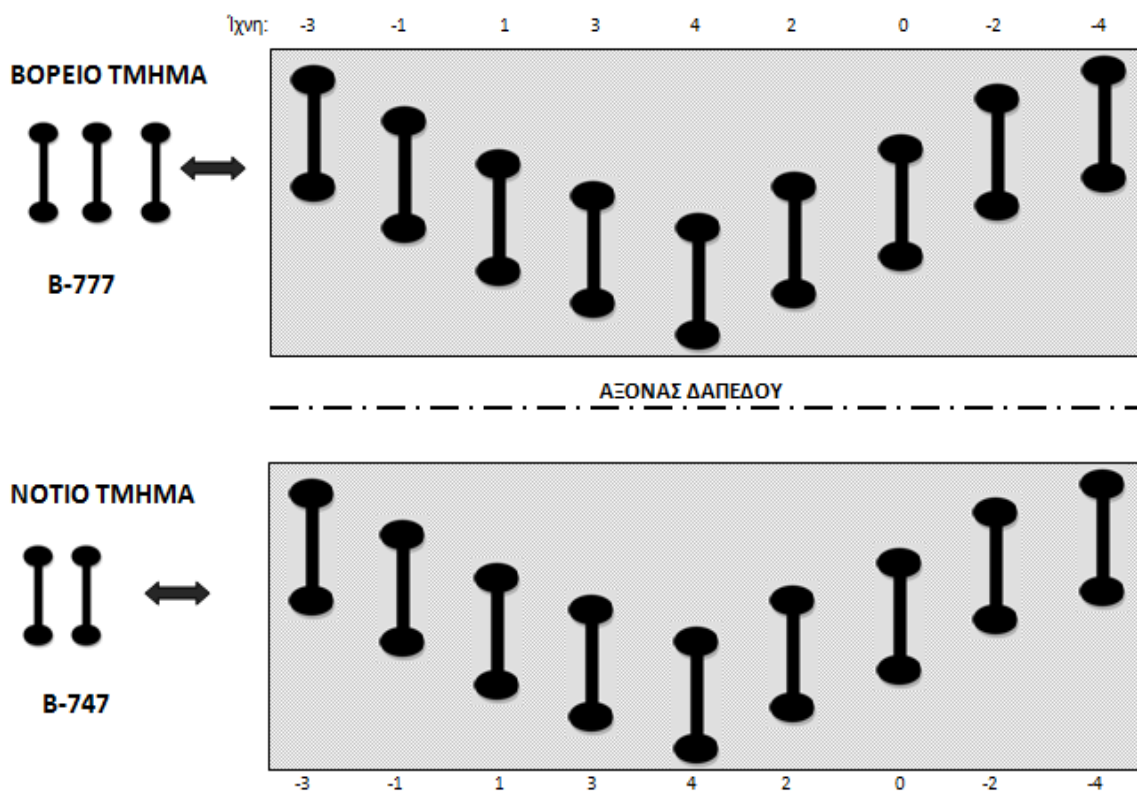
Εικόνα 5.7 Εύκαμπτα δάπεδα με στρώση βάσης από ασφαλτικό υλικό

Οι δοκιμές των δαπέδων πραγματοποιήθηκαν με δύο τύπους φορείων, ένας για κάθε τμήμα δαπέδου (βόρειο και νότιο). Στο βόρειο τμήμα δοκιμάστηκε το φορείο του αεροσκάφους Boeing-777 με διπλό τροχό και τριπλό άξονα, ενώ στο νότιο το φορείο του αεροσκάφους Boeing-747 (εικόνα 5.8). Αρχικά τέθηκε φορτίο τροχού και για τα δύο φορεία ίσο με 20,4 t (200,2 kN ή 45.000 lbs), με πίεση ελαστικού ίση με 1,30 Mpa (189 psi) και επιφάνεια επαφής τροχού-δαπέδου ίση με 0,318 m² (214,6 in²). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι έγιναν και άλλες δοκιμές, με φορτίο τροχού που έφτασε μέχρι και 29,5 t (289,1 kN ή 65.000 lbs) και πίεση ελαστικού 1,85 Mpa (268 psi). Τα φορτία επιβάλλονταν ταυτόχρονα και στα δύο τμήματα του κάθε δαπέδου, με ταχύτητα διέλευσης ίση με 8 km/hr (5 mph) όταν το φορτίο τροχού ήταν 20,4 t, καθότι για μετρήσεις με μεγαλύτερο φορτίο ανά τροχό, η ταχύτητα μειώθηκε έως και 4 km/hr (2,5 mph). Οι ταχύτητες αυτές αντιπροσωπεύουν την τροχοδρόμηση του αεροσκάφους από τη θέση στάθμευσης στη θέση απογείωσης. Τέτοιου είδους ελιγμοί προκαλούν τη μέγιστη φθορά στο οδόστρωμα, αφού το αεροσκάφος φέρει το μέγιστο δυνατό φορτίο (καύσιμα και ωφέλιμο φορτίο), ενώ παράλληλα η ταχύτητά του είναι χαμηλή.



Εικόνα 5.8 Φορεία προσομοίωσης στα δύο τμήματα των δοκιμαστικών δαπέδων

Τα οχήματα που κινούνται κατά μήκος μιας οδού ή ενός αεροδρομίου, γενικά δε διατρέχουν το οδόστρωμα στην ίδια εγκάρσια θέση, γιατί υπόκεινται σε κάποια πρόσθετη πλευρική μετατόπιση (Yoder/Witczak, 1975). Προκειμένου να ληφθεί υπόψη αυτή η παράμετρος, οι διελεύσεις των φορείων έγιναν σε εννέα διαφορετικά ίχνη (tracks), καθένα από τα οποία υποδεικνύει συγκεκριμένη απόσταση φορείου από τον άξονα του δαπέδου (εικόνα 5.9, όπου χάριν ευκρίνειας, απεικονίζεται μόνο ένας άξονας τροχών από τα δύο φορεία).



Εικόνα 5.9 Τα ίχνη (tracks) των διελεύσεων

Προκειμένου να γίνει σαφής διαχωρισμός μεταξύ των ίχνων, κωδικοποιούνται με έναν ακέραιο αριθμό από το “-4” έως “4”, συμπεριλαμβανομένου και του μηδενός, όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.9. Το ίχνος που θα ακολουθήσει το όχημα σε κάθε διέλευση καθορίζεται εκ των προτέρων και επιλέγεται έτσι, ώστε η εγκάρσια απόσταση των φορέων από τον άξονα του δαπέδου να περιγράφεται από την κανονική κατανομή με τυπική απόκλιση ίση με 77,5 cm ($\sigma = 77,5 \text{ cm}$ ή 30,5 in). Η τιμή αυτή της τυπικής απόκλισης της εγκάρσιας κατανομής της δοκιμαστικής κυκλοφορίας, αντιπροσωπεύει την αντίστοιχη των τροχοδρόμων αεροδρομίων. Αφού, σε τροχόδρομους αεροδρομίων, όπου υπάρχει εγκιβωτισμένη κυκλοφορία και χρησιμοποιούνται χρωματισμένες γραμμές, το σ είναι μεταξύ 60,96 cm και 106,68 cm (Yoder/Witczak, 1975).

Ένα πλήρες πρότυπο προσομοίωσης της προαναφερθείσας κατανομής σχετικά με την πλευρική μετατόπιση των φορέων, αποτελείται από μία ομάδα εξήντα έξι (66) διελεύσεων (εικόνα 5.10). Κάθε μία διέλευση κωδικοποιείται με ένα φυσικό αριθμό από το “1” έως το “66” (sequence number), ο οποίος φανερώνει την κατεύθυνση κίνησης του οχήματος. Συγκεκριμένα, οι ζυγοί αριθμοί υποδεικνύουν κατεύθυνση Ανατολικά προς Δυτικά, ενώ οι περιττοί Δυτικά προς Ανατολικά αντίστοιχα. Η πρώτη διέλευση έχει κατεύθυνση κίνησης Δυτικά προς Ανατολικά και με την ολοκλήρωσή της αντιστρέφεται η κατεύθυνση κίνησης των φορέων, από Ανατολικά προς Δυτικά κατά μήκος του ίδιου ίχνους, πραγματοποιώντας έτσι τη δεύτερη διέλευση. Εν συνεχεία τα φορεία μετακινούνται στο επόμενο ίχνος και ακολουθεί ένα ακόμη ζεύγος διελεύσεων, έως ότου να ολοκληρωθούν οι εξήντα έξι διελεύσεις του προτύπου. Τέλος, θα πρέπει να τονισθεί ότι τα δύο φορεία μετακινούνται ταυτόχρονα στο ίδιο ίχνος κάθε φορά, ούτως ώστε να ελαχιστοποιηθεί η αλληλεπίδραση τους λόγω εγγύτητας.

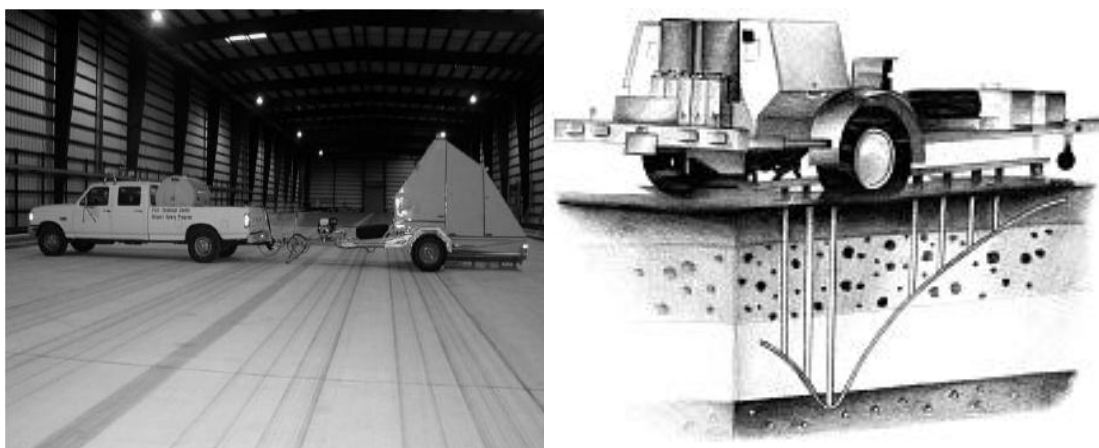
Συχνότητα Ιχνών	6,1%	9,1%	12,1%	15,2%	15,2%	15,2%	12,1%	9,1%	6,1%	
Ομάδα 66 διελεύσεων προτύπου	Κανονική κατανομή ($\sigma = 77,5 \text{ cm}$)									
					63,64	65,66	61,62			
				51,52	59,60	53,54	57,58	55,56		
		43,44	45,46	41,42	47,48	39,40	49,50	37,38		
	19,20	35,36	21,22	33,34	23,24	31,32	25,26	29,30	27,28	
	1,2	17,18	3,4	15,16	5,6	13,14	7,8	11,12	9,10	
Αριθμός Ιχνους	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	
Απόσταση βόρειου φορείου από τον άξονα του δαπέδου (m)	4,94	4,68	4,42	4,16	3,90	3,64	3,38	3,20	2,86	
Απόσταση νότιου φορείου από τον άξονα του δαπέδου (m)	2,72	3,00	3,24	3,50	3,76	4,02	4,28	4,54	4,80	

Εικόνα 5.10 Κατανομή διελεύσεων - συχνότητα χρήσης των ίχνων και θέσεις φορέων

5.3 Μετρήσεις με εφαρμογή παραμορφωσιμέτρου πίπτοντος βάρους (FWD)

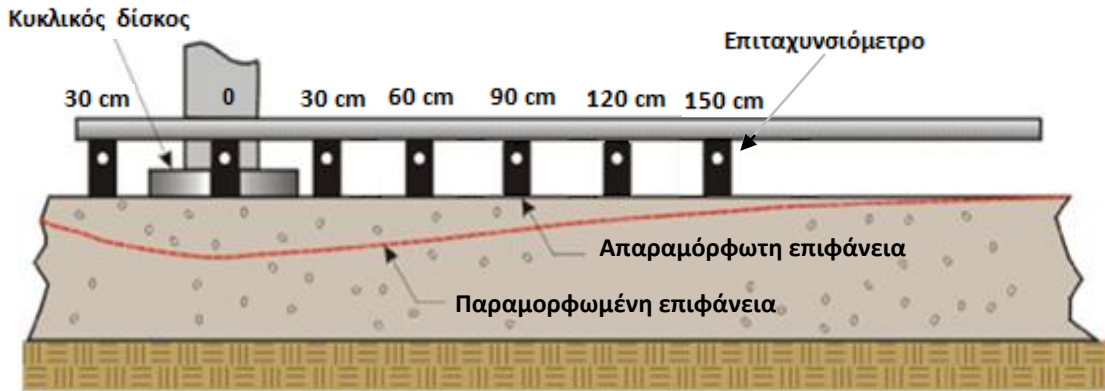
Παράλληλα με τις φορτίσεις από τα δύο φορεία, πραγματοποιήθηκαν και μη καταστρεπτικές μετρήσεις εκτίμησης της φέρουσας ικανότητας των δαπέδων, με την εφαρμογή του συστήματος του Παραμορφωσιμέτρου Πίπτοντος Βάρους (FWD). Οι μετρήσεις έγιναν για διάφορες μέρες και ώρες στο διάστημα του πρώτου κατασκευαστικού κύκλου.

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε η συσκευή KUAB 240 FWD της FAA (εικόνα 5.11). Η συσκευή χρησιμοποιεί έναν κυκλικό δίσκο για την πρόσπτωση του βάρους, διαμέτρου 30,5 cm (12 in). Πραγματοποιούνται τέσσερις δοκιμές σε κάθε θέση, διάρκειας 27 έως 30 msec, με φορτία 160 kN (36.000 lbs), 53 kN (12.000 lbs), 106 kN (24.000 lbs) και 160 kN (36.000 lbs) αντίστοιχα. Η πρώτη δοκιμή κάθε φορά, πραγματοποιείται προκειμένου να εξισορροπήσει τυχόν προϋπάρχουσες παραμορφώσεις και γι αυτό δε χρησιμοποιείται στις αναλύσεις (Garg & Marsey, 2002).



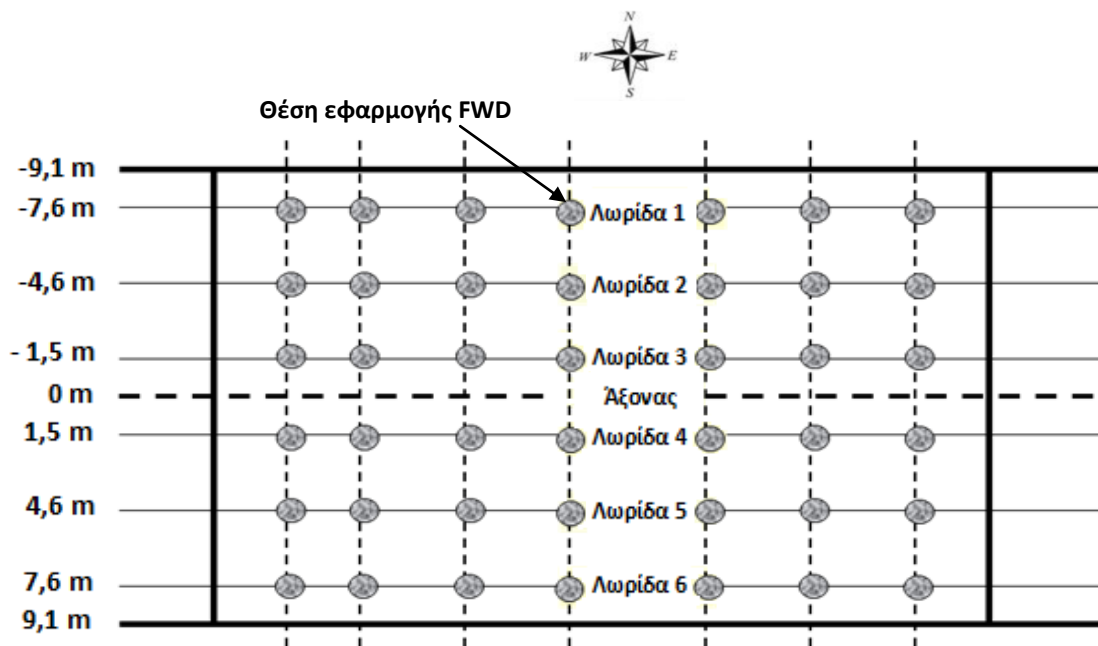
Εικόνα 5.11 Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους (FWD) της FAA

Η μέτρηση των ελαστικών υποχωρήσεων καταγράφεται από επτά επιταχυνσιόμετρα, τοποθετημένα σε συγκεκριμένες αποστάσεις από τον κυκλικό δίσκο. Ταυτόχρονα καταγράφεται το μέγεθος του προσπίπτοντος φορτίου, ενώ μετρώνται και οι θερμοκρασίες του περιβάλλοντα χώρου και της επιφάνειας του δαπέδου, στο οποίο γίνεται η εφαρμογή του FWD. Στην εικόνα 5.12 φαίνονται οι θέσεις των επιταχυνσιόμετρων και οι αποστάσεις τους από τον κυκλικό δίσκο. Συγκεκριμένα, τοποθετείται επιταχυνσιόμετρο επί του κυκλικού δίσκου (D_0), ένα δεύτερο σε απόσταση 30,5 cm (12 in) μπροστά από το σημείο πρόσπτωσης του φορτίου (D_1) και τα υπόλοιπα σε αποστάσεις των 30 cm (12 in) (D_2), 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 του κυκλικού δίσκου.



Εικόνα 5.12 Αποστάσεις επιταχυνσιόμετρων από τον κυκλικό δίσκο

Δοκιμές FWD έγιναν τόσο στο βόρειο, όσο και στο νότιο τμήμα των δαπέδων, πάνω σε έξι λωρίδες (lanes). Σε κάθε λωρίδα λάμβαναν χώρα επτά δοκιμές κάθε φορά, με την μεταξύ τους απόσταση να είναι ίση με τρία μέτρα (3m), κατά τη διαμήκη διεύθυνση (εικόνα 5.13).



Εικόνα 5.13 Θέσεις εφαρμογής FWD

5.4 Τυπικές διατομές εύκαμπτων δαπέδων

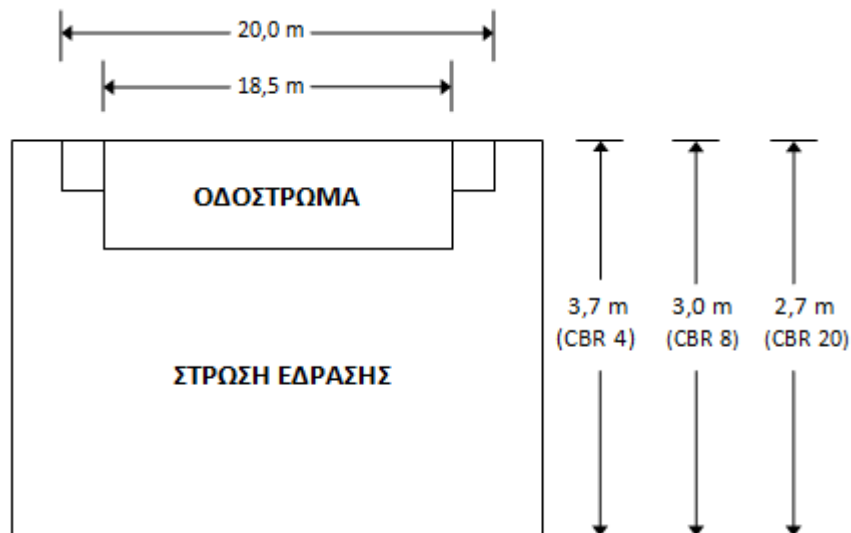
Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη συμπεριφορά των εύκαμπτων δαπέδων με στρώση βάσης από ασφαλτικό υλικό (LFS, MFS, HFS). Για την ακρίβεια, διερευνά τις οριζόντιες παραμορφώσεις κατά τη διαμήκη διεύθυνση των δαπέδων, στους πυθμένες της επιφανειακής στρώσης και της βάσης αντίστοιχα, για τον πρώτο κατασκευαστικό κύκλο

(CC1). Οι διατομές αυτές απεικονίζονται στην εικόνα 5.14. Το χαρακτηριστικό των τριών αυτών διατομών είναι ότι η επιφανειακή στρώση και η βάση κατασκευάστηκαν από το ίδιο υλικό, τύπου P-401, ενώ η υπόβαση από υλικό τύπου P-209 για τις διατομές LFS και MFS, ενώ η HFS δεν έχει στρώση υπόβασης.



Εικόνα 5.14 Τυπικές διατομές εύκαμπτων δαπέδων, με στρώση βάσης από ασφαλτικό σκυρόδεμα (ποιοτικά σχήματα)

Το συνολικό ύψος των διατομών διαφέρει ανάλογα την κατηγορία της στρώσης έδρασης, κάτι το οποίο δε γίνεται αντιληπτό από τις διατομές της εικόνας 5.14. Τα ύψη κυμαίνονται από 2,7 m για διατομές με στρώση έδρασης υψηλής φέρουσας ικανότητας, έως 3,7 m για διατομές με στρώση έδρασης χαμηλής φέρουσας ικανότητας (εικόνα 5.15).



Εικόνα 5.15 Συνολικά βάθη διατομών ανάλογα με την φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης

Ένας αξιοσημείωτος αριθμός μετρήσεων των φυσικών ιδιοτήτων των δαπέδων της ΝΑΡΤΦ έγινε σε όλα τα στάδια της κατασκευής τους, αλλά και μετά την ολοκλήρωσή τους. Σκοπός των μετρήσεων ήταν ο έλεγχος της ποιότητας των δαπέδων (Quality Control, QC) και κατ' επέκταση η αποδοχή τους ή μη, καθώς επίσης και ο προσδιορισμός της κατάστασης των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε στρώση. Για τον έλεγχο της ποιότητας των

οδοστρωμάτων έλαβαν χώρα μετρήσεις υγρασίας, πυκνότητας και κοκκοδιαβαθμίσεις, ενώ για τις ιδιότητες των υλικών έγιναν CBR δοκιμές. Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις των υλικών κάθε στρώσης αποθηκεύτηκαν σε υπολογιστικά φύλλα Microsoft Excel™.

Η επιφανειακή στρώση, αλλά και η βάση των τριών διατομών κατασκευάστηκε από ασφαλτικό σκυρόδεμα τύπου P-401 (Asphalt Concrete), το οποίο χρησιμοποιείται για υψηλής ποιότητας οδοστρώματα, όταν προβλέπεται μεγάλος κυκλοφοριακός φόρτος ή/και μεγάλα φορτία. Αποτελείται από μίγμα αδρανών και ασφαλτούχων υλικών και είναι σύμφωνο με την πρότυπη τεχνική προδιαγραφή της FAA, AC 150/5370-10A. Με την ίδια πρότυπη τεχνική προδιαγραφή είναι σύμφωνο και το υλικό της υπόβασης των διατομών LFS, MFS, που είναι θραυστό ασύνδετο αμμοχάλικο τύπου P-209 (Crushed Stone). Τα υλικά των δαπέδων που εξετάζει η παρούσα διπλωματική εργασία παρατίθενται στον πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1 Υλικά στρώσεων δοκιμαστικών δαπέδων

Τύπος Δαπέδου	Στρώση Έδρασης	Υλικό Επιφ. Στρώσης	Πάχος Επιφ. Στρώσης (cm)	Υλικό βάσης	Πάχος Βάσης (cm)	Υλικό Υπόβασης	Πάχος Υπόβασης (cm)
LFS	CBR 4	P-401	12,7	P-401	12,4	P-209	75,3
MFS	CBR 8	P-401	12,7	P-401	12,4	P-209	21,6
HFS	CBR 20	P-401	13	P-401	11,4		

Τα υλικά της στρώσης έδρασης διέφεραν για κάθε διατομή. Για τα δάπεδα με στρώση έδρασης χαμηλής φέρουσας ικανότητας (CBR 4), χρησιμοποιήθηκε μίγμα ιλύος και αμμοχαλικώδους αργίλου (County Sand and Stone Clay, CS&SC), ταξινομημένο ως MH-CH (ιλύς υψηλής πλαστιμότητας-άργιλος υψηλής πλαστιμότητας) στο “Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης Εδαφών” (ASTM Unified Soil Classification System – USCS). Στις διατομές με στρώση έδρασης μέσης φέρουσας ικανότητας (CBR 8) χρησιμοποιήθηκε άργιλος (DuPont), με κατάταξη CL-CH (άργιλος χαμηλής πλαστιμότητας-άργιλος υψηλής πλαστιμότητας) κατά ASTM-USCS. Το υπέδαφος της περιοχής χρησιμοποιήθηκε ως στρώση έδρασης υψηλής φέρουσας ικανότητας (CBR 20), ταξινομημένο ως SW-SM (καλά διαβαθμισμένη άμμος-ιλυώδης άμμος) στο ASTM-USCS (Garg and Hayhoe, 2001).

Το “Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης Εδαφών” (ASTM Unified Soil Classification System – USCS) χρησιμοποιείται για να περιγράψει την υφή, το μέγεθος και το είδος των κόκκων των εδαφών, έχοντας εφαρμογή σε μεγάλη γκάμα ασύνδετων υλικών. Τα υλικά κατατάσσονται και κωδικοποιούνται από δύο γράμματα της αγγλικής αλφαβήτου. Το πρώτο γράμμα αναφέρεται στο είδος του υλικού και το δεύτερο στη διαβάθμιση ή την πλαστιμότητά του.

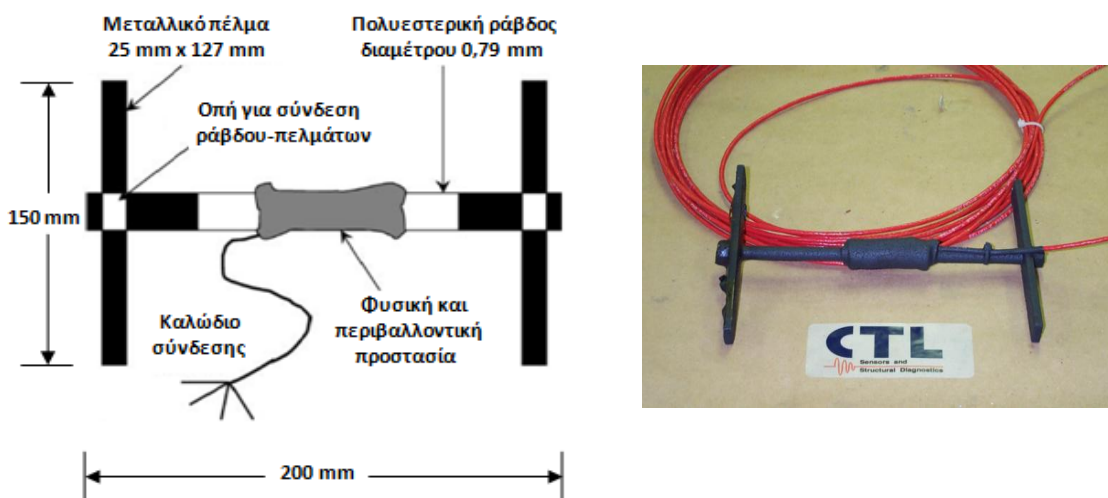
5.5 Αισθητήρες μέτρησης της απόκρισης των δαπέδων

Όπως έχει αναφερθεί στο δεύτερο κεφάλαιο, μία από τις βασικές παραμέτρους στον σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, είναι η κόπωση της στρώσεως του ασφαλτικού σκυροδέματος, η αστοχία της οποίας σχετίζεται με το μέγεθος των οριζόντιων ανηγμένων εφελκυστικών παραμορφώσεων (tensile strains) στον πυθμένα της στρώσης. Ο μηχανισμός της κόπωσης συσχετίζει τις επαναλήψεις των φορτίσεων του οδοστρώματος με τη μέγιστη οριζόντια ανηγμένη εφελκυστική παραμόρφωση που αναπτύσσεται σε κάθε φόρτιση. Έτσι, η μέτρηση των παραμορφώσεων αυτών καθίσταται απαραίτητη προϋπόθεση για την αξιολόγηση της επίδοσης των δαπέδων (Garg and Hayhoe, 2001).

Για αυτόν το σκοπό, εγκιβωτίστηκαν οι δύο τύποι αισθητήρων που έχουν αναφερθεί (στατικοί και δυναμικοί), σε διάφορες θέσεις και βάθη, μετρώντας μεγέθη όπως θερμοκρασία, υγρασία, οριζόντιες ανηγμένες παραμορφώσεις, τάσεις, υποχωρήσεις κ.ά. Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά, στα δάπεδα που προαναφέρθηκαν, τις οριζόντιες ανηγμένες παραμορφώσεις στους πυθμένες της επιφανειακής στρώσης και της βάσης αντίστοιχα, οι οποίες μετρώνται από τους αισθητήρες ASGs (Asphalt Strain Gages, ASGs).

Το σχήμα των αισθητήρων είναι τύπου “H” και εφαρμόζονται στο μέσο του μήκους κυλινδρικών πολυεστερικών ράβδων, με δύο μεταλλικά πέλματα στα άκρα που στηρίζουν τις ράβδους. Τέσσερα ωμόμετρα της τάξεως των 350 Ω, δύο αξονικά και δύο εγκάρσια, (προσανατολισμένα σε διεύθυνση ενενήντα μοιρών σε σχέση με τους ενεργούς αισθητήρες) χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε ράβδο. Επίσης, συνδέθηκαν ηλεκτρικά με ένα πλήρες κύκλωμα γέφυρας Wheatstone και τοποθετήθηκαν πάνω στην πολυεστερική ράβδο, ούτως ώστε να μπορεί να μετρηθεί η διαμήκης-οριζόντια, ανηγμένη παραμόρφωση της ράβδου (Garg and Hayhoe, 2001). Μια σχηματική απεικόνιση των κύριων κατασκευαστικών χαρακτηριστικών των ASGs, παρουσιάζεται στην εικόνα 5.16.

Ο αισθητήρας περιβάλλεται από πολυαμίδιο, με μεγάλη, τραχιά συγκολλημένη επικάλυψη χαλκού. Επίσης, το ηλεκτρονικό κύκλωμα του αισθητήρα είναι επικαλυμμένο με κερί και εποξικά, για φυσική και περιβαλλοντική προστασία. Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα (Garg and Hayhoe, 2001).



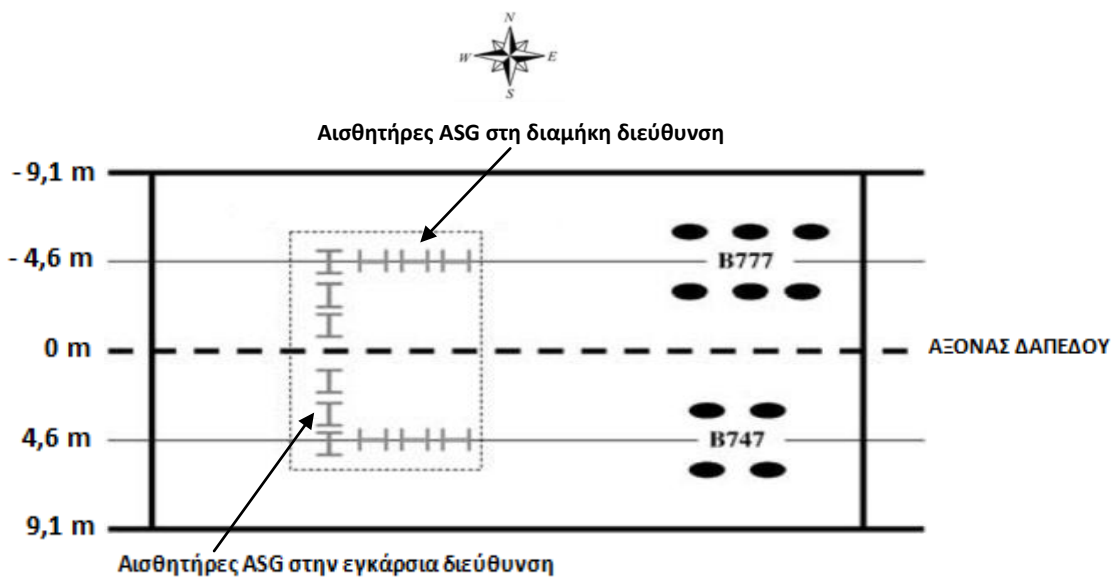
Εικόνα 5.16 Κατασκευαστικές λεπτομέρειες- φωτογραφία του αισθητήρα ASG

Οι αισθητήρες ASGs παρουσιάζουν δυσκολία στην εγκατάστασή τους, καθότι είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι σε υψηλές θερμοκρασίες και στις επιπτώσεις από τις διαδοχικές διελεύσεις/δονήσεις μετά την τοποθέτησή τους (Weinmann et al., 2004). Γι αυτό, οι καταγραφές των αισθητήρων θα πρέπει να εξετάζονται με κριτικό βλέμμα και να ελέγχονται για τυχόν σφάλματα.

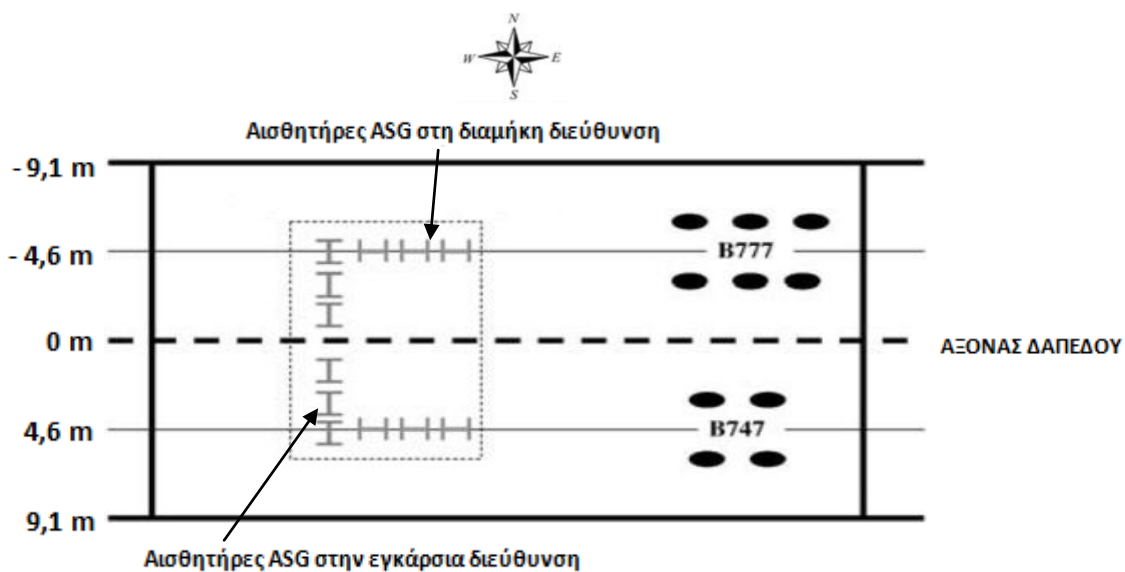
Πίνακας 5.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα ASG

Κατασκευαστής/Τύπος	CTL/Αισθητήρας ASG
Ακρίβεια μέτρησης	1 microstrain
Ανάλυση	0,1 microstrain
Εύρος μέτρησης	2000 microstrains
Εύρος θερμοκρασιακής λειτουργίας	0 °C-150 °C
Συχνότητα καταγραφής	> 100 Hz
Στατικός/Δυναμικός	Δυναμικός (100 καταγραφές/sec)

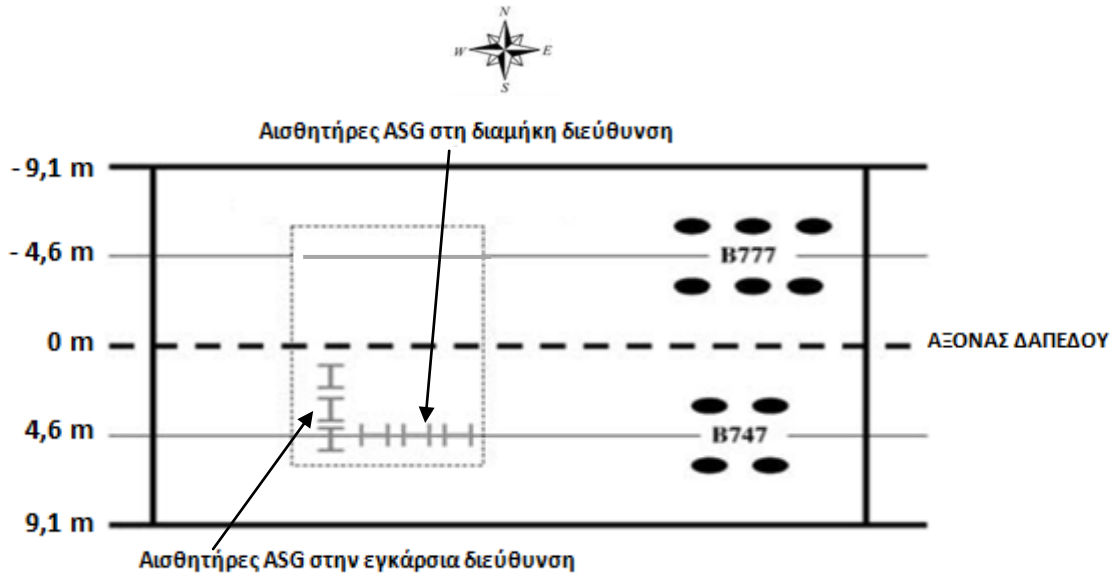
Εγκιβωτίστηκαν συνολικά ενενήντα έξι αισθητήρες τύπου ASG στα εύκαμπτα δάπεδα της NARTF, εκ των οποίων οι εξήντα έξι στα δάπεδα που εξετάζει η παρούσα διπλωματική εργασία. Συγκεκριμένα, στο LFS ενσωματώθηκαν εικοσιτέσσερις αισθητήρες συμμετρικά για τα δύο τμήματα (βόρειο και νότιο), από τους οποίους οι δώδεκα σε βάθος 11,4 cm (4,5 in) από την επιφάνεια και οι υπόλοιποι 24,1 cm (9,5 in) αντίστοιχα. Επιπλέον, οι μισοί αισθητήρες σε κάθε βάθος ήταν τοποθετημένοι κατά τη διαμήκη διεύθυνση, μετρώντας τις οριζόντιες, διαμήκεις ανηγμένες παραμορφώσεις, ενώ οι άλλοι μισοί τοποθετήθηκαν εγκαρσίως, για την μέτρηση των εγκάρσιων ανηγμένων παραμορφώσεων. Τα ίδια ακριβώς ισχύουν και για το δάπεδο MFS. Το HFS περιέχει δεκαοχτώ αισθητήρες αντί για εικοσιτέσσερις που είχαν τα προηγούμενα δύο, καθώς στο βόρειο τμήμα δεν τοποθετήθηκαν οι έξι αισθητήρες (τρεις διαμήκως και τρεις εγκαρσίως) στο βάθος των 11,4 cm. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται οι κατόψεις με τις θέσεις των αισθητήρων στα δάπεδα, καθώς επίσης και το βάθος τους στις διατομές.



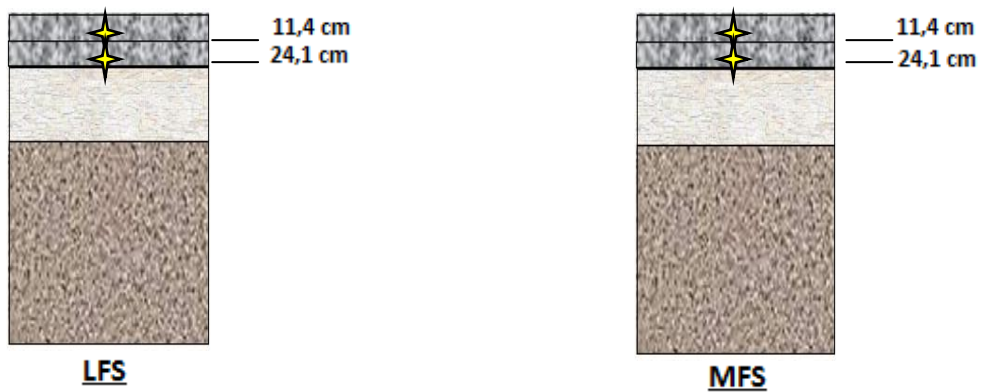
Εικόνα 5.18 Θέσεις αισθητήρων στα δάπεδα LFS, MFS για τα βάθη των 11,4 και 24,1 cm



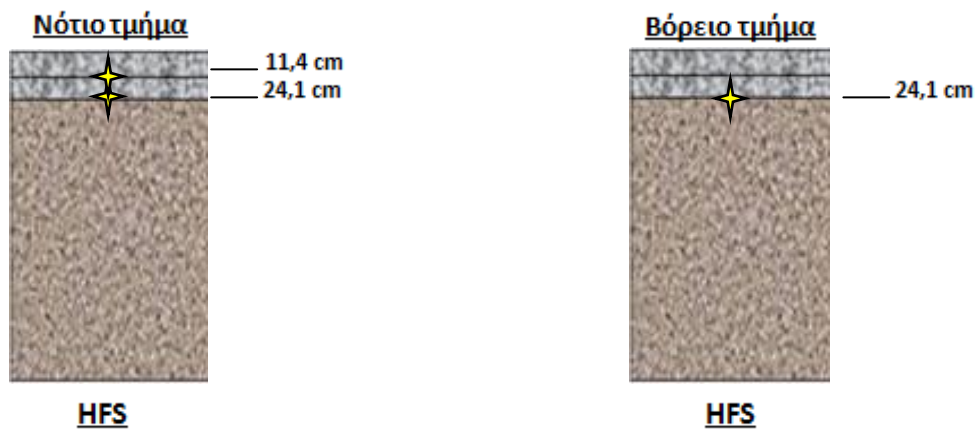
Εικόνα 5.19 Θέσεις αισθητήρων στο δάπεδο HFS για βάθος 24,1 cm



Εικόνα 5.20 Θέσεις αισθητήρων στο δάπεδο HFS για βάθος 11,4 cm



Εικόνα 5.21 Βάθη αισθητήρων ASG και στα δύο τμήματα (βόρειο και νότιο)



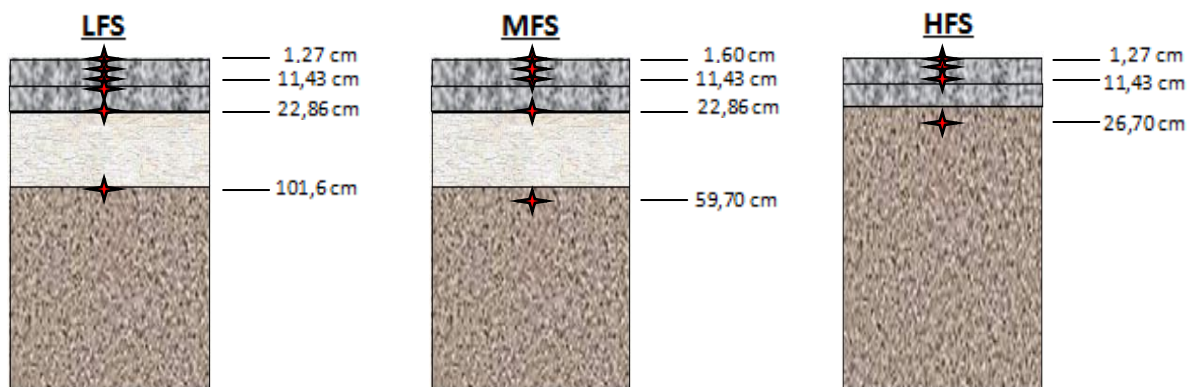
Εικόνα 5.22 Βάθη αισθητήρων ASG

Στον πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι κωδικές ονομασίες και οι συντεταγμένες των αισθητήρων που είναι τοποθετημένοι κατά τη διαμήκη διεύθυνση, δηλαδή κατά την κατεύθυνση κίνησης των φορέων, αφού η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά τις οριζόντιες ανηγμένες παραμορφώσεις σε αυτήν τη διεύθυνση.

Πίνακας 5.3 Συντεταγμένες αισθητήρων κατά τη διαμήκη διεύθυνση

Δάπεδα	Αισθητήρες (ονομασία)	Συντεταγμένες Αισθητήρων κατά Χ(m)	Συντεταγμένες Αισθητήρων κατά Υ(m)	Συντεταγμένες Αισθητήρων κατά Ζ(cm)
LFS	LBS1	48,73	-4,6	24,1
	LBS2	48,00	-4,6	24,1
	LBS3	47,34	-4,6	24,1
	LBS10	47,34	4,6	24,1
	LBS11	48,00	4,6	24,1
	LBS12	48,73	4,6	24,1
	LSS1	48,73	-4,6	11,4
	LSS2	48,00	-4,6	11,4
	LSS3	47,30	-4,6	11,4
	LSS10	47,30	4,6	11,4
	LSS11	48,00	4,6	11,4
	LSS12	48,73	4,6	11,4
MFS	MBS1	134,84	-4,6	24,1
	MBS2	134,11	-4,6	24,1
	MBS3	133,40	-4,6	24,1
	MBS10	133,40	4,6	24,1
	MBS11	134,11	4,6	24,1
	MBS12	134,84	4,6	24,1
	MSS1	134,84	-4,6	11,4
	MSS2	134,11	-4,6	11,4
	MSS3	133,40	-4,6	11,4
	MSS10	133,40	4,6	11,4
	MSS11	134,11	4,6	11,4
	MSS12	134,84	4,6	11,4
HFS	HBS1	237.71	-4,6	24,1
	HBS2	237.00	-4,6	24,1
	HBS3	236.27	-4,6	24,1
	HBS10	236.27	4,6	24,1
	HBS11	237.00	4,6	24,1
	HBS12	237.71	4,6	24,1
	HSS10	236.27	4,6	11,4
	HSS11	237.00	4,6	11,4
	HSS12	237.71	4,6	11,4

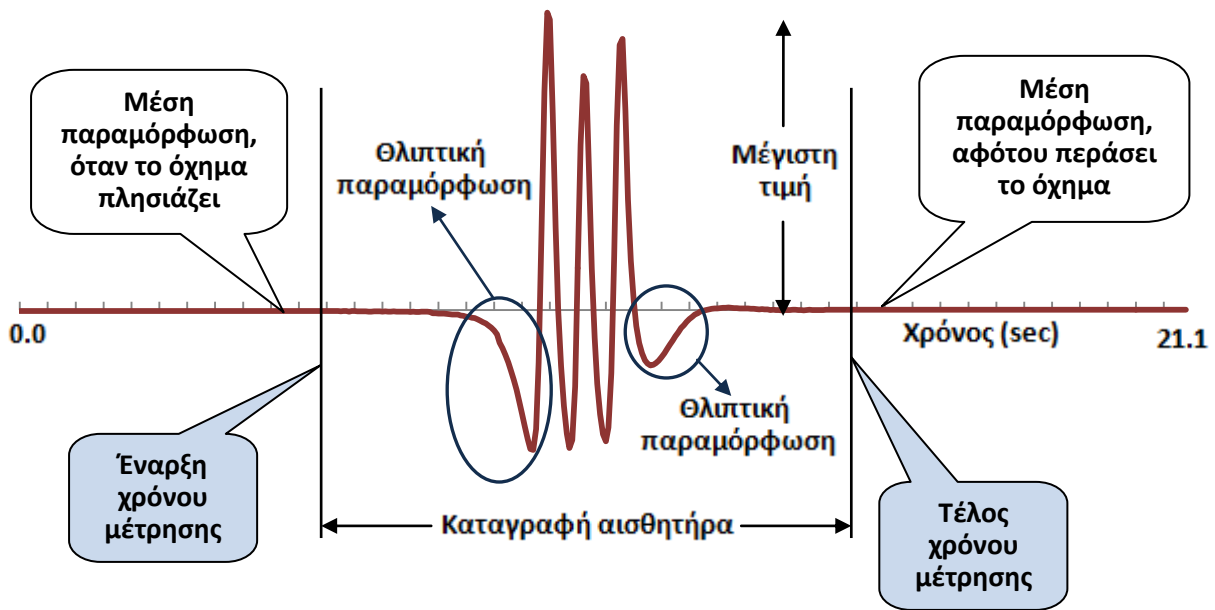
Βασικός παράγοντας που επηρεάζει τη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων είναι η θερμοκρασία. Για το λόγο αυτό, τοποθετήθηκαν ηλεκτρονικοί αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας (Temperature Gages, TGs) τύπου Omega Thermistor, σε διάφορα βάθη για κάθε διατομή (Garg and Hayhoe, 2001). Συγκεκριμένα, για το LFS εγκιβωτίστηκαν αισθητήρες σε βάθη 1,27 cm, 2,54 cm, 6,35 cm, 11,43 cm, 22,86 cm και 101,6 cm από την επιφάνεια. Τα αντίστοιχα βάθη στο MFS είναι 1,60 cm, 6,35 cm, 11,43 cm, 22,86 cm, 59,70 cm, ενώ στο HFS 1,27 cm, 6,35 cm, 11,43 cm και 26,70 cm (εικόνα 5.23, στην οποία δεν αναγράφονται τα βάθη για όλους τους αισθητήρες, χάριν ευκρίνειας).



Εικόνα 5.23 Βάθη αισθητήρων μέτρησης θερμοκρασίας (TG)

5.6 Τυπικά διαγράμματα ανηγμένων παραμορφώσεων

Για κάθε διέλευση (event), το όχημα ενεργοποιεί με την κίνησή του τον εκάστοτε αισθητήρα ανηγμένων παραμορφώσεων. Το όχημα συγχρονίζεται με τη μονάδα επεξεργασίας του σήματος των αισθητήρων (Signal Processing Unit – SPU), αφού η ακριβής θέση του οχήματος είναι γνωστή. Δημιουργείται έτσι ένα σημείο αναφοράς, το οποίο βοηθάει στην επεξεργασία των τιμών αποκρίσεως του αισθητήρα σε συνάρτηση με το χρόνο και κατ' επέκταση σε συνάρτηση με τη θέση του οχήματος. Η εικόνα που ακολουθεί, αντιπροσωπεύει το διάγραμμα των παραμορφώσεων, όπως καταγράφονται από τον αισθητήρα σε συνάρτηση με το χρόνο, κατά τη διάρκεια μιας διέλευσης.



Εικόνα 5.24 Ανάλυση διαγράμματος ανηγμένων παραμορφώσεων-χρόνου

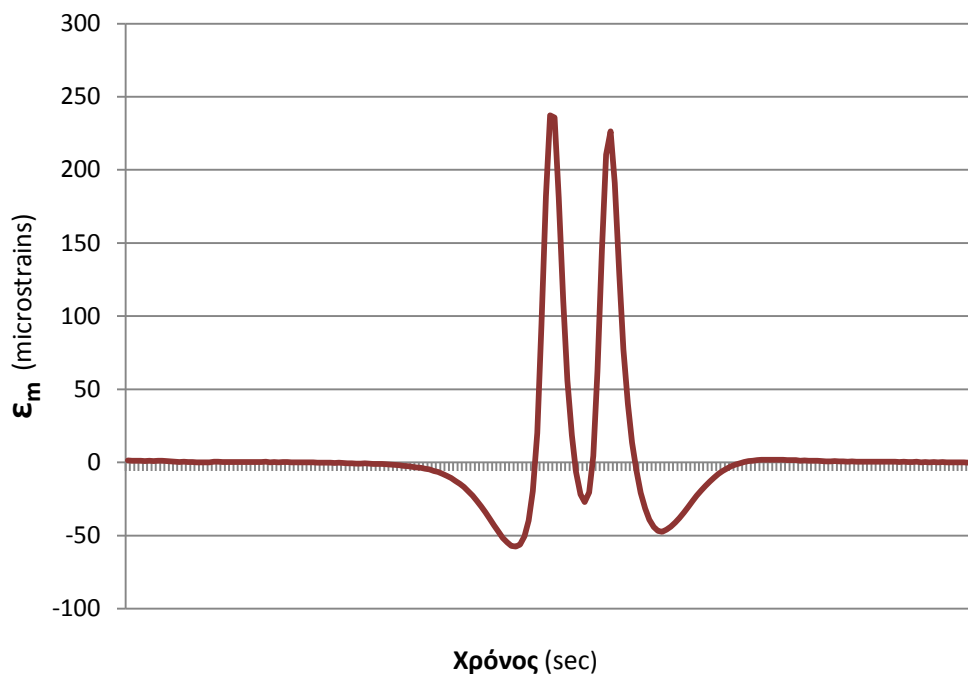
Οι αισθητήρες καταγράφουν τις τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων σε χρονικά διαστήματα των 0,05 δευτερολέπτων (sec) και η μονάδα μέτρησης είναι το millistrain (milli-inch/inch). Το διάγραμμα διαιρείται σε τρία τμήματα. Το κεντρικό τμήμα περιλαμβάνει τις μέγιστες τιμές του αισθητήρα, όταν δηλαδή το όχημα είναι πολύ κοντά σε αυτόν, καθώς επίσης και όταν περνάει από πάνω του. Η αρχή του τμήματος αυτού, σηματοδοτεί την αρχή της καταγραφής του αισθητήρα. Το τμήμα αυτό καταλαμβάνει περίπου το 40% του συνολικού διαγράμματος, αν και το ποσοστό αυτό ποικίλει, ανάλογα με τον τύπο του αισθητήρα και τη θέση του στη διατομή.

Το αρχικό τμήμα υποδεικνύει την καταγραφή του αισθητήρα όταν το όχημα πλησιάζει προς αυτόν, ενώ το τελευταίο, όταν το όχημα απομακρύνεται. Οι τιμές των τμημάτων αυτών βρίσκονται στον αντίστοιχο πίνακα δεδομένων της NARTF (dynamic_data), ως μέσοι όροι, στις στήλες με τις ονομασίες "offset left" και "offset right" αντίστοιχα (Teubert et al., 2002). Ακολουθεί η εικόνα που φανερώνει τον τρόπο με τον οποίο είναι οργανωμένες οι καταγραφές των αισθητήρων, στον αντίστοιχο πίνακα δεδομένων της NARTF.

Sensor ID	Sensor Name	Item	Test Item	Event Number	Record Start Time	Record End Time	Starting Vehicle Location x, ft	Ending Vehicle Location x, ft	Offset Left	Offset Right	Peak1 Time	Peak1	Peak2 Time	Peak2	Peak3 Time	Peak3	Sensor Record
1236	LBS4	ASG-138	LF5-1	31	2/14/2000 11:07:8	2/14/2000 11:07:19	311.8	229.7	-0.0979	-0.09625	6.10	0.08458	9.00	-0.00381	0.00	0	Download
1236	LBS4	ASG-138	LF5-1	32	2/14/2000 11:10:55	2/14/2000 11:11:6	194.52	117.92	-0.09245	-0.09479	22.10	0.08917	24.65	-0.00156	0.00	0	Download

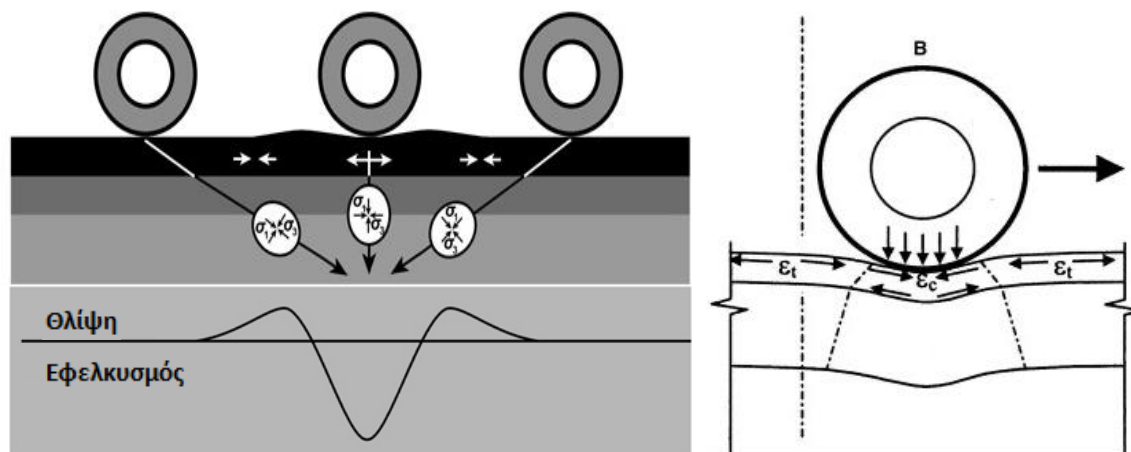
Εικόνα 5.25 Πληροφορίες από καταγραφές αισθητήρα, στον πίνακα δεδομένων της NARTF

Τα διαγράμματα που προκύπτουν από τις καταγραφές του σήματος των αισθητήρων, είναι όμοια σε σχήμα ακόμα και αν ο τροχός δε διέρχεται ακριβώς πάνω από τον αισθητήρα. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το τυπικό διάγραμμα ανηγμένων παραμορφώσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, για μία τυχαία καταγραφή αισθητήρα, από τη διέλευση του φορείου με διάταξη διπλού δίδυμου τροχού (B-747).



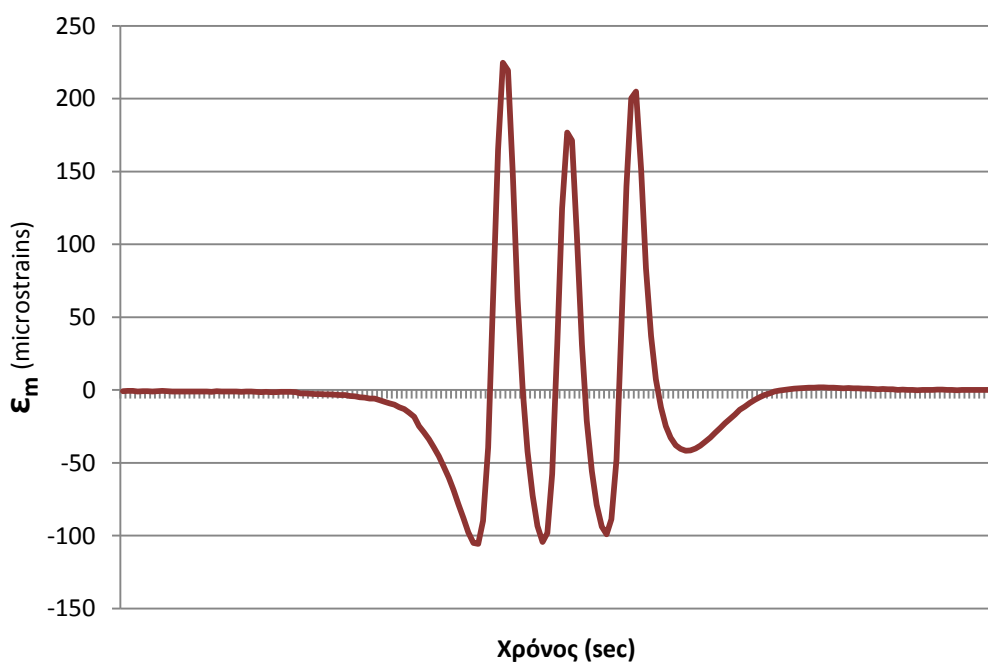
Εικόνα 5.26 Τυπικό διάγραμμα ανηγμένων παραμορφώσεων για την περίπτωση του διπλού άξονα-διπλού τροχού (B-747)

Αρχικά, καθώς ο τροχός πλησιάζει το σημείο που βρίσκεται ο αισθητήρας, υπάρχουν πάντοτε θλιπτικές παραμορφώσεις, έπειτα αναπτύσσονται εφελκυστικές, δηλαδή τη στιγμή που ο πρώτος άξονας περνάει πάνω από τον αισθητήρα. Στη συνέχεια, όταν ο αισθητήρας είναι ανάμεσα στους δύο άξονες, αναπτύσσονται ξανά θλιπτικές, κ.ο.κ, ώσπου τέλος, με την απομάκρυνση και του τελευταίου άξονα από τον αισθητήρα, έχουμε πάλι θλίψη. Τα ίδια ισχύουν και στην περίπτωση του φορείου με τριπλό άξονα και διπλό τροχό (B-777). Στην εικόνα 5.27, συσχετίζεται η θέση του τροχού με τα σημεία εκείνα στο οδόστρωμα που αναπτύσσεται εφελκυσμός και θλίψη.



Εικόνα 5.27 Θέσεις ανάπτυξης θλίψης και εφελκυσμού κατά τη διέλευση του τροχού

Αφού περάσει ο άξονας από τη θέση του αισθητήρα, το μέγεθος των παραμορφώσεων μειώνεται απότομα και παρατηρείται μόνιμη παραμόρφωση πολύ μικρής τιμής. Στην περίπτωση τόσο του διπλού δίδυμου τροχού (B-747), όσο και σε αυτή του τριπλού άξονα- διπλού τροχού (B-777), η θλίψη παρατηρείται πάντοτε ανάμεσα στους άξονες. Στην εικόνα που ακολουθεί, φαίνεται το τυπικό διάγραμμα ανηγμένων παραμορφώσεων για την περίπτωση του φορείου με διάταξη τριπλού άξονα-διπλού τροχού.



Εικόνα 5.28 Τυπικό διάγραμμα ανηγμένων παραμορφώσεων για την περίπτωση του τριπλού άξονα-διπλού τροχού (B-777)

Η επαναφορά των παραμορφώσεων σε κατάσταση ισορροπίας, η οποία παρατηρείται στα διαγράμματα των εικόνων 5.27 και 5.28, οφείλεται στις ιξωδοελαστικές ιδιότητες των ασφαλτούχων υλικών (Garg and Hayhoe, 2001).

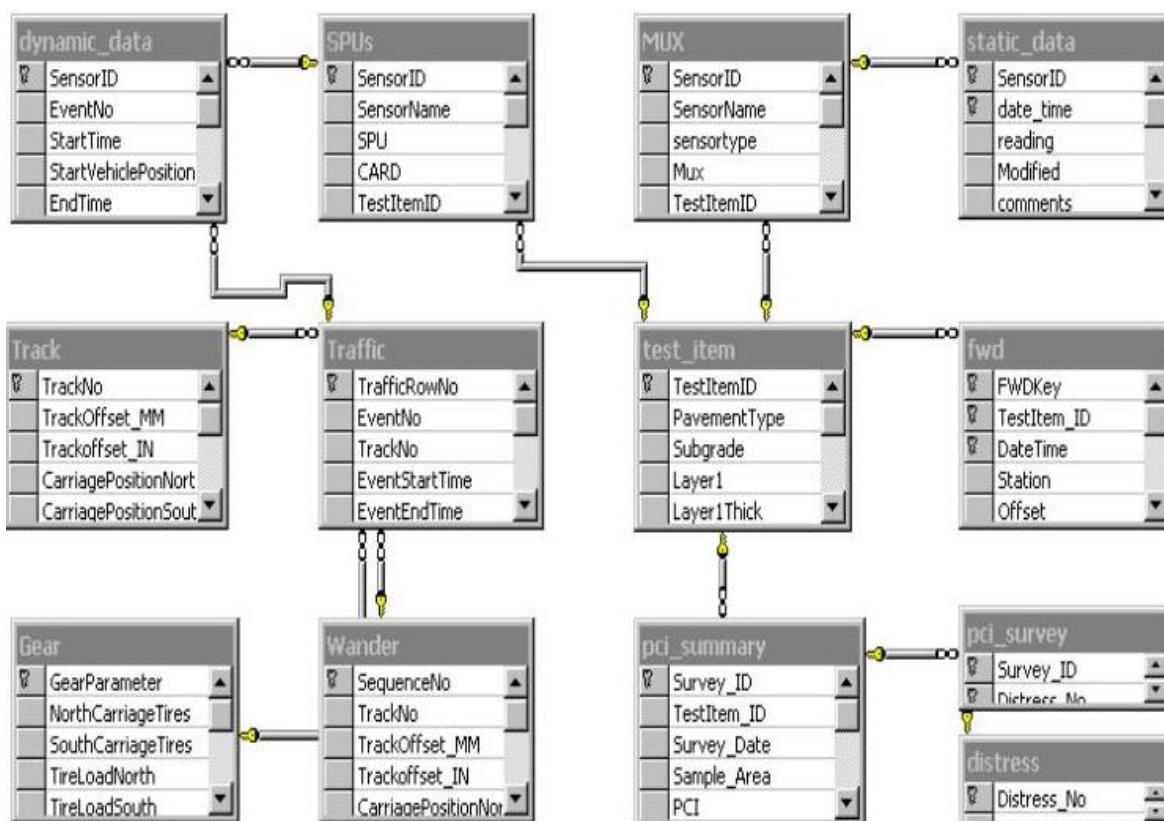
Επίσης, το γεγονός ότι οι μέγιστες εφελκυστικές ανηγμένες παραμορφώσεις δεν έχουν την ίδια τιμή, υποδεικνύει τη δυναμική εντατική κατάσταση που επιβάλλουν τα κινούμενα φορτία των δύο φορέων.

6 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

6.1 Εισαγωγή

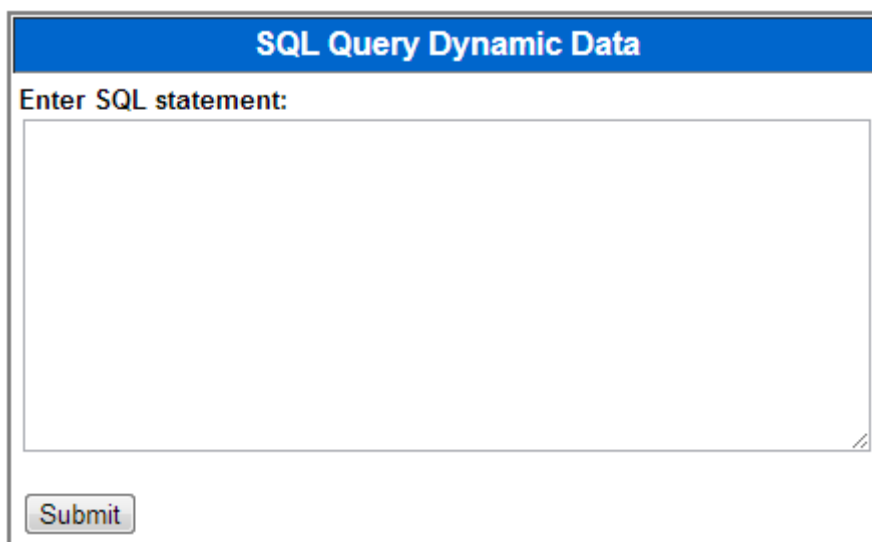
Αρχικά, θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο κατασκευαστικός κύκλος που εξετάζεται διήρκησε περίπου δύο χρόνια. Κατ' επέκταση, ο όγκος των δεδομένων και των διάφορων πληροφοριών είναι πολύ μεγάλος. Επιπλέον, η πρόσβαση σ' αυτά τα δεδομένα είναι εφικτή μέσω της ιστοσελίδας της FAA για τη NAPTF (FAA, 2012), δωρεάν και χωρίς να απαιτείται εγγραφή.

Όλες οι πληροφορίες για τα δάπεδα (πάχη στρώσεων, συντεταγμένες αισθητήρων, κλπ), καθώς επίσης και τα δεδομένα από τις φορτίσεις (μέγεθος φορτίου ανά τροχό, πιέσεις ελαστικών, ταχύτητα οχήματος προσομοίωσης, κλπ), είναι οργανωμένα σε πίνακες δεδομένων. Το ίδιο ισχύει και για τις καταγραφές των διαφόρων τύπων αισθητήρων. Κάθε πίνακας φέρει συγκεκριμένη ονομασία, ανάλογα με το είδος των δεδομένων που περιέχει. Για παράδειγμα ο πίνακας με τα στοιχεία από τις εφαρμογές FWD, έχει ονομασία fwd. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό των πινάκων είναι το γεγονός ότι πολλοί από αυτούς αλληλοσυνδέονται, καθότι ορισμένες από τις στήλες τους είναι κοινές. Στην εικόνα 6.1 φαίνεται το σύνολο των πινάκων με τις ονομασίες τους, τις στήλες που περιέχουν και τέλος τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται ορισμένοι εξ αυτών. Η εικόνα παρατίθεται όπως υπάρχει ακριβώς στην ιστοσελίδα της FAA για τη NAPTF.



Εικόνα 6.1 Ονομασίες, στήλες και αλληλοσυνδέσεις πινάκων δεδομένων της FAA για τη NAPTF

Η εύρεση και εξαγωγή των επιθυμητών δεδομένων κάθε φορά, έγινε μέσω γλώσσας προγραμματισμού, η οποία διατίθεται στην προαναφερθείσα ιστοσελίδα. Συγκεκριμένα, η γλώσσα αυτή είναι η SQL (Structured Query Language), η οποία αποτελεί μία γλώσσα που σχεδιάστηκε για τη διαχείριση δεδομένων σε ένα σύστημα σχεσιακών βάσεων δεδομένων. Βασικό της πλεονέκτημα είναι η απλή της χρήση, διευκολύνοντας αρκετά τόσο τον εντοπισμό και την εξαγωγή, όσο και την επεξεργασία των στοιχείων που επιλέχθησαν. Στην εικόνα 6.2 παρατίθεται το “παράθυρο” για τη γραφή των εντολών της SQL, όπως υπάρχει ακριβώς στην ιστοσελίδα της FAA για τη NAPTF.



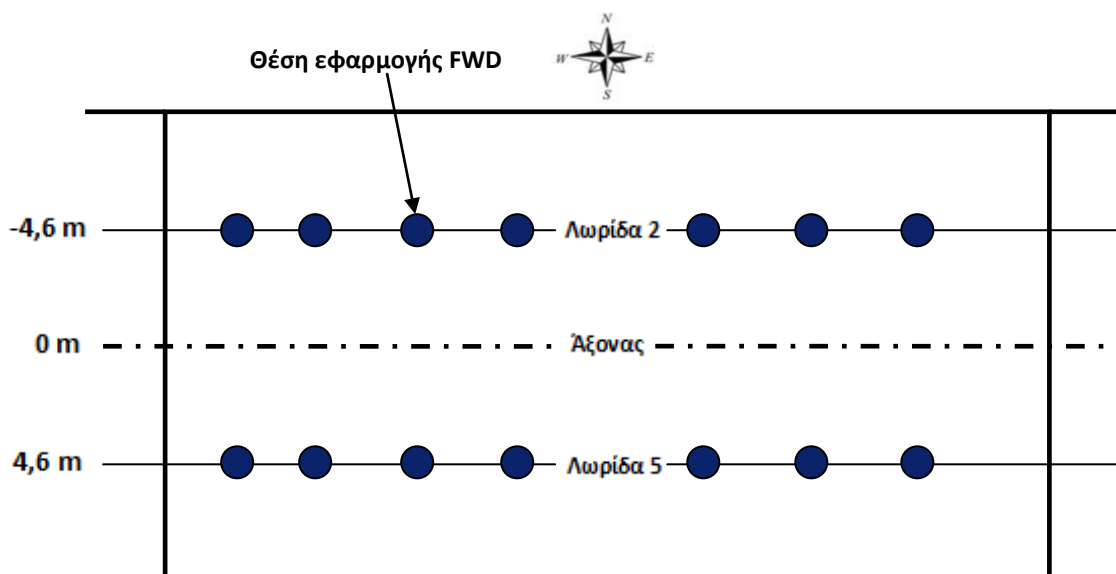
Εικόνα 6.2 Παράθυρο για σύνταξη των εντολών SQL στην ιστοσελίδα της FAA για τη NAPTF

6.2 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων

6.2.1 Επιλογή αισθητήρων

Ένα από τα πρώτα βήματα για τη συλλογή των δεδομένων, αποτέλεσε ο εντοπισμός των κατάλληλων αισθητήρων καταγραφής της ανηγμένης οριζόντιας παραμόρφωσης, κατά τη διαμήκη διεύθυνση (longitudinal strain). Η τελική επιλογή των αισθητήρων πραγματοποιήθηκε με συγκεκριμένα κριτήρια.

Ένα από αυτά τα κριτήρια ήταν η ταύτιση της θέσης εφαρμογής FWD, με τη θέση του αισθητήρα, ούτως ώστε να μπορούν να συγκριθούν οι μετρημένες παραμορφώσεις, με αυτές που θα υπολογιστούν μετέπειτα. Δηλαδή, ο αισθητήρας να βρίσκεται ακριβώς κάτω από τη θέση που εφαρμόστηκε FWD. Από τις έξι λωρίδες που πραγματοποίησαν μετρήσεις FWD (εικόνα 6.3), μόνο επί των δύο βρίσκονταν αισθητήρες. Για την ακρίβεια, η λωρίδα 2 στο βόρειο τμήμα και η λωρίδα 5 στο νότιο αντίστοιχα. Ενώ, για την ταύτιση κατά τη διαμήκη έννοια συγκρίθηκαν οι συντεταγμένες των αισθητήρων (ως προς τον άξονα x), με τις αντίστοιχες συντεταγμένες κάθε θέσης εφαρμογής για τις δύο προαναφερθείσες λωρίδες.



Εικόνα 6.3 Λωρίδες επί των οποίων υπάρχουν αισθητήρες και εφαρμογές FWD

Έτσι, για καθένα από τα δάπεδα LFS, MFS εντοπίστηκαν τέσσερις αισθητήρες, δύο σε κάθε τμήμα (βόρειο και νότιο). Για κάθε τμήμα, ο ένας βρίσκεται στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης και ο άλλος στον πυθμένα της βάσης. Για το HFS βρέθηκαν τρεις, καθώς στο βόρειο τμήμα δεν έχουν εγκιβωτιστεί αισθητήρες στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης.

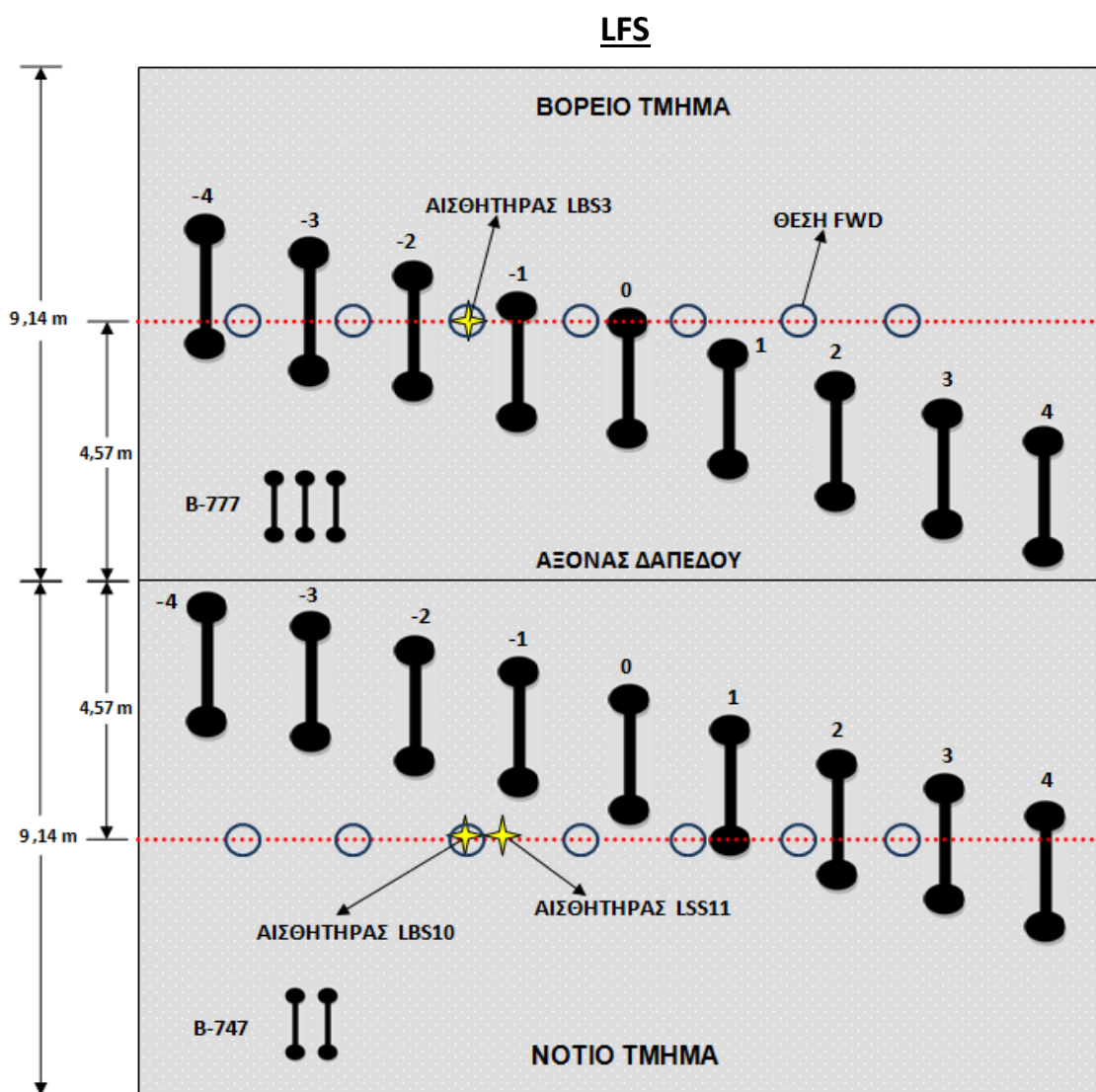
Έχει αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, ότι οι αισθητήρες έχουν μεγάλη ευαισθησία και γι αυτό είναι επιρρεπείς σε εσφαλμένες τιμές. Κατέστη, λοιπόν, αναγκαία η αξιολόγηση των αισθητήρων, όσον αφορά στην αξιοπιστία των καταγραφών. Εξετάσθηκαν όλοι οι αισθητήρες με βάση τις τιμές των παραμορφώσεων από τις διελεύσεις του οχήματος. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκαν αισθητήρες οι οποίοι έδιναν συνεχώς τις ίδιες τιμές, ανεξάρτητα από την θερμοκρασία, το φορτίο και την ταχύτητα του οχήματος ή ακόμα και την καταπόνηση του δαπέδου απ' τις συνεχείς διελεύσεις. Μάλιστα, οι τιμές ορισμένων εξ αυτών ήταν ιδιαίτερα χαμηλές, ενώ άλλων πολύ υψηλές. Ένα ακόμη στοιχείο για τη μη καταλληλότητα αυτών των αισθητήρων, ήταν το γεγονός ότι οι τιμές που έδιναν ήταν περίπου ίδιες για όλα τα ίχνη, δηλαδή "ανεξάρτητες" από την απόσταση τροχού-αισθητήρα. Οι αισθητήρες αυτοί απορρίφθηκαν και κατ' αυτόν τον τρόπο επελέγησαν μόνο εννιά αισθητήρες συνολικά, τρεις για κάθε δάπεδο.

Εντέλει, δεν είναι και οι εννιά αισθητήρες ακριβώς κάτω από θέσεις όπου έγιναν FWD εφαρμογές. Αφού, οι αισθητήρες που βρίσκονταν κάτω από θέσεις με FWD δοκιμή δεν ήταν όλοι αξιόπιστοι. Οπότε, οι αμέσως πιο κοντινοί σε αυτούς, ελέγχθηκαν ως προς την αξιοπιστία των μετρήσεων και ανάλογα επιλέχθηκαν ή απορρίφθηκαν. Ο πίνακας 6.1 περιέχει τους αισθητήρες που επελέγησαν ανά δάπεδο.

Πίνακας 6.1 Αξιοποιήσιμοι αισθητήρες

Δάπεδα	Αισθητήρες (ονομασία)	Συντεταγμένες Αισθητήρων κατά Χ(m)	Συντεταγμένες Αισθητήρων κατά Υ(m)	Συντεταγμένες Αισθητήρων κατά Ζ(cm)
LFS	LBS3	47,34	-4,6	24,1
	LBS10	47,34	4,6	24,1
	LSS11	48,00	4,6	11,4
MFS	MBS2	134,11	-4,6	24,1
	MBS10	133,40	4,6	24,1
	MSS10	133,40	4,6	11,4
HFS	HBS1	237,71	-4,6	24,1
	HBS11	237,00	4,6	24,1
	HSS11	237,00	4,6	11,4

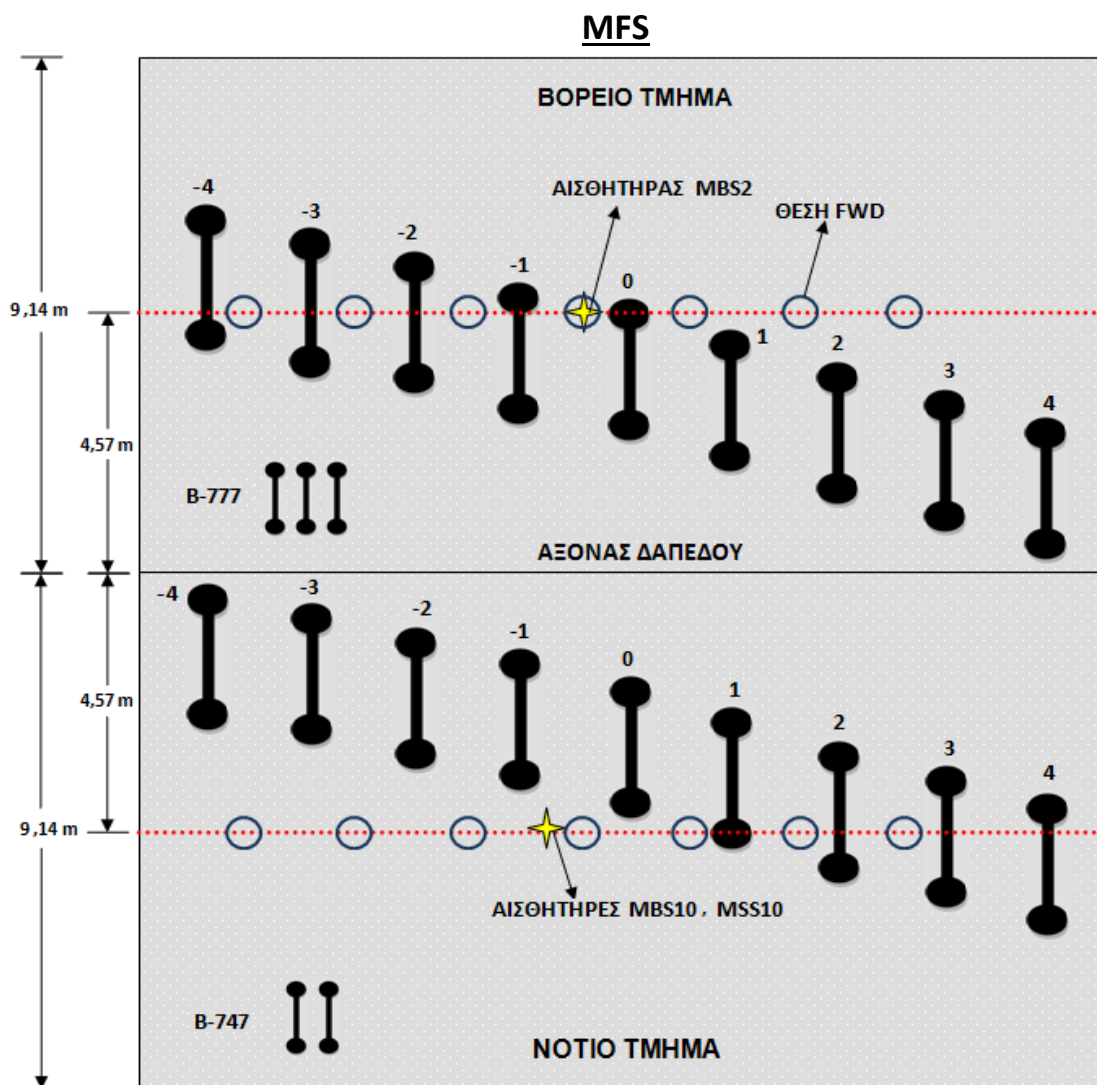
Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται για κάθε δάπεδο, οι θέσεις των αισθητήρων και FWD δοκιμών, καθώς και οι θέσεις των αξόνων κάθε φορείου, για όλα τα ίχνη.



Εικόνα 6.4 Κάτοψη δαπέδου LFS

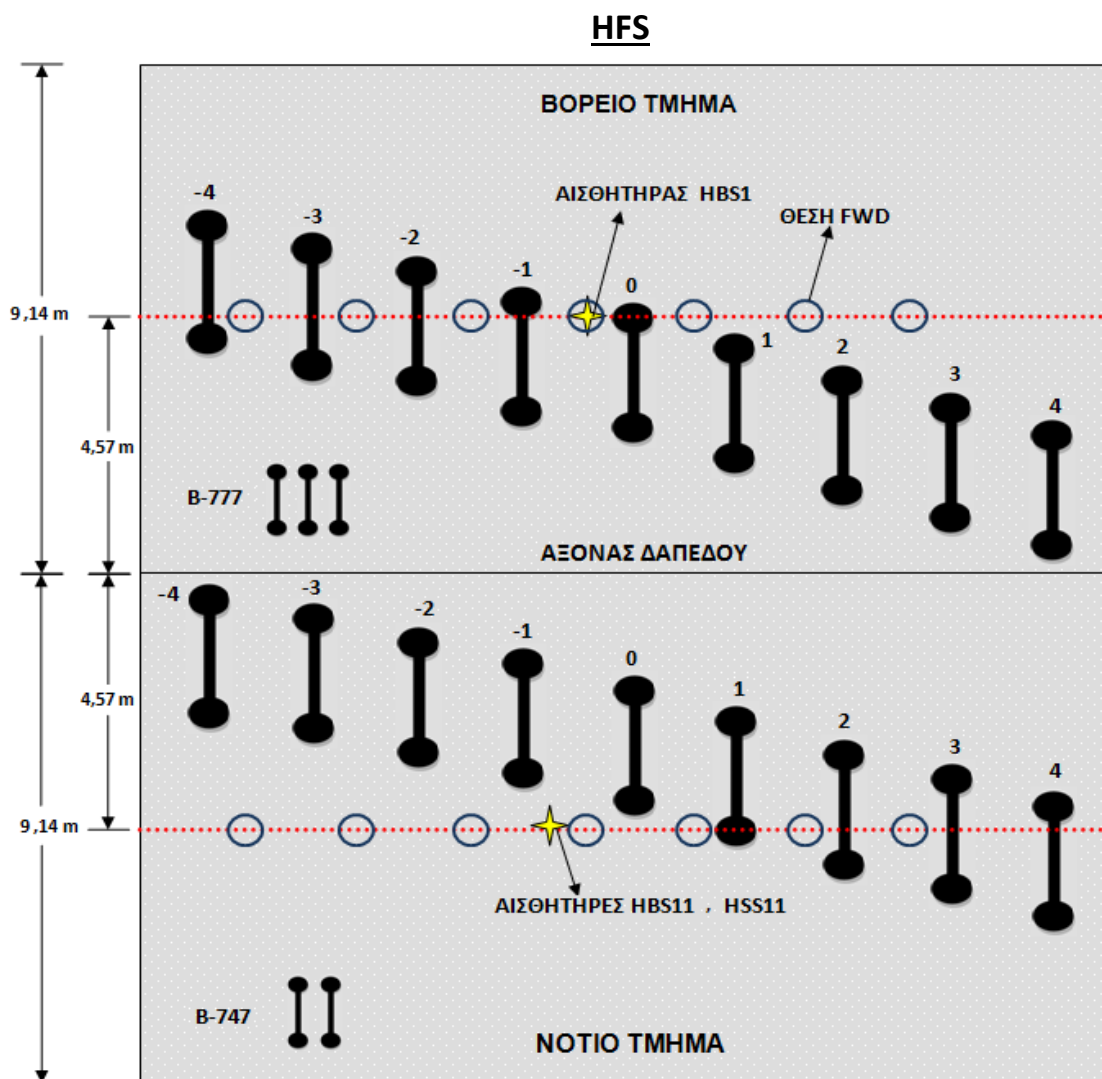
Στις εικόνες, τόσο ο τριπλός άξονας από το φορείο του B-777, όσο και ο διπλός του B-747 παρουσιάζονται ως μονοί για λόγους ευκρίνειας.

Οι αισθητήρες LBS3 και LBS10 βρίσκονται κάτω ακριβώς από θέση με εφαρμογή FWD ενώ ο LSS11, που είναι ο μοναδικός στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης, απέχει 65 cm περίπου από αυτήν τη θέση.



Εικόνα 6.5 Κάτοψη δαπέδου MFS

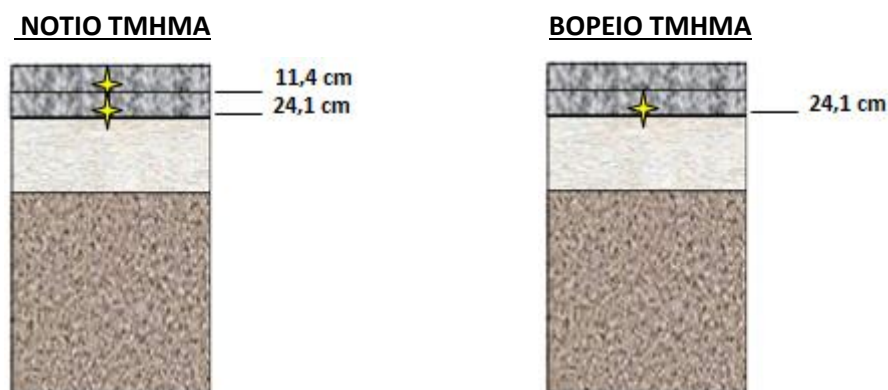
Ο αισθητήρας MBS2 βρίσκεται κάτω από θέση με FWD δοκιμή, ενώ οι MBS10 και MSS10, έχουν τις ίδιες συντεταγμένες ως προς τους άξονες x και y, αλλά διαφορετικά βάθη και απέχουν 70 cm από θέση FWD. Ο MSS10 είναι εγκιβωτισμένος στη βάση της επιφανειακής ασφαλτικής στρώσης.



Εικόνα 6.6 Κάτοψη δαπέδου HFS

Οι αισθητήρες HBS11, HSS11 απέχουν 70 cm από θέση FWD, με τον HSS11 να είναι ο μοναδικός στη βάση της επιφανειακής ασφαλτικής στρώσης. Αντίθετα, η θέση του HBS1 ταυτίζεται με θέση εφαρμογής FWD.

Στην εικόνα 6.7 φαίνονται οι θέσεις των επιλεγμένων αισθητήρων στις διατομές των δαπέδων. Ο αριθμός των αισθητήρων και τα βάθη τους στις διατομές κάθε τμήματος είναι ίδια και για τα τρία δάπεδα.



Εικόνα 6.7 Βάθη αισθητήρων και στα τρία δάπεδα για κάθε τμήμα

6.2.2 Επιλογή ημερών

Το επόμενο βήμα της επεξεργασίας των διαθέσιμων στοιχείων ήταν η επιλογή των ημερών που έγιναν δοκιμαστικές φορτίσεις. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι περισσότερες φορτίσεις έγιναν για το δάπεδο LFS, ενώ ελάχιστες πραγματοποιήθηκαν για το HFS. Γι αυτό, οι περισσότερες ημέρες επιλέχθηκαν για το LFS και οι λιγότερες για το HFS. Η επιλογή έγινε έτσι, ώστε να είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων.

Επελέγησαν ημέρες που είχαμε δοκιμαστικές φορτίσεις και εφαρμογή FWD. Έτσι, μπορούν να συγκριθούν οι άμεσα μετρημένες παραμορφώσεις και αυτές που θα προκύψουν από τον αναλυτικό υπολογισμό. Η σύγκριση αυτή παρουσιάζει αξιοπιστία, καθώς φορτίσεις από τον προσομοιωτή και πτώσεις του βάρους της συσκευής FWD, γίνονται στο ίδιο δάπεδο, με τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες. Για το HFS δεν βρέθηκε καμία ημέρα που να πληροί αυτό το κριτήριο.

Αξιοποιήθηκαν διαδοχικές ημέρες με δοκιμαστικές φορτίσεις, προκειμένου να διερευνηθεί η απόκριση των δαπέδων στη συνεχόμενη φόρτιση. Ενώ επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα συνοπτικής παρουσίασης μεγάλης γκάμας ημερών. Επελέγησαν διαδοχικές ημέρες, με διαφορετικές θερμοκρασίες προκειμένου να φανεί η επιρροή της θερμοκρασίας. Συνυπολογίζεται, βέβαια, και η υφιστάμενη καταπόνηση των δαπέδων για κάθε θερμοκρασία. Για παράδειγμα, για τις ημερομηνίες 27/4/00 και 28/4/00 διερευνάται η απόκριση των δαπέδων LFS, MFS στους 12 °C, ενώ για τις 12/6/00 και 13/6/00 στους 21 °C. Όμως, για το τελευταίο “ζευγάρι ημερών”, συνεκτιμάται η καταπόνηση από τις σαφώς περισσότερες φορτίσεις που έχουν υποστεί τα δάπεδα σε αυτές τις ημερομηνίες.

Χρησιμοποιήθηκαν και μεμονωμένες ημέρες με διαφορετικές θερμοκρασίες. Οι συγκεκριμένες μέρες βοηθούν όχι μόνο στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της θερμοκρασίας, αλλά παρέχουν και μια σταθερή εποπτεία της απόκρισης του δαπέδου. Έτσι, μπορούμε να γνωρίζουμε πως εξελίσσεται η καταπόνηση μέσω των επαναλήψεων, σταδιακά. Για παράδειγμα, αν η επόμενη ημέρα που επιλέγαμε μετά τις 28/4/00 ήταν η 11/7/00, δε θα είχαμε σαφή εικόνα για την σταδιακή καταπόνηση του δαπέδου απ’ τις ενδιάμεσες φορτίσεις. Κατ’ αυτόν τον τρόπο θα υπήρχε κίνδυνος υπερεκτίμησης του “παράγοντα θερμοκρασία”.

Όπως αναφέρθηκε, οι μέρες για το LFS είναι πολύ περισσότερες από τα άλλα δύο δάπεδα, οπότε υπάρχει μεγαλύτερη ποικιλία σε χαρακτηριστικά που μπορούν να επηρεάσουν την απόκριση του δαπέδου. Ενώ, λοιπόν, στο MFS και HFS οι βασικοί παράγοντες είναι η θερμοκρασία και η καταπόνηση που προκαλείται από τον αυξανόμενο αριθμό φορτίσεων, στο LFS εξετάζονται κι άλλοι παράγοντες, οι οποίοι αναφέρονται στη συνέχεια.

Για το LFS εξετάστηκαν συνεχόμενες ημέρες με το όχημα να φέρει διαφορετικά φορτία ανά τροχό την κάθε ημέρα, προκείμενου να ελεγχθεί η επιρροή της αύξησης του φορτίου.

Επίσης, βρέθηκαν μεμονωμένες μέρες με αυξημένα φορτία (π.χ. 24/8/00 , 1/9/00, 29/9/00). Έτσι, δίδεται η δυνατότητα να κατανοηθεί η συμπεριφορά του οδοστρώματος για διαφορετικά φορτία. Διερευνάται επιπλέον, η επιρροή της θερμοκρασίας για τα αυξημένα φορτία. Δηλαδή, πόσο πιο δυσμενής είναι ο συνδυασμός “αυξημένο φορτίο-υψηλή θερμοκρασία” και τι επιπτώσεις έχει στον ρυθμό καταπόνησης του δαπέδου.

Επιπροσθέτως, επιλέχθηκαν συνεχόμενες ημέρες με αυξημένα φορτία (π.χ. 5/10/00 και 6/10/00). Μπορούν έτσι, να βγουν συμπεράσματα σχετικά με τη συμπεριφορά του οδοστρώματος κάτω από τις συνεχείς δοκιμές με υψηλά φορτία. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα να συγκριθεί αυτή η συμπεριφορά με την αντίστοιχη συμπεριφορά του δαπέδου, για μέρες με χαμηλότερο φορτίο, διαφορετική θερμοκρασία και διαφορετικό αριθμό υφιστάμενων φορτίσεων.

Συνεχόμενες μέρες που πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με το μέγιστο φορτίο ανά τροχό, αλλά με χαμηλές ταχύτητες (π.χ. 8/11/00, 9/11/00), αποτελεί ακόμα μία επιλογή για το LFS. Μάλιστα, την 8/11/00 έγιναν δοκιμές τόσο με ταχύτητα 8 km/h, όσο και με 4 km/h. Κατ' επέκταση, προκύπτουν συμπεράσματα για την επιρροή της ταχύτητας των φορτίων στη συμπεριφορά του οδοστρώματος.

Τελευταία επιλογή αποτελούν ημέρες, στις οποίες πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με το μέγιστο φορτίο και χαμηλή ταχύτητα, αλλά έγιναν επίσης και FWD εφαρμογές (π.χ. 14/11/00, 6/6/01). Έτσι, παρακολουθείται σταδιακά, με την πάροδο του χρόνου η καταπόνηση που επιφέρουν τα υψηλά φορτία σε συνδυασμό με την χαμηλή ταχύτητα. Παρέχεται η δυνατότητα σύγκρισης των άμεσα μετρούμενων παραμορφώσεων, με αυτές από τον αναλυτικό υπολογισμό. Δηλαδή, προκύπτει η απόκλιση των ϵ_m (measured - μετρημένες) και ϵ_c (calculated - υπολογισμένες). Η απόκλιση αυτή, λοιπόν, μπορεί να συγκριθεί με τις αντίστοιχες αποκλίσεις για τις μέρες που οι δοκιμές είχαν άλλα χαρακτηριστικά και το δάπεδο βρισκόταν σε διαφορετική κατάσταση.

Όσον αφορά στο MFS, όλες οι μέρες που επελέγησαν, υπάρχουν και για το LFS, ούτως ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση των δαπέδων αυτών. Η επιλογή των ημερών περιορίστηκε εξαιτίας εσφαλμένων μετρήσεων από τα τέλη Ιουνίου του 2000, λόγω ευαισθησίας των αισθητήρων.

Για το HFS, λόγω περιορισμένων δοκιμών, το δείγμα των ημερών είναι πολύ μικρό και υπάρχουν μόνο δύο κοινές ημέρες (4/4/00 και 5/4/00) με τα άλλα δάπεδα.

Στον πίνακα 6.2 παρουσιάζονται αναλυτικά οι μέρες που επιλέχθηκαν για κάθε δάπεδο, καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά φόρτισης, όπως το φορτίο ανά τροχό και η ταχύτητα του προσομοιωτή.

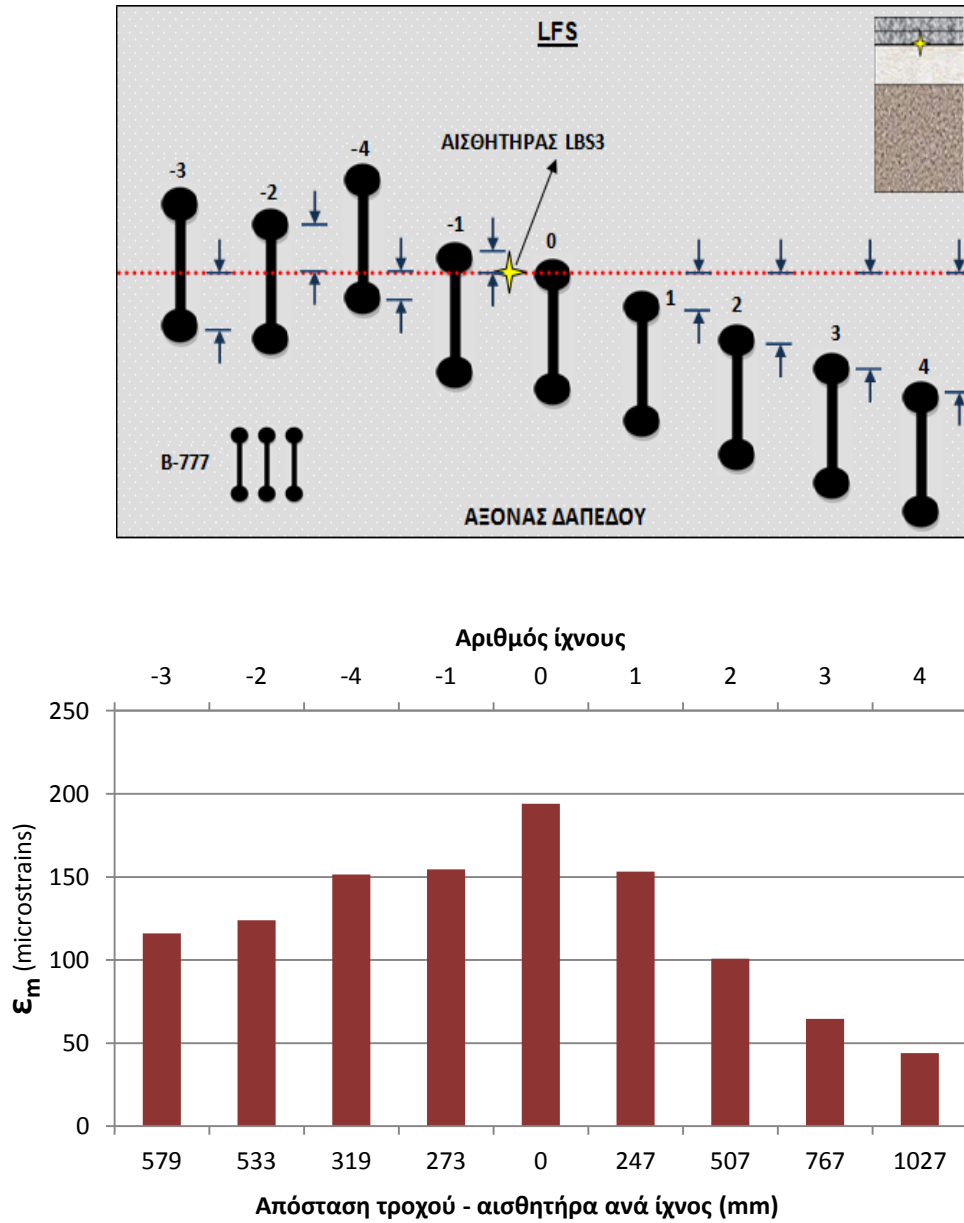
Πίνακας 6.2 Ημέρες που επελέγησαν και βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη δοκιμών

Δάπεδα	Ημέρες	Θερμοκρασία (°C)	Ταχύτητα (km/h)	Φορτίο/Τροχό (KN)	Διελύσεις	FWD
LFS	4/4/00	13	8	200,2	168	-
	5/4/00	12	8	200,2	130	-
	7/4/00	13	8	200,2	58	✓
	14/4/00	11	8	200,2	270	✓
	27/4/00	11	8	200,2	156	-
	28/4/00	12	8	200,2	146	-
	4/5/00	15	8	200,2	234	-
	15/5/00	19	8	200,2	310	-
	23/5/00	16	8	200,2	250	-
	12/6/00	24	8	200,2	314	-
	13/6/00	21	8	200,2	320	-
	22/6/00	23	8	200,2	72	✓
	10/7/00	23	8	200,2	328	-
	11/7/00	23	8	200,2	325	-
	17/8/00	24	8	200,2	306	-
	18/8/00	23	8	222,4	66	-
	24/8/00	23	8	244,7	67	-
	31/8/00	24	8	266,9	66	✓
	1/9/00	24	8	289,1	156	-
	29/9/00	20	8	289,1	330	✓
	5/10/00	22	8	289,1	938	✓
	6/10/00	22	8	289,1	426	✓
	8/11/00	18	8 και 4	289,1	330	-
9/11/00	18	4	289,1	348	-	
14/11/00	17	4	289,1	345	✓	
6/6/01	21	4	289,1	566	✓	
MFS	4/4/00	13	8	200,2	168	-
	5/4/00	12	8	200,2	130	-
	7/4/00	13	8	200,2	58	✓
	14/4/00	11	8	200,2	270	✓
	27/4/00	11	8	200,2	156	-
	28/4/00	12	8	200,2	146	-
	4/5/00	15	8	200,2	234	-
	15/5/00	19	8	200,2	310	-
	23/5/00	16	8	200,2	250	✓
	12/6/00	24	8	200,2	314	-
	13/6/00	21	8	200,2	320	-
	22/6/00	23	8	200,2	72	✓
HFS	15/3/00	11	8	200,2	410	-
	16/3/00	11	8	200,2	400	-
	4/4/00	13	8	200,2	168	-
	5/4/00	12	8	200,2	130	-

Η θερμοκρασία υπολογίστηκε ως ο μέσος όρος των θερμοκρασιών της επιφάνειας του καταστρώματος, στο χρονικό διάστημα που έγιναν δοκιμές από τα φορεία. Δηλαδή, σε μέρα που πραγματοποιήθηκαν δοκιμές από τις 7:00 πμ έως τις 15:00 μμ, υπολογίστηκε ο μέσος όρος μόνο για αυτό το χρονικό διάστημα, από αισθητήρα θερμοκρασίας στην επιφάνεια του καταστρώματος.

Για τους αισθητήρες, λοιπόν, που επελέγησαν στις προαναφερθείσες ημέρες, έγιναν τα ιστογράμματα οριζόντιας ανηγμένης παραμόρφωσης ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης του αισθητήρα από τον πλησιέστερο τροχό κάθε άξονα, για όλα τα ίχνη. Η τιμή της παραμόρφωσης που χρησιμοποιήθηκε στα ιστογράμματα για κάθε ίχνος ήταν ο μέσος όρος των μέγιστων τιμών (peak value), οι οποίες προέκυπταν από κάθε διέλευση στο εκάστοτε ίχνος για μία συγκεκριμένη ημέρα δοκιμών. Για τον έλεγχο της αποδεκτής μέσης τιμής, έγινε χρήση του συντελεστή διακύμανσης/μεταβλητότητας (Coefficient of Variation, CoV). Ο συντελεστής αυτός προέκυψε ως το πηλίκο της τυπικής απόκλισης προς το μέσο όρο των μέγιστων τιμών παραμόρφωσης για κάθε ίχνος. Αποδεκτές έγιναν οι τιμές με συντελεστή διακύμανσης μικρότερο ή ίσο του 20 %. Ωστόσο, ο συντελεστής αυτός σε ορισμένα ίχνη, για τους αισθητήρες στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης, ήταν μεγαλύτερος. Παρ' όλα αυτά, παρουσιάζονται τα ιστογράμματα και αυτών των αισθητήρων, καθώς μπορούν να προκύψουν αξιόπιστα συμπεράσματα, ιδίως για τα ίχνη εκείνα στα οποία ο τροχός είχε την πιο μικρή απόσταση από τους αισθητήρες.

Στην εικόνα 6.8 παρουσιάζεται ένα τυπικό ιστόγραμμα των ανηγμένων οριζόντιων παραμορφώσεων (ϵ_m) για μία μέρα. Στον οριζόντιο άξονα αναγράφεται η εγκάρσια απόσταση του τροχού από τον αισθητήρα για κάθε ίχνος (mm), ενώ στον κατακόρυφο οι παραμορφώσεις ϵ_m (microstrains). Ταυτόχρονα, παρουσιάζεται η κάτοψη του τμήματος με τη θέση του αισθητήρα που εξετάζεται, καθώς επίσης και η θέση του στη διατομή.



Εικόνα 6.8 Τυπικό ιστόγραμμα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος, ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης του αισθητήρα από τον τροχό, για κάθε ίχνος

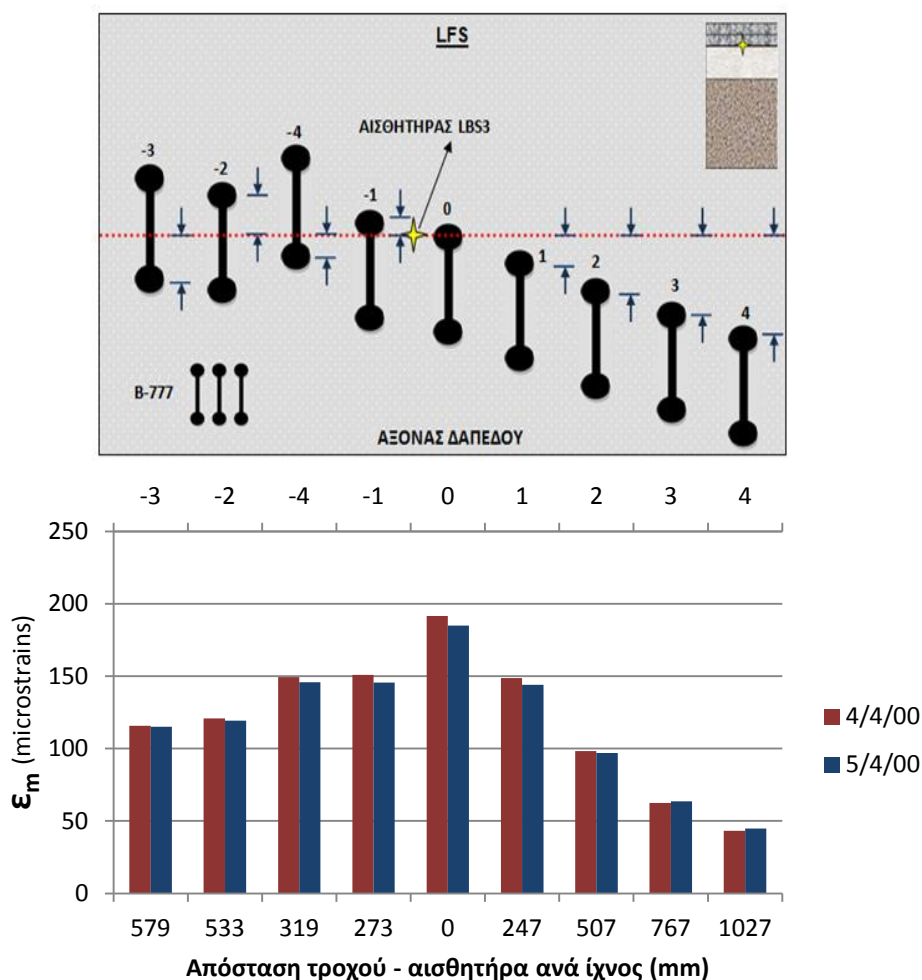
6.2.3 Ιστογράμματα παραμορφώσεων δαπέδου LFS

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα ιστογράμματα των ανηγμένων οριζόντιων παραμορφώσεων για καθέναν από τους τρεις αισθητήρες που έχουν επιλεγεί. Αρχικά, παρατίθενται τα ιστογράμματα για διήμερα σε διάφορες θερμοκρασίες, προκειμένου να φανεί η συμπεριφορά του οδοστρώματος στη συνεχή φόρτιση και πώς αυτή επηρεάζεται από την θερμοκρασία.

6.2.3.1 Διαδοχικές φορτίσεις

Αρχικά, εξετάζονται τα ιστογράμματα για διήμερα σε διάφορες θερμοκρασίες, προκειμένου να φανεί η συμπεριφορά του οδοστρώματος στη συνεχή φόρτιση και πώς αυτή επηρεάζεται από την θερμοκρασία.

Επειδή ο όγκος των δεδομένων είναι μεγάλος, παρατίθεται ενδεικτικά μόνο ένα από τα ιστογράμματα και τα υπόλοιπα παρουσιάζονται στο παράρτημα Α (εικόνα Π6.1).



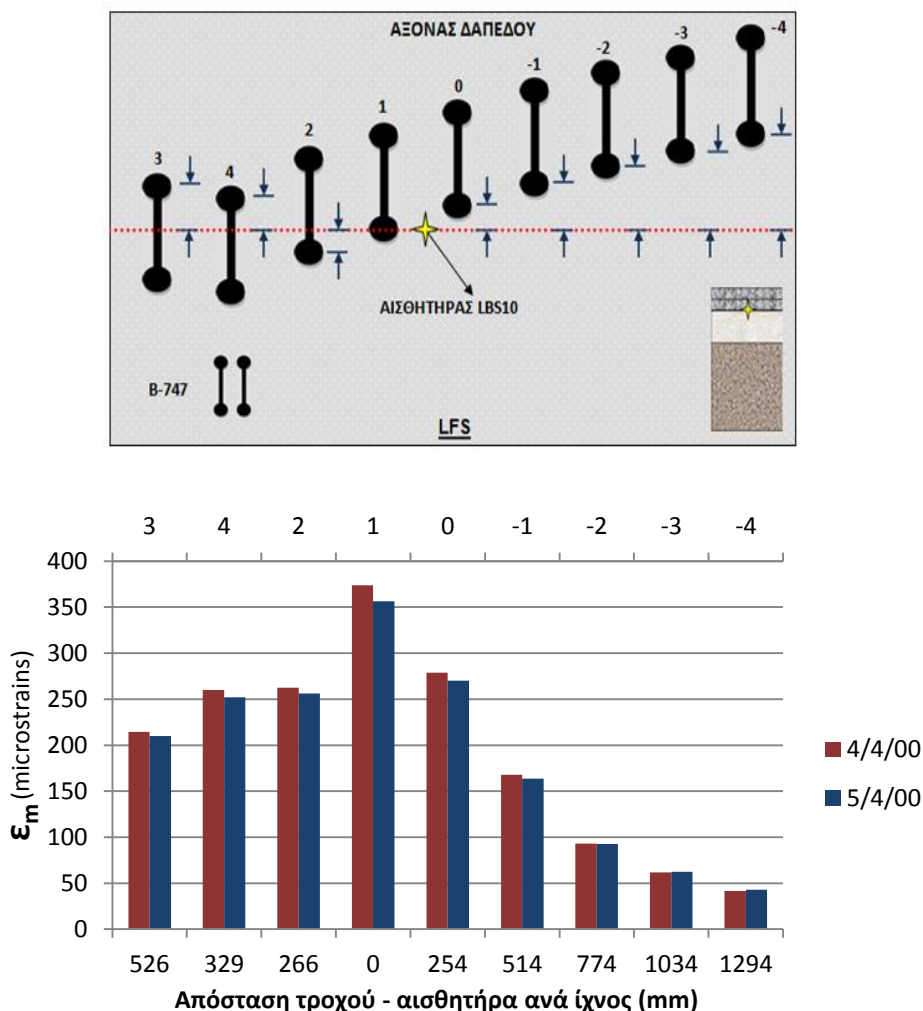
Εικόνα 6.9 Δάπεδο LFS, βόρειο τμήμα (B-777)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για διαδοχικές ημέρες

Όπως αναμένονταν, οι παραμορφώσεις κατά τη δεύτερη μέρα καθενός διημέρου είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τις παραμορφώσεις της πρώτης, με μια μικρή αύξηση κατά τη δεύτερη ημέρα κάθε φορά (προκύπτει από τα αντίστοιχα ιστογράμματα στο

παράρτημα). Εξάιρεση αποτελεί το διήμερο 12/6/00 και 13/6/00, όπου οι παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερες κατά την 12/6/00. Πιθανό αίτιο αποτελεί το γεγονός ότι η θερμοκρασία στις 12/6/00 ήταν κατά 3 °C αυξημένη από αυτή στις 13/6/00, κάτι το οποίο φανερώνει τον καθοριστικό ρόλο της θερμοκρασίας στη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων εν γένει. Το ίδιο παρατηρείται και για το διήμερο 4/4/00 και 5/4/00.

Εύκολα παρατηρείται επίσης η αύξηση του μεγέθους των ανηγμένων παραμορφώσεων από την 4/4/00 έως την 11/7/00. Συγκεκριμένα, οι τιμές των παραμορφώσεων σχεδόν τριπλασιάστηκαν. Βασικοί παράγοντες για αυτήν την αύξηση, αποτελούν τόσο η αύξηση της θερμοκρασίας, όσο και η καταπόνηση του δαπέδου από τις συνεχείς φορτίσεις. Επιπλέον, η φθορά των υλικών του οδοστρώματος που υφίσταται με την πάροδο του χρόνου, αποτελεί ακόμη έναν παράγοντα.

Ακολουθεί η ενδεικτική απεικόνιση ενός ιστογράμματος για τον αισθητήρα στον πυθμένα της ασφαλτικής βάσης του νότιου τμήματος (B-747) του δαπέδου LFS (εικόνα 6.10). Τα υπόλοιπα ιστογράμματα, παρατίθενται στο παράρτημα Α (εικόνα Π6.2).

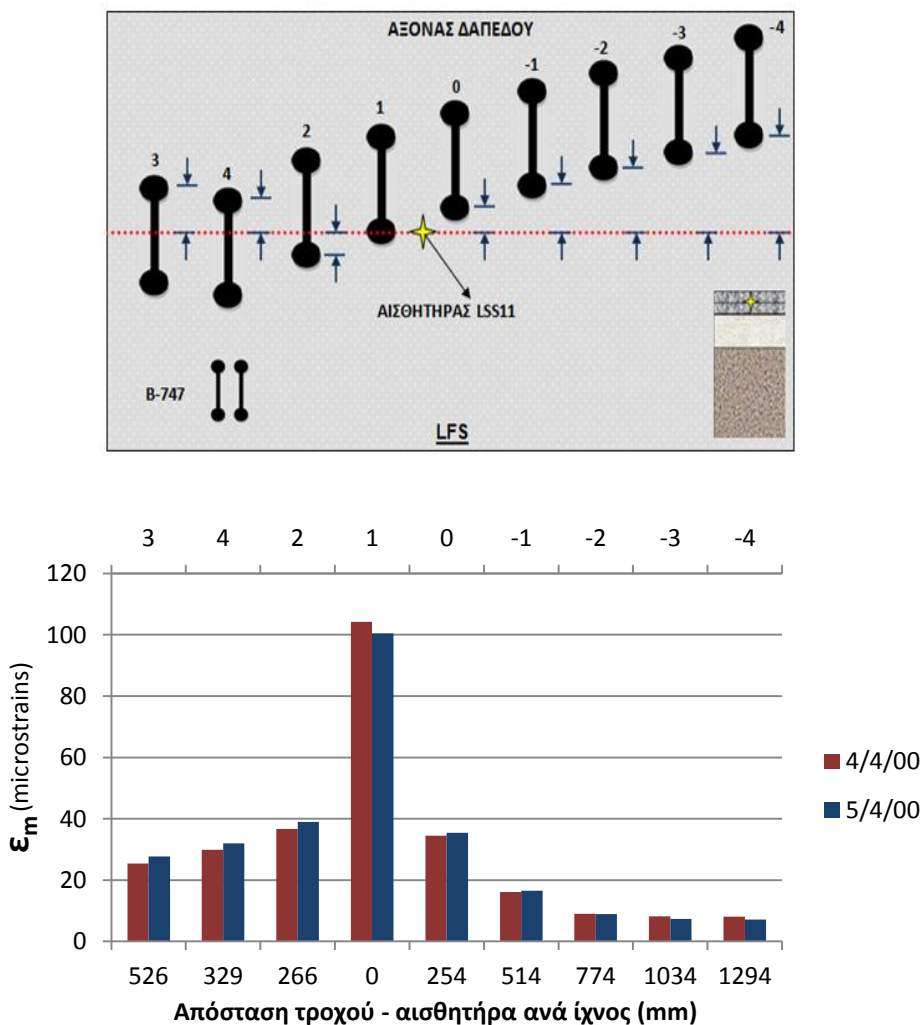


Εικόνα 6.10 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για διαδοχικές ημέρες

Οι παραμορφώσεις και γι αυτόν τον αισθητήρα κατά τη δεύτερη μέρα καθενός διημέρου είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τις παραμορφώσεις της πρώτης, με μια μικρή αύξηση κατά τη δεύτερη ημέρα κάθε φορά (προκύπτει επίσης από τα αντίστοιχα ιστογράμματα στο παράρτημα). Παρατηρείται και εδώ η εξαίρεση στο διήμερο 12/6/00 και 13/6/00, όπου οι παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερες κατά την 12/6/00. Όπως αναφέρθηκε, πιθανό αίτιο αποτελεί το γεγονός ότι η θερμοκρασία στις 12/6/00 ήταν κατά 3 °C αυξημένη από αυτή στις 13/6/00, κάτι το οποίο φανέρωσε τον καθοριστικό ρόλο της θερμοκρασίας στη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων. Το ίδιο παρατηρείται και για το διήμερο 4/4/00 και 5/4/00.

Ομοίως, παρατηρείται αύξηση του μεγέθους των ανηγμένων παραμορφώσεων από την 4/4/00 έως την 11/7/00. Οι τιμές των παραμορφώσεων σχεδόν τριπλασιάστηκαν. Οι βασικοί παράγοντες γι αυτήν την αύξηση είναι οι ίδιοι με αυτούς που αναφέρθηκαν για τον προηγούμενο αισθητήρα.

Εν συνεχεία (εικόνα 6.11), απεικονίζεται το ιστογράμμα των ανηγμένων παραμορφώσεων για τον αισθητήρα στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης, με τα υπόλοιπα ιστογράμματα των άλλων διημέρων να φαίνονται στην εικόνα Π6.3.



Εικόνα 6.11 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης, για διαδοχικές ημέρες

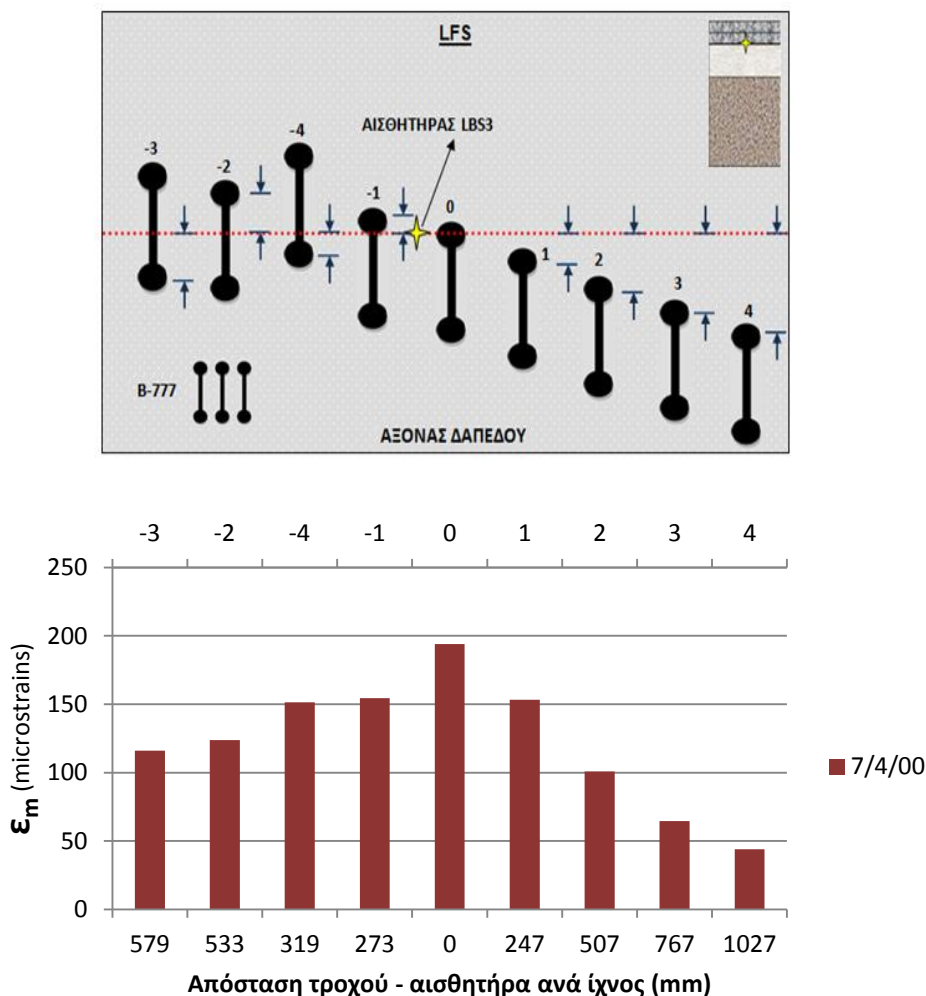
Τα συμπεράσματα που προκύπτουν εξετάζοντας τις μετρήσεις του εν λόγω αισθητήρα, είναι όμοια με αυτά που αναφέρθηκαν για τους προηγούμενους αισθητήρες. Δηλαδή, οι παραμορφώσεις κατά τη δεύτερη μέρα καθενός διημέρου είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τις παραμορφώσεις της πρώτης, παρουσιάζοντας μικρή αύξηση κατά τη δεύτερη ημέρα. Παρατηρήθηκε και εδώ η εξαίρεση για τις περιπτώσεις όπου στη μέρα με τις περισσότερες διελεύσεις, αλλά με μικρότερη θερμοκρασία σε σχέση με την προηγούμενή της, το δάπεδο ανέπτυξε μεγαλύτερες παραμορφώσεις.

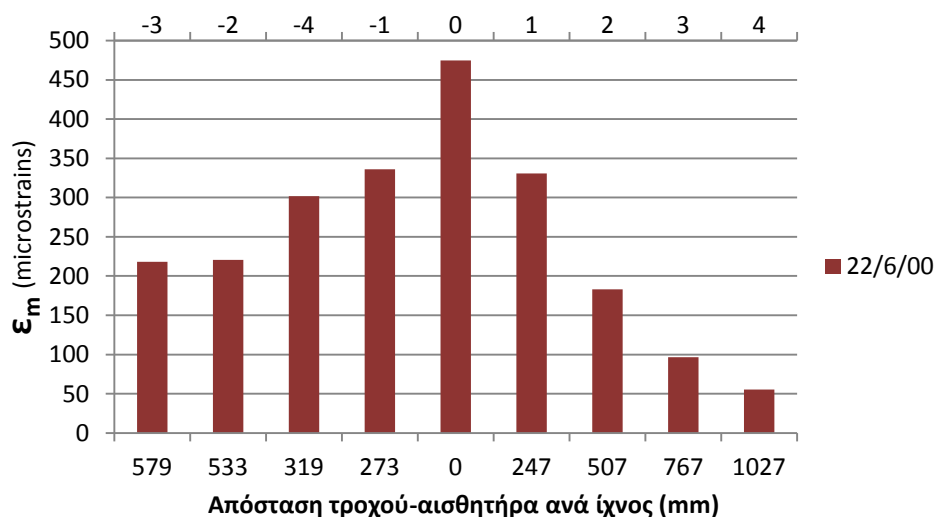
Επιπροσθέτως, είναι εμφανής η αύξηση των παραμορφώσεων από την πρώτη ημέρα που απεικονίζεται (4/4/00) έως την 11/7/00.

6.2.3.2 Ιστογράμματα μεμονωμένων ημερών

Ακολουθούν τα ιστογράμματα για μεμονωμένες ημέρες μεταξύ των ημερομηνιών 4/4/00 και 11/7/00, προκειμένου να έχουμε σαφή εποπτεία της κατάστασης του δαπέδου, καθώς αυξάνεται σταδιακά η θερμοκρασία και ο αριθμός των διελεύσεων. Σε ορισμένες εξ αυτών έχει πραγματοποιηθεί και εφαρμογή FWD (βλ. πίνακα 6.2).

Αρχικά, απεικονίζονται τα ιστογράμματα των παραμορφώσεων για τον πυθμένα της ασφαλτικής βάσης του βόρειου τμήματος (B-777), μόνο για την πρώτη και την τελευταία ημέρα από αυτές που έχουν επιλεγεί για τη συγκεκριμένη υποενοότητα (εικόνα 6.12). Τα ιστογράμματα για τις ενδιάμεσες ημέρες φαίνονται στο παράρτημα Α (εικόνα Π6.4).

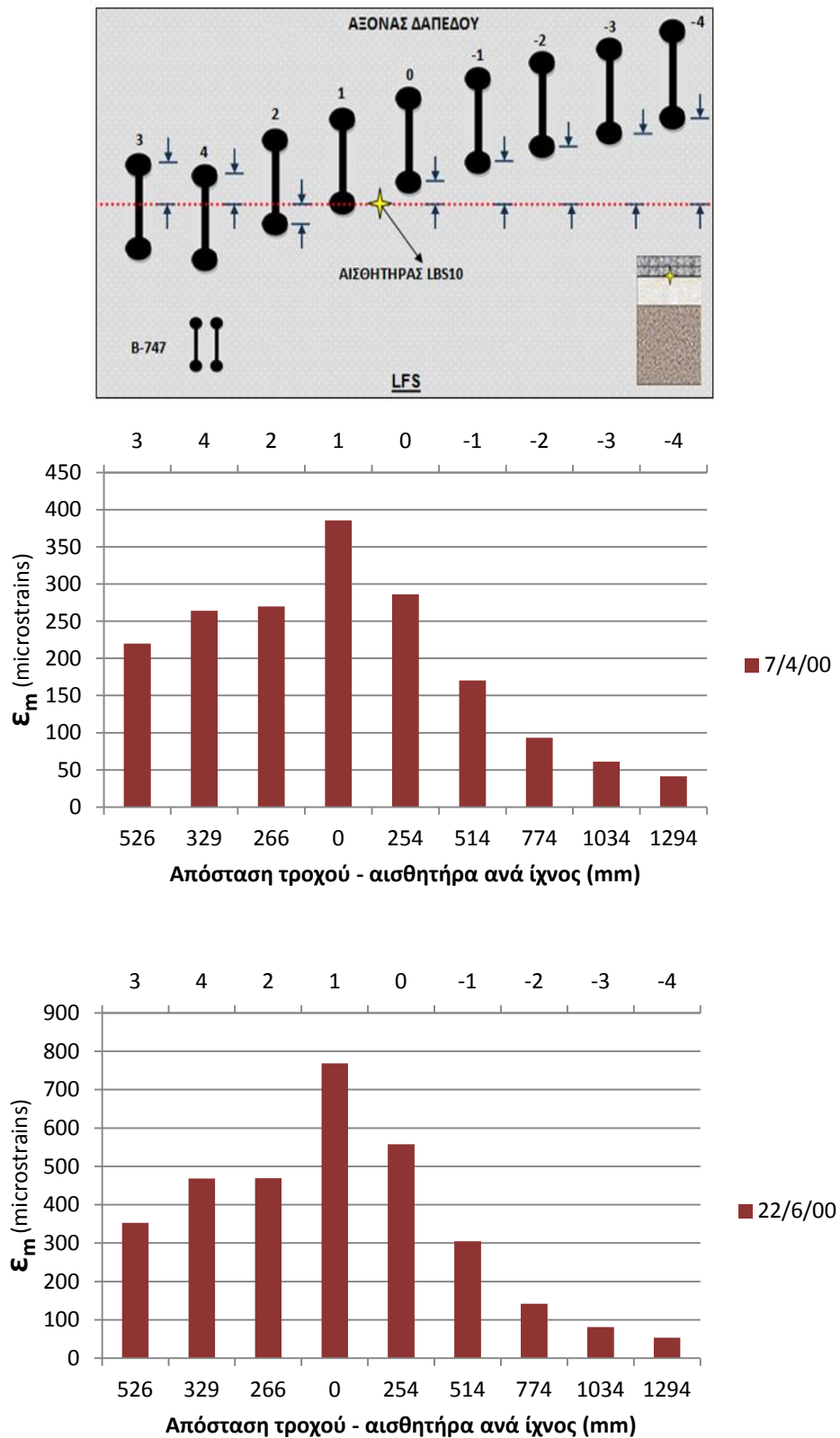




Εικόνα 6.12 Δάπεδο LFS, βόρειο τμήμα (B-777)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για μεμονωμένες ημέρες σε διάφορες θερμοκρασίες

Χρήσιμα συμπεράσματα προκύπτουν από τα ιστογράμματα των μεμονωμένων ημερών όσον αφορά στη συμπεριφορά του βόρειου τμήματος του δαπέδου. Το μέγεθος των παραμορφώσεων αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των διελεύσεων και η θερμοκρασία. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση των παραμορφώσεων για τις ημέρες 7/4/00 και 14/4/00. Αν και οι διελεύσεις που έχει υποστεί το δάπεδο στις 14/4/00 είναι περισσότερες, οι τιμές των παραμορφώσεων στις 7/4/00 είναι μεγαλύτερες. Η απόκριση αυτή του δαπέδου, μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι η θερμοκρασία στις 7/4/00 (13 °C) ήταν κατά 2 °C αυξημένη σε σχέση με αυτή στις 14/4/00 (11 °C). Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε από τη σύγκριση των παραμορφώσεων για τις ημέρες 15/5/00 και 23/5/00, όπου η θερμοκρασία στις 15/5/00 (19 °C) είναι κατά 3 °C αυξημένη από αυτή στις 23/5/00 (16 °C). Σημαντικά μεγαλύτερες είναι οι παραμορφώσεις στις 22/6/00, όπου τόσο η θερμοκρασία (23 °C), όσο και ο αριθμός των υφιστάμενων διελεύσεων αυξάνονται.

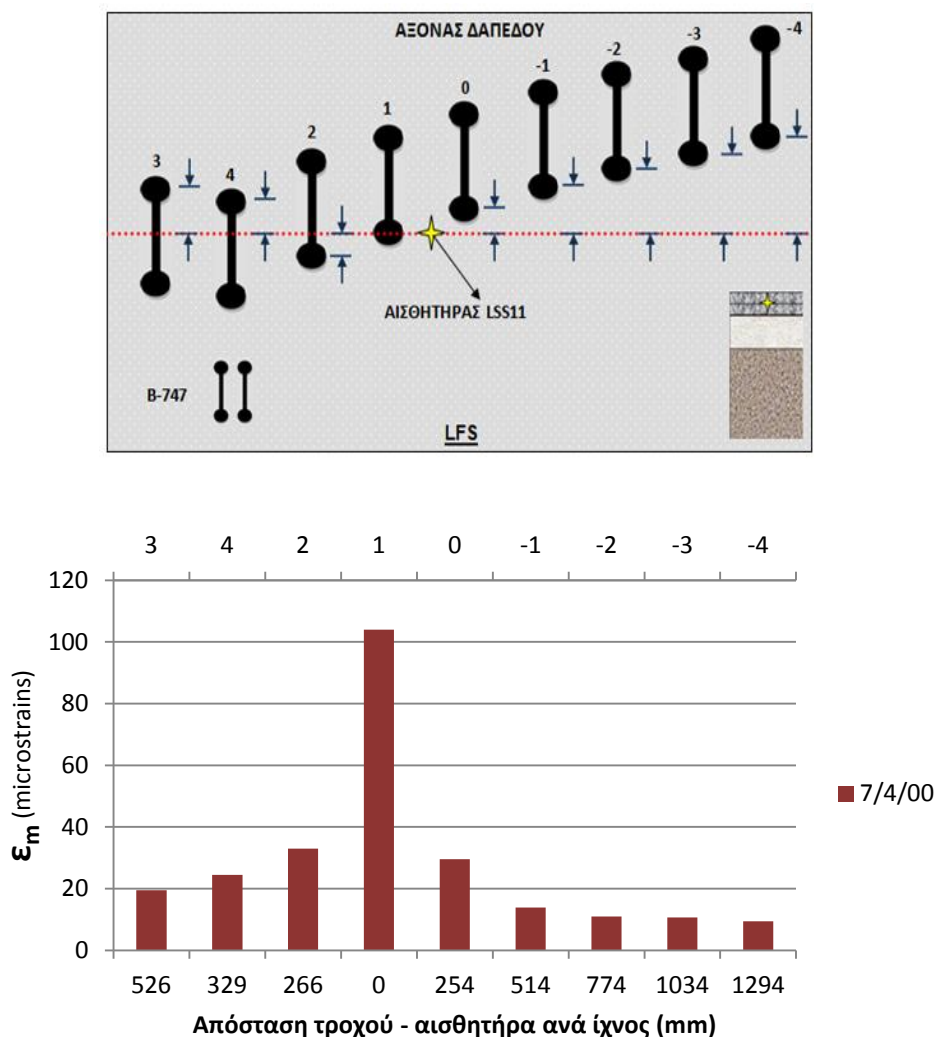
Στην εικόνα 6.13 φαίνονται με ανάλογο τρόπο τα ιστογράμματα για τον πυθμένα της βάσης από ασφαλτικό σκυρόδεμα του νότιου τμήματος (B-747). Τα ιστογράμματα των ανηγμένων παραμορφώσεων από τις 7/4/00 και έπειτα έως τις 22/6/00 παρουσιάζονται στην εικόνα Π6.5 του παραρτήματος Α.

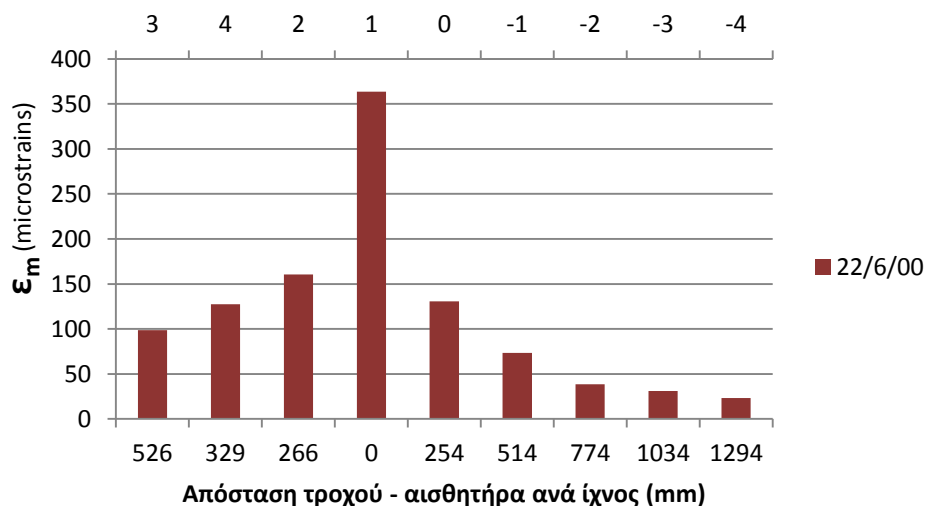


Εικόνα 6.13 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για μεμονωμένες ημέρες σε διάφορες θερμοκρασίες

Το μέγεθος των παραμορφώσεων αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των διελεύσεων και η θερμοκρασία και για το συγκεκριμένο τμήμα του δαπέδου. Η σύγκριση επίσης των παραμορφώσεων για τις ημέρες 7/4/00 και 14/4/00 δίνει τα ίδια αποτελέσματα με αυτά που προαναφέρθηκαν και για το βόρειο τμήμα του δαπέδου. Ανάλογα συμπέρασμα με αυτά που προαναφέρθηκαν προκύπτουν και από την αντίστοιχη σύγκριση για τις 15/5/00 και 23/5/00. Επιπλέον, είναι φανερή η σημαντική αύξηση των παραμορφώσεων στις 22/6/00 σε σχέση με τις προηγούμενες ημέρες, όπου τόσο η θερμοκρασία (23 °C), όσο και ο αριθμός των υφιστάμενων διελεύσεων έχουν αυξηθεί.

Στην εικόνα 6.14 παρατίθενται τα ιστογράμματα για τον πυθμένα της επιφανειακής ασφαλτικής στρώσης του νότιου τμήματος (B-747). Τα ιστογράμματα των ανηγμένων παραμορφώσεων από τις 7/4/00 και έπειτα έως τις 22/6/00 παρουσιάζονται στην εικόνα Π6.6 του παραρτήματος Α.





Εικόνα 6.14 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης, για μεμονωμένες ημέρες σε διάφορες θερμοκρασίες

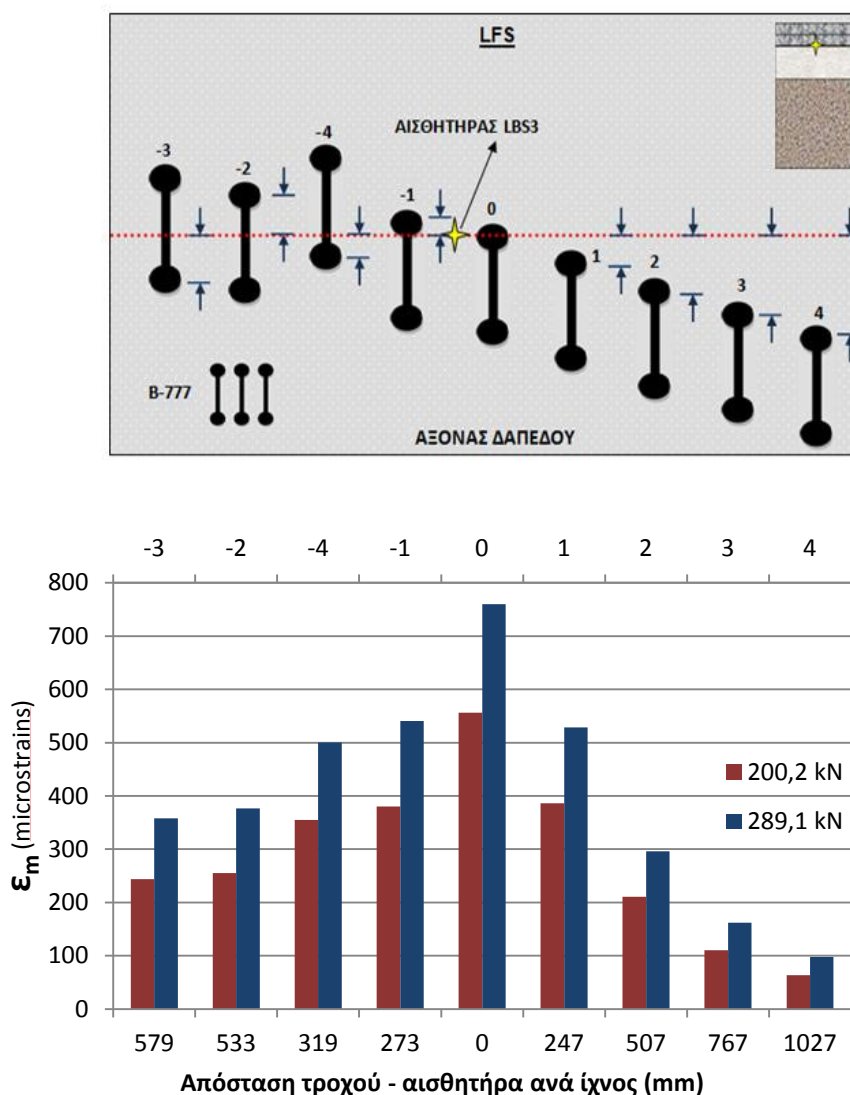
Η συμπεριφορά του ασφαλτοσκυροδέματος στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης είναι ομοειδής με αυτή που παρουσιάστηκε στον πυθμένα. Συγκεκριμένα, το μέγεθος των παραμορφώσεων αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, υπό την αύξηση του αριθμού των διελεύσεων και της θερμοκρασίας. Αυξήθηκαν σημαντικά οι παραμορφώσεις στις 22/6/00 σε σχέση με τις προηγούμενες ημέρες, υπό την αυξημένη θερμοκρασία (23 °C) και τον σαφώς μεγαλύτερο αριθμό των υφιστάμενων διελεύσεων.

Στην επόμενη υποενότητα, εξετάζεται η συμπεριφορά του οδοστρώματος για τις μέρες εκείνες που αυξάνεται το φορτίο ανά τροχό και στα δύο φορεία.

6.2.3.3 Επιρροή μεγέθους φορτίου ανά τροχή

Όλες οι μέρες που έχουν επιλεγεί δεν απέχουν χρονικά μεταξύ τους και η θερμοκρασία είναι σταθερή (23 με 24 °C). Κατ' αυτόν τον τρόπο, διερευνάται αποκλειστικά η επιρροή του φορτίου στο κατάστρωμα.

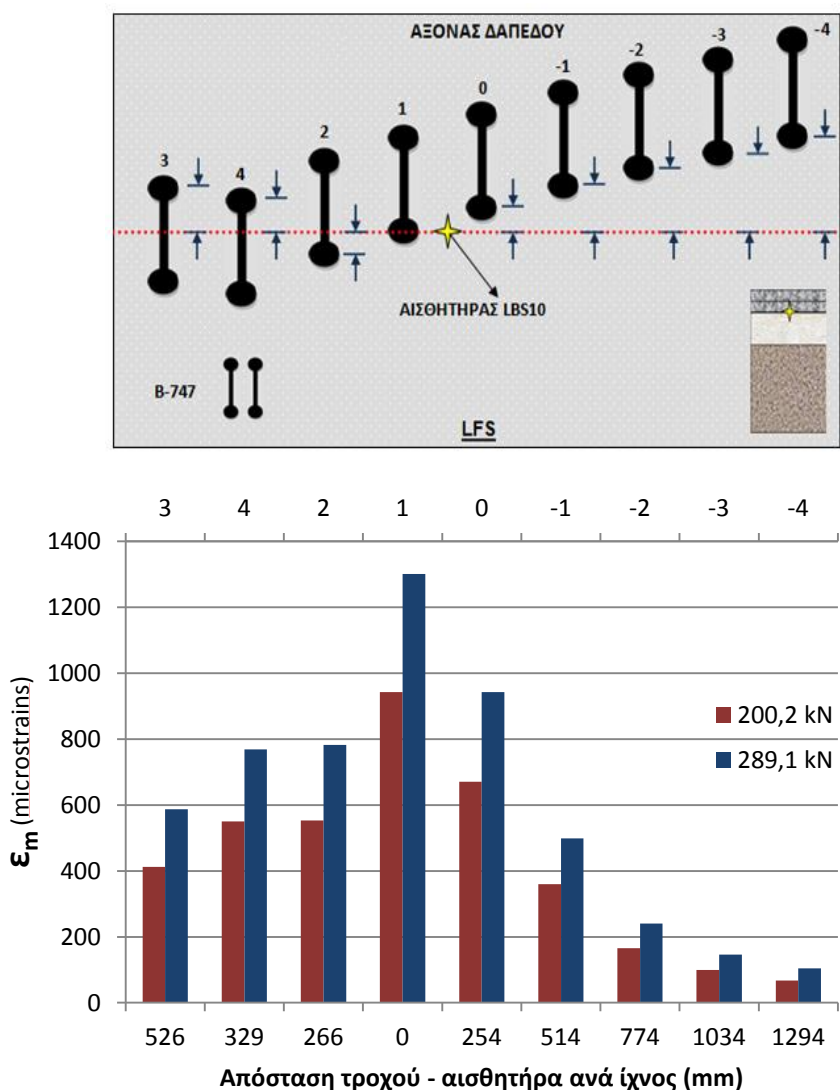
Παρουσιάζεται μόνο το ιστόγραμμα των παραμορφώσεων για την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή του φορτίου (200,2 και 289,1 kN αντίστοιχα). Τα ιστογράμματα των παραμορφώσεων με τις ενδιάμεσες τιμές του φορτίου βρίσκονται στο παράρτημα Α (εικόνα Π6.7)



Εικόνα 6.15 Δάπεδο LFS, βόρειο τμήμα (B-777)-Ιστόγραμμα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για δοκιμές με διαφορετικά φορτία ανά τροχή (ελάχιστη και μέγιστη τιμή φορτίου)

Η συμπεριφορά του δαπέδου στην αύξηση του φορτίου ανά τροχό είναι η αναμενόμενη. Παρατηρούμε ότι οι παραμορφώσεις αυξάνονται με την αύξηση του φορτίου (εικόνα παραρτήματος Α, Π6.7). Η συνολική μεταβολή στις παραμορφώσεις του βόρειου τμήματος (B-777) εξαιτίας της αύξησης του φορτίου/τροχό από 200,2 kN (17/8/00) σε 289,1 kN (1/9/00), επέφερε αύξηση της τάξεως του 43 % (με συντελεστή μεταβλητότητας 12,8 %), με τις δύο ημέρες να μη διαφέρουν θερμοκρασιακά (24°C).

Με τον ίδιο τρόπο, παρουσιάζεται το ιστογράμμα των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται από το B-747 στον πυθμένα της ασφαλτικής βάσης για την ελάχιστη και μέγιστη τιμή που έλαβε το φορτίο ανά τροχό κατά τις δοκιμές (εικόνα 6.16). Τα ιστογράμματα για τις ενδιάμεσες τιμές του φορτίου, καθώς αυτό αυξάνει από τα 200,2 kN στα 289,1 kN, φαίνονται στην εικόνα Π6.8 του παραρτήματος Α.



Εικόνα 6.16 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για δοκιμές με διαφορετικά φορτία ανά τροχό (ελάχιστη και μέγιστη τιμή φορτίου)

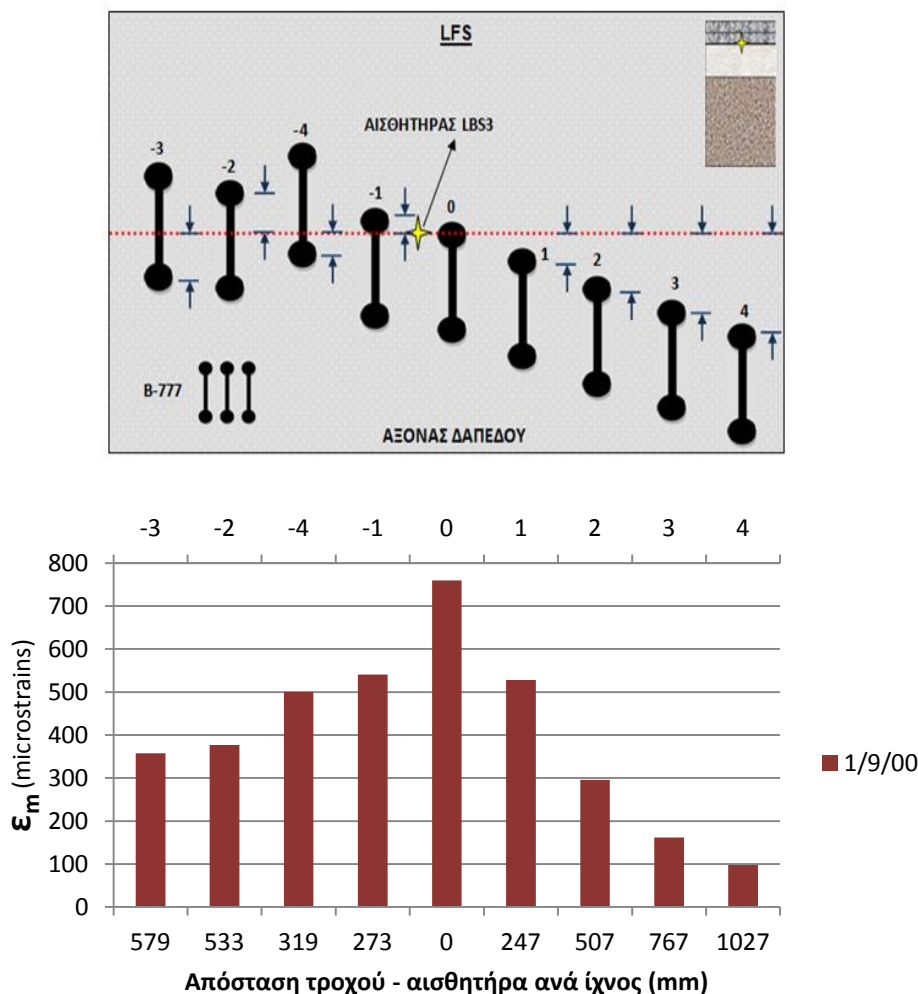
Αντίστοιχα με τα προηγούμενα παρατηρείται ότι οι παραμορφώσεις αυξάνονται με την αύξηση του φορτίου (εικόνα παραρτήματος Α, Π6.8). Για το τμήμα αυτό (B-747), η συνολική αύξηση στις παραμορφώσεις εξαιτίας της αύξησης του φορτίου από 200,2 kN (17/8/00) σε 289,1 kN (1/9/00), επέφερε αύξηση της τάξεως του 44% (με συντελεστή διακύμανσης 11,6 %) και όπως προαναφέρθηκε οι δύο ημέρες δε διαφέρουν θερμοκρασιακά (24°C).

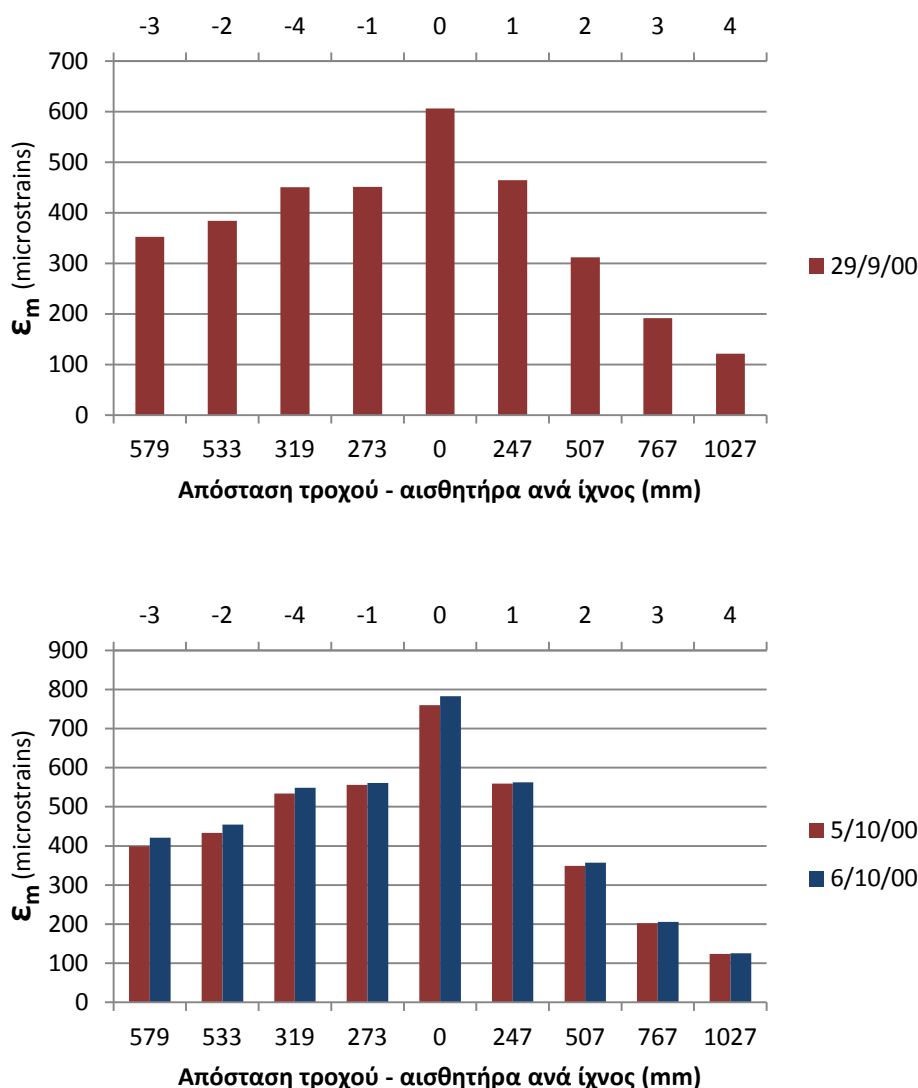
Ο αισθητήρας στο μέσον της ασφαλτικής στρώσης του νότιου τμήματος έδωσε εσφαλμένες τιμές για τις συγκεκριμένες ημέρες δοκιμών και έτσι δεν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Το φορτίο λαμβάνει τη μέγιστη τιμή την 1/9/00 (289,1 kN) και έπειτα παραμένει σταθερό για τις επόμενες ημέρες δοκιμών. Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα ιστογράμματα με αυτό το φορτίο, για διάφορες ημέρες, σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

6.2.3.3.1 Μεμονωμένες ημέρες φορτίσεων με το μέγιστο φορτίο ανά τροχό

Μέσω αυτών των ημερών, μπορεί να υπάρξει σαφή εικόνα της συμπεριφοράς του δαπέδου με την πάροδο του χρόνου, υπό τη δυσμενέστερη φόρτιση. Στις ημέρες αυτές (εκτός από την 1/9/00) έχουν πραγματοποιηθεί και FWD εφαρμογές. Οπότε, καθίσταται εφικτή η σύγκριση των τιμών των παραμορφώσεων που μετρώνται άμεσα από τους αισθητήρες, με αυτές που θα προκύψουν από τον αναλυτικό υπολογισμό.





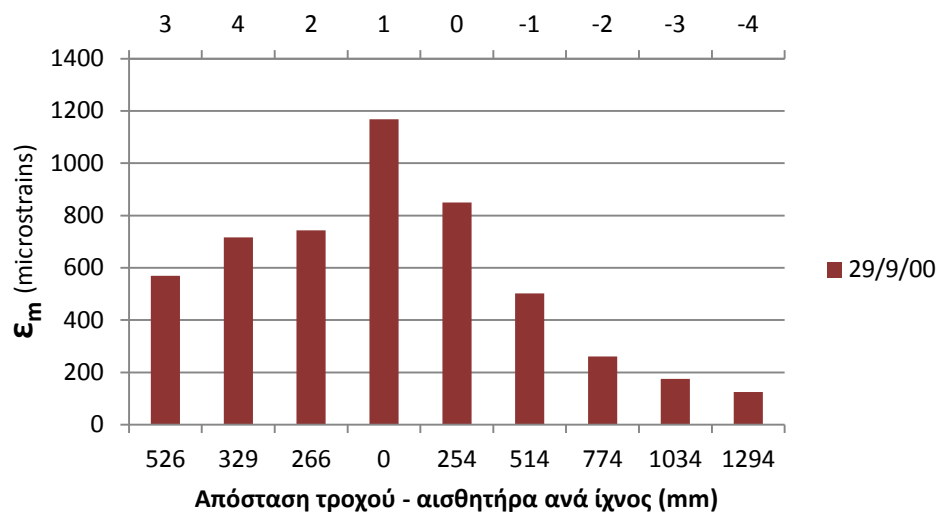
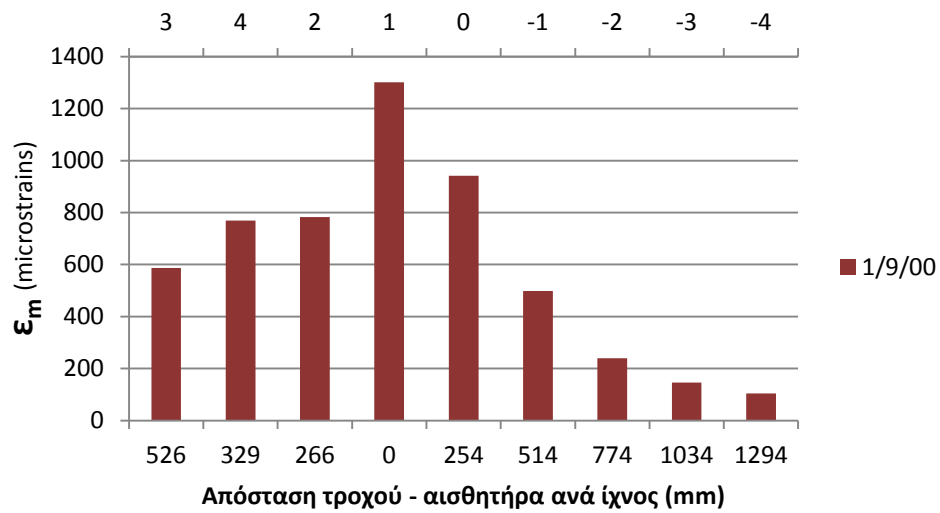
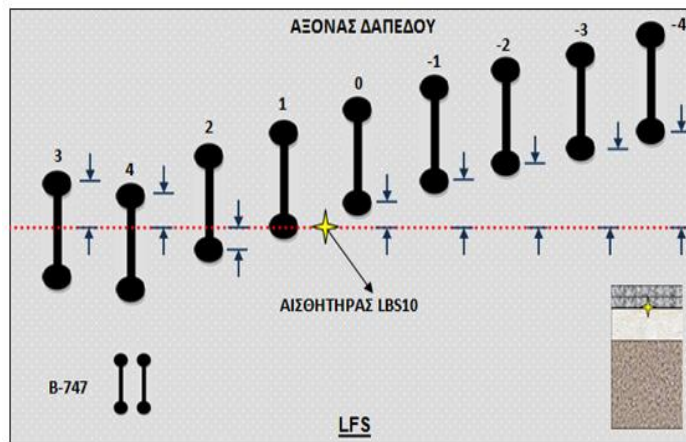
Εικόνα 6.17 Δάπεδο LFS, βόρειο τμήμα (B-777)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για δοκιμές με το μέγιστο φορτίο ανά τροχό

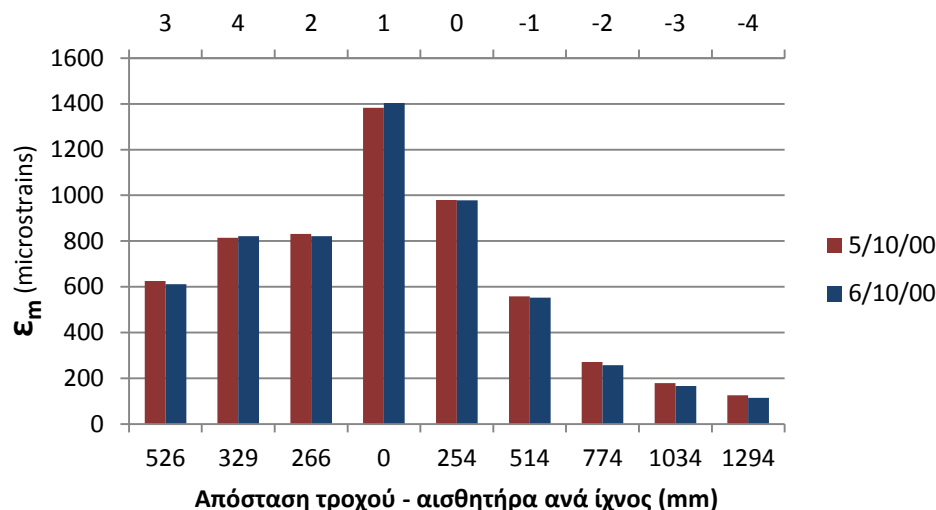
Όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 6.17 για το τμήμα του δαπέδου που φορτίζεται από το B-777, είναι αξιοπρόσεχτη η διαφορά στις τιμές των παραμορφώσεων μεταξύ της 1/9/00 και 29/9/00. Οι παραμορφώσεις κατά την 1/9/00 είναι μεγαλύτερες από τις παραμορφώσεις στις 29/9/00. Ενώ ο αριθμός των υφιστάμενων διελεύσεων είναι προφανώς μεγαλύτερος την 29/9/00, η θερμοκρασία επηρεάζει περισσότερο τη συμπεριφορά του οδοστρώματος. Για την ακρίβεια, η θερμοκρασία την 1/9/00 ήταν 24 °C, ενώ στις 29/9/00, 20 °C.

Για τις ημέρες 5/10/00 και 6/10/00, παρατηρείται αύξηση στις τιμές των παραμορφώσεων. Η θερμοκρασία και για τις δύο αυτές μέρες ήταν 22 °C. Αν και μικρότερη κατά 2 °C από αυτήν της 1/9/00, οι παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερες. Το γεγονός αυτό φανερώνει την καταπόνηση του δαπέδου καθώς αυξάνεται ο αριθμός των φορτίσεων.

Η σύγκριση των δύο συνεχόμενων ημερών, υποδεικνύει ότι οι παραμορφώσεις είναι της ίδιας τάξης μεγέθους. Παρατηρείται μια μικρή αύξηση των παραμορφώσεων κατά την 6/10/00.

Στην επόμενη εικόνα (6.18) παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για τον πυθμένα της ασφαλτικής βάσης του νότιου τμήματος του δαπέδου (B-747).





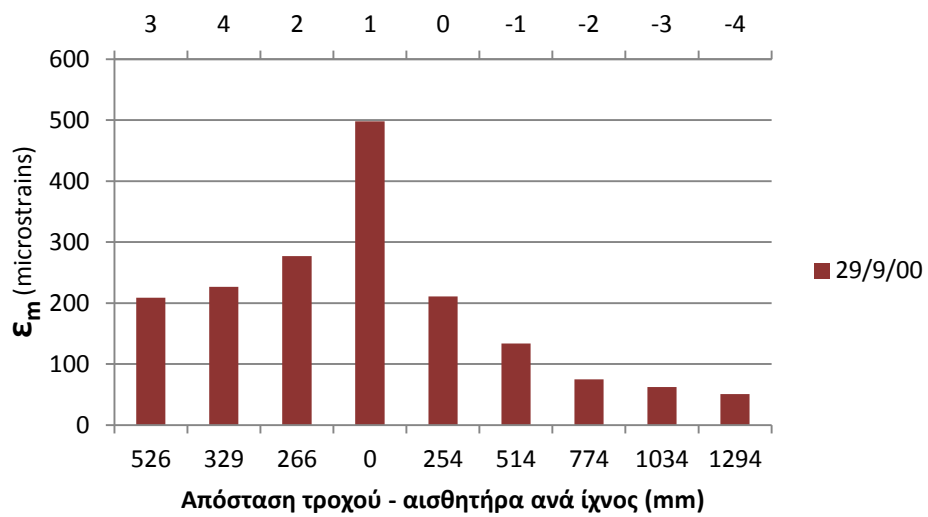
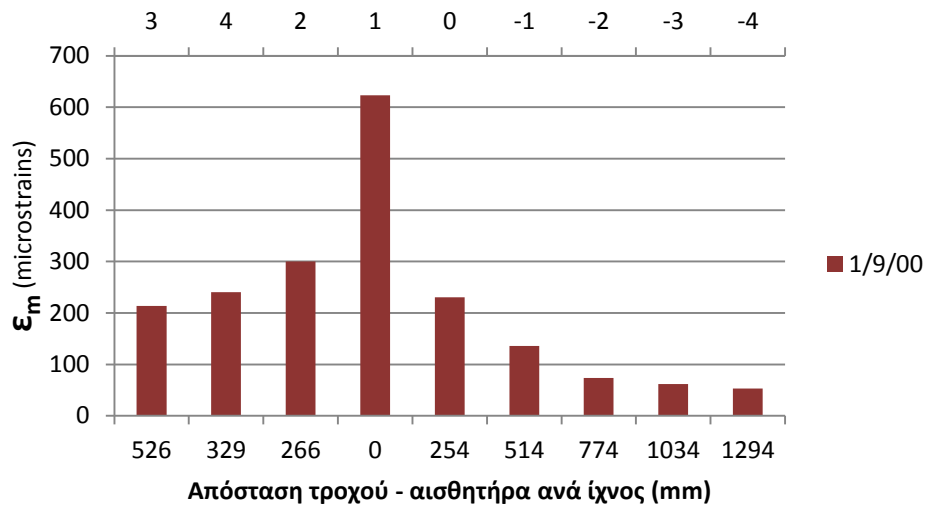
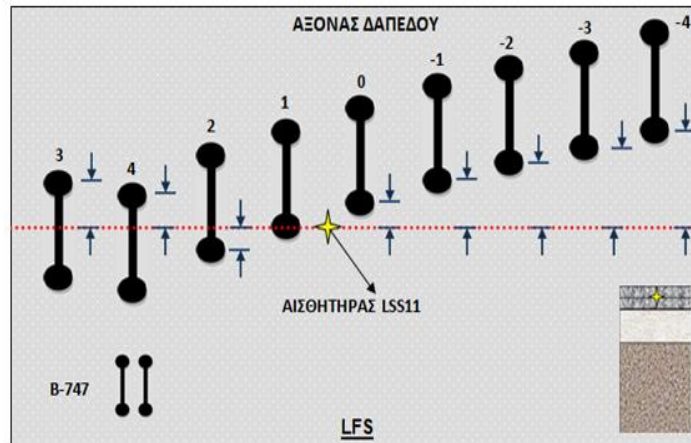
Εικόνα 6.18 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για δοκιμές με το μέγιστο φορτίο ανά τροχό

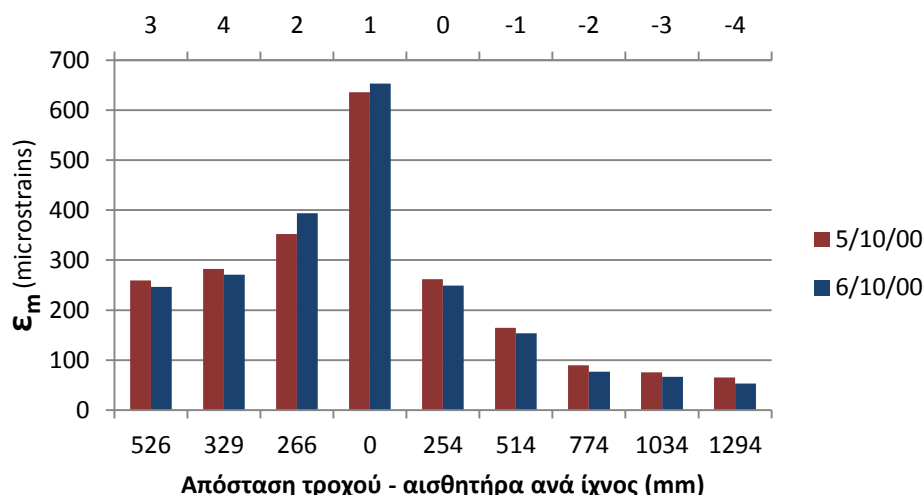
Διαπιστώνεται ανάλογη διαφορά στις τιμές των παραμορφώσεων μεταξύ της 1/9/00 και 29/9/00, λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς που προαναφέρθηκε.

Για τις δύο συνεχόμενες ημέρες (5/10/00 και 6/10/00), παρατηρείται αύξηση στις τιμές των παραμορφώσεων σε σχέση με αυτές προηγούμενων ημερών, φανερώνοντας έτσι την καταπόνηση του δαπέδου με την πάροδο του χρόνου.

Η σύγκριση των δύο συνεχόμενων ημερών, υποδεικνύει ότι οι παραμορφώσεις είναι της ίδιας τάξης μεγέθους. Βέβαια, παρουσιάζεται αύξηση (6/10/00) μόνο για τα ίχνη με την μικρότερη απόσταση τροχού-αισθητήρα.

Στην εικόνα 6.19 φαίνονται τα ιστογράμματα για το μέσον της στρώσης του ασφαλτικού σκυροδέματος (πυθμένας επιφανειακής ασφαλτικής στρώσης).





Εικόνα 6.19 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης, για δοκιμές με το μέγιστο φορτίο ανά τροχό

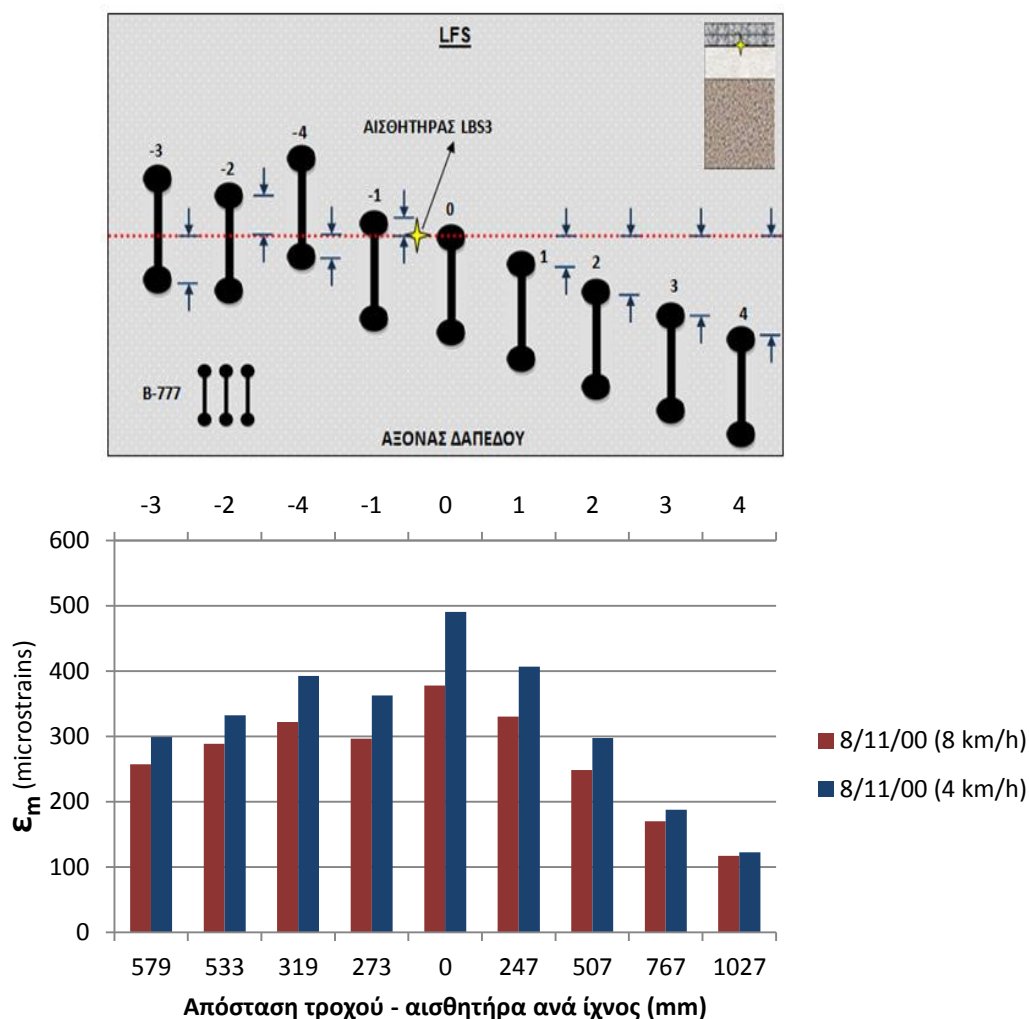
Η συμπεριφορά του ασφαλτοσκυροδέματος στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης είναι ομοειδής με αυτήν του πυθμένα της ασφαλτικής βάσης για τις συγκεκριμένες φορτίσεις που εξετάζονται στην παρούσα υποενότητα. Δηλαδή, ισχύουν τα ίδια που προαναφέρθηκαν για τους δύο αισθητήρες του πυθμένα της ασφαλτικής βάσης.

6.2.3.4 Επιρροή ταχύτητας φορείων

Εν συνεχεία, διερευνάται η επίδραση της μείωσης της ταχύτητας του οχήματος, με την ταυτόχρονη διατήρηση του μέγιστου φορτίου ανά τροχό (289,1 kN), στη συμπεριφορά του δαπέδου.

Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζεται μόνο το ιστογράμματα των παραμορφώσεων που αναπτύχθηκαν από τις φορτίσεις στην ίδια ημέρα (8/11/00), για τις δύο διαφορετικές τιμές της ταχύτητας των φορείων. Υπάρχουν ακόμα δύο ιστογράμματα παραμορφώσεων για κάθε αισθητήρα (παράρτημα Α), στα οποία συγκρίνεται η απόκριση του δαπέδου στις φορτίσεις με διαφορετικές τιμές ταχύτητας διέλευσης των φορείων, αλλά για διαφορετικές ημέρες.

Στην εικόνα 6.20 φαίνονται οι διαφορές στις τιμές των παραμορφώσεων για το βόρειο τμήμα (B-777). Τα ιστογράμματα στα οποία συγκρίνεται η απόκριση του δαπέδου υπό τις φορτίσεις με διαφορετική ταχύτητα του B-777, για διαφορετικές ημέρες παρατίθενται στην εικόνα Π6.9 (παράρτημα Α).

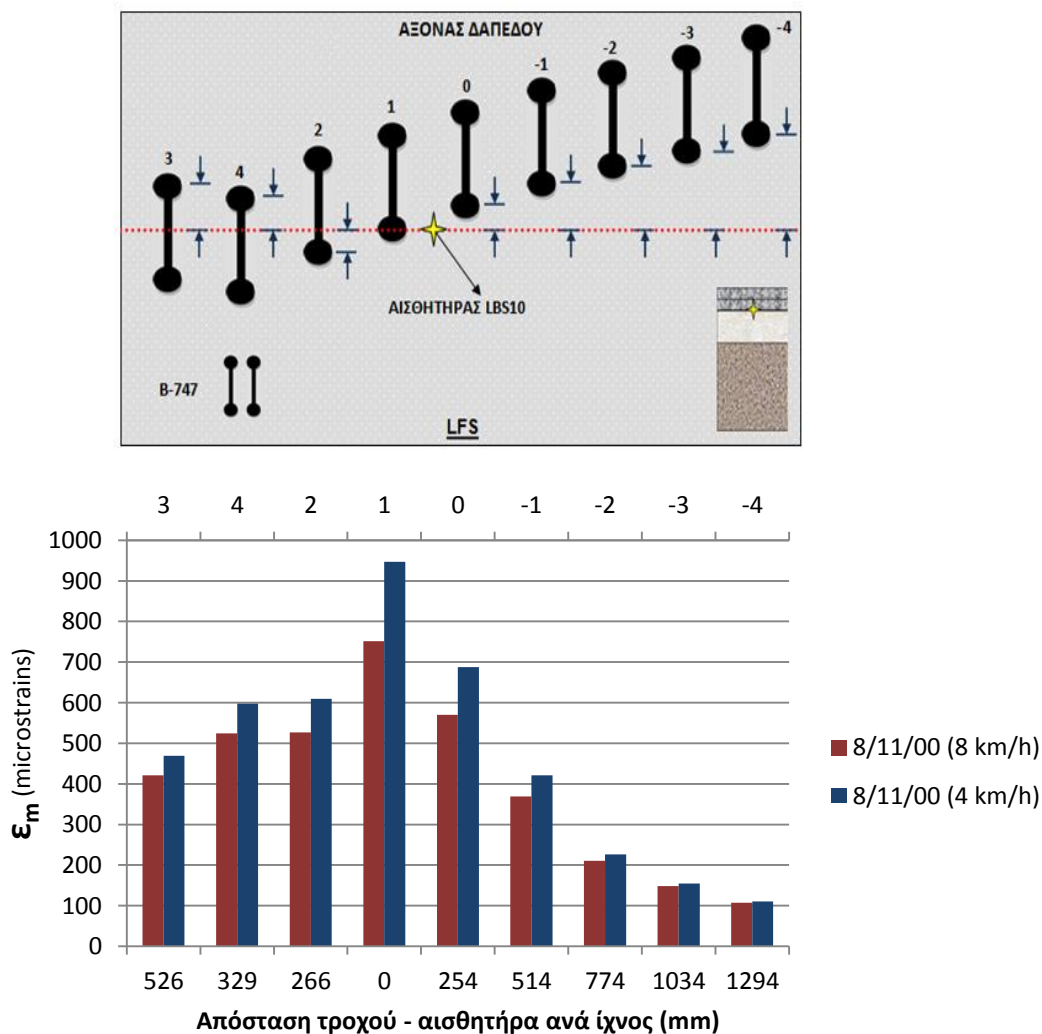


Εικόνα 6.20 Δάπεδο LFS, βόρειο τμήμα (B-777)-Ιστογράμμο παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για δοκιμές με μειωμένη ταχύτητα οχήματος και μέγιστο φορτίο ανά τροχό

Το οδόστρωμα έχει την ίδια θερμοκρασία, τόσο στις 8/11/00, όσο και στις 9/11/00, η οποία είναι 18 °C. Είναι προφανές ότι ο υποδιπλασιασμός της ταχύτητας, προκάλεσε μεγάλη αύξηση στις ανηγμένες παραμορφώσεις. Συγκεκριμένα, για τη συγκεκριμένη ημέρα δοκιμών (8/11/00) οι παραμορφώσεις αυξήθηκαν κατά 13 % στο βόρειο τμήμα (με το συντελεστή μεταβλητότητας να είναι 41,6 %).

Η σύγκριση των ιστογραμμάτων που προέκυψαν από τις δοκιμές με τη μειωμένη ταχύτητα για τις δύο συνεχόμενες ημέρες, φανερώνει μια μικρή αύξηση των παραμορφώσεων κατά τη δεύτερη μέρα.

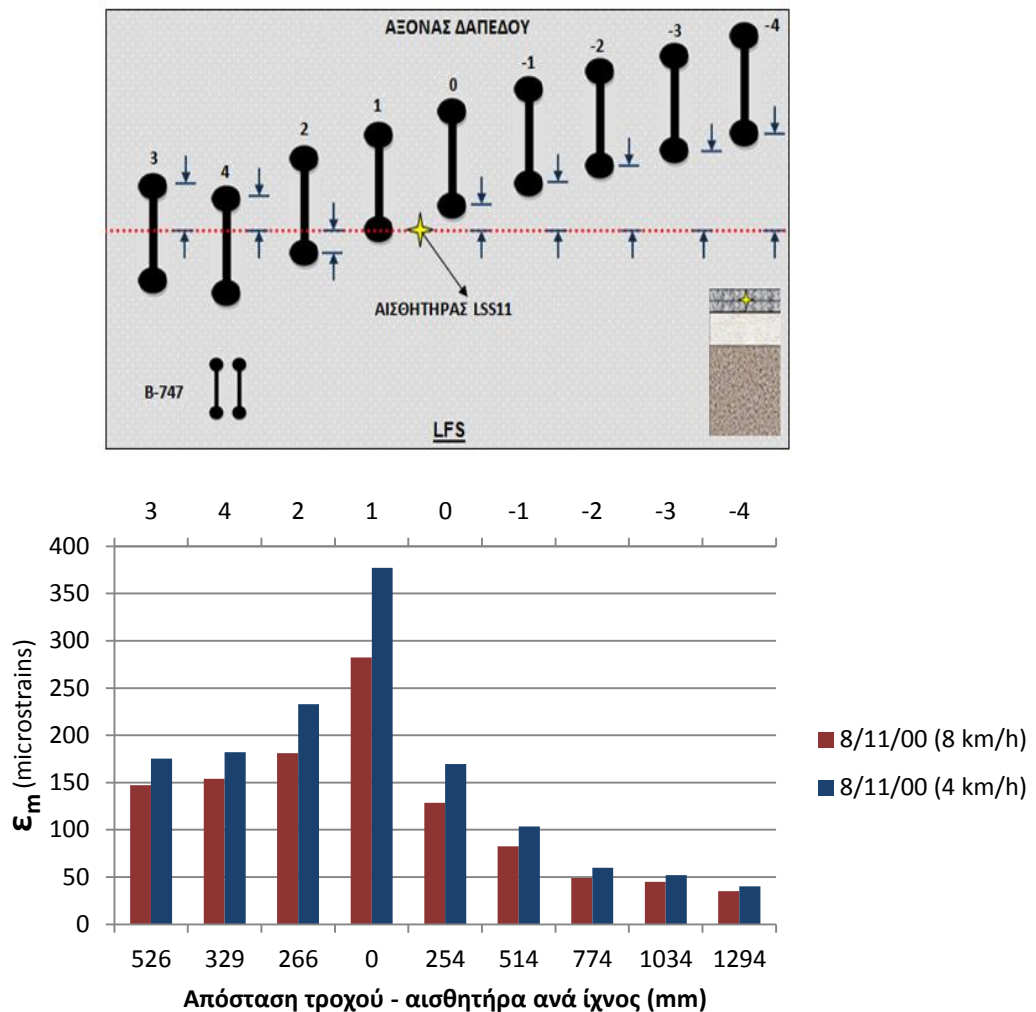
Στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 6.21) πραγματοποιείται η αντίστοιχη σύγκριση για το νότιο τμήμα του δαπέδου (B-747). Τα υπόλοιπα ιστογράμματα που αφορούν στην επιρροή της ταχύτητας παρουσιάζονται στην εικόνα Π6.10 του παραρτήματος Α.



Εικόνα 6.21 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμμο παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για δοκιμές με μειωμένη ταχύτητα οχήματος και μέγιστο φορτίο ανά τροχό

Για την ίδια μέρα δοκιμών (8/11/00) οι παραμορφώσεις αυξήθηκαν κατά 18 % σε αυτό το τμήμα, με το συντελεστή διακύμανσης ίσος με 59,2 %.

Στην εικόνα 6.22 παρουσιάζεται η απόκριση του δαπέδου υπό τη μείωση της ταχύτητας στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης. Τα υπόλοιπα ιστογράμματα σχετικά με την επιρροή της ταχύτητας φαίνονται στο παράρτημα Α (εικόνα Π6.11).



Εικόνα 6.22 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμμο παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης, για δοκιμές με μειωμένη ταχύτητα οχήματος και μέγιστο φορτίο ανά τροχό

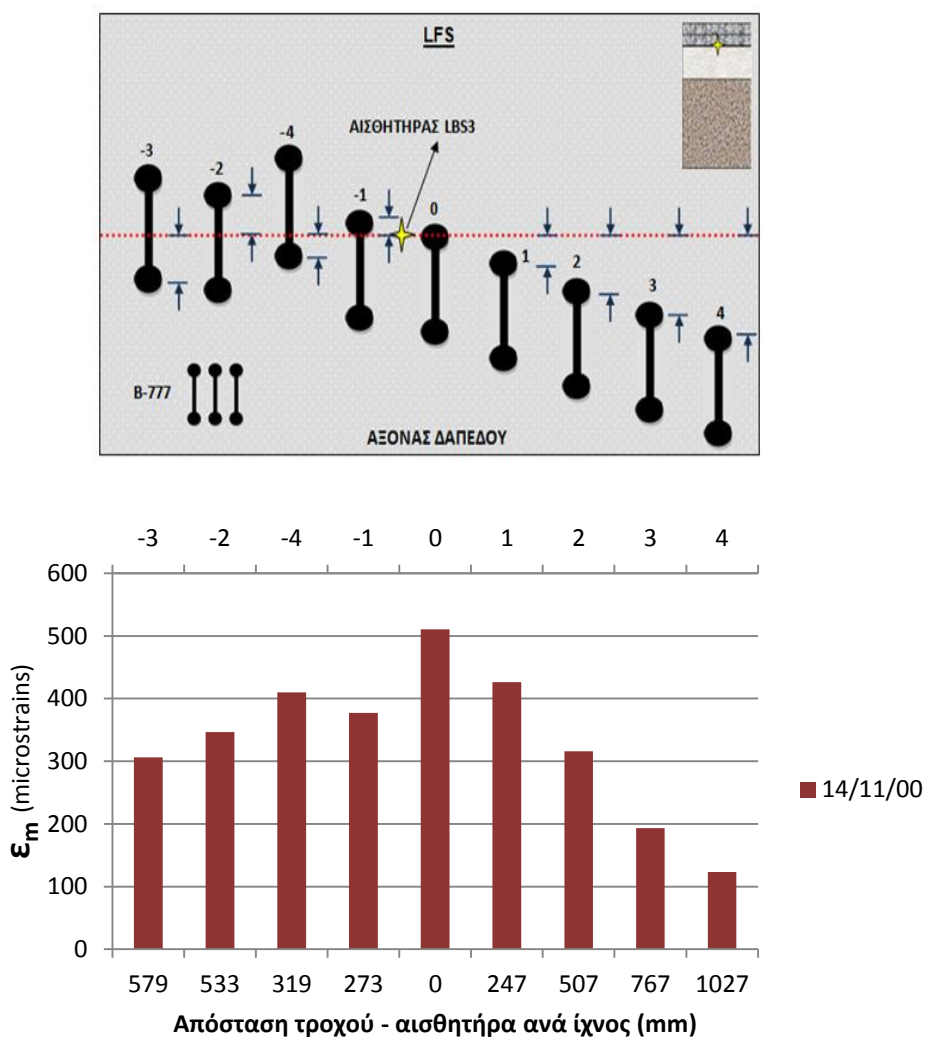
Απεδείχθη ότι η συμπεριφορά του δαπέδου στον πυθμένα της ασφαλτικής επιφανειακής στρώσης είναι ομοειδής με αυτή στο πυθμένα της βάσης από ασφαλτικό σκυρόδεμα. Συγκεκριμένα, ο υποδιπλασιασμός της ταχύτητας του B-747 επιφέρει την αναμενόμενη αύξηση στις τιμές των παραμορφώσεων.

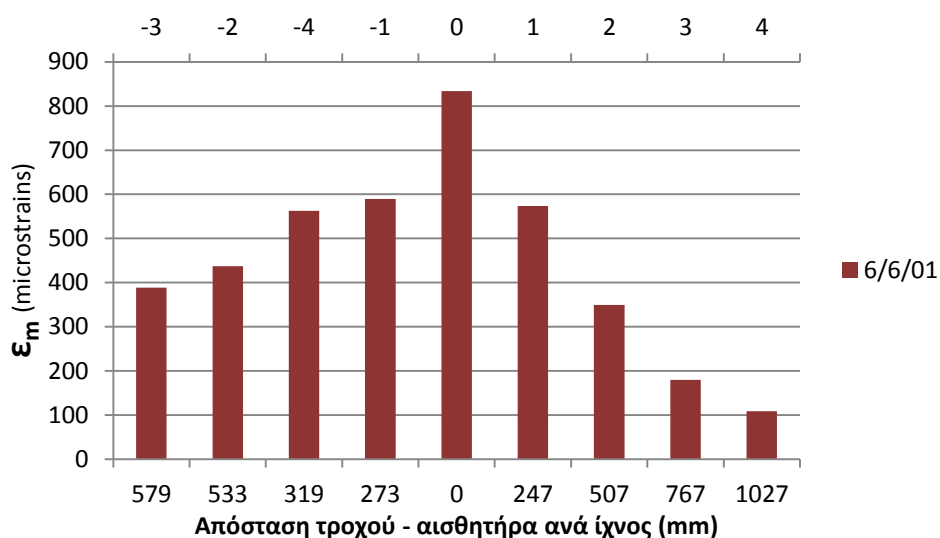
Θα πρέπει να υπογραμμιστεί ότι οι τιμές των παραμορφώσεων και για τους τρεις αισθητήρες μειώνονται συγκριτικά με τις παραμορφώσεις που αναπτύχθηκαν στις ημέρες που εξετάστηκαν με μεγαλύτερες θερμοκρασίες και το φορτίο/τροχό ήταν το ίδιο (π.χ. 5/10/00). Παρόλο που η ταχύτητα μειώνεται και ο αριθμός των διελεύσεων αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, οι παραμορφώσεις μειώνονται αισθητά. Το γεγονός αυτό, αποδεικνύει ότι η θερμοκρασία έχει βαρύνουσα σημασία στον τρόπο απόκρισης του οδοστρώματος, αποτελώντας τον πιο καθοριστικό παράγοντα.

6.2.3.4.1 Μειονωμένες ημέρες φορτίσεων με το μέγιστο φορτίο τροχού και την ελάχιστη ταχύτητα φορείου

Για περαιτέρω διερεύνηση της επιρροής της ταχύτητας του οχήματος στο οδόστρωμα, παρατίθενται τα παρακάτω ιστογράμματα. Στις μέρες που επιλέγονται, η θερμοκρασία διαφέρει, ενώ το φορτίο του οχήματος εξακολουθεί να είναι το μέγιστο και η ταχύτητα μειωμένη στα 4 km/h. Επιπλέον, έχουν γίνει και FWD εφαρμογές.

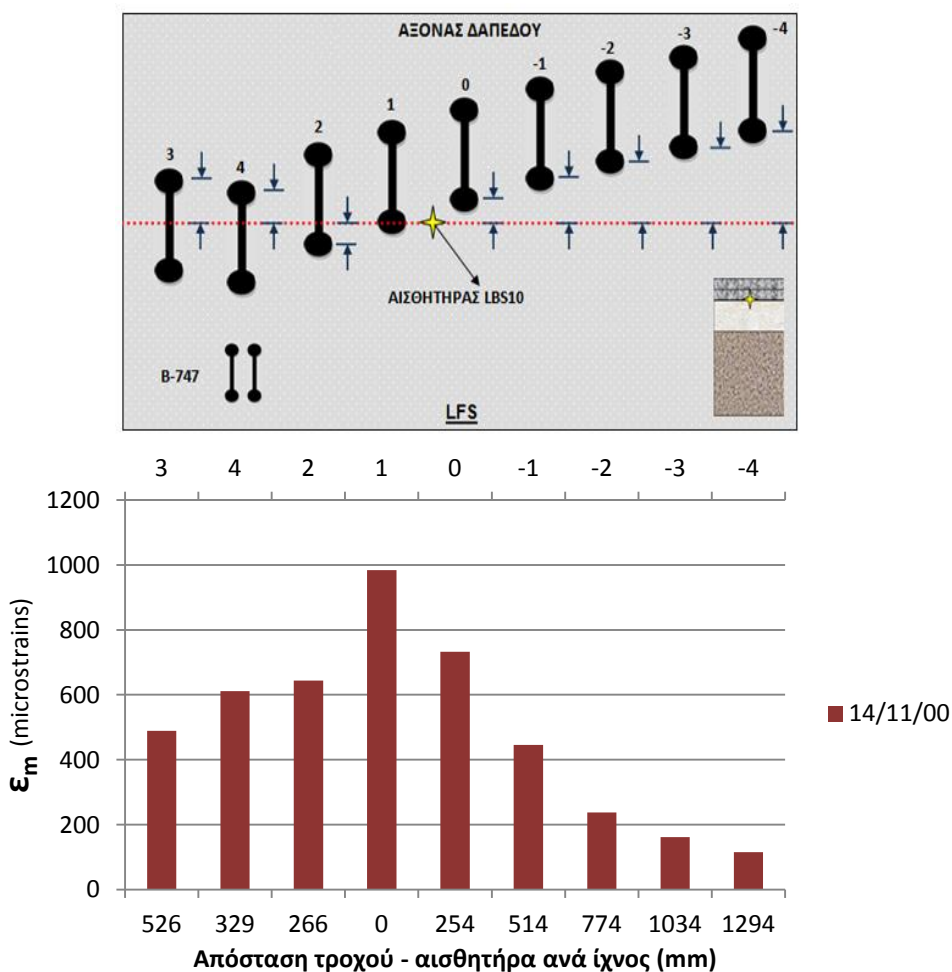
Στην πρώτη εικόνα παρουσιάζονται τα ιστογράμματα των παραμορφώσεων για το τμήμα του δαπέδου που φορτίζεται από το B-777.

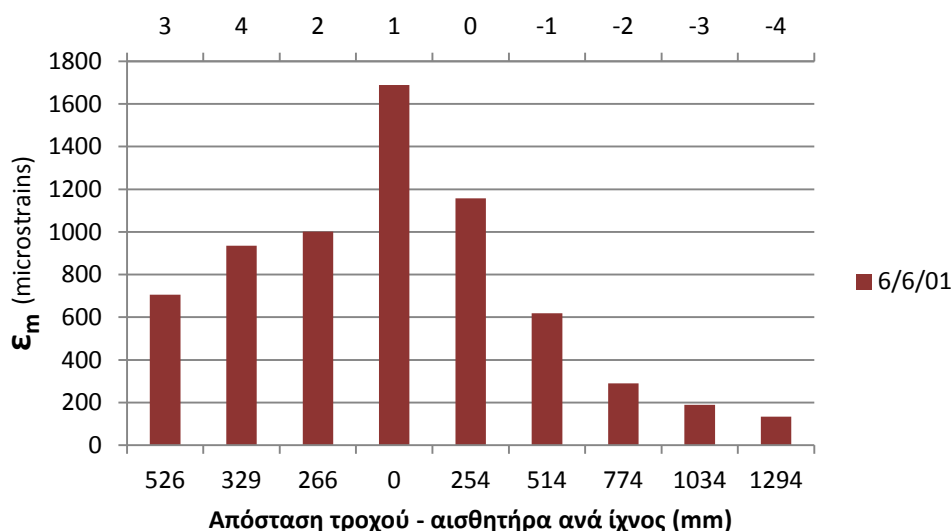




Εικόνα 6.23 Δάπεδο LFS, βόρειο τμήμα (B-777)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για δοκιμές με μειωμένη ταχύτητα οχήματος και μέγιστο φορτίο ανά τροχό

Στην εικόνα 6.24 παρουσιάζονται τα ιστογράμματα για το νότιο τμήμα (B-747), επίσης στον πυθμένα των ασφαλτικών και έπειτα σχολιάζονται οι τιμές και των δύο αισθητήρων, αφού οι αποκρίσεις τους είναι ομοειδείς





Εικόνα 6.24 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για δοκιμές με μειωμένη ταχύτητα οχήματος και μέγιστο φορτίο ανά τροχό

Στις 6/6/01 παρατηρούμε ότι οι παραμορφώσεις παίρνουν τις μέγιστες τιμές. Η θερμοκρασία είναι υψηλή (21 °C) και η καταπόνηση του δαπέδου από τις υφιστάμενες διελεύσεις μεγάλη.

Διαπιστώνουμε επίσης, ότι οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται την 14/11/00 (17 °C) δεν απέχουν πολύ από εκείνες στις 9/11/00 (18 °C). Διότι, οι δύο μέρες είναι κοντινές χρονικά και δε διαφέρουν θερμοκρασιακά. Έτσι και στις 14/11/00, οι αισθητήρες δίνουν τιμές χαμηλότερες από τις ημερομηνίες εκείνες στις οποίες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με μεγαλύτερη ταχύτητα φορείων (π.χ. 5/10/00), αλλά η θερμοκρασία του καταστρώματος ήταν μεγαλύτερη.

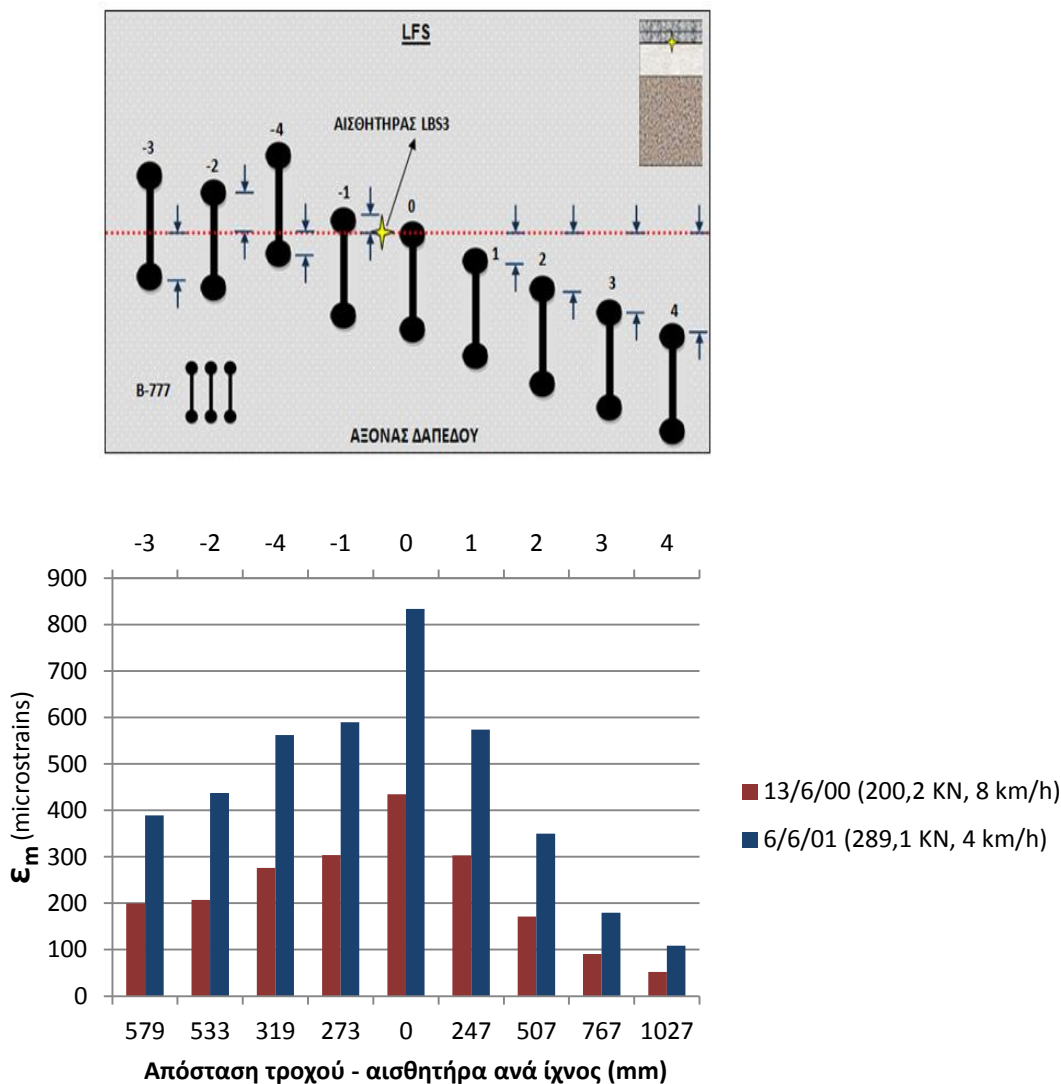
Ο αισθητήρας στον πυθμένα της επιφανειακής ασφαλτικής στρώσης έδωσε εσφαλμένες τιμές για τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στις δύο αυτές ημέρες και έτσι δεν έγιναν τα αντίστοιχα ιστογράμματα.

6.2.3.5 Σύγκριση αρχικής και τελικής κατάστασης δαπέδου

Αξίζει να συγκριθούν οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο δάπεδο στην αρχική περίοδο φορτίσεων και κατά την τελευταία ημέρα. Προκειμένου να εξαιρεθεί η επιρροή της θερμοκρασίας, επιλέγονται ημέρες με την ίδια θερμοκρασία δαπέδου. Συγκεκριμένα, στις 13/6/00 το φορτίο ανά τροχό είχε την αρχική τιμή (200,2 KN) και η ταχύτητα τη μέγιστη τιμή (8 km/h), ενώ η θερμοκρασία της επιφάνειας του καταστρώματος ήταν στους 21 °C. Στις 6/6/01, το δάπεδο είχε την ίδια θερμοκρασία, το φορτίο ανά τροχό έχει τη μέγιστη τιμή (289,1 KN) και η ταχύτητα έχει μειωθεί στο μισό (4 km/h). Κατ' αυτόν τον τρόπο προκύπτει ένας απολογισμός σχετικά με την επιρροή της ταχύτητας, του φορτίου και ιδίως της καταπόνησης του δαπέδου από τις υφιστάμενες διελεύσεις έως την 6/6/01.

Οι δύο αυτές ημέρες απέχουν περίπου ένα έτος, στο οποίο πραγματοποιήθηκαν πολλές δοκιμές-φορτίσεις. Είναι λογικό, έτσι, οι παραμορφώσεις στις 6/6/01 να παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές. Παρ' όλα αυτά, η σύγκριση δίδει χρήσιμα

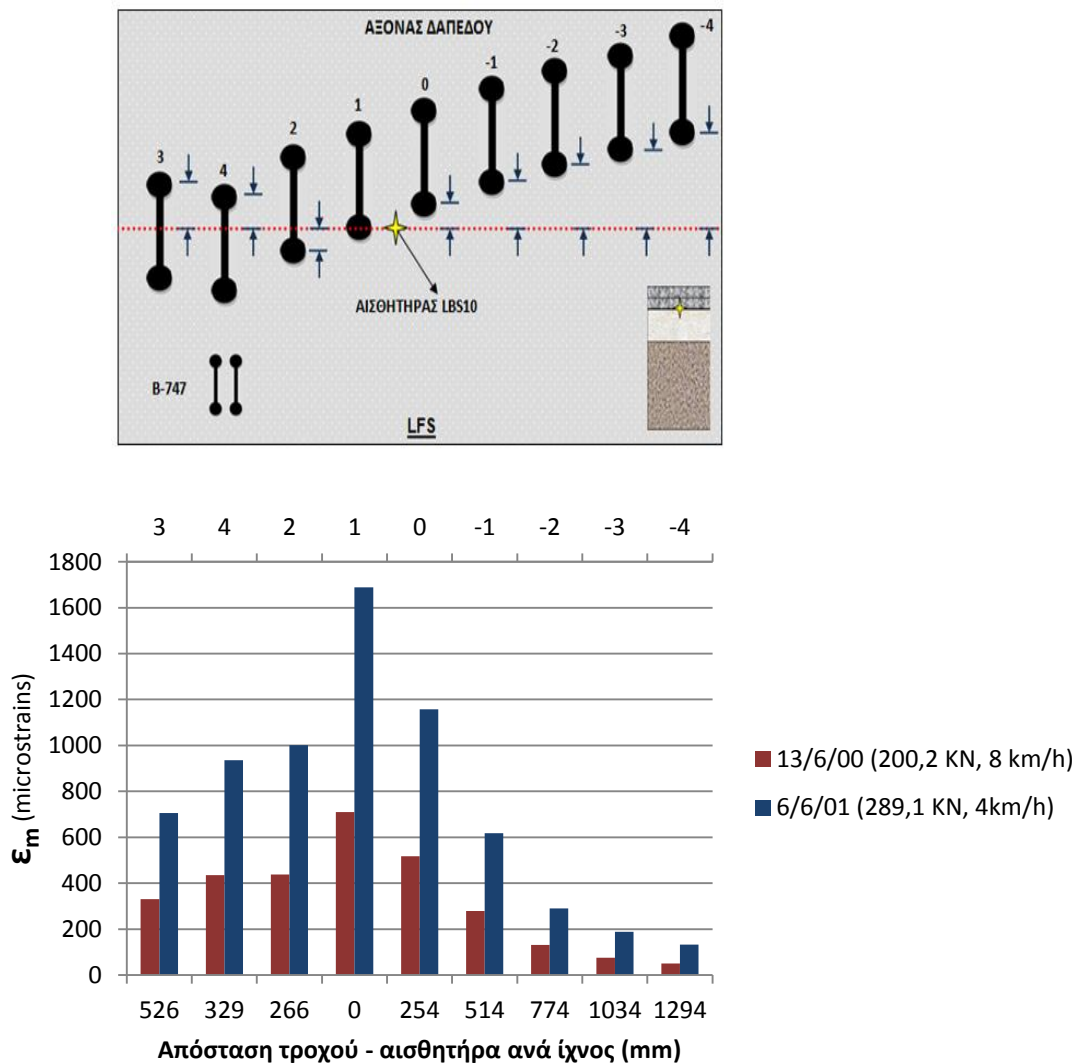
συμπεράσματα, αφού μπορεί να φανεί η αρχική και η τελική κατάσταση του οδοστρώματος για τις μέρες που επιλέχθηκαν. Μπορεί η 13/6/00 να μην είναι η πρώτη ημέρα δοκιμών, όμως η συμπεριφορά του δαπέδου δεν παρεκκλίνει ιδιαίτερα από αυτήν της πρώτης ημέρας, μιας και είναι κοντά χρονικά.



Εικόνα 6.25 Δάπεδο LFS, βόρειο τμήμα (B-777)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης-αρχική και τελική κατάσταση δαπέδου υπό τις ελάχιστες & μέγιστες τιμές ταχύτητας και φορτίου, στην ίδια θερμοκρασία

Η σύγκριση λοιπόν αυτή, φανερώνει μεγάλη αύξηση των παραμορφώσεων, η οποία όπως προαναφέρθηκε οφείλεται κυρίως στην αύξηση του φορτίου με την ταυτόχρονη μείωση της ταχύτητας, καθώς επίσης και στην καταπόνηση του δαπέδου από τις φορτίσεις των φορείων. Συγκεκριμένα, για το βόρειο τμήμα (B-777), του οποίου οι παραμορφώσεις φαίνονται στην εικόνα 6.25, το μέσο ποσοστό αύξησης των παραμορφώσεων ήταν 130 % (με το συντελεστή διακύμανσης στο 7,65 %).

Στη συνέχεια (εικόνα 6.26) φαίνεται η αντίστοιχη σύγκριση για το νότιο τμήμα του δαπέδου (B-747).



Εικόνα 6.26 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης-αρχική και τελική κατάσταση δαπέδου υπό τις ελάχιστες & μέγιστες τιμές ταχύτητας και φορτίου, στην ίδια θερμοκρασία

Το μέσο ποσοστό αύξησης των παραμορφώσεων για το συγκεκριμένο τμήμα προέκυψε 99 %, με το συντελεστή μεταβλητότητας στο 13,7 %.

Συνοψίζοντας, το δάπεδο διερευνήθηκε ως προς πολλούς παράγοντες, εκ των οποίων η θερμοκρασία φάνηκε να είναι ο σημαντικότερος από αυτούς. Ωστόσο, τόσο η αύξηση στο φορτίο, όσο και η μείωση της ταχύτητας του οχήματος επηρέασαν το δάπεδο, αυξάνοντας τις τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων. Μάλιστα, ο συνδυασμός του μέγιστου φορτίου ανά τροχό και της χαμηλότερης ταχύτητας, για τη σχετικά υψηλή θερμοκρασία των 21 °C, έδωσε τις μέγιστες παραμορφώσεις. Για τον αισθητήρα στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης δεν είναι εφικτή η σύγκριση των παραμορφώσεων, εξαιτίας των εσφαλμένων τιμών που κατέγραψε από τις φορτίσεις στις 6/6/01.

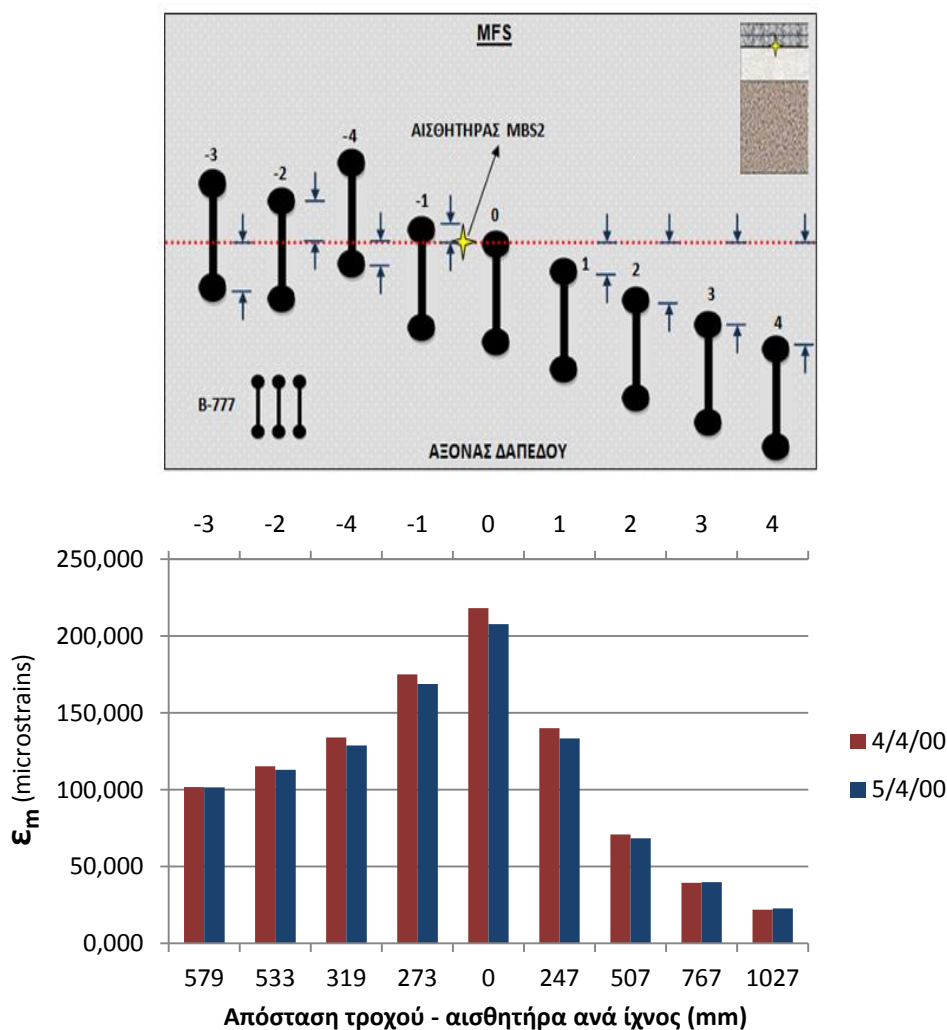
6.2.4 Ιστογράμματα παραμορφώσεων δαπέδου MFS

Έχει ήδη αναφερθεί ότι ο αριθμός των διαθέσιμων ημερών για το MFS είναι μικρότερος από αυτόν του LFS. Παρακάτω παρουσιάζονται τα ιστογράμματα των ανηγμένων οριζόντιων παραμορφώσεων για τους αισθητήρες που έχουν επιλεγεί. Ο τρόπος που παρατίθενται είναι όμοιος με αυτόν του προηγούμενου δαπέδου.

6.2.4.1 Διαδοχικές φορτίσεις

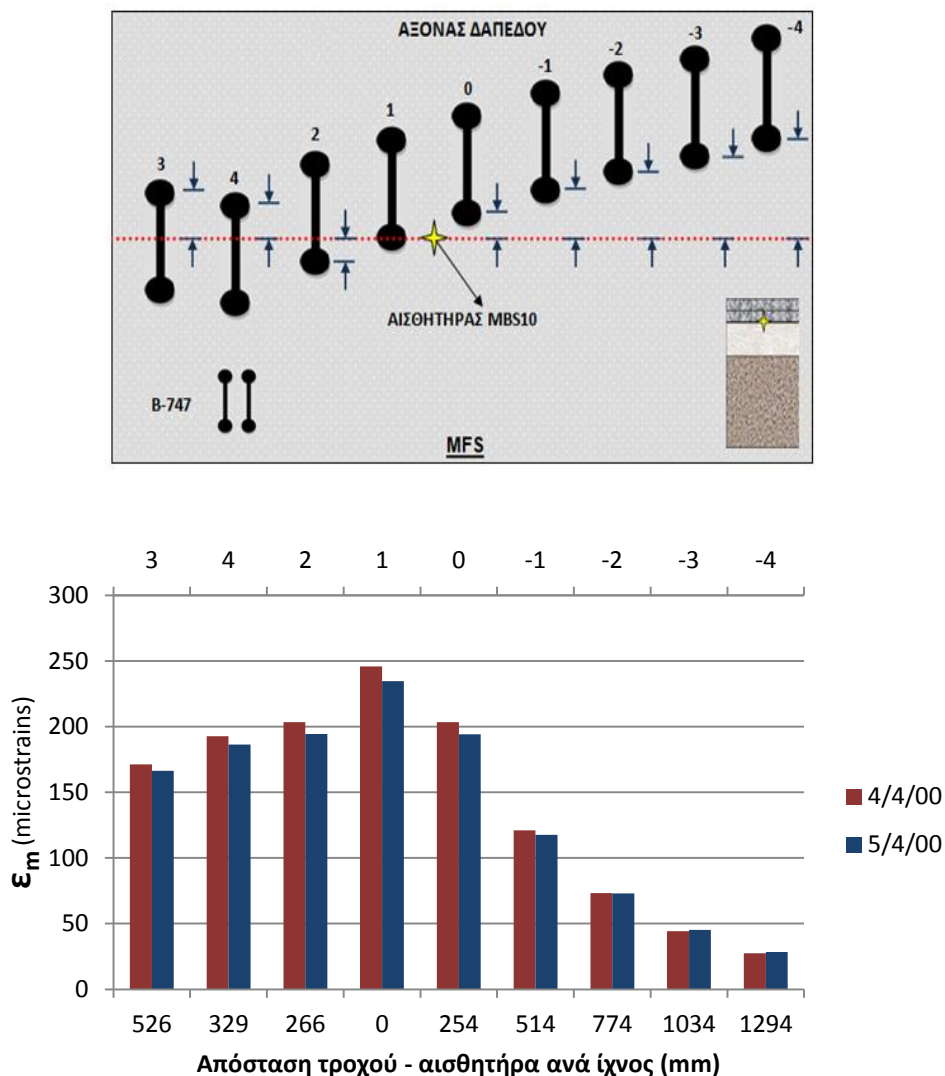
Αρχικά, παρατίθενται τα ιστογράμματα για διήμερα σε διάφορες θερμοκρασίες, προκειμένου να φανεί η συμπεριφορά του οδοστρώματος στη συνεχή φόρτιση και πώς αυτή επηρεάζεται από την θερμοκρασία.

Όπως και για το προηγούμενο δάπεδο, παρατίθεται ενδεικτικά μόνο ένα από τα ιστογράμματα και τα υπόλοιπα παρουσιάζονται στο παράρτημα Α. Στην εικόνα 6.27 φαίνονται οι παραμορφώσεις για το βόρειο τμήμα (B-777) του δαπέδου, κατά το πρώτο διήμερο που επιλέχθηκε. Τα υπόλοιπα ιστογράμματα παρουσιάζονται στο παράρτημα Α (εικόνα Π6.12).



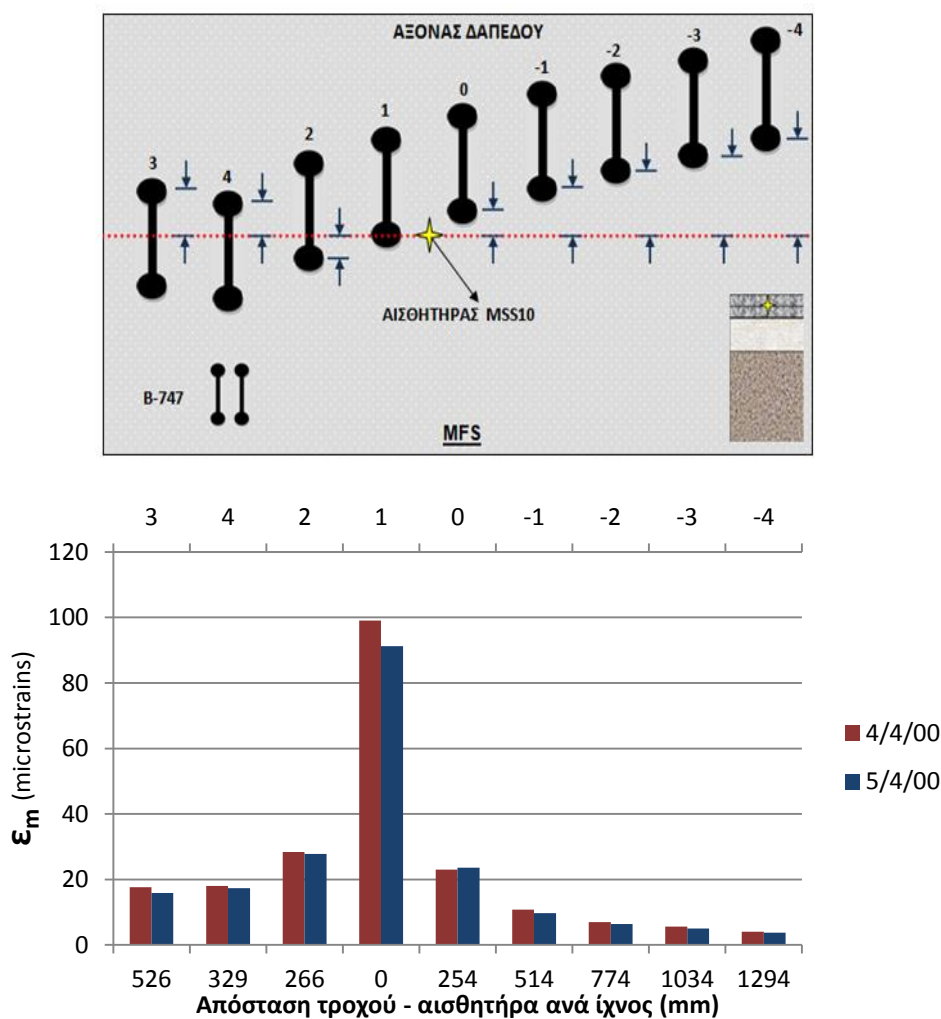
Εικόνα 6.27 Δάπεδο MFS, βόρειο τμήμα (B-777)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για διαδοχικές ημέρες

Η εικόνα 6.28 παρουσιάζει τις παραμορφώσεις του νότιου τμήματος του δαπέδου στον πυθμένα της ασφαλτικής βάσης για το πρώτο διήμερο. Τα υπόλοιπα ιστογράμματα παρατίθενται στο παράρτημα Α, εικόνα Π6.13.



Εικόνα 6.28 Δάπεδο MFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστόγραμμα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για διαδοχικές ημέρες

Έπειτα, παρουσιάζεται το ιστογράμματα των παραμορφώσεων για τον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης (εικόνα 6.29). Τα ιστογράμματα για τις υπόλοιπες διαδοχικές ημέρες δοκιμών φαίνονται στην εικόνα Π6.14 του παραρτήματος Α.



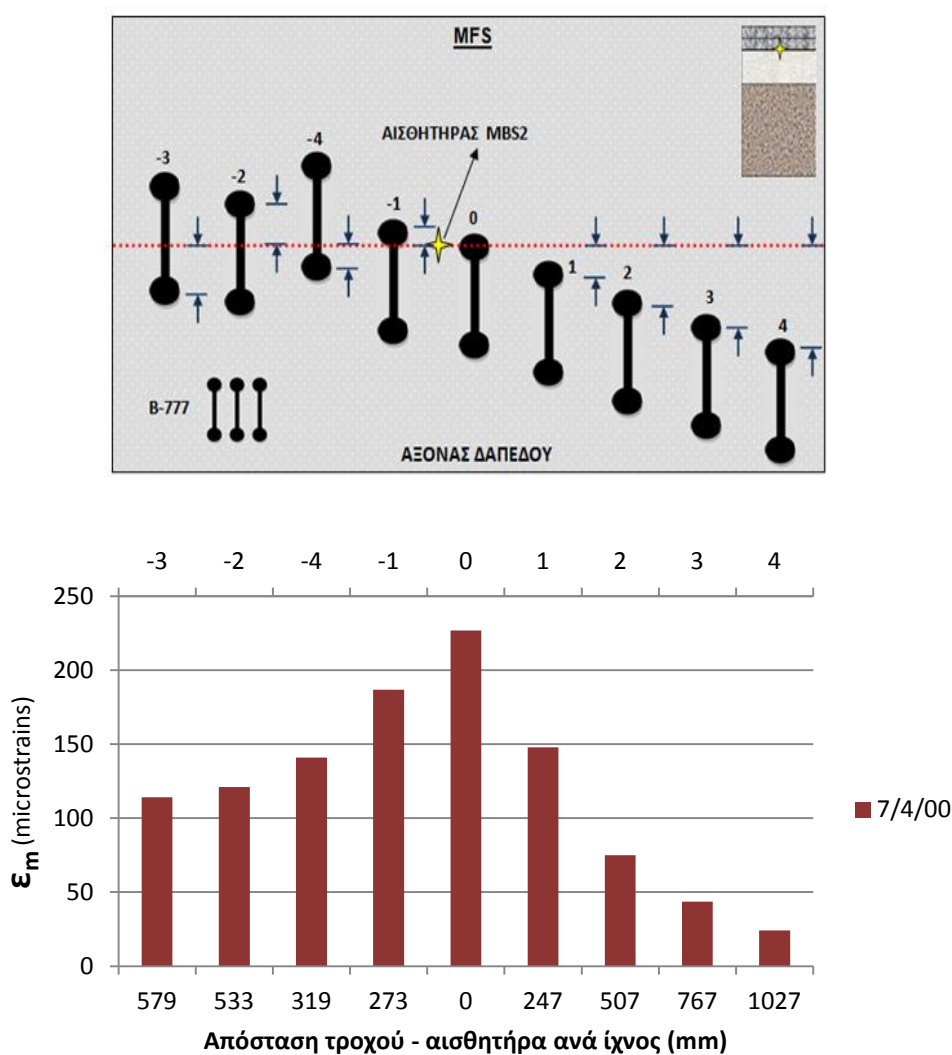
Εικόνα 6.29 Δάπεδο MFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμμο παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης, για διαδοχικές ημέρες

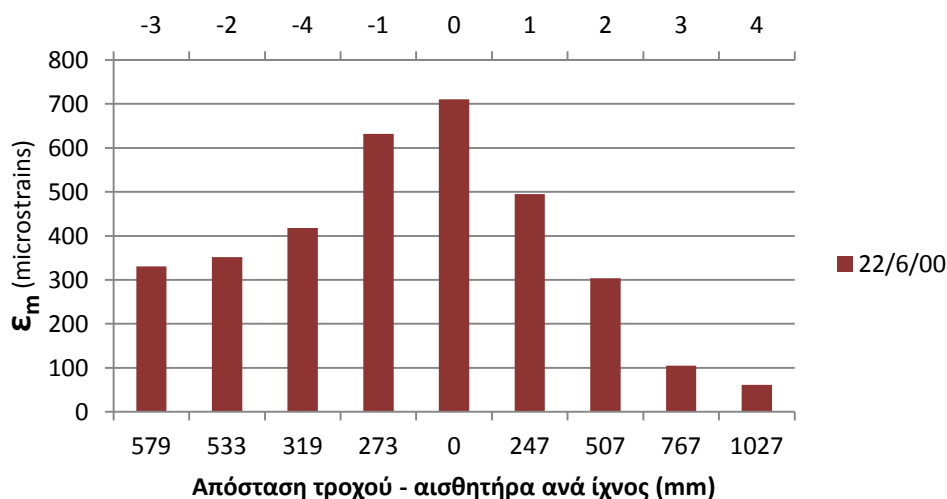
Η συμπεριφορά του δαπέδου είναι όμοια με αυτήν του LFS. Οι παραμορφώσεις κατά τη δεύτερη μέρα καθενός διημέρου είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τις παραμορφώσεις της πρώτης. Εξαιρέσεις αποτελούν τα διήμερα 12/6/00 – 13/6/00, καθώς και 4/4/00 – 5/4/00 όπου οι παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερες κατά την πρώτη μέρα καθενός διημέρου. Έχει αναφερθεί ήδη ότι αίτιο αποτελεί το γεγονός ότι η θερμοκρασία στις 12/6/00 ήταν κατά 3 °C αυξημένη από αυτή στις 13/6/00 και αντίστοιχα κατά 1 °C στις 4/4/00 από αυτή στις 5/4/00.

6.2.4.2 Ιστογράμματα μεμονωμένων ημερών

Ακολουθούν τα ιστογράμματα για μεμονωμένες ημέρες μεταξύ των ημερομηνιών 4/4/00 και 22/6/00, για την όσο το δυνατόν πληρέστερη εσοπτεία της κατάστασης του δαπέδου, καθώς αυξάνεται σταδιακά η θερμοκρασία και ο αριθμός των διελεύσεων. Σε ορισμένες εξ αυτών έχει πραγματοποιηθεί και εφαρμογή FWD (βλ. πίνακα 6.2).

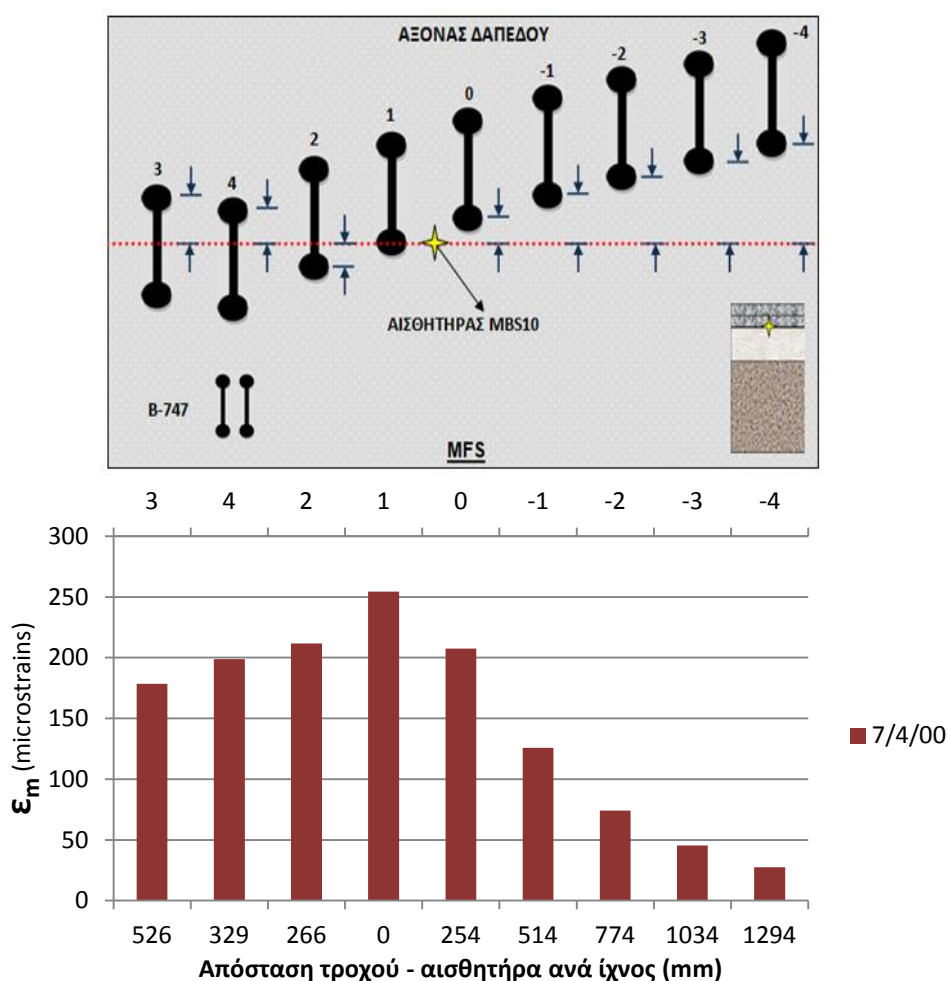
Παρουσιάζονται αρχικά τα ιστογράμματα των παραμορφώσεων για την πρώτη ημέρα (7/4/00) και την τελευταία (22/6/00), στο βόρειο τμήμα του δαπέδου (B-777). Τα ιστογράμματα για τις ενδιάμεσες ημέρες φαίνονται στην εικόνα Π6.15 του παραρτήματος Α.

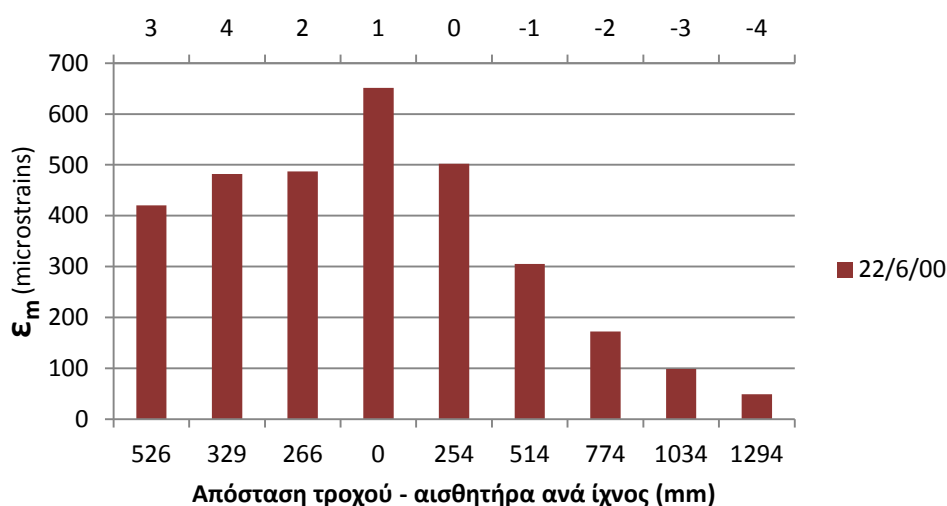




Εικόνα 6.30 Δάπεδο MFS, βόρειο τμήμα (B-777)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για μεμονωμένες ημέρες σε διάφορες θερμοκρασίες

Στην εικόνα 6.31 φαίνονται τα ιστογράμματα των παραμορφώσεων στον πυθμένα του νότιου τμήματος. Τα ιστογράμματα εκείνα για τις υπόλοιπες ημέρες παρουσιάζονται στην εικόνα Π6.16 του παραρτήματος Α.

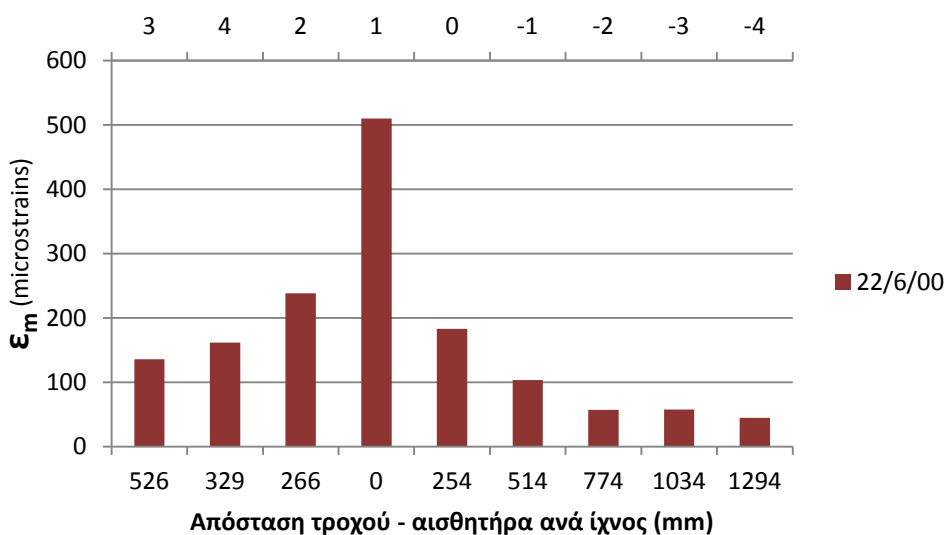
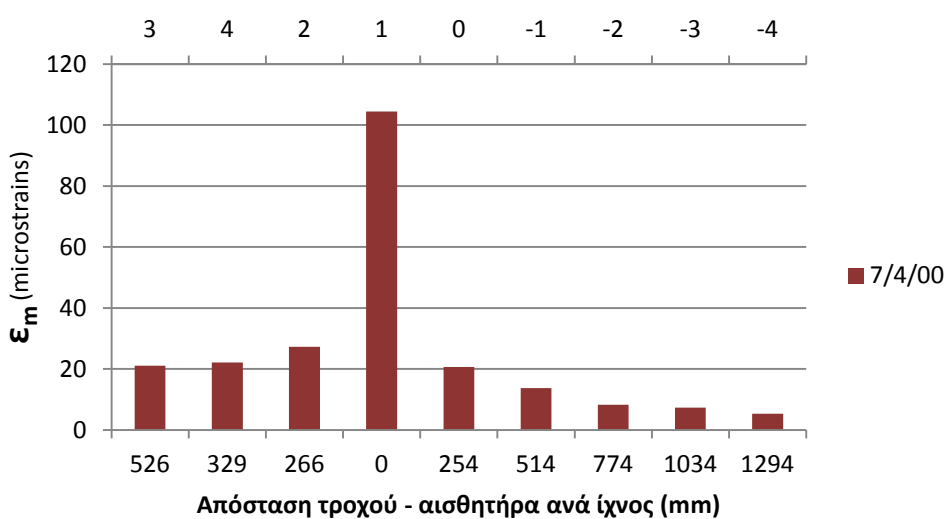
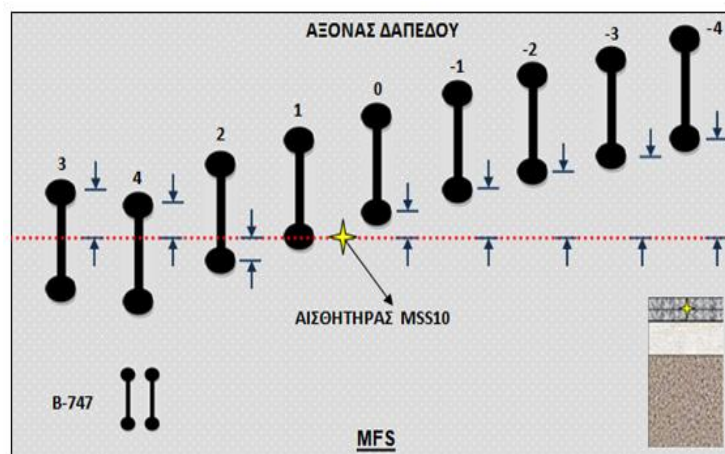




Εικόνα 6.31 Δάπεδο MFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για μεμονωμένες ημέρες σε διάφορες θερμοκρασίες

Στην εικόνα 6.32 φαίνονται τα αντίστοιχα ιστογράμματα για τον πυθμένα της επιφανειακής ασφαλτικής στρώσης, με τα ιστογράμματα για τις υπόλοιπες ημέρες να παρουσιάζονται στο παράρτημα Α (εικόνα Π6.17).

Ο σχολιασμός πραγματοποιείται στο τέλος της παρούσας υποενότητας και όχι για κάθε αισθητήρα χωριστά, αφού οι αισθητήρες έδωσαν τιμές με ομοειδή συμπεριφορά τόσο μεταξύ τους, όσο και σε σχέση με τους αντίστοιχους αισθητήρες του δαπέδου LFS που γίνεται εκτενέστερη αναφορά.



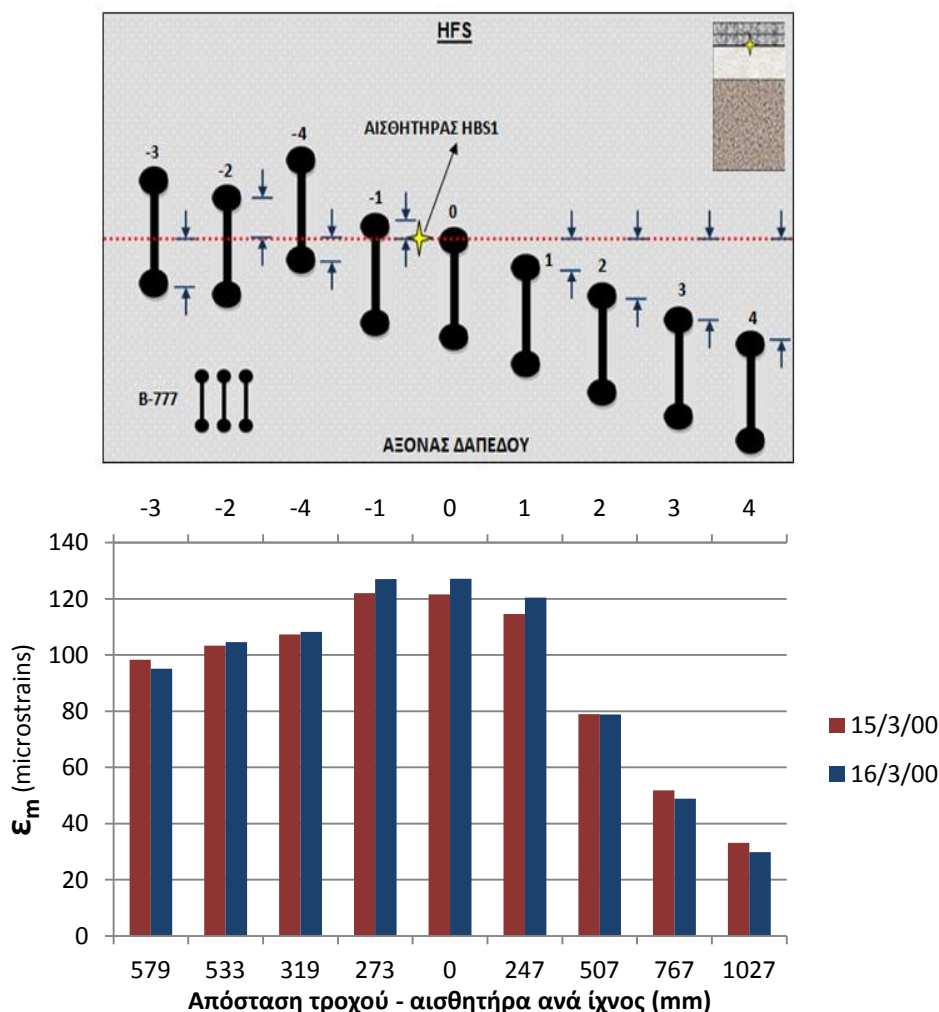
Εικόνα 6.32 Δάπεδο MFS, νότιο τμήμα-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης, για μεμονωμένες ημέρες σε διάφορες θερμοκρασίες

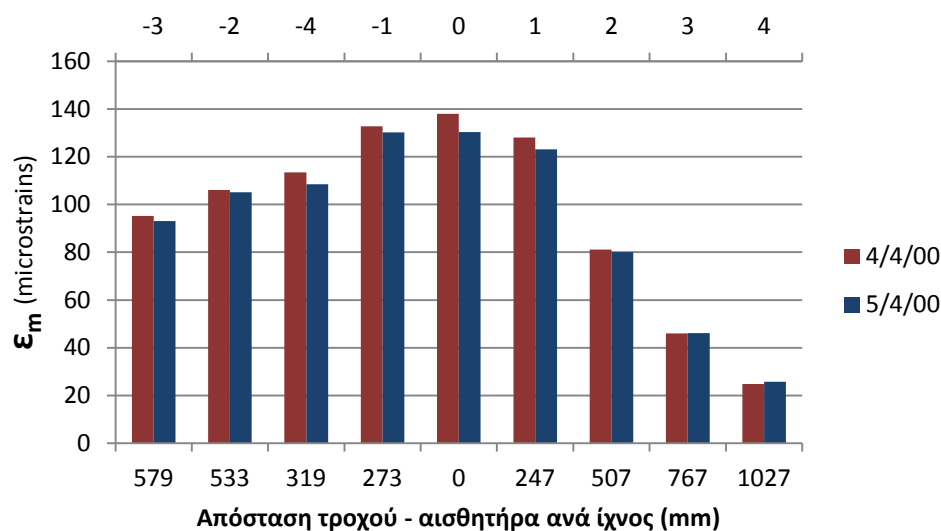
Παρατηρείται λοιπόν, ότι οι παραμορφώσεις αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου και για τους τρεις αισθητήρες, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των διελεύσεων και η θερμοκρασία. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον και γι αυτό το δάπεδο παρουσιάζει η σύγκριση των ημερών 7/4/00 με 14/4/00. Όπως έχει αναφερθεί και για το LFS, οι διελεύσεις που έχει υποστεί το δάπεδο στις 14/4/00 είναι περισσότερες, όμως οι τιμές των παραμορφώσεων στις 7/4/00 είναι μεγαλύτερες. Η απόκριση αυτή του δαπέδου, δικαιολογείται από το γεγονός ότι η θερμοκρασία στις 7/4/00 (13 °C) ήταν κατά 2 °C αυξημένη σε σχέση με αυτή στις 14/4/00 (11 °C). Ομοίως και για τις ημέρες 15/5/00 και 23/5/00, όπου η θερμοκρασία στις 15/5/00 (19 °C) είναι κατά 3 °C αυξημένη από αυτή στις 23/5/00 (16 °C). Σημαντικά μεγαλύτερες είναι οι παραμορφώσεις στις 22/6/00, όπου τόσο η θερμοκρασία (23 °C), όσο και ο αριθμός των φορτίσεων που έχει υποστεί το δάπεδο, αυξάνονται.

6.2.5 Ιστογράμματα παραμορφώσεων δαπέδου HFS

Ενδεικτικά, παρατίθενται τα ιστογράμματα των ανηγμένων παραμορφώσεων του δαπέδου με στρώση έδρασης υψηλής φέρουσας ικανότητας (HFS). Επαναλαμβάνεται ότι για το συγκεκριμένο δάπεδο έγιναν οι λιγότερες δοκιμές και κατ' επέκταση τα αξιοποιήσιμα στοιχεία είναι λίγα.

Στην εικόνα 6.33 παρατίθενται τα ιστογράμματα των παραμορφώσεων που αναπτύχθηκαν από το B-777.

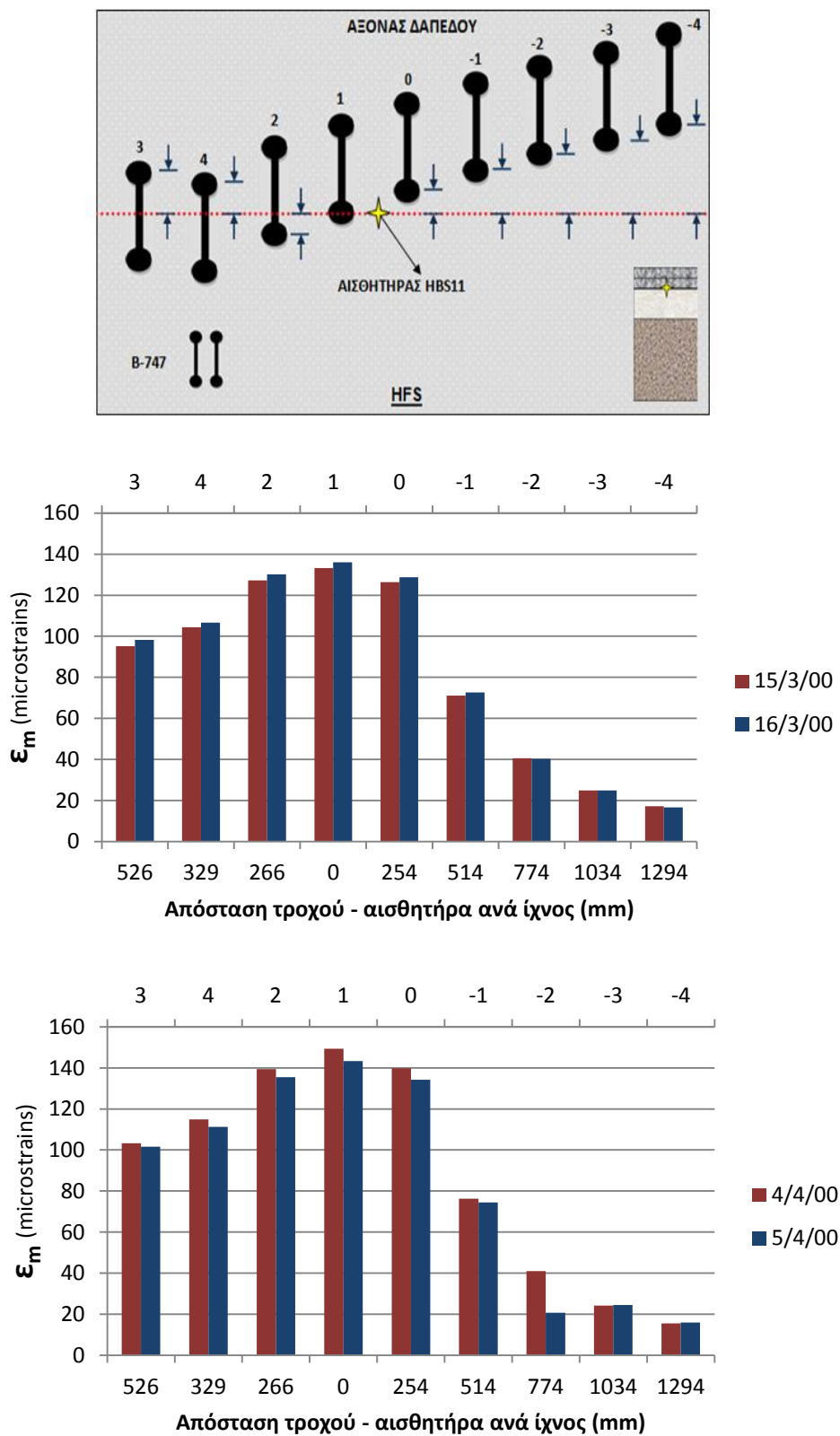




Εικόνα 6.33 Δάπεδο HFS, βόρειο τμήμα (B-777)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για διαδοχικές ημέρες

Η συμπεριφορά του δαπέδου στη συνεχόμενη φόρτιση από το B-777 είναι όμοια με αυτή των προηγούμενων δύο δαπέδων. Συγκεκριμένα οι παραμορφώσεις είναι σχεδόν ίσες για καθ' ένα διήμερο, ενώ οι παραμορφώσεις στις 4/4/00 είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από αυτές στις 5/4/00, αφού η θερμοκρασία του δαπέδου ήταν μεγαλύτερη κατά 1 °C.

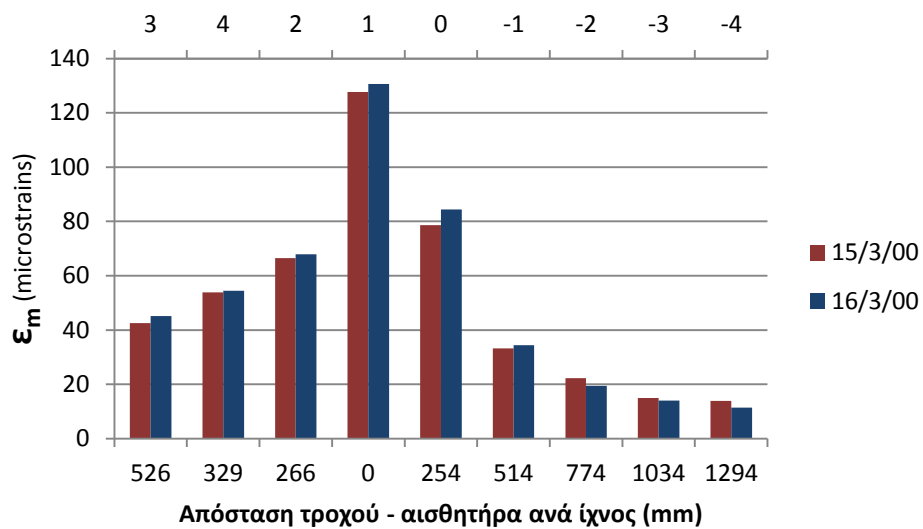
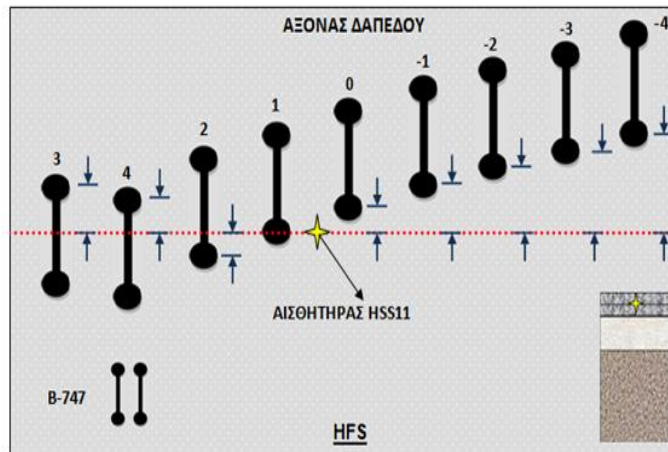
Ακολουθούν τα αντίστοιχα ιστογράμματα για τον πυθμένα της ασφαλτικής βάσης και κάτω από τη φόρτιση του B-747 (εικόνα 6.34).

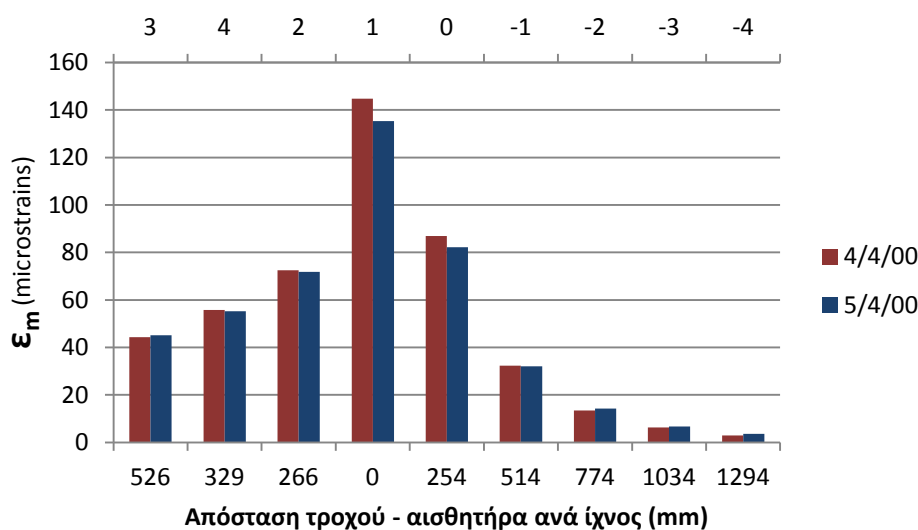


Εικόνα 6.34 Δάπεδο HFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για διαδοχικές ημέρες

Φαίνεται ότι το δάπεδο και για τη φόρτιση από το Β-777 συμπεριφέρεται με ομοειδή τρόπο εν συγκρίσει με αυτόν των δύο άλλων δαπέδων, με τις παραμορφώσεις να προκύπτουν σχεδόν ίσες για καθ' ένα διήμερο

Τέλος, στην εικόνα 6.35 φαίνονται τα αντίστοιχα ιστογράμματα για τον πυθμένα της ασφαλτικής επιφανειακής στρώσης.



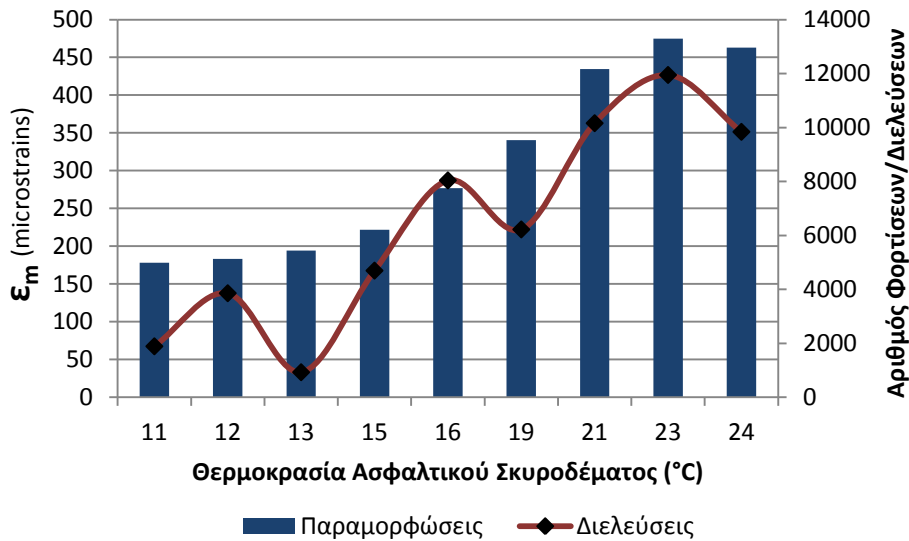


Εικόνα 6.35 Δάπεδο HFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης, για διαδοχικές ημέρες

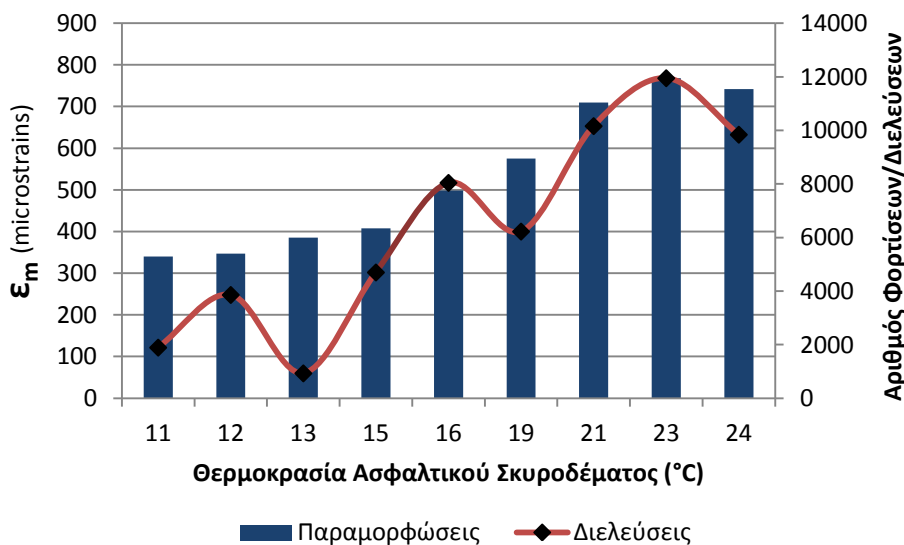
Παρατηρείται ότι και στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης, η συμπεριφορά του δαπέδου είναι ανάλογη με αυτήν των προηγούμενων δύο δαπέδων.

6.2.6 Επιρροή Θερμοκρασίας στην ανάπτυξη των παραμορφώσεων

Από την ανάλυση που έχει προηγηθεί, έχει καταστεί φανερός ο βαρύνουσας σημασίας ρόλος της θερμοκρασίας στην ανάπτυξη των εφελκυστικών παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος. Σαφή εικόνα δίνουν τα παρακάτω σχήματα που συσχετίζουν το μέγεθος των μετρημένων παραμορφώσεων με τη θερμοκρασία και το συνολικό αριθμό των υφιστάμενων διελεύσεων μέχρι την εκάστοτε ημέρα. Έχουν επιλεγεί ημέρες κατά τις οποίες τα χαρακτηριστικά των φορτίσεων (φορτίο ανά τροχό, ταχύτητα φορείου, κλπ) είναι τα ίδια, ούτως ώστε να μην υπεισέλθουν κι άλλοι παράγοντες στη σύγκριση των παραμορφώσεων. Έχουν επιλεγεί μόνο οι αισθητήρες στον πυθμένα της βάσης για τα δάπεδα LFS και MFS. Επίσης, οι τιμές των παραμορφώσεων αφορούν στο ίχνος εκείνο, κατά το οποίο ο τροχός διέρχεται ακριβώς πάνω από τον αισθητήρα.

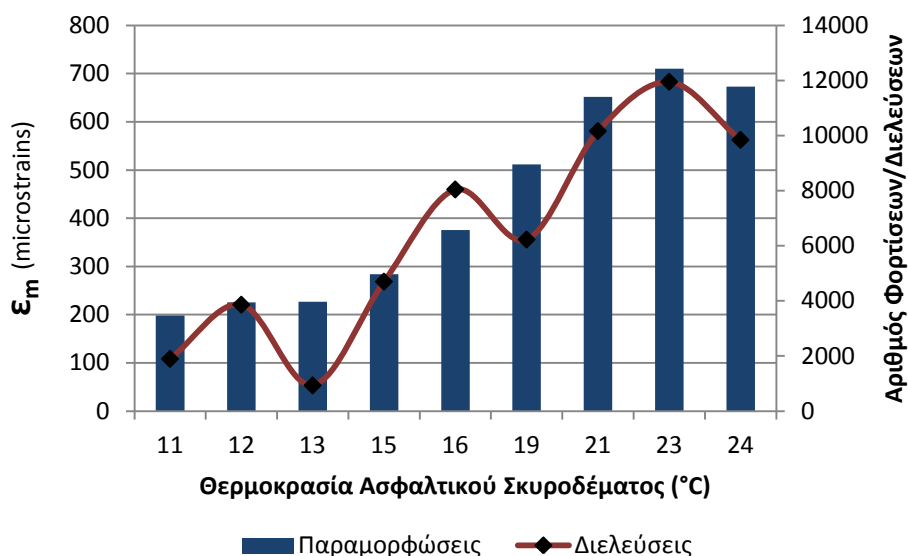


Εικόνα 6.36 Δάπεδο LFS, βόρειο τμήμα (B-777)-Ιστόγραμμα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και τον αριθμό των υφιστάμενων διελεύσεων

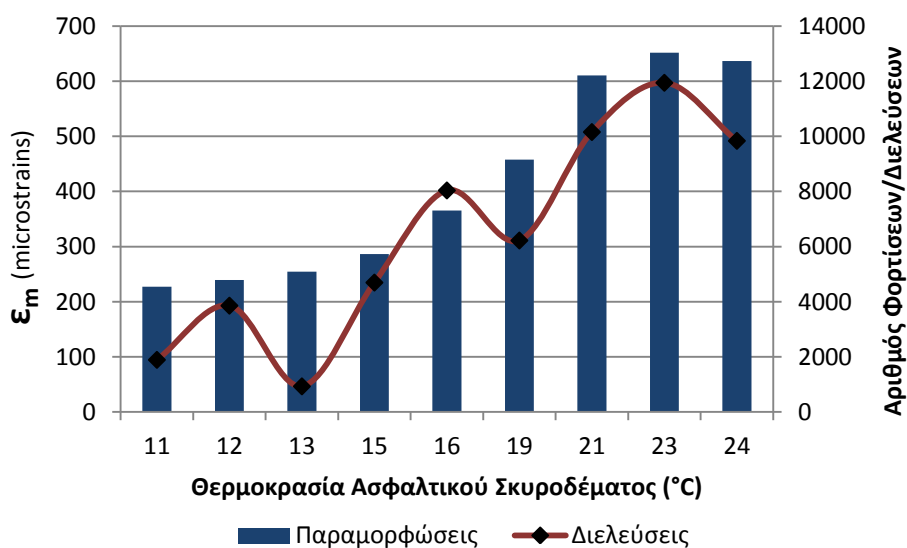


Εικόνα 6.37 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστόγραμμα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και τον αριθμό των υφιστάμενων διελεύσεων

Ο ρυθμός αύξησης των παραμορφώσεων προέκυψε ίσος με 14,5 % για το βόρειο τμήμα (B-777) του LFS και 11,8 % για το νότιο (B-747) αντίστοιχα. Επίσης, η αύξηση της θερμοκρασίας από τους 11 °C στους 23 °C, επέφερε αύξηση των παραμορφώσεων κατά 166 % για το βόρειο και 126 % για το νότιο τμήμα του LFS αντίστοιχα



Εικόνα 6.38 Δάπεδο MFS, βόρειο τμήμα (B-777)-Ιστόγραμμα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και τον αριθμό των υφιστάμενων διελύσεων



Εικόνα 6.39 Δάπεδο MFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστόγραμμα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και τον αριθμό των υφιστάμενων διελύσεων

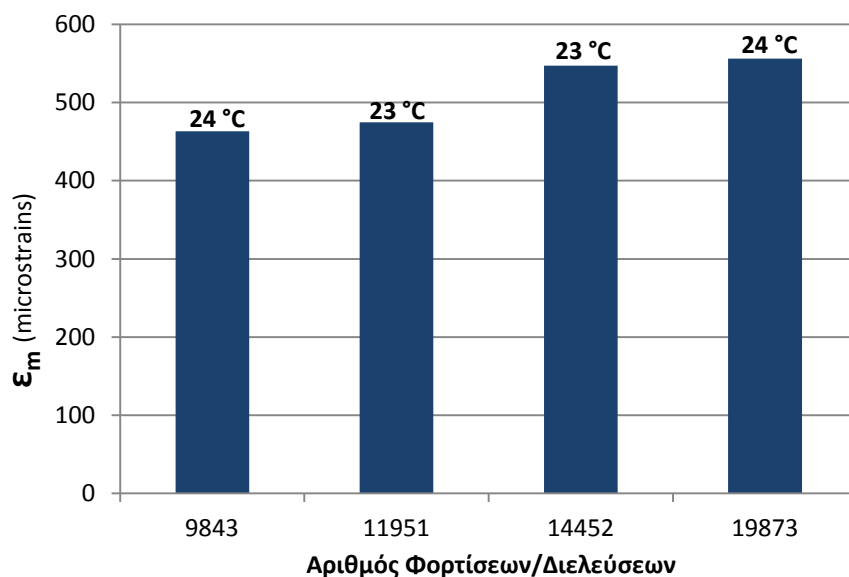
Ο ρυθμός αύξησης των παραμορφώσεων προέκυψε ίσος με 18,4 % για το βόρειο τμήμα του MFS και 15,6 % για το νότιο. Η αύξηση της θερμοκρασίας από τους 11 °C στους 23 °C επέφερε μεγαλύτερα ποσοστά αύξησης των παραμορφώσεων για το MFS σε σχέση με το LFS. Για την ακρίβεια, προκλήθηκε αύξηση των παραμορφώσεων κατά 258 % στο βόρειο τμήμα και στο νότιο κατά 187 %.

Μπορεί λοιπόν να ισχυριστεί κανείς ότι τα δύο δάπεδα παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά με τη μεταβολή της θερμοκρασίας και στα δύο τμήματά τους. Παρατηρείται συνεχής αύξηση των παραμορφώσεων με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η σύγκριση των παραμορφώσεων για τις θερμοκρασίες των 12 και 13 °C, φανερώνει αύξηση των παραμορφώσεων στους 13 °C, αν και τα δάπεδα έχουν υποστεί λιγότερες φορτίσεις σε αυτήν τη θερμοκρασία. Το ίδιο προκύπτει και από τη σύγκριση των παραμορφώσεων για τις ημέρες με τις θερμοκρασίες των 16 και 19 °C αντίστοιχα. Αντίθετα, στους 23 °C αναπτύσσονται μεγαλύτερες παραμορφώσεις σε σχέση με αυτές στους 24 °C. Βέβαια, στους 23 °C τα δάπεδα έχουν υποστεί περισσότερες φορτίσεις. Επιπλέον, οι παραμένουσες παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερες σε υψηλότερες θερμοκρασίες λόγω των ιξωδοελαστικών ιδιοτήτων του ασφαλτικού σκυροδέματος.

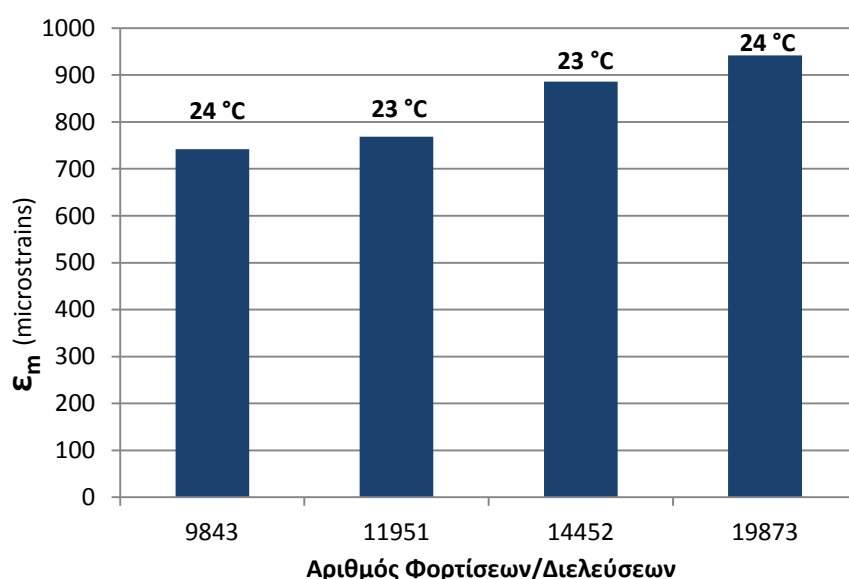
Η αύξηση που φανερώνουν τα παραπάνω ποσοστά συνδιαμορφώνεται και από την αύξηση στον αριθμό των διελεύσεων, δηλαδή της καταπόνησης που προκαλείται από τις φορτίσεις. Γι αυτό, εξετάζεται παρακάτω η μεταβολή των παραμορφώσεων συναρτήσει της αύξησης του αριθμού των υφιστάμενων διελεύσεων για την ίδια θερμοκρασία (± 1 °C).

6.2.7 Επιρροή διελεύσεων υπό σταθερή θερμοκρασία

Για την περίπτωση αυτή, εξετάζεται μόνο το δάπεδο LFS, καθώς μόνο για αυτό το δάπεδο βρέθηκαν ημέρες δοκιμών με την ίδια θερμοκρασία ή έστω με απόκλιση κατά 1 °C. Συγκεκριμένα εντοπίστηκαν τέσσερις ημέρες, με τη θερμοκρασία να βρίσκεται στους 23 έως και 24 °C. Όπως και πριν, εξετάζονται οι τιμές από τους αισθητήρες στον πυθμένα της ασφαλτικής βάσης του δαπέδου και μόνο για το ίχνος όπου η εγκάρσια απόσταση τροχού και αισθητήρια μηδενίζεται. Επιπλέον και σε αυτήν την περίπτωση επελέγησαν ημέρες όπου τα χαρακτηριστικά των φορτίσεων ήταν τα ίδια. Έτσι, εκτιμάται η καταπόνηση του οδοστρώματος αποκλειστικά από τον αυξανόμενο αριθμό των διελεύσεων των δύο φορείων. Απ' τα σχήματα που ακολουθούν, προκύπτουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την απόκριση του δαπέδου καθώς αυξάνεται ο αριθμός των διελεύσεων. Στην εικόνα 6.40 φαίνονται οι παραμορφώσεις για το βόρειο τμήμα (B-777), ενώ στην εικόνα 6.41 για το νότιο (B-747) αντίστοιχα, συναρτήσει του αριθμού των διελεύσεων των δύο φορείων.



Εικόνα 6.40 Δάπεδο LFS, βόρειο τμήμα (B-777)-Ιστογράμμα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, σε συνάρτηση με τον αριθμό των υφιστάμενων διελεύσεων



Εικόνα 6.41 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμμα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, σε συνάρτηση με τον αριθμό των υφιστάμενων διελεύσεων

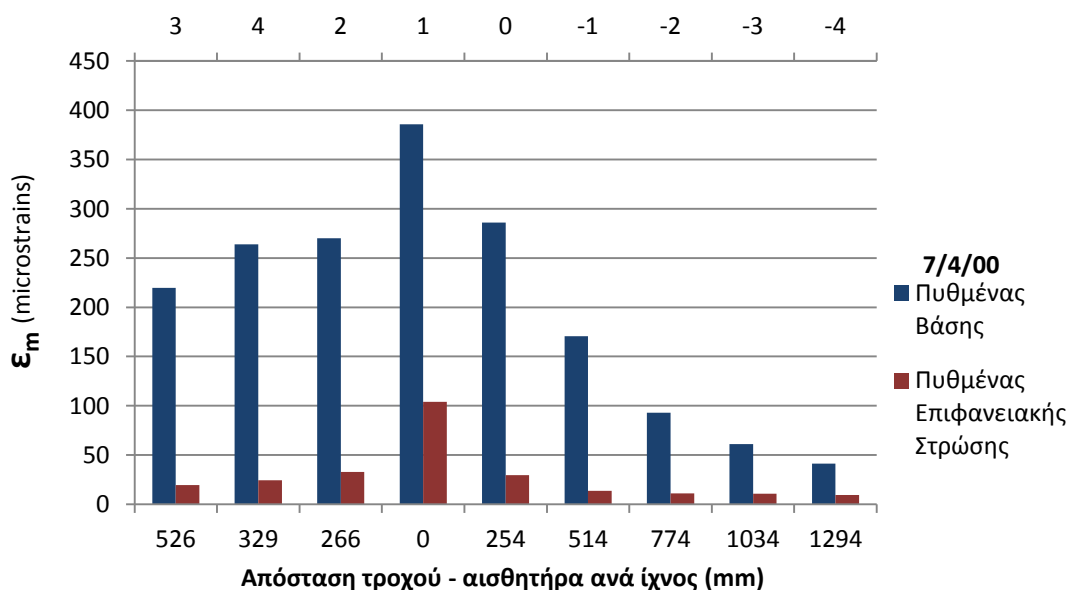
Είναι φανερό και στα δύο τμήματα του δαπέδου, ότι οι παραμορφώσεις αυξάνονται με την αύξηση των διελεύσεων των δύο φορείων. Για την ακρίβεια, ο ρυθμός αύξησης των παραμορφώσεων στο βόρειο τμήμα είναι ίσος με 6,9 % και στο νότιο 8,6 %. Παρατηρήθηκε επίσης, συνολική αύξηση κοντά στο 20 % στο βόρειο τμήμα, ενώ στο νότιο τμήμα 27 %, για αύξηση του αριθμού των διελεύσεων κατά δέκα χιλιάδες (από 9843 σε 19873 διελεύσεις).

6.2.8 Σύγκριση παραμορφώσεων πυθμένα επιφανειακής στρώσης – πυθμένα ασφαλτικής βάσης

Επαναλαμβάνεται ότι ο διαχωρισμός της στρώσης του ασφαλτικού σκυροδέματος σε επιφανειακή στρώση και στρώση βάσης ασφαλτικού υλικού είναι συμβατικός και στα πλαίσια του τρόπου με τον οποίο αναφέρονται από τους υπεύθυνους της εγκατάστασης. Επί της ουσίας υπάρχει μία στρώση ασφαλτικού σκυροδέματος.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση των παραμορφώσεων στο μέσον της ασφαλτικής στρώσης (πυθμένας επιφανειακής στρώσης) και αυτών στον πυθμένα της (πυθμένας βάσης). Για το σκοπό αυτό, επιλέχθηκαν ορισμένες ημέρες και συγκρίθηκαν οι τιμές των αισθητήρων στα δύο βάθη. Η σύγκριση αυτή αφορά στο νότιο τμήμα καθενός δαπέδου (B-747), αφού στο βόρειο δεν υπάρχει αξιοποιήσιμος αισθητήρας στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης. Θα πρέπει επίσης να τονισθεί ότι στο δάπεδο LFS, οι δύο αισθητήρες απέχουν μεταξύ τους όσον αφορά στη διαμήκη διεύθυνση (άξονας x) κατά 70 cm περίπου (εικόνα 6.4). Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζεται η σύγκριση αυτή για καθένα δάπεδο.

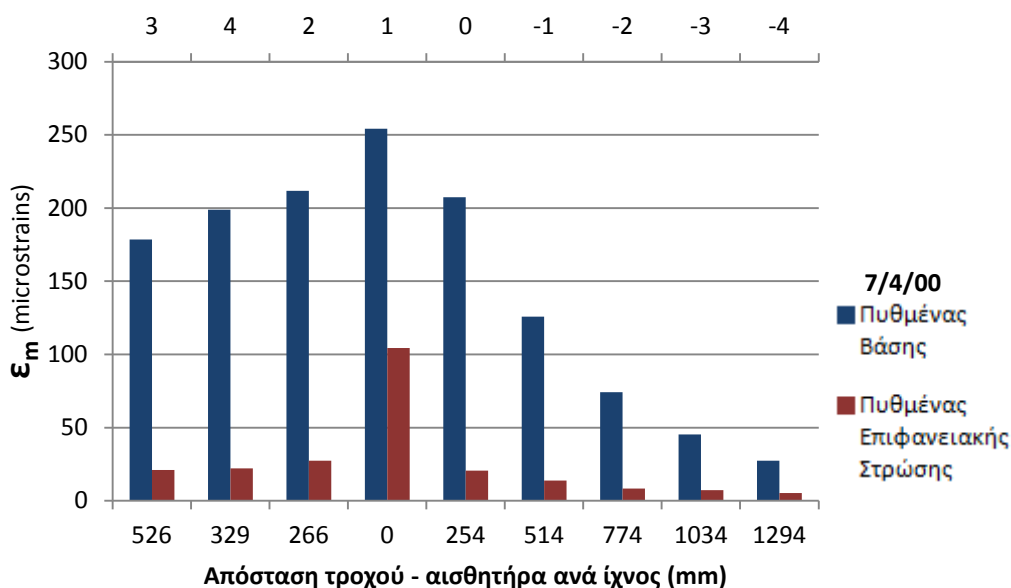
Στην εικόνα 6.42 φαίνεται ένα τυπικό ιστόγραμμα σύγκρισης των παραμορφώσεων στον πυθμένα της ασφαλτικής βάσης και της επιφανειακής ασφαλτικής στρώσης για το LFS. Τα υπόλοιπα ιστογράμματα που έχουν γίνει, παρουσιάζονται στην εικόνα Π6.18 του παραρτήματος Α.



Εικόνα 6.42 Δάπεδο LFS – Ιστόγραμμα σύγκρισης παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης και στον πυθμένα της βάσης

Οι τιμές των παραμορφώσεων, λοιπόν, στον πυθμένα των ασφαλτικών ήταν αυξημένες κατά 170 % (5/10/00) έως και 681 % (14/4/00), σε σχέση με αυτές στο μέσον, για το δάπεδο με στρώση έδρασης χαμηλής φέρουσας ικανότητας (CoV = 35,4 και 31,3 % αντίστοιχα).

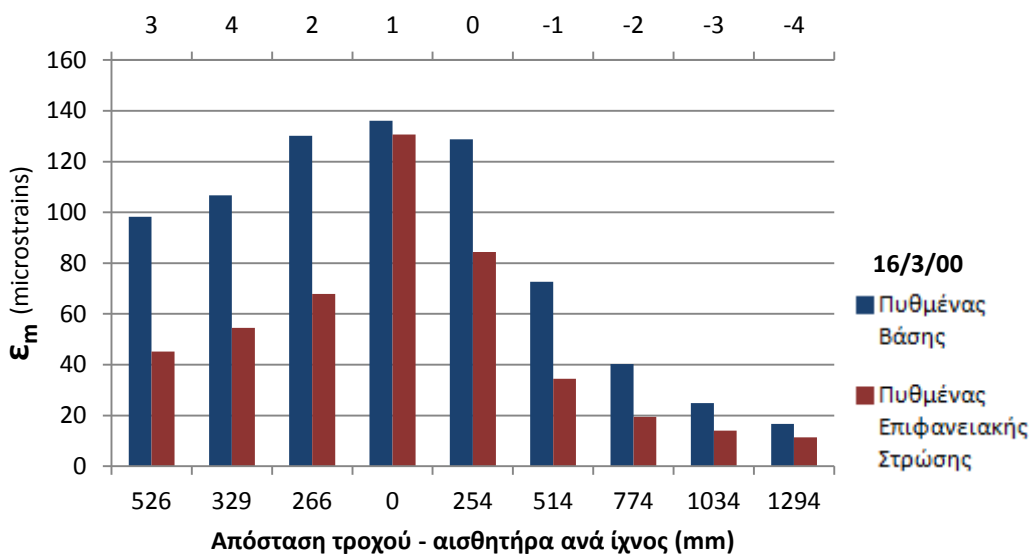
Στην εικόνα 6.43 παρουσιάζεται ένα από τα ιστογράμματα σύγκρισης των παραμορφώσεων στις δύο θέσεις της διατομής για το δάπεδο MFS. Τα υπόλοιπα ιστογράμματα για το δάπεδο αυτό φαίνονται στην εικόνα Π6.19 του παραρτήματος Α.



Εικόνα 6.43 Δάπεδο MFS – Ιστόγραμμα σύγκρισης παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης και στον πυθμένα της βάσης

Η διαφορά για αυτό το δάπεδο κυμάνθηκε σε μεγαλύτερα ποσοστά. Συγκεκριμένα, από 133 % (22/6/00) έως και 799 % (14/4/00), με τους συντελεστές διακύμανσης ίσους με 60,3 και 34,2 %.

Στην εικόνα 6.44 παρουσιάζεται το ιστογράμματα σύγκρισης ασφαλτικού σκυροδέματος για τις δύο θέσεις της διατομής με στρώση έδρασης υψηλής φέρουσας ικανότητας (HFS). Ένα ακόμη ιστογράμματα παρατίθεται στην εικόνα Π6.20, στο παράρτημα Α.



Εικόνα 6.44 Δάπεδο HFS – Ιστόγραμμα σύγκρισης παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης και στον πυθμένα της βάσης

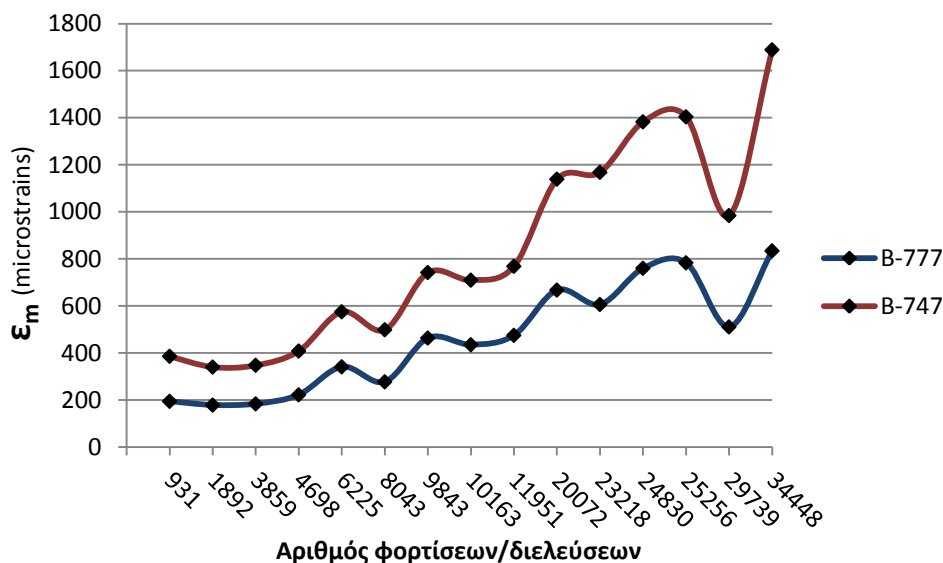
Παρατηρείται ότι στο HFS οι τιμές απέχουν λιγότερο και τα ποσοστά είναι 78 % για τις 16/3/00 και 128 % για τις 5/4/00 με τους συντελεστές μεταβλητότητας να λαμβάνουν τιμές 47,5 % και 81,6 % αντίστοιχα.

Συμπερασματικά, μπορεί να ειπωθεί ότι οι παραμορφώσεις που αναπτύχθηκαν στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης, ήταν σταθερά μικρότερες από τις αντίστοιχες στον πυθμένα της βάσης και στα τρία δάπεδα. Έτσι, όπως σε κάθε εύκαμπτο οδόστρωμα, τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη αναπτύσσονται στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων (και στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης), ο οποίος στα δάπεδα που διερευνώνται, ταυτίζεται με τον πυθμένα της ασφαλτικής βάσης.

Αντίθετα, οι θλιπτικές ανηγμένες παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο μέσον, παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές (κατ' απόλυτη τιμή) από τις εφελκυστικές.

6.2.9 Σύγκριση καταπόνησης ασφαλτικού σκυροδέματος από B-777 και B-747

Για τη σύγκριση της καταπόνησης που προκαλούν τα δύο φορεία στα δάπεδα, συγκρίνονται οι παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλτικών για τα δύο τμήματα των δαπέδων. Επιλέγονται ημέρες δοκιμών και στη συνέχεια συγκρίνονται οι τιμές των παραμορφώσεων μόνο για τα ίχνη που η απόσταση τροχού-αισθητήρα μηδενίζεται. Στα διαγράμματα που ακολουθούν, απεικονίζονται οι τιμές των παραμορφώσεων από τα δύο φορεία.

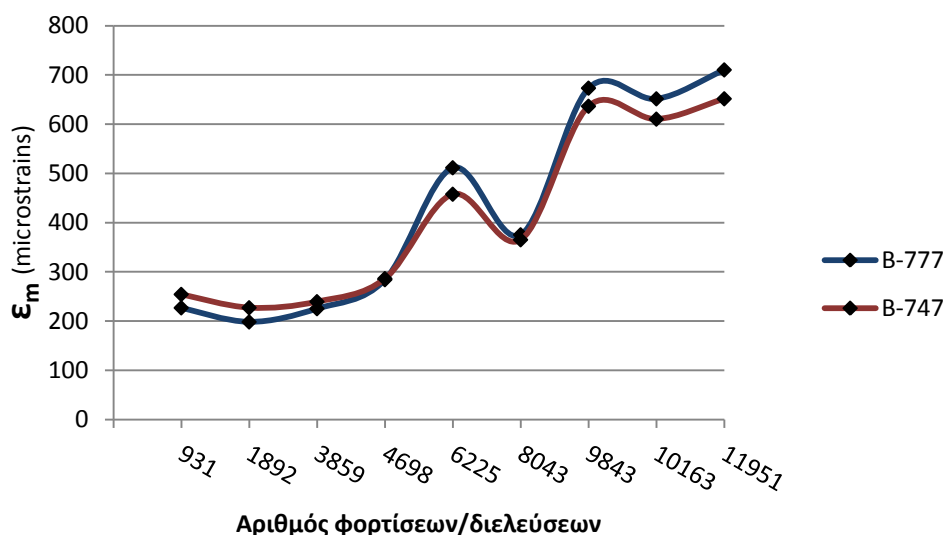


Εικόνα 6.45 Δάπεδο LFS – Διάγραμμα σύγκρισης παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος από B-777 και B-747

Όσον αφορά στο δάπεδο LFS, το φορείο τύπου B-747 προκάλεσε μεγαλύτερη καταπόνηση σε σχέση με το B-777. Συγκεκριμένα, οι παραμορφώσεις που αναπτύχθηκαν από τις διελεύσεις του B-747 ήταν κατά 81 % (μέσο ποσοστό για τις ημέρες που επιλέχθηκαν, με συντελεστή διακύμανσης 16,8 %) μεγαλύτερες από αυτές του B-777.

Ωστόσο, ο ρυθμός αύξησης των παραμορφώσεων προέκυψε περίπου ο ίδιος και για τα δύο φορεία, ίσος με 11,5 %.

Στην εικόνα 6.46 παρουσιάζεται το διάγραμμα συγκριτικής καταπόνησης από τα δύο φορεία για το MFS.

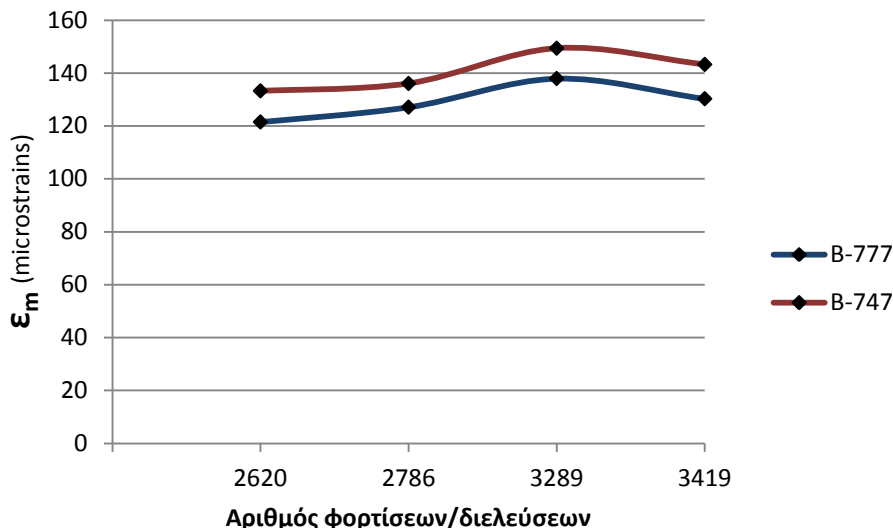


Εικόνα 6.46 Δάπεδο MFS – Διάγραμμα σύγκρισης παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος από B-777 και B-747

Σχετικά με αυτό το δάπεδο, μέχρι τις πρώτες 4000 περίπου διελεύσεις, προκλήθηκαν κατά 8 % μεγαλύτερες παραμορφώσεις από το φορείο τύπου B-747. Ενώ, απ' τις 5000 διελεύσεις και έπειτα, το B-777 προκάλεσε μεγαλύτερες παραμορφώσεις, με μέσο ποσοστό διαφοράς 7 % (με συντελεστές διακύμανσης 73 και 47 % αντίστοιχα). Επιπλέον, ο ρυθμός αύξησης των παραμορφώσεων από το B-777 είναι 17,7 %, ενώ του B-747 παρουσιάστηκε μικρότερος, ίσος με 14,8 %.

Έτσι, ενώ για το LFS είναι ξεκάθαρο ότι το B-747 προκάλεσε σαφώς μεγαλύτερη καταπόνηση, για το MFS φάνηκε ότι το B-777 προξένησε μεγαλύτερη καταπόνηση με την πάροδο του χρόνου.

Στο επόμενο διάγραμμα (εικόνα 6.47) φαίνεται η καταπόνηση που προκαλούν τα δύο φορεία για το HFS.

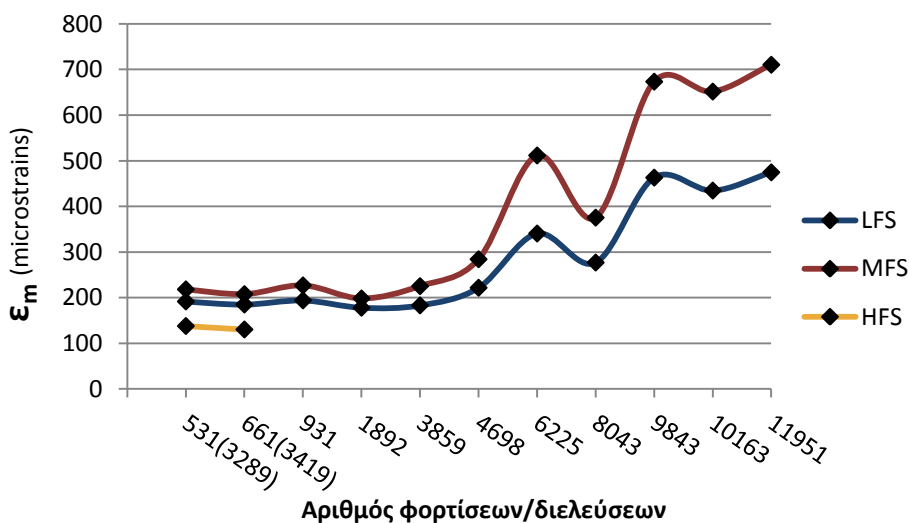


Εικόνα 6.47 Δάπεδο HFS – Διάγραμμα σύγκρισης παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος από B-777 και B-747

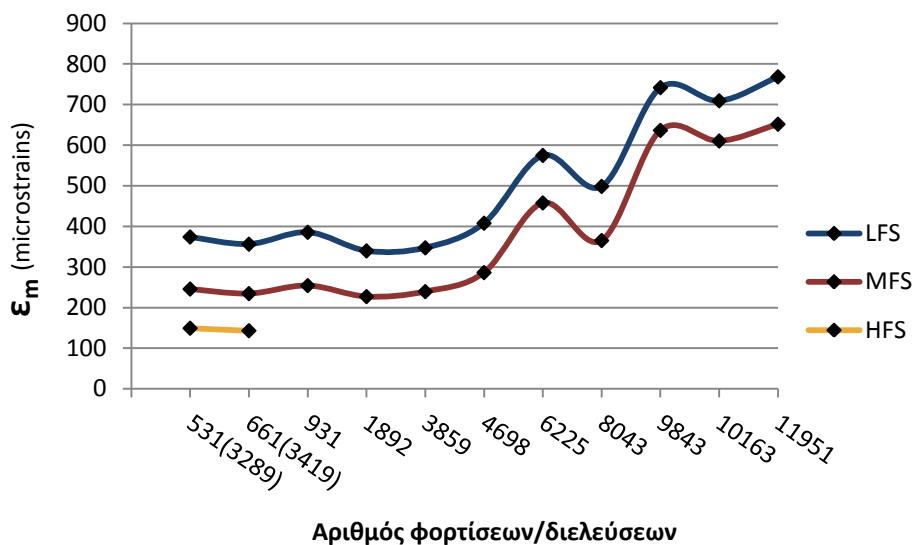
Αναφορικά με το HFS, το B-747 προκάλεσε κατά 9 % μεγαλύτερες παραμορφώσεις από το B-777 (ο συντελεστής διακύμανσης των ποσοστιαίων διαφορών ισούται με 15,8 %). Οι ρυθμοί αύξησης των παραμορφώσεων κυμάνθηκαν σε χαμηλές τιμές και συγκεκριμένα 2,9 % για το B-777 και 3,1 % για το B-747.

6.2.10 Σύγκριση παραμορφώσεων μεταξύ των δαπέδων

Για τη σύγκριση μεταξύ των τριών δαπέδων, επιλέγονται οι παραμορφώσεις στην κρίσιμη θέση του πυθμένα των ασφαλτικών και μόνο για το ίχνος κατά το οποίο οι τροχοί των φορείων διέρχονται ακριβώς πάνω από τους αισθητήρες. Στις εικόνες 6.47 και 6.48 παρουσιάζεται η σύγκριση αυτή για τα δύο τμήματα των δαπέδων.



Εικόνα 6.48 Διάγραμμα σύγκρισης παραμορφώσεων μεταξύ των δαπέδων – Πυθμένας ασφαλτικών, βόρειο τμήμα (B-777)



Εικόνα 6.49 Διάγραμμα σύγκρισης παραμορφώσεων μεταξύ των δαπέδων – Πυθμένας ασφαλτικών, νότιο τμήμα (B-747)

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι αριθμοί σε παρενθέσεις στα παραπάνω διαγράμματα είναι οι αριθμοί των υφιστάμενων διελεύσεων για το δάπεδο HFS, μιας και το συγκεκριμένο δάπεδο είχε υποστεί περισσότερες φορτίσεις από τα άλλα δύο έως τις συγκεκριμένες χρονικές περιόδους.

Παρατηρείται ότι στο βόρειο τμήμα (B-777) οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο MFS είναι μεγαλύτερες εν συγκρίσει με τις παραμορφώσεις των δύο άλλων δαπέδων. Για την ακρίβεια, οι παραμορφώσεις στο MFS είναι κατά 13,6 % (CoV = 17,8 %) μεγαλύτερες από αυτές του LFS μέχρι τις πρώτες 4000 διελεύσεις περίπου, με το ποσοστό να αυξάνεται σε 40,2 % (CoV = 28,2 %) έπειτα και κατά 59 % αντίστοιχα από το HFS (CoV = 1,5 %), παρόλο που το τελευταίο έχει υποστεί περίπου έξι φορές περισσότερες διελεύσεις. Ένα ακόμη χρήσιμο συμπέρασμα προκύπτει από το γεγονός ότι η διαφορά των παραμορφώσεων μεταξύ του MFS και του LFS αυξάνεται, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των διελεύσεων. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι ο ρυθμός καταπόνησης του MFS είναι μεγαλύτερος από αυτόν του LFS. Πράγματι, τα ποσοστά του ρυθμού αύξησης των παραμορφώσεων από τις 531 διελεύσεις έως τις 11951 είναι 14,4 % για το MFS και 11 % για το LFS.

Αντίθετα, στο νότιο τμήμα οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο LFS είναι κατά 48,8 % (CoV = 8,4 %) μεγαλύτερες από τις παραμορφώσεις του MFS μέχρι τις πρώτες 4700 διελεύσεις, με το ποσοστό να μειώνεται σε 22,5 % (CoV = 38,5 %) για τις επόμενες διελεύσεις και κατά 150 % αντίστοιχα από αυτές του HFS (CoV = 0,77 %). Η διαφορά στις παραμορφώσεις μεταξύ του LFS και του MFS μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των διελεύσεων. Έτσι, φαίνεται ότι και γι αυτό το τμήμα, ο ρυθμός καταπόνησης του MFS είναι μεγαλύτερος από αυτόν του LFS. Τα ποσοστά του ρυθμού αύξησης των παραμορφώσεων από τις 531 έως τις 11951 διελεύσεις είναι 11,9 % για το MFS και 8,7 % για το LFS.

Τέλος, η μεγάλη διαφορά στις παραμορφώσεις του δαπέδου HFS σε σχέση με τα δύο άλλα δάπεδα, παρόλο που έχει υποστεί περίπου εξαπλάσιες διελεύσεις, έρχεται σε συμφωνία με τα συμπεράσματα άλλων ερευνητών. Για παράδειγμα, ο Gopalakrishnan (2009) που υποστήριξε ότι για να επιτευχθεί ήβωση της τάξεως των 25,4 mm, απαιτούνται 10^{10} διελεύσεις των φορέων (B-777, B-747), με φορτίο ανά τροχό στους 20,4 t (200,2 kN).

7 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΑΠΕΔΩΝ

7.1 Εισαγωγή

Βασικό πεδίο διερεύνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η σύγκριση μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων παραμορφώσεων. Συγκεκριμένα, οι μετρημένες από τους αισθητήρες παραμορφώσεις συγκρίνονται με τις αντίστοιχες υπολογισμένες από πρόγραμμα προσομοίωσης. Ο υπολογισμός αυτός προϋποθέτει τον προσδιορισμό της δομικής κατάστασης των υπό διερεύνηση δαπέδων. Επί της ουσίας, προσδιορίζονται τα μέτρα ελαστικότητας των δαπέδων με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα BAKFAA της FAA, μέσω του οποίου εκτιμήθηκαν τα μέτρα ελαστικότητας κάθε στρώσης για τα τρία δάπεδα.

7.2 Υπολογισμός μέτρων δυσκαμψίας/ελαστικότητας δαπέδων

7.2.1 Περιγραφή διαδικασίας ανάστροφου υπολογισμού (Back-analysis)

Ο αλγόριθμος ανάστροφου υπολογισμού των μέτρων δυσκαμψίας στο πρόγραμμα BAKFAA, ενεργοποιήθηκε μετά από την εισαγωγή μιας σειράς δεδομένων. Η μία ομάδα δεδομένων αφορά βασικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε δαπέδου, όπως πάχη στρώσεων και σπερματικές τιμές μηχανικών χαρακτηριστικών. Τα υπόλοιπα δεδομένα σχετίζονται με τις μετρήσεις από το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (FWD). Τέτοια δεδομένα είναι η ακτίνα του δίσκου επιβολής του φορτίου και οι αποστάσεις των επιταχυνσιόμετρων από το δίσκο. Επιπλέον, οι ελαστικές υποχωρήσεις που καταγράφει καθένα από αυτά σε κάθε πτώση, καθώς και το φορτίο του πίπτοντος βάρους, το οποίο μεταβάλλεται κάθε φορά. Στοιχεία για τον τρόπο εφαρμογής των μετρήσεων με το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους, έχουν αναφερθεί στην ενότητα 5.3.

Όλα τα δεδομένα από τις εφαρμογές FWD είναι οργανωμένα στον αντίστοιχο πίνακα δεδομένων της NARTF. Τα δεδομένα αυτά εξήχθησαν μέσω της γλώσσας προγραμματισμού SQL, αποθηκεύτηκαν σε φύλλο excel και κατόπιν έγινε η απαραίτητη διαλογή.

Πριν τη διεξαγωγή της ανάστροφης ανάλυσης (back-calculation analysis), έγινε ο έλεγχος των τιμών των ελαστικών υποχωρήσεων, που κατέγραψαν τα επιταχυνσιόμετρα. Ο έλεγχος αυτός είναι απαραίτητος προκειμένου να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία των μετρήσεων της συσκευής FWD. Καθότι, υπάρχει το ενδεχόμενο να προκύψουν εσφαλμένες τιμές εξαιτίας πολλών παραγόντων. Τέτοιοι παράγοντες είναι η ύπαρξη ρωγμής κοντά στον κυκλικό δίσκο επιβολής του φορτίου, η διακοπή λειτουργίας ενός αισθητήρα, η εσφαλμένη ρύθμιση της συσκευής, η λανθασμένη βαθμονόμηση ενός από τους αισθητήρες, κ.ά. Τα σφάλματα αυτά είναι τριών τύπων:

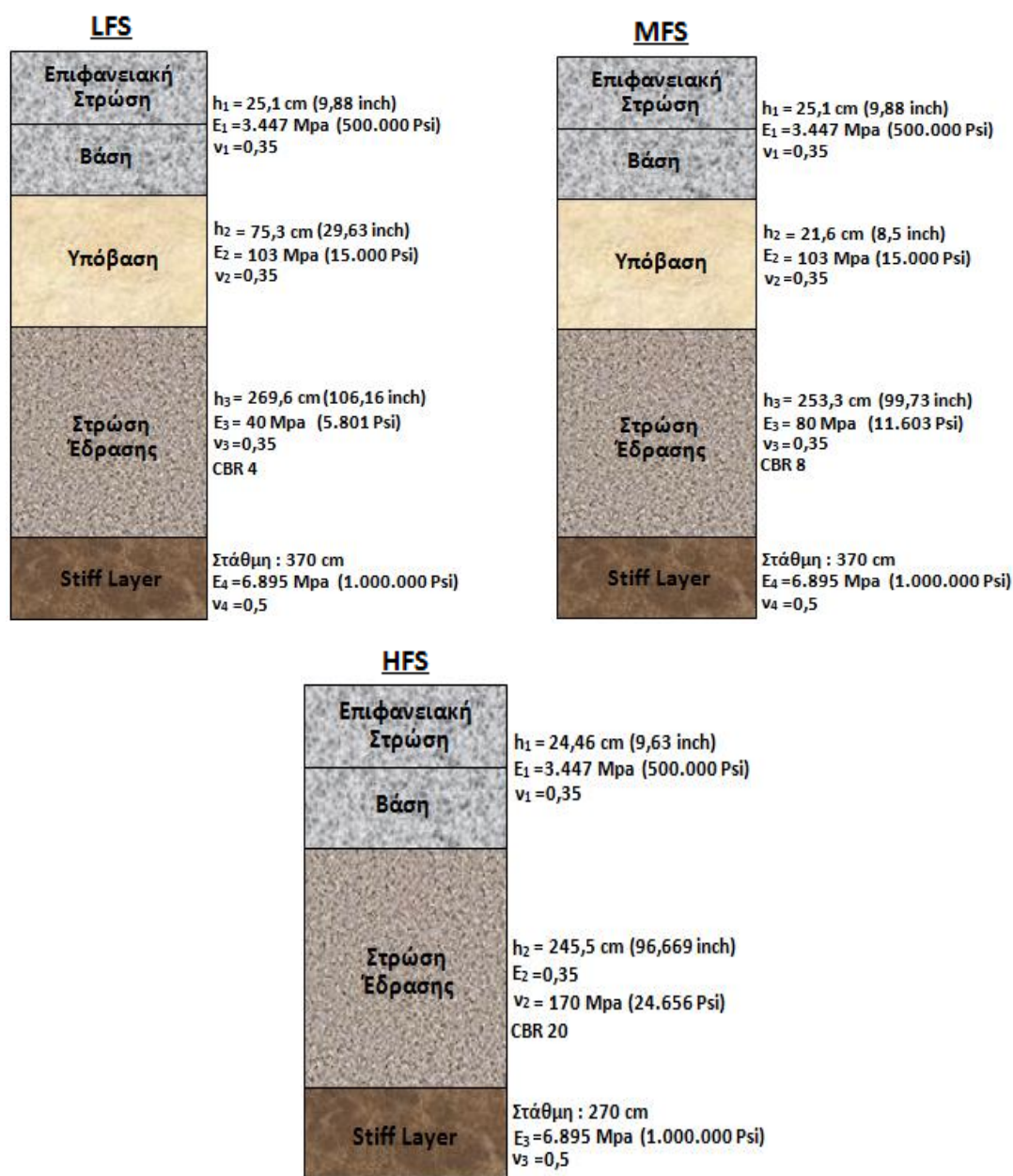
Τύπου I : Στην περίπτωση αυτή, ένας ή περισσότεροι από τους εξωτερικούς αισθητήρες, δίνουν μεγαλύτερη τιμή ελαστικής υποχώρησης, από αυτήν που αναπτύσσεται κάτω από το κέντρο της φόρτισης. Αυτός ο τύπος σφάλματος μπορεί να προκαλέσει τις μεγαλύτερες αποκλίσεις στα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού.

Τύπου II : Ακόμα ένας τύπος σφάλματος, πιο δυσδιάκριτος, είναι η ασυνήθιστα μεγάλη μείωση των τιμών των ελαστικών υποχωρήσεων μεταξύ δύο γειτονικών αισθητήρων. Ενώ η θεωρία των ελαστικών στρώσεων απαιτεί τη μείωση των ελαστικών

υποχωρήσεων με την αύξηση της απόστασης από το κέντρο της φόρτισης, η μείωση αυτή οφείλει να είναι βαθμιαία και σχετικά σταθερή μεταξύ όλων των αισθητήρων.

Τύπου III : Ομοίως με το σφάλμα τύπου I, η τιμή της ελαστικής υποχώρησης του εξωτερικού αισθητήρα, ενός οποιουδήποτε ζεύγους αισθητήρων, είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή του αισθητήρα που είναι πιο κοντά στο κέντρο φόρτισης (FAA, Advisory Circular AC 150/5370-11 B, 2011).

Ο έλεγχος των τιμών από τις εφαρμογές FWD που επελέγησαν, έδειξε ότι δεν υπήρχε κανένας από τους παραπάνω τύπους σφαλμάτων. Τα δεδομένα εισήχθησαν έπειτα στο πρόγραμμα για τον υπολογισμό των μέτρων δυσκαμψίας. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι σπερματικές τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών των στρώσεων των δαπέδων, καθώς και το πάχος κάθε στρώσης.



Εικόνα 7.1 Σπερματικές τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών των δαπέδων και πάχη στρώσεων, όπως εισήχθησαν στο πρόγραμμα ανάστροφου υπολογισμού ΒΑΚFΑΑ (οι διατομές δεν είναι υπό κλίμακα)

Τα πάχη των στρώσεων εξήχθησαν από τον ανάλογο πίνακα δεδομένων (test_item). Θα πρέπει να τονισθεί ότι η στρώση ασφαλικού σκυροδέματος χωρίζεται σε επιφανειακή ασφαλική στρώση, καθώς και σε ασφαλική στρώση βάσης, βάσει του τρόπου με τον οποίο περιγράφονται/απεικονίζονται τα συγκεκριμένα δάπεδα από τη NAPTf. Στο πρόγραμμα του ανάστροφου υπολογισμού δεν έγινε τέτοιος διαχωρισμός. Οι σπερματικές τιμές (seed values) των μέτρων δυσκαμψίας (Young’s Modulus) και των λόγων του Poisson (Poisson’s Ratio), ελήφθησαν από την εγκύκλιο της FAA (FAA, Advisory Circular AC 150/5370-11 B, 2011). Η εγκύκλιος εκτός των άλλων, προσδιορίζει για κάθε πιθανό υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις διάφορες στρώσεις των οδοστρωμάτων, ένα εύρος αποδεκτών τιμών, όσον αφορά στα μηχανικά χαρακτηριστικά τους. Στους πίνακες που ακολουθούν, φαίνονται οι τιμές αυτές μόνο για τα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί στα υπό διερεύνηση δάπεδα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Πίνακας 7.1 Εύρος τιμών του μέτρου δυσκαμψίας για υλικά οδοστρωμάτων, σύμφωνα με την εγκύκλιο της FAA

Υλικό	Ελάχιστη τιμή, PSI (Mpa)	Μέση τιμή, PSI (Mpa)	Μέγιστη τιμή, PSI (Mpa)
Ασφαλικό σκυρόδεμα	70.000 (482)	500.000 (3.447)	2.000.000 (13.789)
Κοκκώδες υλικό υπόβασης	5.000 (34)	15.000 (103)	30.000 (206)
Συνεκτικά εδάφη	3.000 (20)	7.000 (48)	25.000 (172)

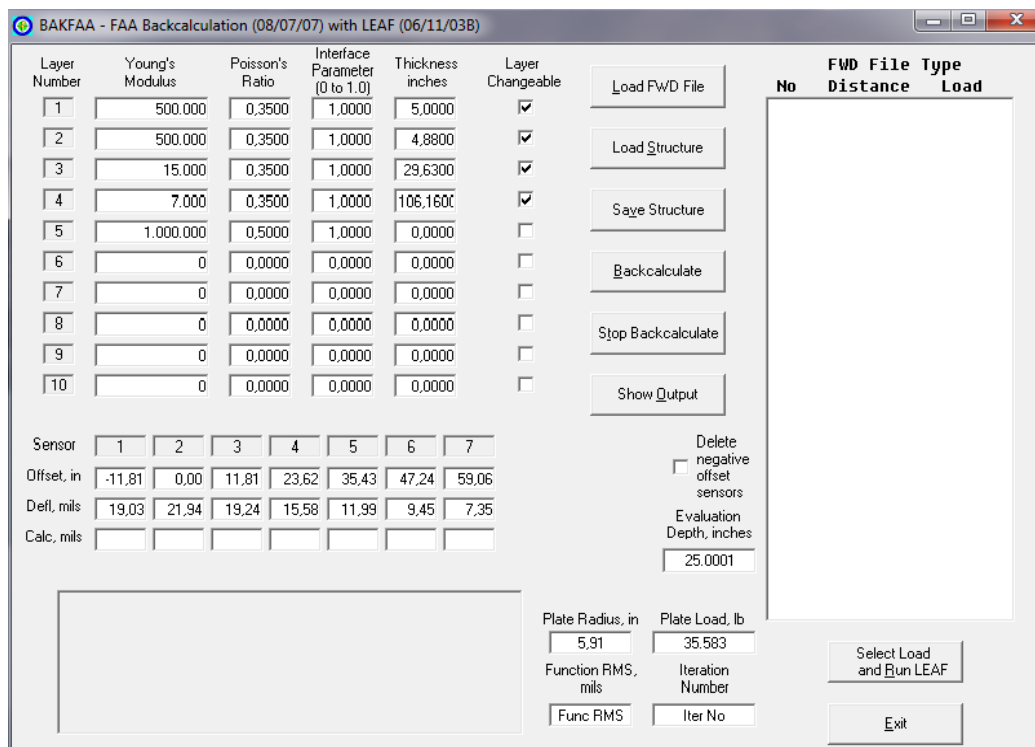
Πίνακας 7.2 Εύρος τιμών του λόγου Poisson για υλικά οδοστρωμάτων, σύμφωνα με την εγκύκλιο της FAA

Υλικό	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
Ασφαλικό σκυρόδεμα	0,25	0,40
Κοκκώδες υλικό υπόβασης	0,20	0,40
Συνεκτικά εδάφη	0,30	0,45

Το πρόγραμμα απαιτεί την εισαγωγή ακόμα μιας στρώσης, υποκείμενης της στρώσης έδρασης, με συγκεκριμένες τιμές μηχανικών χαρακτηριστικών. Πρόκειται για δύσκαμπτη στρώση (Stiff layer) με μέτρο ελαστικότητας 6.895 Mpa (1.000.000 psi) και λόγο Poisson 0,50. Επιπλέον, έχει τη στάθμη της στα 3,70 m για το LFS, στα 3,00 m για το MFS και στα 2,70 m για το HFS (Gopalakrishnan and Thompson, 2004). Η στρώση αυτή χρησιμοποιείται για να προσομοιάσει είτε ένα βραχώδες υπόστρωμα, είτε το βάθος εκείνο στο οποίο οι κατακόρυφες παραμορφώσεις γίνονται αμελητέες. Η έρευνα έχει δείξει ότι τα αποτελέσματα από την ανάστροφη ανάλυση είναι σημαντικά ανακριβή με την παράλειψη αυτής της στρώσεως, ή ακόμα και με το λανθασμένο προσδιορισμό του βάθους της στάθμης της (American Society for Testing and Materials – ASTM, 2008).

Στην εικόνα 7.2 παρουσιάζεται η αρχική οθόνη του προγράμματος BAKFAA, στην οποία έχουν καταχωρηθεί τα πάχη και οι σπερματικές τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών των στρώσεων του δαπέδου LFS. Επίσης, φαίνονται τα δεδομένα από τη

συγκεκριμένη πτώση (φορτίο πίπτοντος βάρους, αποστάσεις αισθητήρων από τον κυκλικό δίσκο, ελαστικές υποχωρήσεις για κάθε αισθητήρα, καθώς και η ακτίνα του κυκλικού δίσκου).

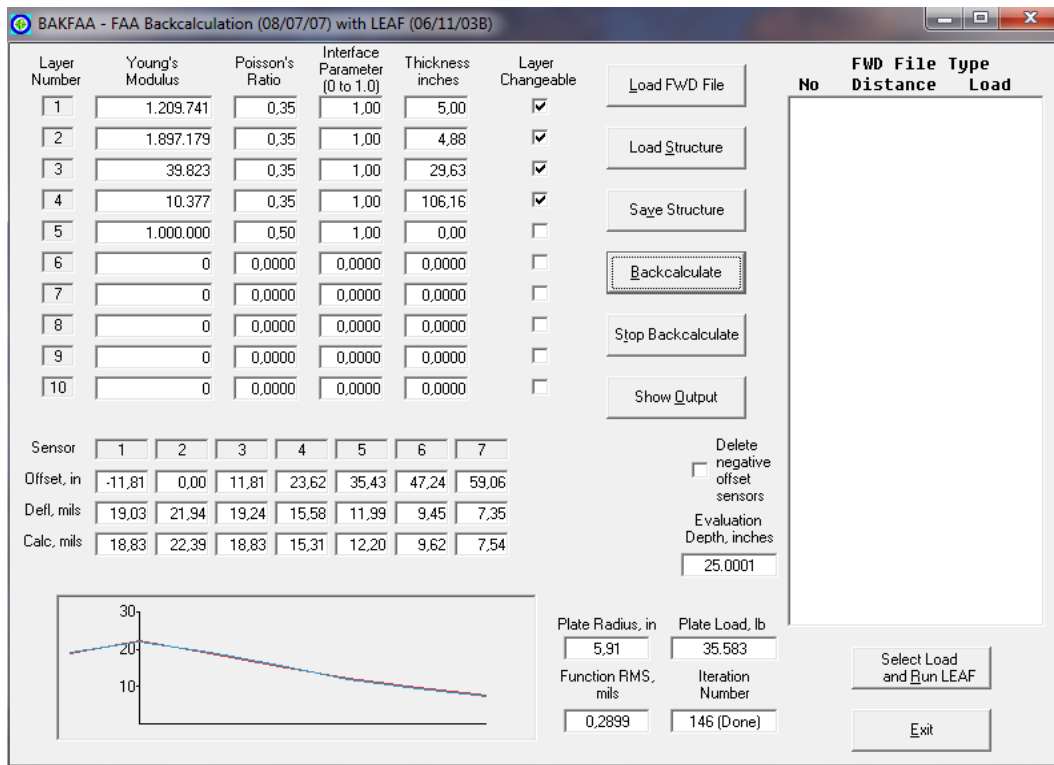


Εικόνα 7.2 Αρχική οθόνη προγράμματος BAKFAA, με όλα τα στοιχεία που απαιτούνται

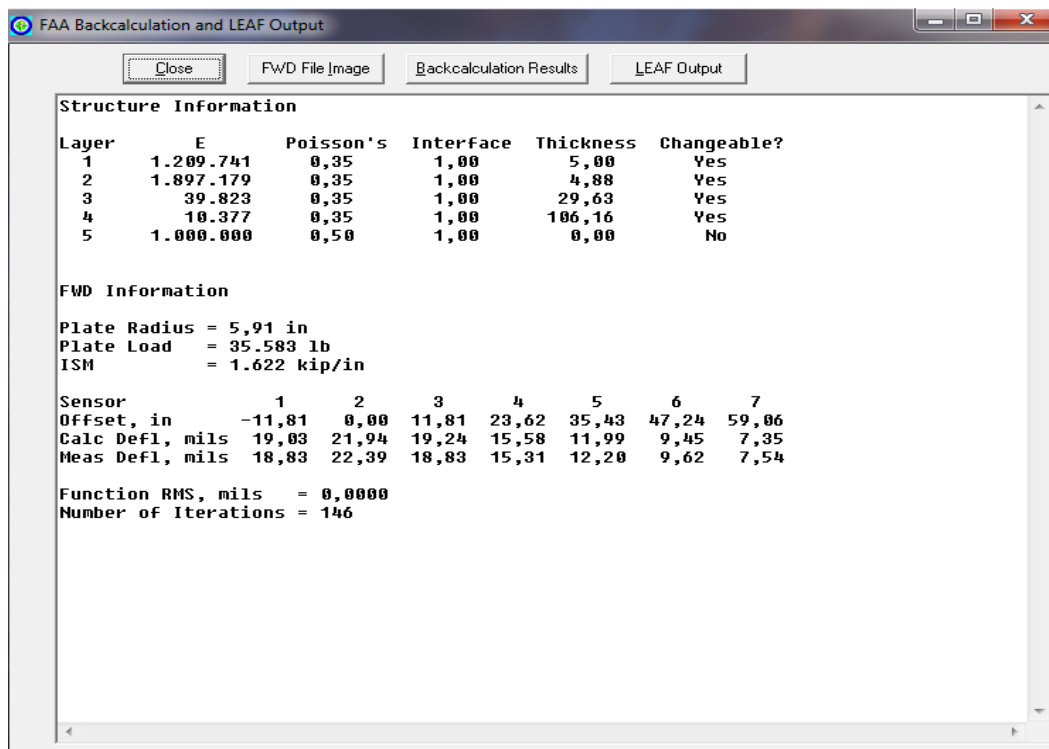
Για τον υπολογισμό των μέτρων ελαστικότητας, δημιουργήθηκαν αρχεία str, τα οποία περιείχαν τις σπερματικές τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών και τα πάχη των στρώσεων για κάθε δάπεδο χωριστά. Έτσι, κάθε φορά άλλαζε μόνο το φορτίο του πίπτοντος βάρους και οι τιμές των ελαστικών υποχωρήσεων. Η ακτίνα που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτή των 15 cm (5,91 inch). Αφού τελείωνε η εισαγωγή των δεδομένων, ο αλγόριθμος του ανάστροφου υπολογισμού του προγράμματος ενεργοποιούνταν (back-calculate).

Το πρόγραμμα πραγματοποιούσε πολλές επαναλήψεις, μέχρις ότου να υπάρξει η μικρότερη δυνατή απόκλιση μεταξύ των μετρημένων ελαστικών υποχωρήσεων και των υπολογισμένων από το πρόγραμμα. Με το πέρας των επαναλήψεων, σταθεροποιούνταν τα μέτρα ελαστικότητας και εμφανίζονταν μαζί με τα υπόλοιπα αποτελέσματα στην αρχική οθόνη.

Επίσης, το πρόγραμμα δημιουργεί και τη γραφική απεικόνιση τόσο των μετρημένων, όσο και των υπολογισμένων τιμών των ελαστικών υποχωρήσεων, η οποία εμφανίζεται αφότου αρχίσουν οι υπολογισμοί και λαμβάνει την τελική της μορφή, με το πέρας τους. Στα αποτελέσματα συμπεριλαμβάνονται τόσο ο αριθμός των επαναλήψεων που πραγματοποίησε το πρόγραμμα για να υπάρξει σύγκλιση στις τιμές των υποχωρήσεων, όσο και η μέση τετραγωνική ρίζα (RMSE). Στις επόμενες εικόνες φαίνονται η οθόνη του προγράμματος μετά τον υπολογισμό και η οθόνη με τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού συγκεντρωτικά.



Εικόνα 7.3 Οθόνη προγράμματος BAKFAA, με τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού



Εικόνα 7.4 Οθόνη εξόδου του προγράμματος BAKFAA, με τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού συγκεντρωτικά

Κατ' αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκε μία ομάδα από μέτρα δυσκαμψίας/ελαστικότητας, τα οποία πληρούσαν το κριτήριο του συντελεστή διακύμανσης του σφάλματος των ελαχίστων τετραγώνων. Όπως έχει αναφερθεί στο τέταρτο κεφάλαιο, το κριτήριο αυτό απαιτεί από το συντελεστή διακύμανσης του RMSE να κυμαίνεται μεταξύ του 2 και 5% ($2\% < \text{CoV}(\text{RMSE}) < 5\%$). Η τελική επιλογή των μέτρων ελαστικότητας έγινε συνεκτιμώντας τους βασικούς παράγοντες επιρροής των μέτρων δυσκαμψίας, όπως για παράδειγμα ο υφιστάμενος αριθμός διελεύσεων/φορτίσεων, καθώς επίσης και η θερμοκρασία. Έτσι, οι τιμές που επιλέχθηκαν θεωρήθηκαν οι πιο αντιπροσωπευτικές, βάσει των προαναφερθέντων παραγόντων. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα μέτρα δυσκαμψίας καθενός δαπέδου. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι έχουν υπολογιστεί και τα μέτρα ελαστικότητας για ημέρα (11/2/00) προτού αρχίσουν οι δοκιμαστικές φορτίσεις, προκειμένου να εκτιμηθεί η δομική κατάσταση των δαπέδων πριν την έναρξη των δοκιμών. Επιπλέον, για το HFS υπολογίστηκαν τα μέτρα ελαστικότητας στις 20/3/00 και 7/4/00. Στις δύο αυτές ημέρες έγιναν μόνο εφαρμογές FWD και όχι δοκιμαστικές φορτίσεις.

7.2.2 Υπολογισμένα μέτρα ελαστικότητας υλικών δαπέδου LFS

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τιμές των εκτιμημένων μέτρων δυσκαμψίας για τις τρεις θέσεις (βόρειο τμήμα, νότιο τμήμα και άξονας δαπέδου).

Υπολογισμένα Μέτρα Ελαστικότητας	Ημέρες Εφαρμογής FWD						
	11/2/00	7/4/00	14/4/00	22/6/00	31/8/00	29/9/00	5/10/00
E_{AC} (Μpa)	20.483	11.874	12.610	5.407	5.183	5.989	4.753
$E_{Subbase}$ (Μpa)	353	312	342	172	170	189	151
$E_{Subgrade}$ (Μpa)	81	68	72	58	61	62	53
RMSE	0,29	0,29	0,30	0,72	0,53	0,47	0,75
CoV(RMSE)	2,60 %	2,04 %	2,17 %	3,43 %	2,49 %	2,38 %	3,16 %
T_{AC} (°C)	6	13	11	23	24	20	22

Υπολογισμένα Μέτρα Ελαστικότητας	Ημέρες Εφαρμογής FWD		
	6/10/00	14/11/00	6/6/01
E_{AC} (Μpa)	4.407	6.832	5.227
$E_{Subbase}$ (Μpa)	170	221	147
$E_{Subgrade}$ (Μpa)	58	69	85
RMSE	0,51	0,47	0,89
CoV(RMSE)	2,28 %	2,56 %	4,28 %
T_{AC} (°C)	22	17	21

Εικόνα 7.5 Υπολογισμένα μέτρα ελαστικότητας/δυσκαμψίας των υλικών του δαπέδου LFS για το βόρειο τμήμα

Υπολογισμένα Μέτρα Ελαστικότητας	Ημέρες Εφαρμογής FWD						
	11/2/00	7/4/00	14/4/00	22/6/00	31/8/00	29/9/00	5/10/00
E_{AC} (Mpa)	15.581	9.846	11.364	4.446	4.747	5.648	3.603
$E_{Subbase}$ (Mpa)	363	276	284	157	157	178	149
$E_{Subgrade}$ (Mpa)	78	72	70	66	66	60	58
RMSE	0,26	0,30	0,34	0,51	0,46	0,69	0,49
CoV(RMSE)	2,16 %	2,00 %	2,28 %	2,37 %	2,21 %	3,32 %	2,01 %
T_{AC} (°C)	6	13	11	23	24	20	22

Υπολογισμένα Μέτρα Ελαστικότητας	Ημέρες Εφαρμογής FWD		
	6/10/00	14/11/00	6/6/01
E_{AC} (Mpa)	4.381	6.428	4.677
$E_{Subbase}$ (Mpa)	143	206	156
$E_{Subgrade}$ (Mpa)	54	66	63
RMSE	0,52	0,52	0,60
CoV(RMSE)	2,24 %	2,66 %	2,71 %
T_{AC} (°C)	22	17	21

Εικόνα 7.6 Υπολογισμένα μέτρα ελαστικότητας/δυσκαμψίας των υλικών του δαπέδου LFS για το νότιο τμήμα

Υπολογισμένα Μέτρα Ελαστικότητας	Ημέρες Εφαρμογής FWD						
	7/4/00	14/4/00	22/6/00	31/8/00	29/9/00	5/10/00	6/10/00
E_{AC} (Mpa)	10.032	10.772	5.223	5.541	6.708	5.850	5.990
$E_{Subbase}$ (Mpa)	300	311	189	183	217	192	199
$E_{Subgrade}$ (Mpa)	75	77	76	68	68	65	67
RMSE	0,30	0,30	0,38	0,81	0,40	0,41	0,43
CoV(RMSE)	2,07 %	2,13 %	2,09 %	4,23 %	2,21 %	2,11 %	2,25 %
T_{AC} (°C)	13	11	23	24	20	22	22

Υπολογισμένα Μέτρα Ελαστικότητας	Ημέρες Εφαρμογής FWD	
	14/11/00	6/6/01
E_{AC} (Mpa)	7.786	7.774
$E_{Subbase}$ (Mpa)	253	228
$E_{Subgrade}$ (Mpa)	78	73
RMSE	0,39	0,39
CoV(RMSE)	2,39 %	2,34 %
T_{AC} (°C)	17	21

Εικόνα 7.7 Υπολογισμένα μέτρα ελαστικότητας/δυσκαμψίας των υλικών στον άξονα του δαπέδου LFS

7.2.3 Υπολογισμένα μέτρα ελαστικότητας υλικών δαπέδου MFS

Ομοίως, παρατίθενται τα μέτρα ελαστικότητας στις τρεις θέσεις του δαπέδου αυτού.

Υπολογισμένα Μέτρα Ελαστικότητας	Ημέρες Εφαρμογής FWD				
	11/2/00	7/4/00	14/4/00	23/5/00	22/6/00
E_{AC} (Mpa)	19.517	11.518	9.177	3.683	1.664
$E_{Subbase}$ (Mpa)	439	281	293	127	35
$E_{Subgrade}$ (Mpa)	119	107	118	107	112
RMSE	0,28	0,29	0,38	0,82	0,82
CoV(RMSE)	2,60 %	2,19 %	2,80 %	4,32 %	2,99 %
T_{AC} (°C)	6	11	16	23	23

Εικόνα 7.8 Υπολογισμένα μέτρα ελαστικότητας/δυσκαμψίας των υλικών του δαπέδου MFS για το βόρειο τμήμα

Υπολογισμένα Μέτρα Ελαστικότητας	Ημέρες Εφαρμογής FWD				
	11/2/00	7/4/00	14/4/00	23/5/00	22/6/00
E_{AC} (Mpa)	18.521	13.171	14.700	7.310	4.673
$E_{Subbase}$ (Mpa)	345	296	314	221	154
$E_{Subgrade}$ (Mpa)	120	120	123	127	110
RMSE	0,23	0,25	0,29	0,36	0,40
CoV(RMSE)	2,22 %	2,08 %	2,53 %	2,57 %	2,34 %
T_{AC} (°C)	6	11	16	23	23

Εικόνα 7.9 Υπολογισμένα μέτρα ελαστικότητας/δυσκαμψίας των υλικών του δαπέδου MFS για το νότιο τμήμα

Υπολογισμένα Μέτρα Ελαστικότητας	Ημέρες Εφαρμογής FWD			
	7/4/00	14/4/00	23/5/00	22/6/00
E_{AC} (Mpa)	13.473	13.876	7.634	4.741
$E_{Subbase}$ (Mpa)	295	328	148	274
$E_{Subgrade}$ (Mpa)	110	121	109	116
RMSE	0,35	0,25	0,31	0,34
CoV(RMSE)	2,85 %	2,12 %	2,00 %	2,19 %
T_{AC} (°C)	11	16	23	23

Εικόνα 7.10 Υπολογισμένα μέτρα ελαστικότητας/δυσκαμψίας των υλικών στον άξονα του δαπέδου MFS

7.2.4 Υπολογισμένα μέτρα ελαστικότητας υλικών δαπέδου HFS

Παρακάτω φαίνονται τα υπολογισμένα μέτρα ελαστικότητας του δαπέδου για τις τρεις θέσεις που αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα από τις μετρήσεις FWD.

Υπολογισμένα Μέτρα Ελαστικότητας	Ημέρες Εφαρμογής FWD		
	11/2/00	20/3/00	7/4/00
E_{AC} (Mpa)	21.297	16.133	13.116
$E_{Subgrade}$ (Mpa)	159	148	143
RMSE	0,20	0,22	0,23
CoV(RMSE)	2,12 %	2,13 %	2,03 %
T_{AC} (°C)	6	13	13

Εικόνα 7.11 Υπολογισμένα μέτρα ελαστικότητας/δυσκαμψίας των υλικών του δαπέδου HFS για το βόρειο τμήμα

Υπολογισμένα Μέτρα Ελαστικότητας	Ημέρες Εφαρμογής FWD		
	11/2/00	20/3/00	7/4/00
E_{AC} (Μpa)	23.576	21.123	17.365
$E_{Subgrade}$ (Μpa)	162	153	150
RMSE	0,19	0,21	0,23
CoV(RMSE)	2,17 %	2,23 %	2,30 %
T_{AC} (°C)	6	13	13

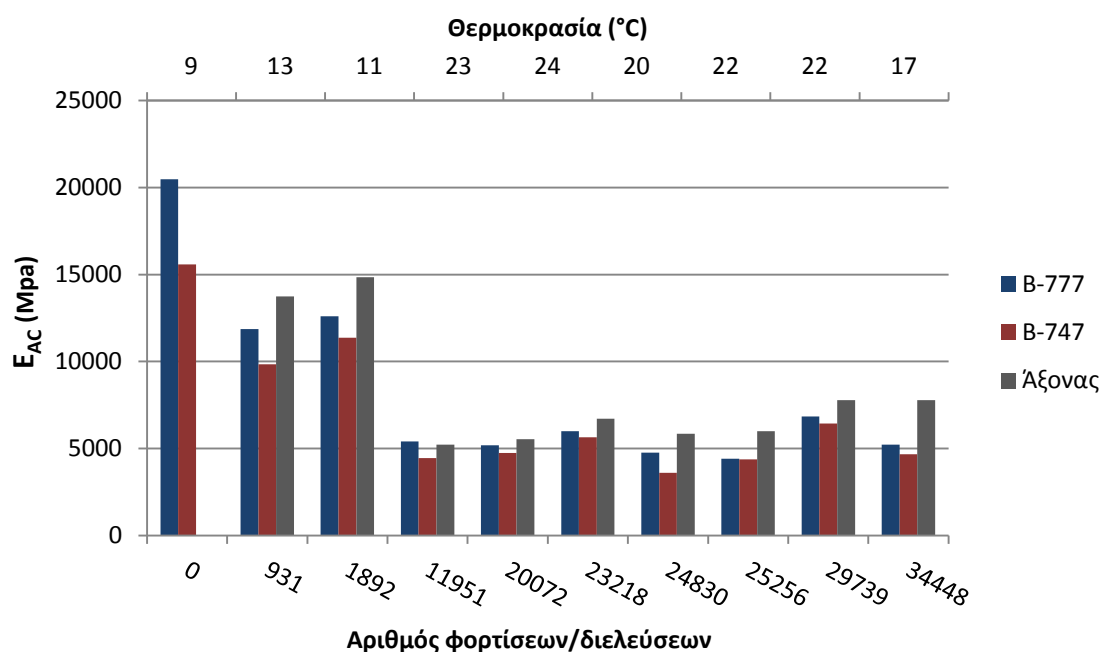
Εικόνα 7.12 Υπολογισμένα μέτρα ελαστικότητας/δυσκαμψίας των υλικών του δαπέδου HFS για το νότιο τμήμα

Υπολογισμένα Μέτρα Ελαστικότητας	Ημέρες Εφαρμογής FWD	
	20/3/00	7/4/00
E_{AC} (Μpa)	17.338	16.328
$E_{Subgrade}$ (Μpa)	170	161
RMSE	0,19	0,23
CoV(RMSE)	2,06 %	2,35 %
T_{AC} (°C)	8	13

Εικόνα 7.13 Υπολογισμένα μέτρα ελαστικότητας/δυσκαμψίας των υλικών στον άξονα του δαπέδου HFS

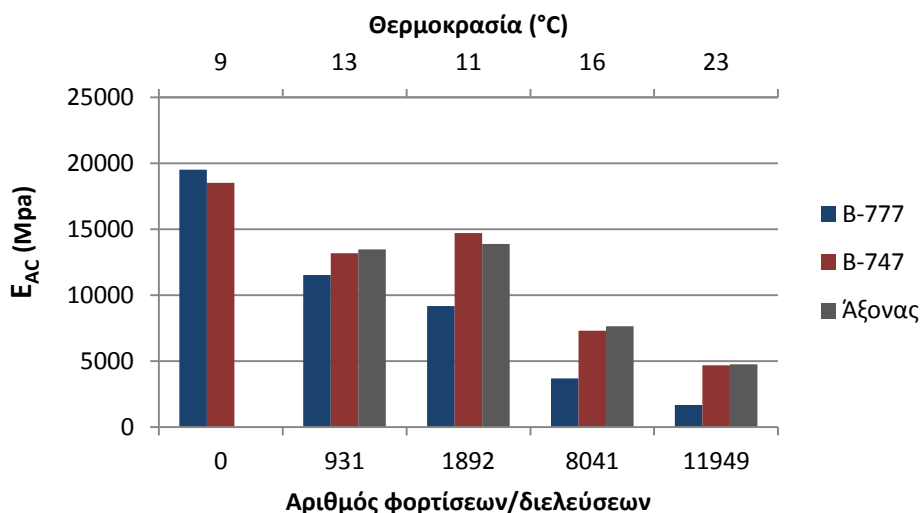
7.2.5 Σύγκριση μέτρων ελαστικότητας ασφαλτικού σκυροδέματος στις τρεις θέσεις των δαπέδων

Σε κάθε δάπεδο υπολογίστηκαν τα μέτρα ελαστικότητας των υλικών σε τρεις θέσεις. Συγκεκριμένα, στο βόρειο και νότιο τμήμα τους, επί των αξόνων όπου υπάρχουν οι αισθητήρες (λωρίδες 2 και 5 αντίστοιχα, εικόνα 6.3), καθώς επίσης και στον άξονα του δαπέδου. Στις δύο λωρίδες πραγματοποιήθηκαν οι περισσότερες διελεύσεις από τα φορεία, ενώ ο άξονας δεν καταπονείται καθ' όλη τη διάρκεια των δοκιμών. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα σύγκρισης της δομικής κατάστασης των δαπέδων μεταξύ των δύο τμημάτων και του άξονα που δεν καταπονείται. Η διαφορά στα μέτρα δυσκαμψίας μεταξύ των τμημάτων και του άξονα υποδεικνύει την καταπόνηση που προκαλούν τα δύο φορεία, καθώς οι μεταβολές των μέτρων ελαστικότητας του άξονα είναι αποτέλεσμα αποκλειστικά της θερμοκρασίας. Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζεται η σύγκριση αυτή για όλα τα δάπεδα.



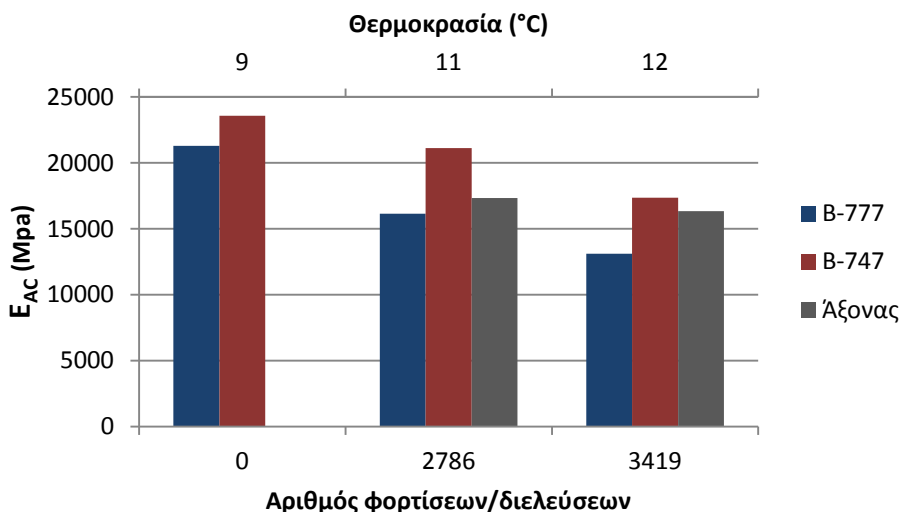
Εικόνα 7.14 Σύγκριση μέτρων ελαστικότητας/δυσκαμψίας ασφαλτικού σκυροδέματος στις τρεις θέσεις του δαπέδου LFS

Σχετικά με το LFS, τα μέτρα δυσκαμψίας στον άξονα παρουσιάζουν όπως αναμενόταν τις μεγαλύτερες τιμές. Επιπλέον, οι τιμές στο βόρειο τμήμα είναι μεγαλύτερες από αυτές του νότιου. Δηλαδή, η καταπόνηση που προκαλείται από το B-747 είναι μεγαλύτερη από αυτή του B-777, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται και από τη σύγκριση των παραμορφώσεων στον πυθμένα των ασφαλτικών. Ακολουθεί η εικόνα 7.15, με τη σύγκριση των μέτρων ελαστικότητας για το MFS.



Εικόνα 7.15 Σύγκριση μέτρων ελαστικότητας/δυσκαμψίας ασφαλτικού σκυροδέματος στις τρεις θέσεις του δαπέδου MFS

Στο MFS οι τιμές των μέτρων δυσκαμψίας στο νότιο τμήμα (B-747) είναι μεγαλύτερες από αυτές του βόρειου, κάτι το οποίο αναμενόταν βάσει και της σύγκρισης των παραμορφώσεων στην κρίσιμη θέση του πυθμένα των ασφαλτικών. Οι τιμές στον άξονα παρουσιάζουν μια μικρή αύξηση σε σχέση με τις τιμές του νότιου τμήματος, χωρίς να παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά, γεγονός που φανερώνει ότι η φέρουσα ικανότητα του νότιου τμήματος δεν έχει μειωθεί ιδιαίτερα για τις ημέρες εκείνες. Στην εικόνα 7.16 παρουσιάζεται η αντίστοιχη σύγκριση για το HFS.



Εικόνα 7.16 Σύγκριση μέτρων ελαστικότητας/δυσκαμψίας ασφαλτικού σκυροδέματος του δαπέδου HFS

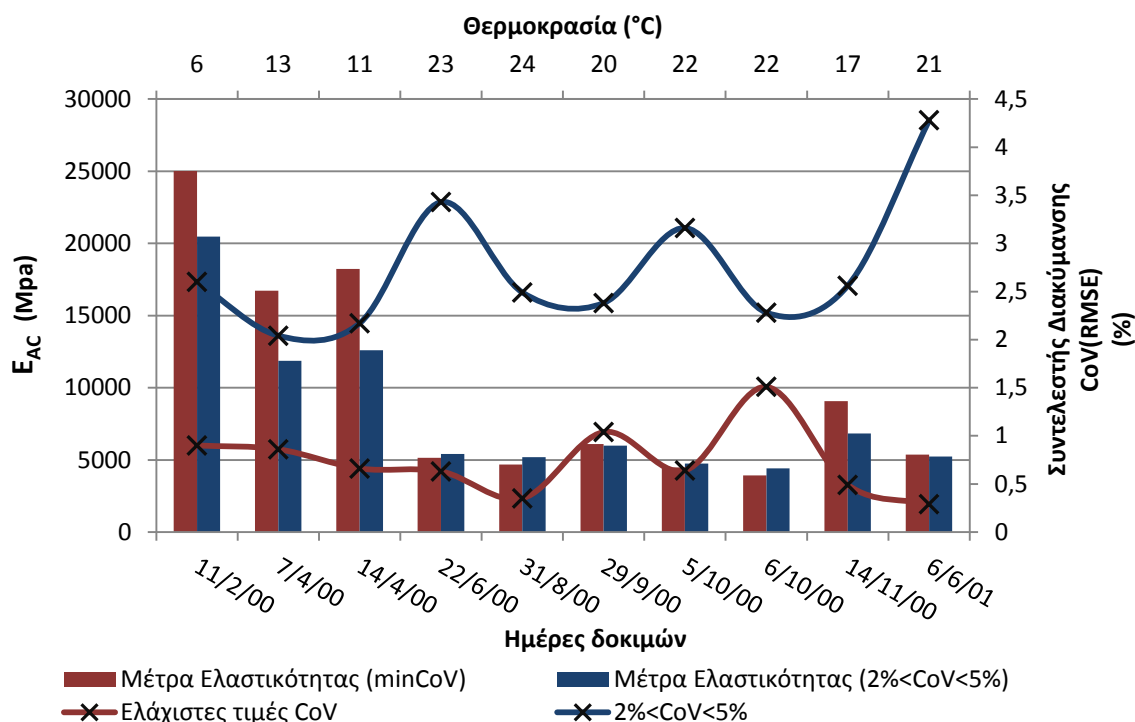
Τέλος, αναφορικά με το HFS, τα μέτρα ελαστικότητας στο νότιο τμήμα είναι μεγαλύτερα από αυτά στο βόρειο, κάτι το οποίο υποδεικνύει μεγαλύτερες παραμορφώσεις στο βόρειο τμήμα (B-777). Όμως αυτό έρχεται σε αντίθεση με τη σύγκριση των παραμορφώσεων, όπως κατεγράφησαν από τους αισθητήρες στον πυθμένα των ασφαλτικών για τις προηγούμενες ημέρες δοκιμών. Επιπλέον, τα μέτρα ελαστικότητας στον άξονα έχουν χαμηλότερες τιμές από αυτές του νότιου τμήματος. Πιθανό αίτιο των παραπάνω αναντιστοιχιών είναι το γεγονός ότι στις μέρες που επιλέχθηκαν για την εύρεση των μέτρων ελαστικότητας στο συγκεκριμένο δάπεδο, δεν πραγματοποιήθηκαν δοκιμές από τα φορεία.

Γενικώς, είναι φανερή η μείωση των μέτρων ελαστικότητας με την αύξηση της θερμοκρασίας και του αριθμού των διελεύσεων και στα τρία δάπεδα.

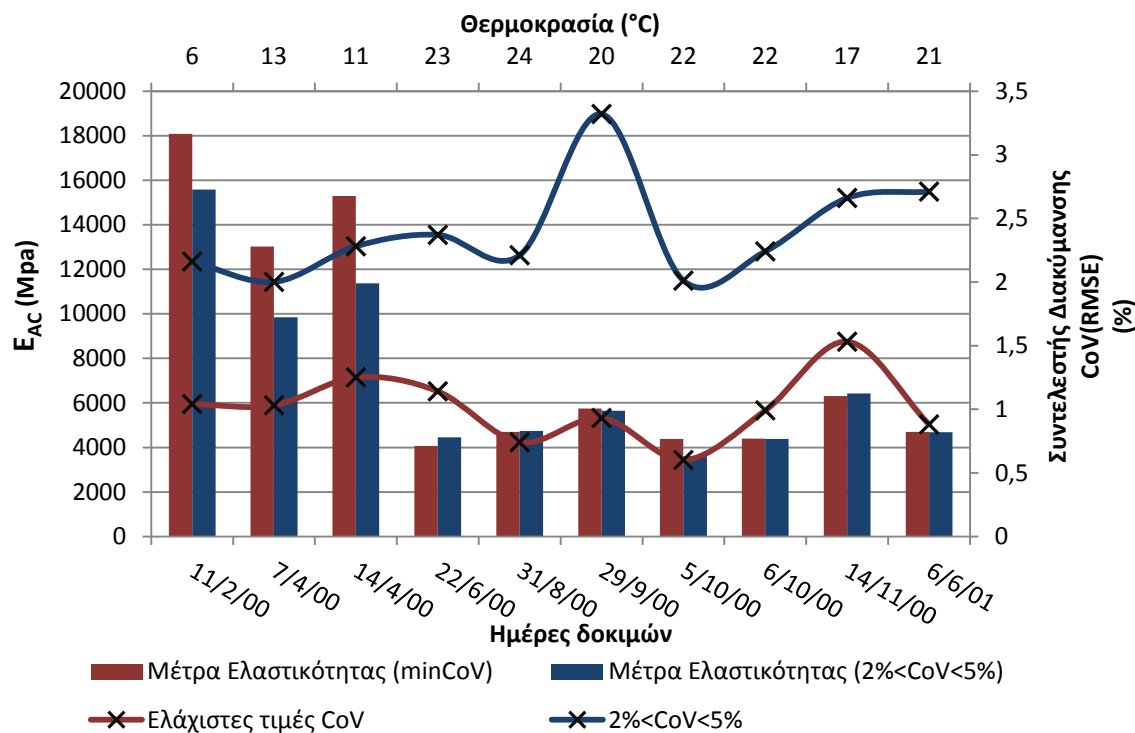
Παρακάτω εξετάζεται η απόκλιση μεταξύ των μέτρων ελαστικότητας που υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα BAKFAA για διαφορετικούς συντελεστές διακύμανσης του σφάλματος της μέσης τετραγωνικής ρίζας (RMSE).

7.2.6 Σύγκριση μέτρων ελαστικότητας ασφαλτικού σκυροδέματος για διαφορετικές τιμές του συντελεστή διακύμανσης του RMSE

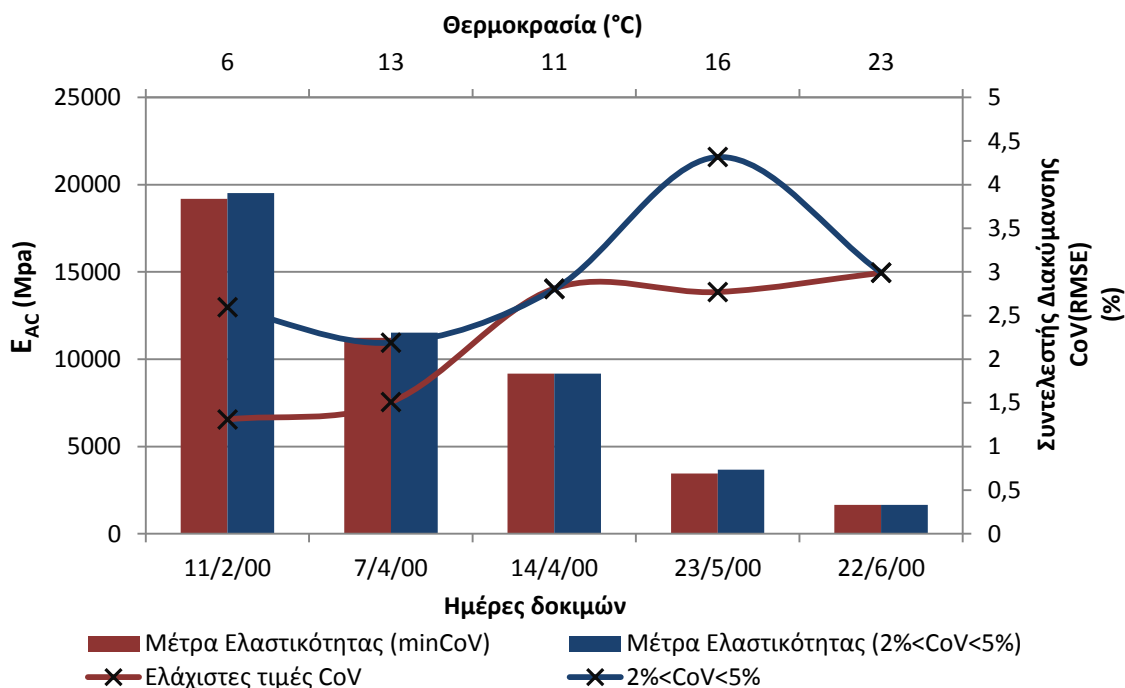
Όπως αναφέρθηκε, το πρόγραμμα του ανάστροφου υπολογισμού έτρεξε πολλές φορές δίνοντας κάθε φορά μία σειρά αποτελεσμάτων (υπολογισμένες υποχωρήσεις, μέτρα ελαστικότητας, τιμές σφάλματος μέσης τετραγωνικής ρίζας, κ.ά.). Κριτήριο αποδοχής των υπολογισμένων μέτρων δυσκαμψίας αποτελεί η σχέση $2\% < CoV(RMSE) < 5\%$. Με άλλα λόγια, ο συντελεστής διακύμανσης του σφάλματος της μέσης τετραγωνικής ρίζας θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ του 2 και 5%. Κατ' επέκταση, ο RMSE θα πρέπει επίσης να κυμαίνεται σε διάστημα, το οποίο καθορίζεται από τη μέση τιμή των μετρημένων υποχωρήσεων και από τις ακραίες τιμές της παραπάνω ανίσωσης. Έτσι, προκειμένου να ικανοποιηθεί το κριτήριο του προγράμματος BAKFAA, δε λήφθηκαν τα μέτρα δυσκαμψίας με την ελάχιστη τιμή του RMSE. Στις παρακάτω εικόνες συγκρίνονται οι τιμές των μέτρων δυσκαμψίας του ασφαλτικού σκυροδέματος των δαπέδων, για τις ελάχιστες τιμές του RMSE και κατ' επέκταση του CoV, με αυτές για τις τιμές του RMSE που ικανοποιούν το προαναφερθέν κριτήριο.



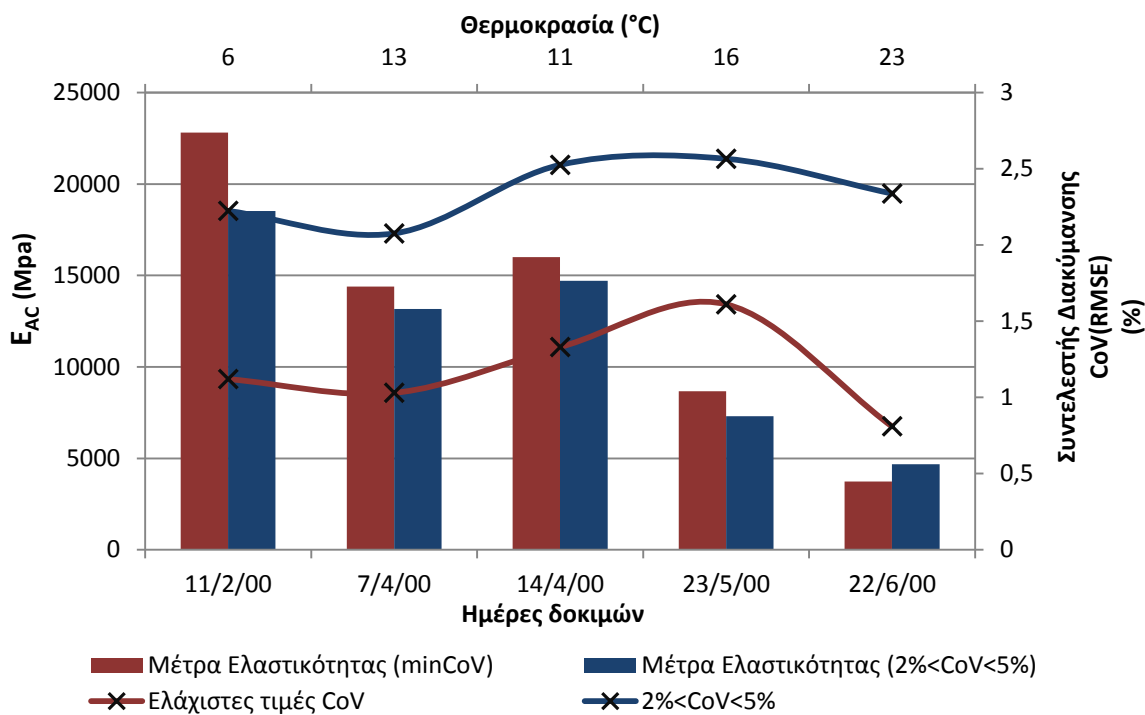
Εικόνα 7.17 Σύγκριση μέτρων ελαστικότητας/δυσκαμψίας ασφαλτικού σκυροδέματος στο βόρειο τμήμα του LFS, για minCoV και 2%<CoV<5%



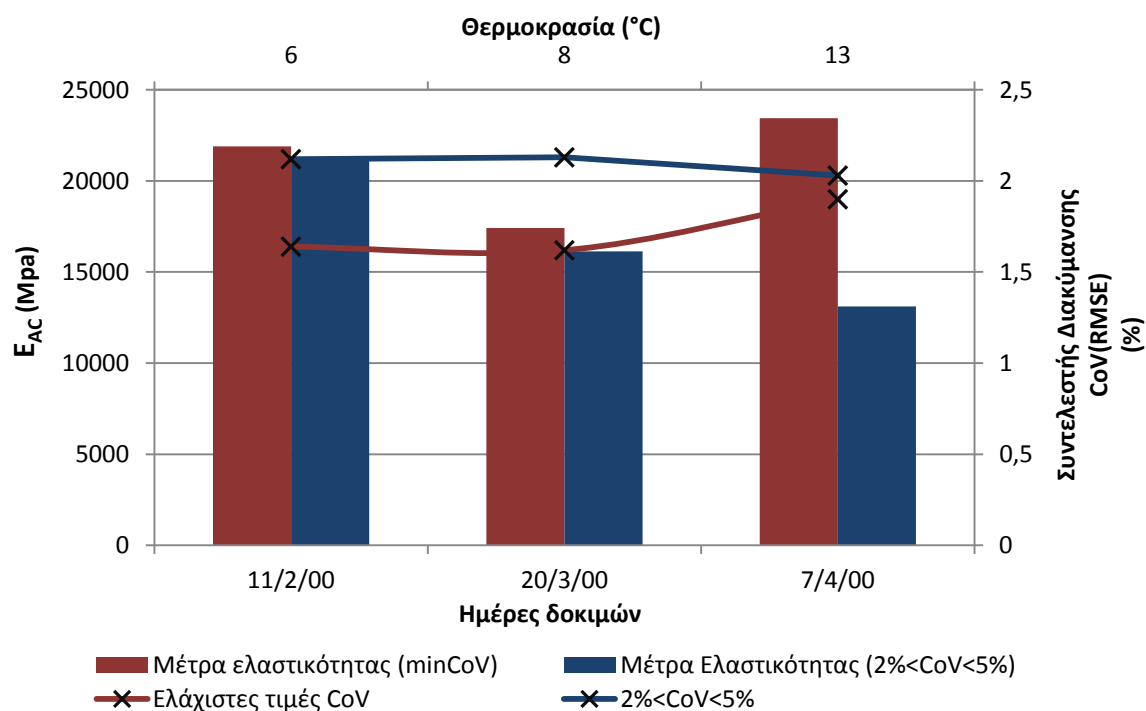
Εικόνα 7.18 Σύγκριση μέτρων ελαστικότητας/δυσκαμψίας ασφαλτικού σκυροδέματος στο νότιο τμήμα του LFS, για minCoV και 2%<CoV<5%



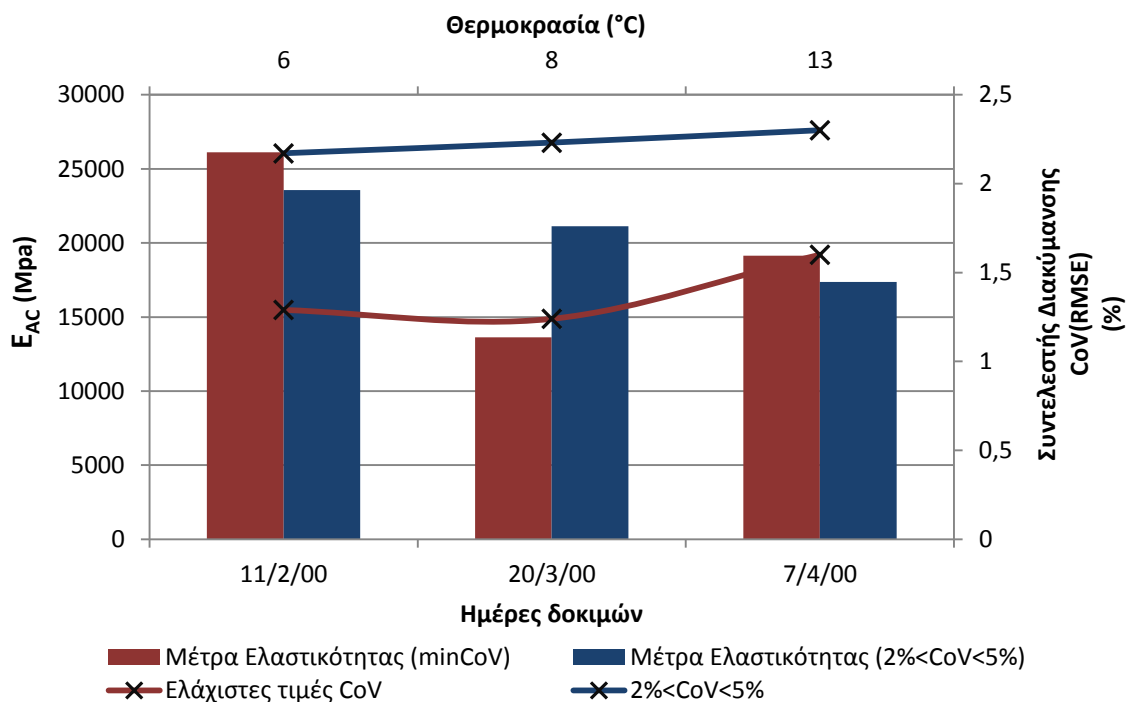
Εικόνα 7.19 Σύγκριση μέτρων ελαστικότητας/δυσκαμψίας ασφαλτικού σκυροδέματος στο βόρειο τμήμα του MFS, για minCoV και 2%<CoV<5%



Εικόνα 7.20 Σύγκριση μέτρων ελαστικότητας/δυσκαμψίας ασφαλτικού σκυροδέματος στο νότιο τμήμα του MFS, για minCoV και 2%<CoV<5%



Εικόνα 7.21 Σύγκριση μέτρων ελαστικότητας/δυσκαμψίας ασφαλτικού σκυροδέματος στο βόρειο τμήμα του HFS, για minCoV και 2%<CoV<5%



Εικόνα 7.22 Σύγκριση μέτρων ελαστικότητας/δυσκαμψίας ασφαλτικού σκυροδέματος στο νότιο τμήμα του HFS, για minCoV και 2%<CoV<5%

Όπως παρατηρείται στις παραπάνω εικόνες, οι διαφορές των μέτρων δυσκαμψίας για διαφορετικές τιμές του CoV(RMSE) είναι μικρές. Δηλαδή, η διαφορά των τιμών του CoV δεν επηρέασε με ανάλογο τρόπο τις τιμές των μέτρων δυσκαμψίας που έδωσε το πρόγραμμα. Έτσι, το γεγονός ότι δεν επιλέχθηκαν τα μέτρα ελαστικότητας με τις μικρότερες τιμές του RMSE, δεν αλλοιώνει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, μιας και οι τιμές είναι παραπλήσιες. Κατ' αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται και η αξιοπιστία των μετέπειτα υπολογισμών των παραμορφώσεων, μέσω προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων.

7.3 Αναλυτικός υπολογισμός παραμορφώσεων μέσω προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων

7.3.1 Διαδικασία κατάστρωσης προτύπων προσομοίωσης

Για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων, έγινε χρήση της θεωρίας των πεπερασμένων στοιχείων. Η προσομοίωση έγινε μέσω προτύπων τριών διαστάσεων (3D) για καθένα από τα δύο τμήματα και των τριών δαπέδων. Έτσι, δόθηκε η δυνατότητα υπολογισμού των οριζόντιων ανηγμένων παραμορφώσεων σε οποιαδήποτε θέση του προτύπου.

Η προσομοίωση των δαπέδων έγινε με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS/CAE. Το ABAQUS είναι γενικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των τάσεων/παραμορφώσεων και των θερμοκρασιακών πεδίων σε κατασκευές. Περιλαμβάνει πληθώρα εντολών, οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα τρισδιάστατου σχεδιασμού, καθώς επίσης και μεγάλη γκάμα προτύπων υλικών που προσομοιάζουν επαρκώς τη συμπεριφορά πολλών υλικών εφαρμοσμένης μηχανικής.

Αρχικά, ο αντικειμενικός σκοπός είναι η σύνταξη ενός αρχείου όπου περιγράφονται τα δεδομένα και τα ζητούμενα του προβλήματος. Το αρχείο αυτό αναφέρεται στο εξής ως "input file". Είναι προφανές πως πολύπλοκα προβλήματα απαιτούν ένα εκτεταμένο input file, το οποίο δεν είναι δύσκολο να συνταχθεί αν ακολουθηθεί η κατάλληλη μέθοδος κάθε φορά.

Στο input file εισάγουμε δεδομένα του μοντέλου (model data) και δεδομένα της παρούσας κατάστασης ή της κατάστασης που προϋπήρχε (history data). Τα δεδομένα του μοντέλου περιγράφουν τα στοιχεία (elements), τους κόμβους (nodes), τις ιδιότητες του στοιχείου (element properties), το υλικό (material definition) και κάθε στοιχείο που προσδιορίζει το μοντέλο καθαυτό. Ενώ, τα δεδομένα της προϋπάρχουσας κατάστασης καθορίζουν το τι συμβαίνει στο μοντέλο και τη συχνότητα της φόρτισης για την οποία ζητείται η απόκριση του μοντέλου. Στο ABAQUS ο χρήστης κλιμακώνει την "ιστορία" του μοντέλου σε μια αλληλουχία βημάτων (steps). Κάθε τέτοιο βήμα είναι μια περίοδος απόκρισης συγκεκριμένου τύπου, μίας στατικής φόρτισης, μίας δυναμικής απόκρισης κ.τ.λ. Ο προσδιορισμός του step περιλαμβάνει τον τύπο της διαδικασίας (στατική ανάλυση τάσεων, ανάλυση μεταφοράς θερμότητας, κ.τ.λ.), παραμέτρους ελέγχου για χρονική ολοκλήρωση ή για μη-γραμμικά προβλήματα, φορτίσεις και ζητούμενα. Ο χρήστης επιλέγει το τι περιλαμβάνει το κάθε step. Για παράδειγμα, ένα στατικό φορτίο είναι δυνατόν να εφαρμοστεί σε ένα step, ή αν απαιτείται μεγαλύτερη λεπτομέρεια στα επίπεδα υψηλής φόρτισης, τότε η ίδια η ανάλυση μπορεί να διασπαστεί σε δυο steps έτσι, ώστε να δίνεται βαρύτητα στις μεταβλητές που ενδιαφέρουν περισσότερο σε κάθε ένα από τα steps.

Τα δεδομένα του προβλήματος στο ABAQUS εισάγονται σε ομάδες εντολών οι οποίες περιγράφουν το πρόβλημα. Ο χρήστης επιλέγει τις κατάλληλες εντολές που σχετίζονται με το εκάστοτε πρόβλημα. Οι εντολές αυτές είναι λέξεις κλειδιά (keywords) στο input file σε διαφορετικές γραμμές. Αν η εντολή ακολουθείται από κάποιες τιμές, τότε αυτές εισάγονται σε ξεχωριστή γραμμή.

Τέλος, να σημειωθεί πως το ABAQUS δεν περιέχει μονάδες, γι αυτό οι μονάδες που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να εντάσσονται στο ίδιο σύστημα. Έτσι, αν οι διαστάσεις μήκους εισάγονται σε μέτρα (m), τότε και οι υπόλοιπες μονάδες θα πρέπει να αναφέρονται στο S.I και τα αποτελέσματα θα δίνονται στις αντίστοιχες μονάδες (Αράβας, 2001).

Για τις αναλύσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε χρήση της έκδοσης ABAQUS/CAE 6.10, σε λειτουργικό σύστημα Windows 7. Χρησιμοποιήθηκαν τετραγωνικά εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία που αποτελούνται από 20 κόμβους (20-node quadratic brick – C3D20), όπως παρουσιάστηκε στην εικόνα 4.18.

Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση των φορέων B-777 και B-747 για το βόρειο και το νότιο τμήμα των δαπέδων αντίστοιχα, με την ακριβή διάταξη των τροχών να λαμβάνεται από τα δεδομένα της NARTF (εικόνα 5.8). Η επιφάνεια επαφής του κάθε τροχού στα δάπεδα θεωρήθηκε κυκλική, με ακτίνα $R=0,222$ m (Gopalakrishnan, 2004), επί της οποίας επιβλήθηκε ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο (πίεση ελαστικού). Τόσο η τιμή του φορτίου ανά τροχό, όσο και η τιμή της πίεσης του ελαστικού λήφθηκαν από τον αντίστοιχο πίνακα δεδομένων της NARTF ανάλογα την ημέρα δοκιμής και ικανοποιούν τη σχέση 3.1 για τη δεδομένη ακτίνα επαφής. Για το LFS το ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο κυμάνθηκε από 1,303 έως και 1,848 Mpa (189 έως 268 psi), ενώ για τα δύο άλλα δάπεδα παρέμεινε σταθερό στα 1,303 Mpa (189 psi) για τις μέρες που επελέγησαν.

Όσον αφορά στις διαστάσεις των προτύπων προσομοίωσης (μήκος x πλάτος), η διεθνής πρακτική υποδεικνύει διάσταση πλευράς το εικοσαπλάσιο της ακτίνας επαφής του τροχού στο δάπεδο ($20 \times R$). Μια τέτοια θεώρηση προσομοιάζει το ένα απ' τα τέσσερα τεταρτημόρια των δαπέδων που εξετάζονται, διαστάσεων $4,440$ m x $4,440$ m ($20 \times R = 20 \times 0,222$ m = $4,440$ m). Ωστόσο, στην παρούσα διπλωματική εργασία υπάρχει η ανάγκη υπολογισμού των παραμορφώσεων για κάθε ίχνος διέλευσης χωριστά ως προς την εγκάρσια διεύθυνση. Επιπλέον, είναι απαραίτητη η εξασφάλιση συμμετρίας για κάθε πρότυπο. Όμως, η παραπάνω θεώρηση δεν καθιστά εφικτό τον υπολογισμό των παραμορφώσεων για τις εγκάρσιες αυτές αποστάσεις με την απαίτηση συμμετρίας. Έτσι, επιλέχθηκε βάσει της διεθνούς βιβλιογραφίας η προσομοίωση του κάθε τμήματος (βόρειο και νότιο) χωριστά, με διαστάσεις $8,890$ m x $8,890$ m (Kim, 2007). Τα πάχη της κάθε στρώσης για κάθε δάπεδο (κατακόρυφος άξονας) εξήχθησαν από τους πίνακες της NARTF και χρησιμοποιήθηκαν αυτούσια για τη δημιουργία των προτύπων προσομοίωσης.

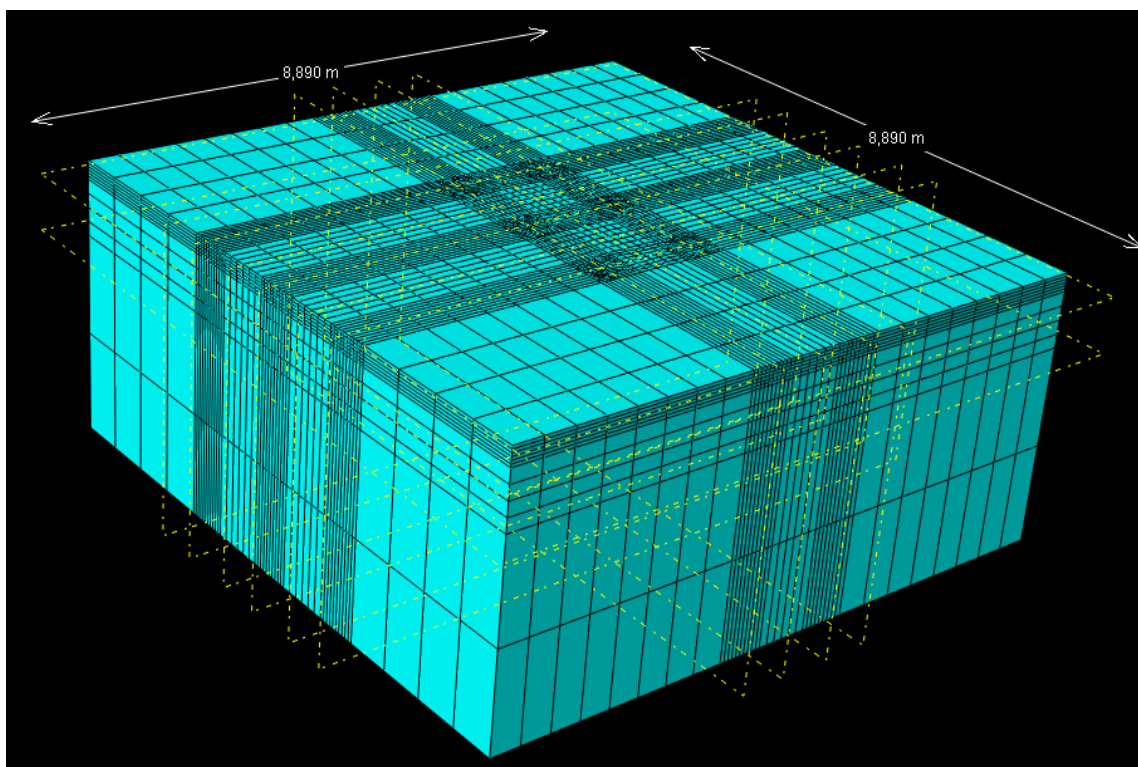
Αναφορικά με τα υλικά κάθε στρώσης, θεωρήθηκαν ισότροπα, γραμμικώς ελαστικά, με μέτρα δυσκαμψίας/ελαστικότητας αυτά που υπολογίστηκαν από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού.

Είναι φανερό ότι αφού διαφέρει το πάχος των στρώσεων από δάπεδο σε δάπεδο και η διάταξη των τροχών για τα δύο τμήματα, το κάθε πρότυπο προσομοίωσης που κατασκευάστηκε έχει διαφορετικό αριθμό πεπερασμένων στοιχείων (elements) και ενεργών κόμβων (nodes). Στον πίνακα 7.3 καταγράφονται για κάθε τμήμα καθενός δαπέδου ο αριθμός των στοιχείων και των κόμβων των προτύπων προσομοίωσης που παρήχθησαν από το πρόγραμμα.

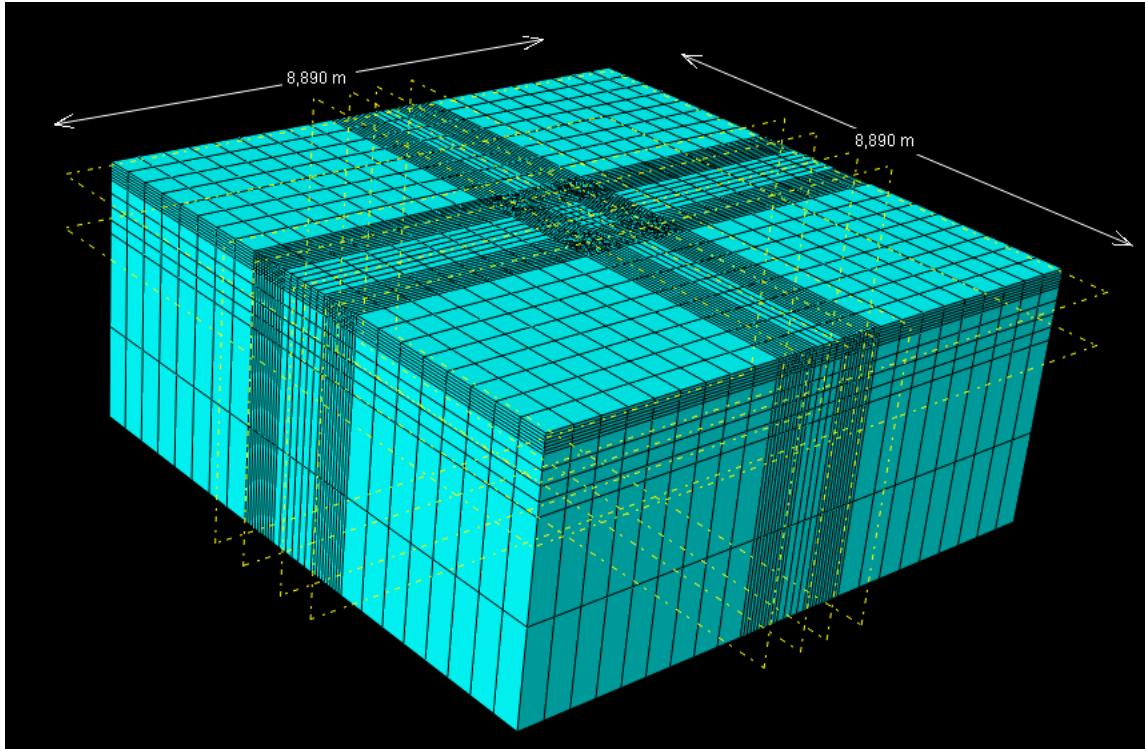
Πίνακας 7.3 Αριθμός πεπερασμένων στοιχείων (finite elements) και κόμβων (nodes) για τα πρότυπα προσομοίωσης

Πρότυπο δαπέδου	Τμήμα	Αριθμός Πεπερασμένων Στοιχείων (elements)	Αριθμός Κόμβων (nodes)
LFS	Βόρειο	28.176	123.307
	Νότιο	27.348	119.598
MFS	Βόρειο	28.033	123.622
	Νότιο	22.670	100.318
HFS	Βόρειο	24.048	107.853
	Νότιο	18.448	83.119

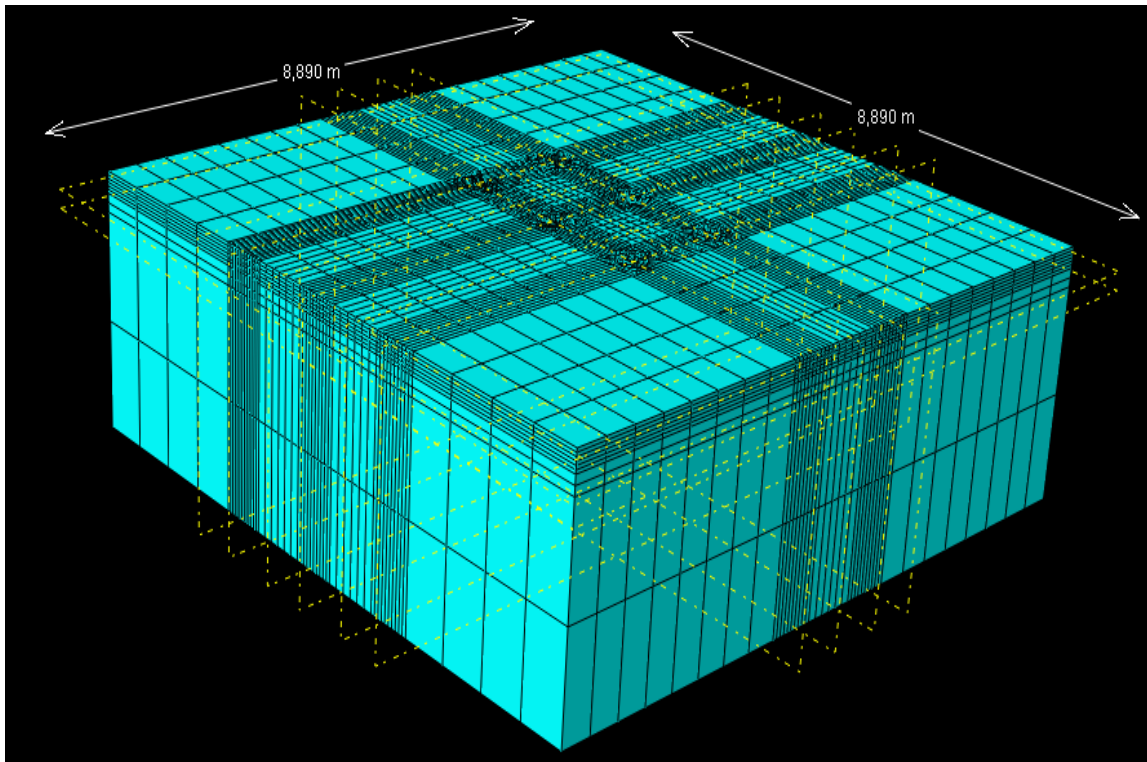
Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζονται τα τρισδιάστατα πρότυπα προσομοίωσης των τριών δαπέδων, καθώς επίσης και οι λεπτομέρειες του πλέγματος στην περιοχή των τροχών.



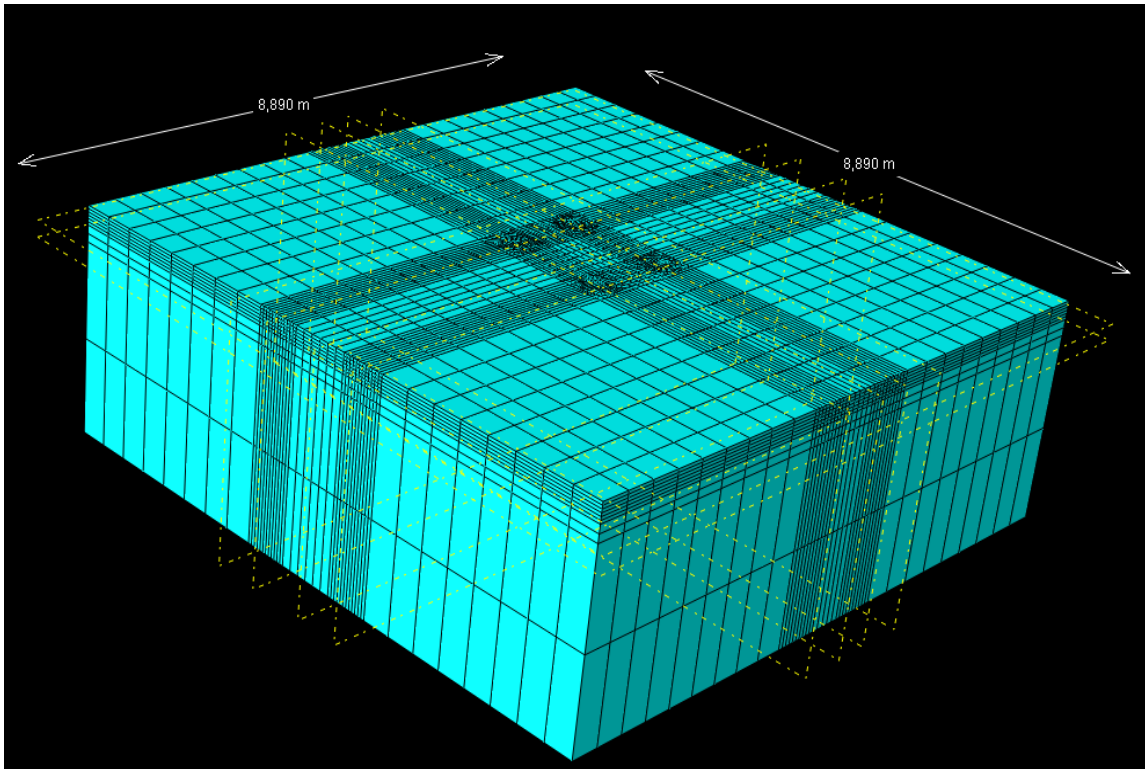
Εικόνα 7.23 Τρισδιάστατο πρότυπο προσομοίωσης δαπέδου LFS – βόρειο τμήμα



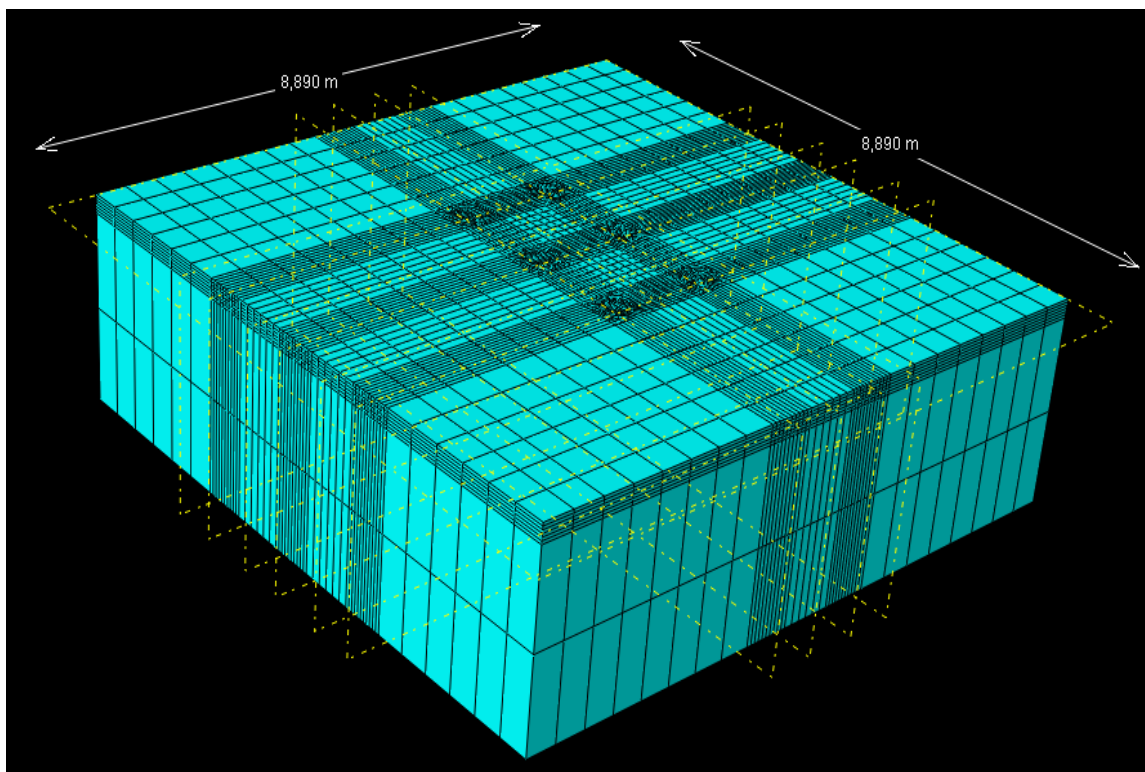
Εικόνα 7.24 Τρισδιάστατο πρότυπο προσομοίωσης δαπέδου LFS – νότιο τμήμα



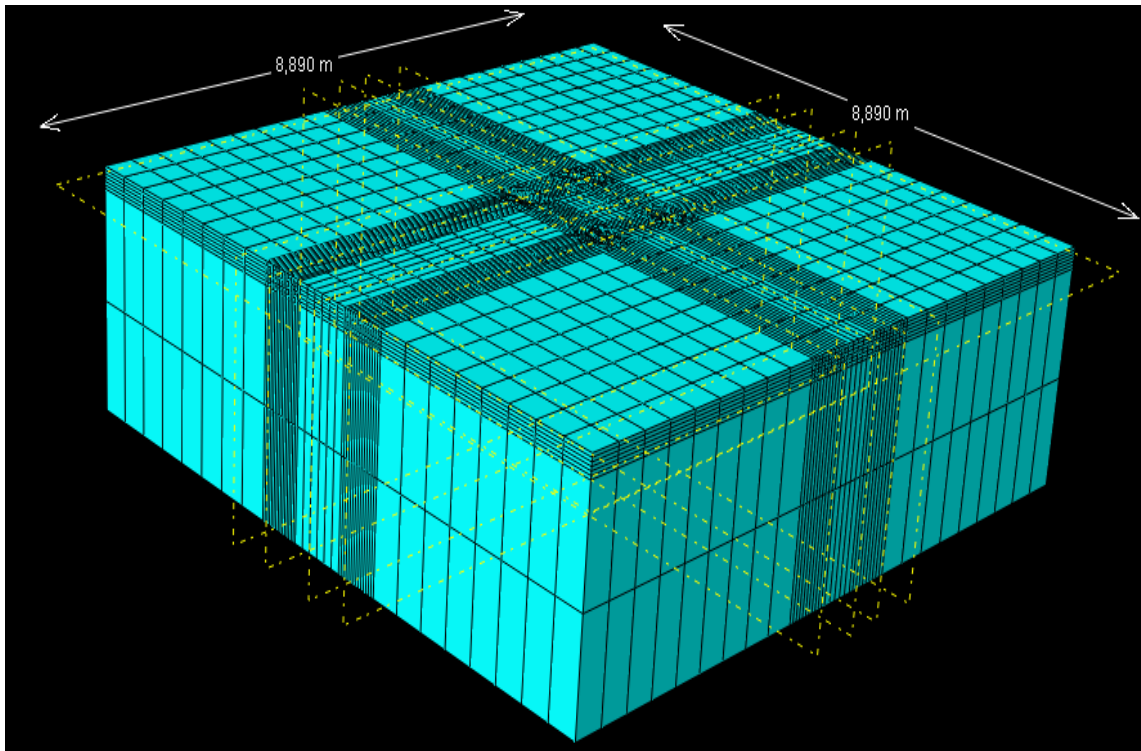
Εικόνα 7.25 Τρισδιάστατο πρότυπο προσομοίωσης δαπέδου MFS – βόρειο τμήμα



Εικόνα 7.26 Τρισδιάστατο πρότυπο προσομοίωσης δαπέδου MFS – νότιο τμήμα

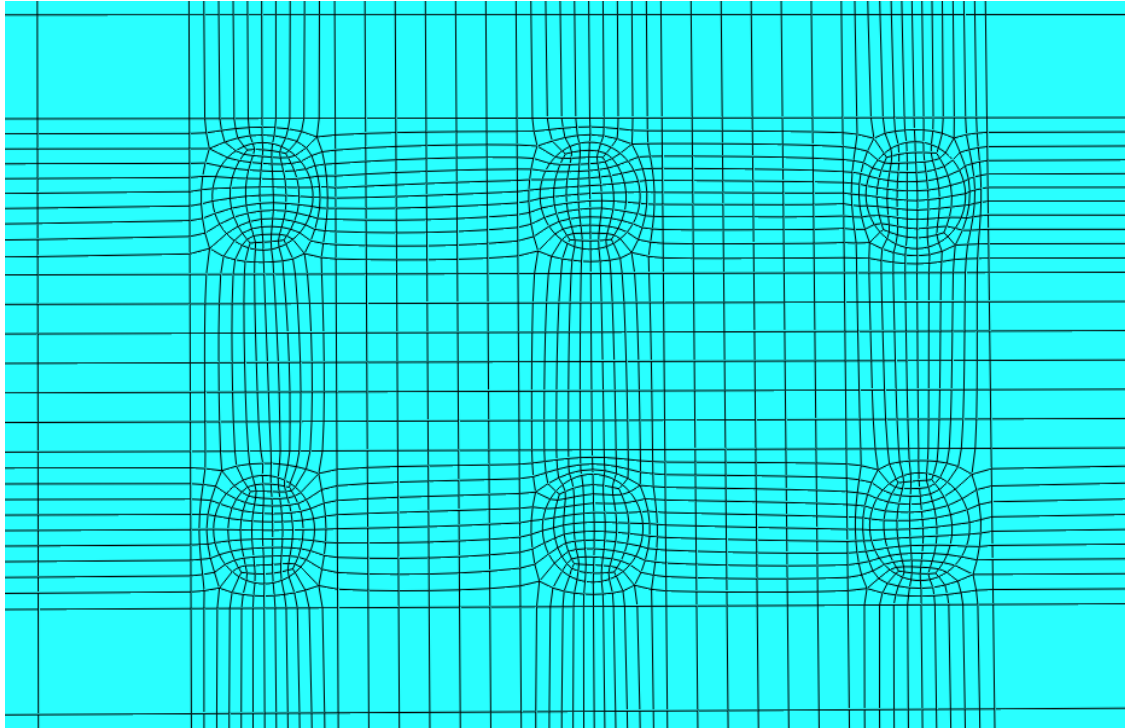


Εικόνα 7.27 Τρισδιάστατο πρότυπο προσομοίωσης δαπέδου HFS – βόρειο τμήμα

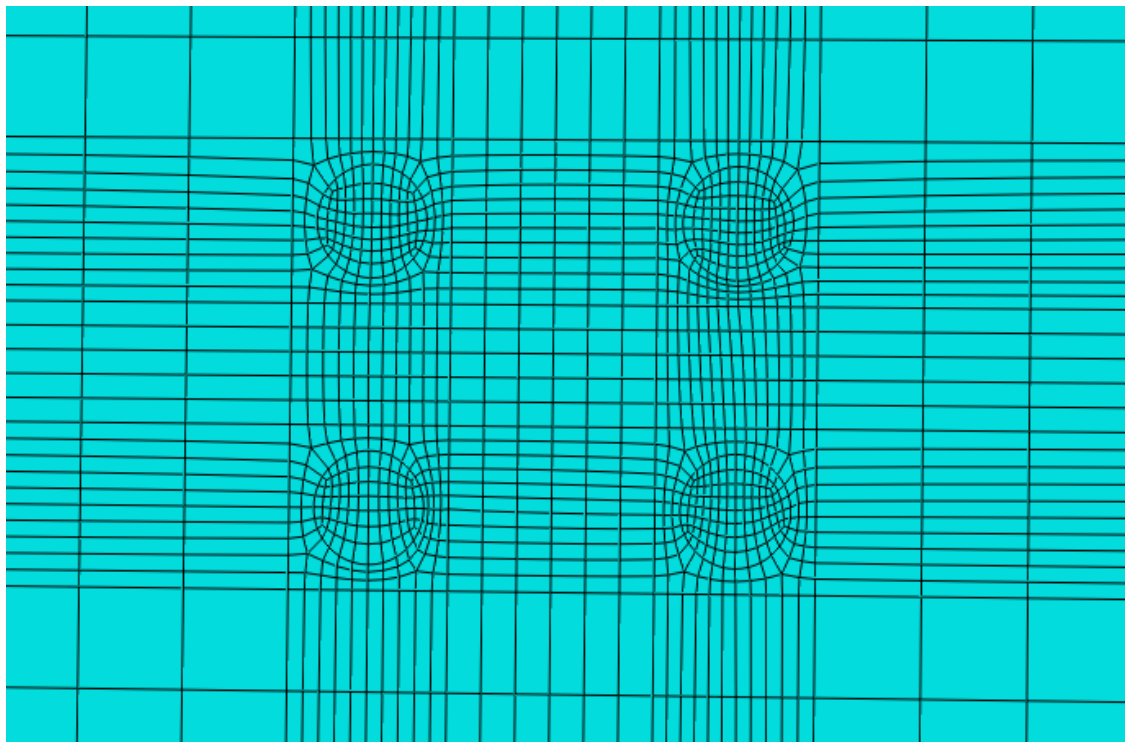


Εικόνα 7.28 Τρισδιάστατο πρότυπο προσομοίωσης δαπέδου HFS – νότιο τμήμα

Στις εικόνες 7.29 και 7.30 φαίνονται λεπτομερέστερα τα πλέγματα στην περιοχή των τροχών των δύο φορέων. Παρουσιάζονται μόνο για το δάπεδο MFS χάριν οικονομίας, αφού είναι όμοια και στα άλλα δύο δάπεδα.

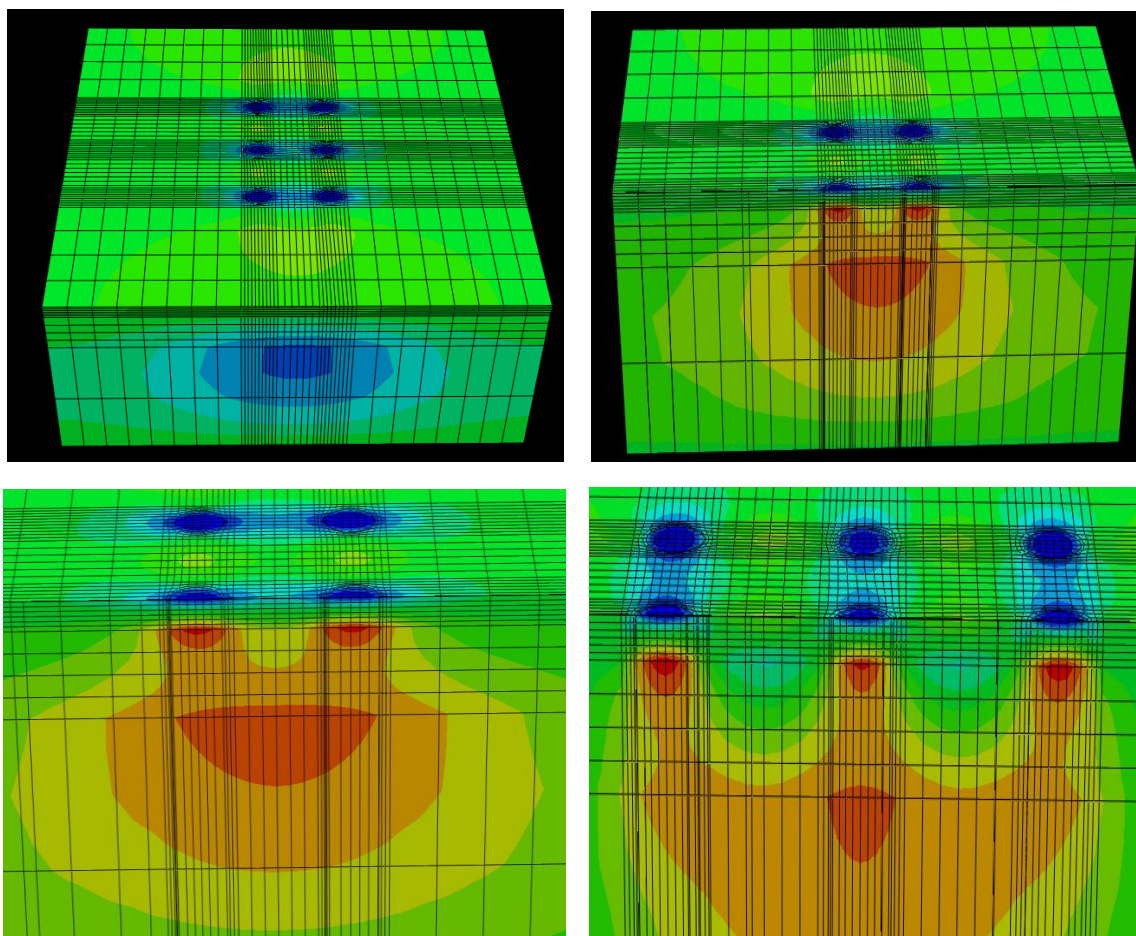


Εικόνα 7.29 Πλέγμα στην περιοχή του φορέου για το βόρειο τμήμα του MFS

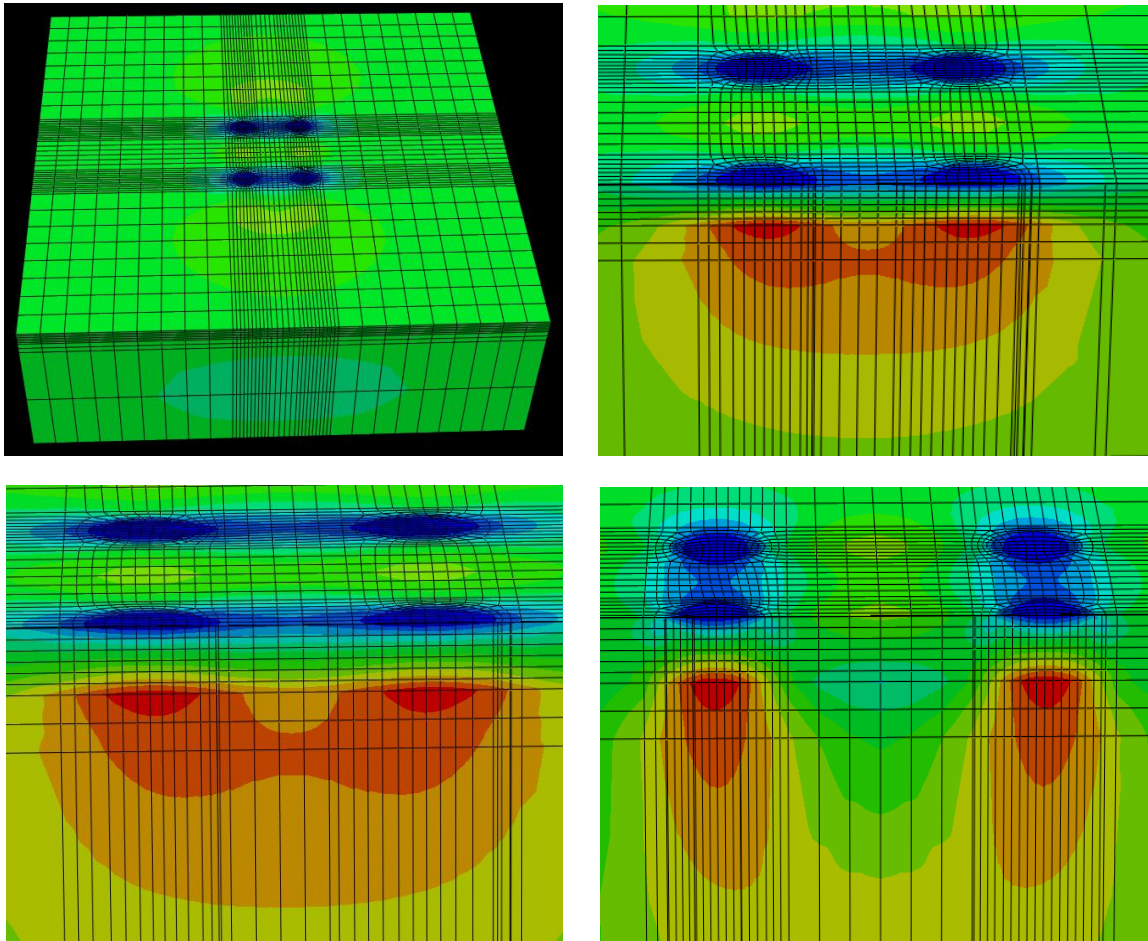


Εικόνα 7.30 Πλέγμα στην περιοχή του φορέου για το νότιο τμήμα του MFS

Αφού λοιπόν εισήχθησαν όλα τα δεδομένα και κατασκευάστηκαν τα πρότυπα προσομοίωσης, το πρόγραμμα έτρεξε προκειμένου να υπολογιστούν οι οριζόντιες ανηγμένες παραμορφώσεις κατά τη διαμήκη διεύθυνση (άξονας x), δηλαδή κατά τη διεύθυνση κίνησης των φορέων. Έπειτα βρέθηκαν οι παραμορφώσεις για τις διάφορες θέσεις εγκάρσιως του προτύπου προσομοίωσης, αντιπροσωπεύοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τα ίχνη διέλευσης των φορέων. Ως προς το βάθος στο οποίο υπολογίστηκαν οι παραμορφώσεις, ήταν το ίδιο με αυτό των αισθητήρων. Δηλαδή για το βόρειο τμήμα των δαπέδων, στον πυθμένα των ασφαλτικών, ενώ στο νότιο τμήμα τόσο στον πυθμένα, όσο και στο μέσον των ασφαλτικών. Στις εικόνες 7.31 και 7.32 παρουσιάζεται η κατανομή των παραμορφώσεων ως προς το βάθος, για δύο πρότυπα προσομοίωσης (χάριν συντομίας).

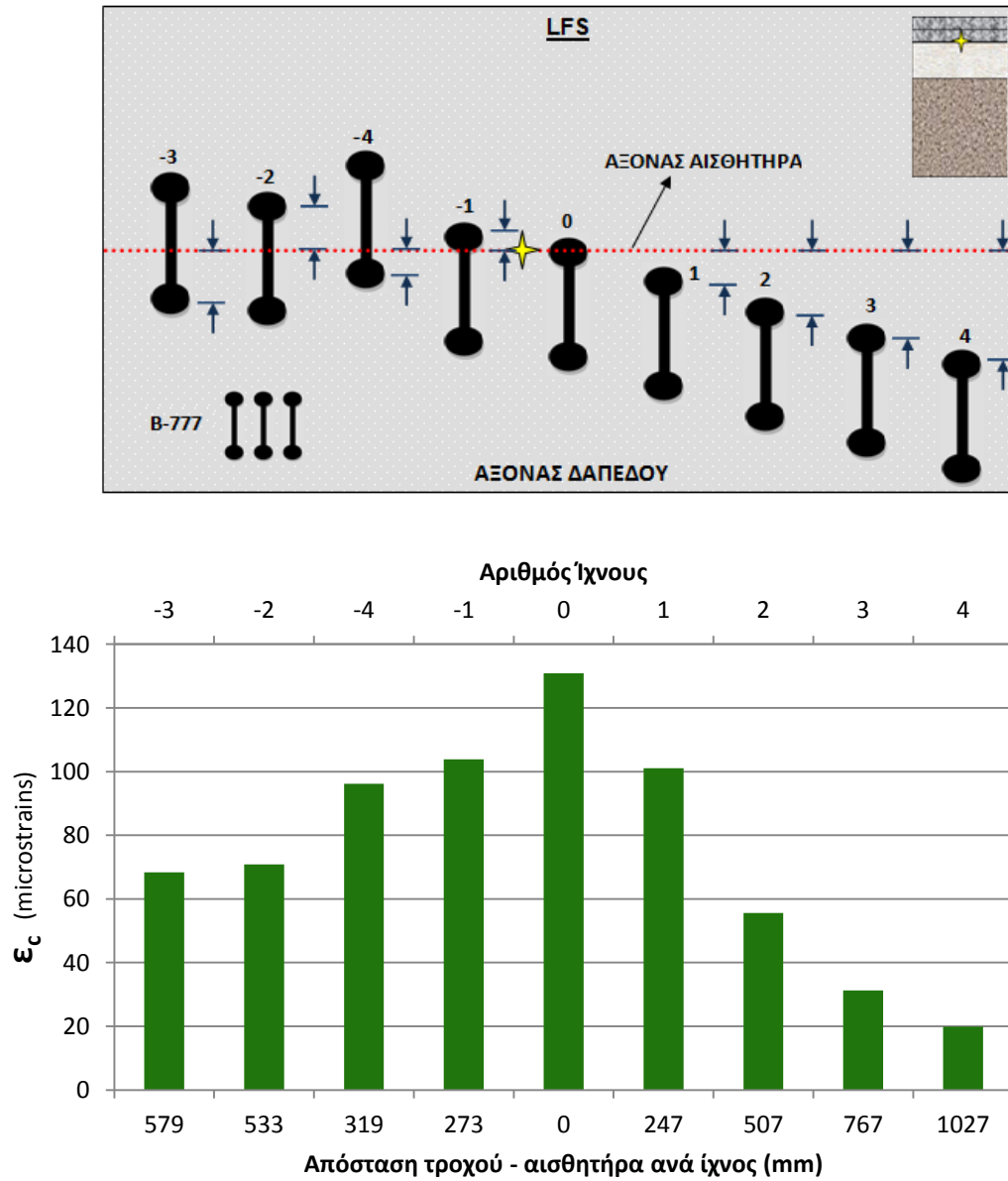


Εικόνα 7.31 Κατανομή παραμορφώσεων προτύπου προσομοίωσης LFS – βόρειο τμήμα



Εικόνα 7.32 Κατανομή παραμορφώσεων προτύπου προσομοίωσης MFS – νότιο τμήμα

Ακολουθούν τα ιστογράμματα των υπολογισμένων από το πρόγραμμα παραμορφώσεων του ασφαλτικού σκυροδέματος, σε συνάρτηση με την εγκάρσια απόσταση του τροχού από τον αισθητήρα. Στην εικόνα 7.33 παρουσιάζεται ένα τυπικό ιστόγραμμα των υπολογισμένων παραμορφώσεων.

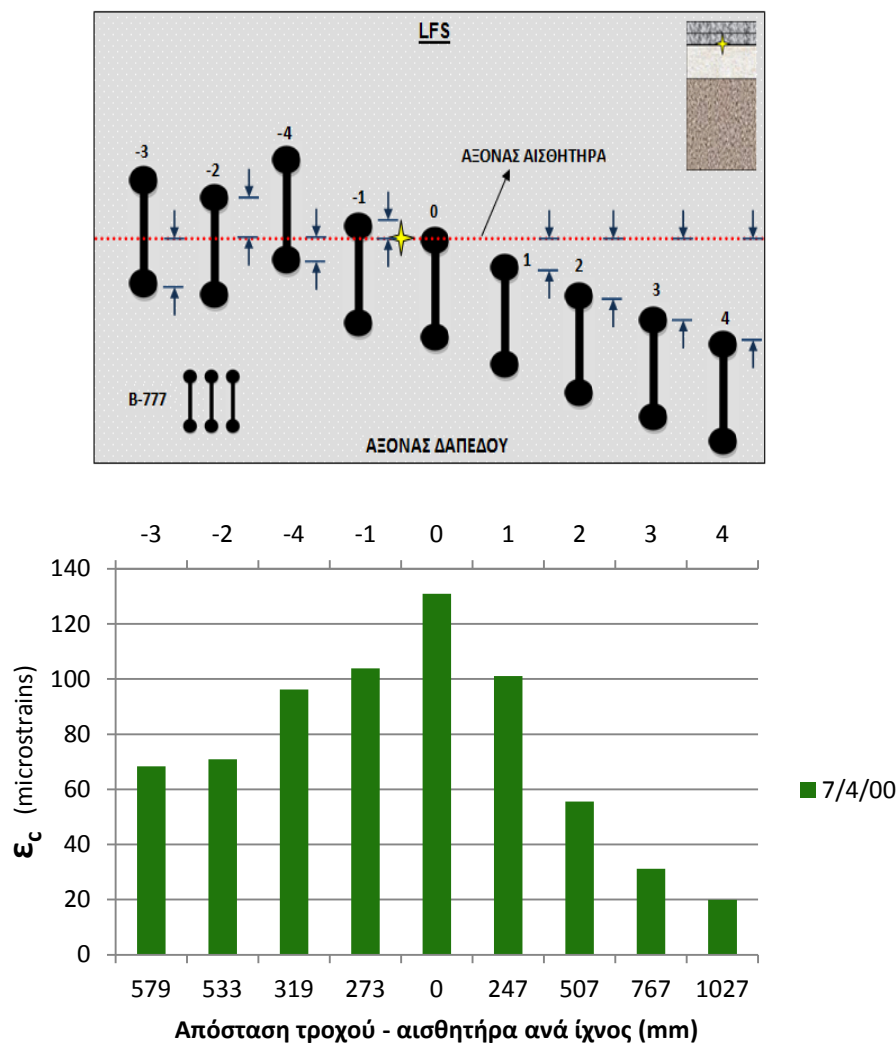


Εικόνα 7.33 Τυπικό ιστόγραμμα υπολογισμένων παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος, ως συνάρτηση της εγκάρσιας απόστασης του αισθητήρα από τον τροχό, για κάθε ίχνος

7.3.2 Υπολογισμένες παραμορφώσεις δαπέδου LFS

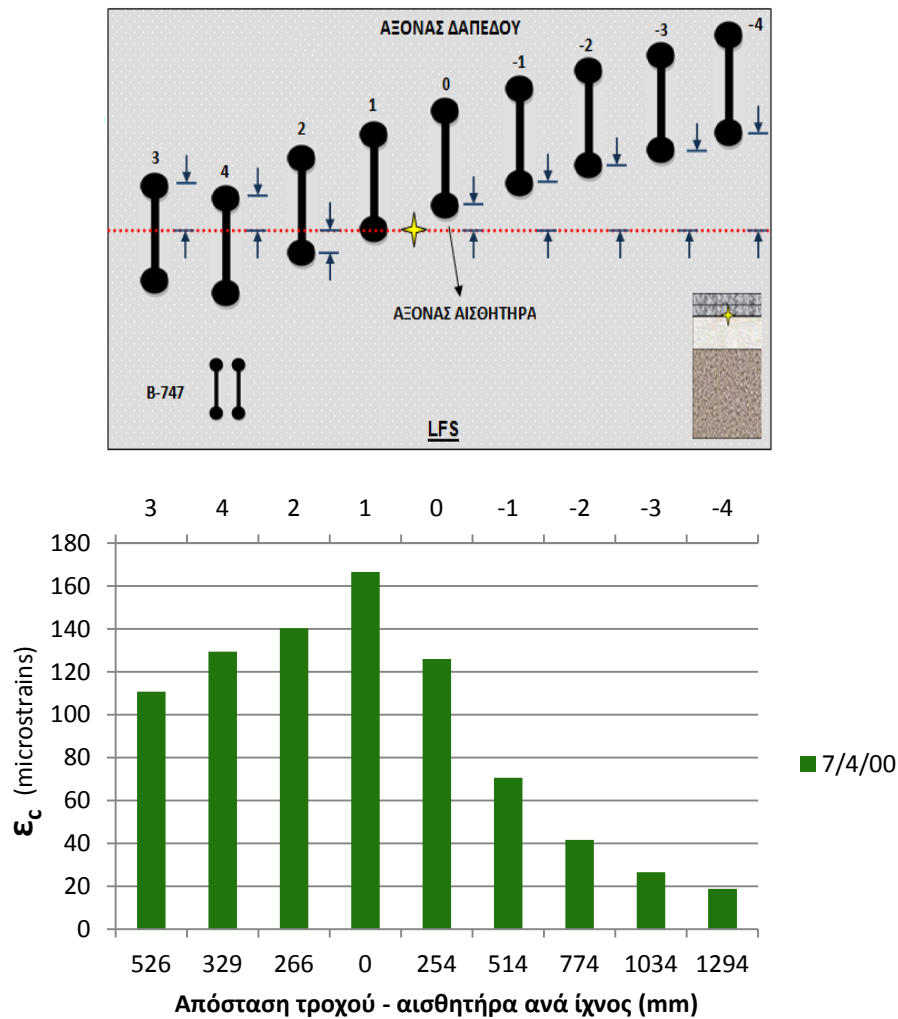
Παρουσιάζεται για κάθε αισθητήρα, μόνο ένα ιστόγραμμα υπολογισμένων παραμορφώσεων. Τα υπόλοιπα ιστογράμματα παρατίθενται στο παράρτημα Β.

Στην εικόνα 7.34 φαίνεται το ιστόγραμμα των υπολογισμένων παραμορφώσεων (ϵ_c) για το βόρειο τμήμα (B-777) του δαπέδου. Τα υπόλοιπα ιστογράμματα φαίνονται στην εικόνα Π7.1 του παραρτήματος Β.



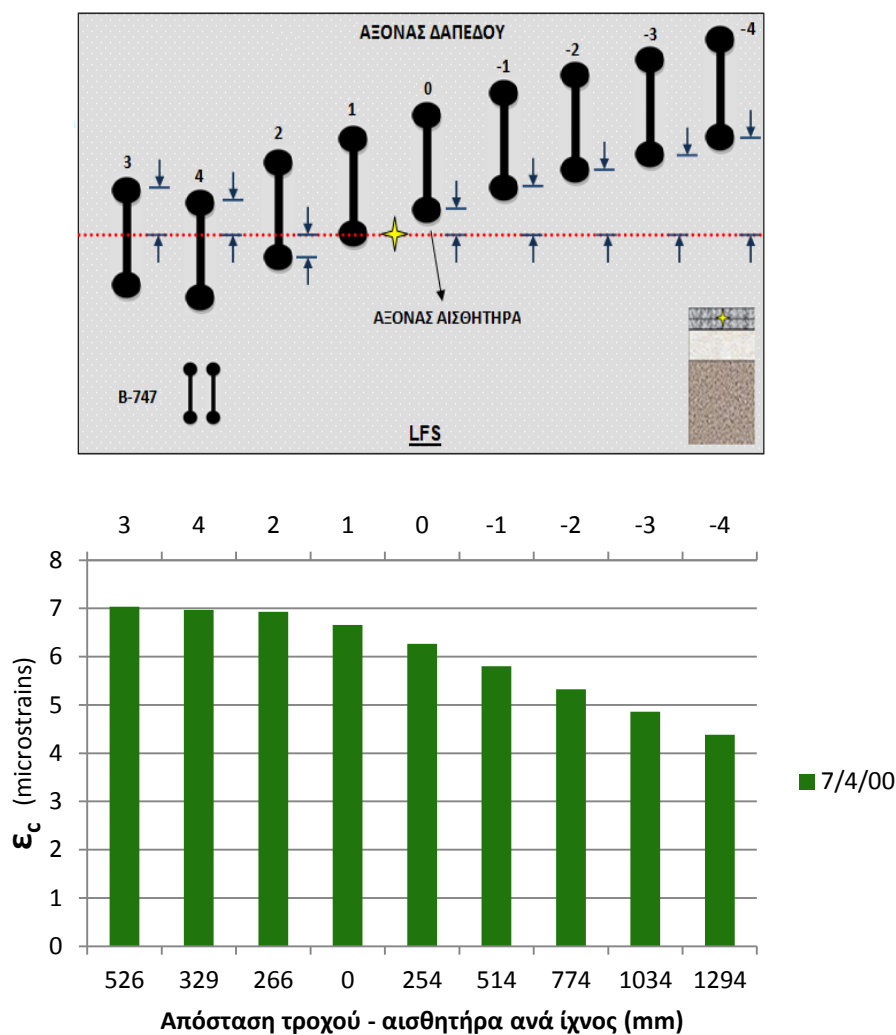
Εικόνα 7.34 Πρότυπο προσομοίωσης LFS, βόρειο τμήμα (B-777) – Ιστόγραμμα υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος

Στην εικόνα 7.34 παρουσιάζεται ένα εκ των ιστογραμμάτων των υπολογισμένων παραμορφώσεων που αναπτύχθηκαν στο νότιο τμήμα (B-747) του προτύπου προσομοίωσης. Τα αντίστοιχα ιστογράμματα και για τις άλλες ημέρες παρατίθενται στο παράρτημα Β, εικόνα Π7.2.



Εικόνα 7.35 Πρότυπο προσομοίωσης LFS, νότιο τμήμα (B-747) – Ιστόγραμμα υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος

Ακολουθεί η εικόνα 7.36 με το ιστόγραμμα των παραμορφώσεων όπως υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα προσομοίωσης στο μέσον του ασφαλτικού σκυροδέματος του προτύπου προσομοίωσης. Τα ιστογράμματα για τις υπόλοιπες ημέρες παρουσιάζονται στην εικόνα Π7.3 του παραρτήματος Β.



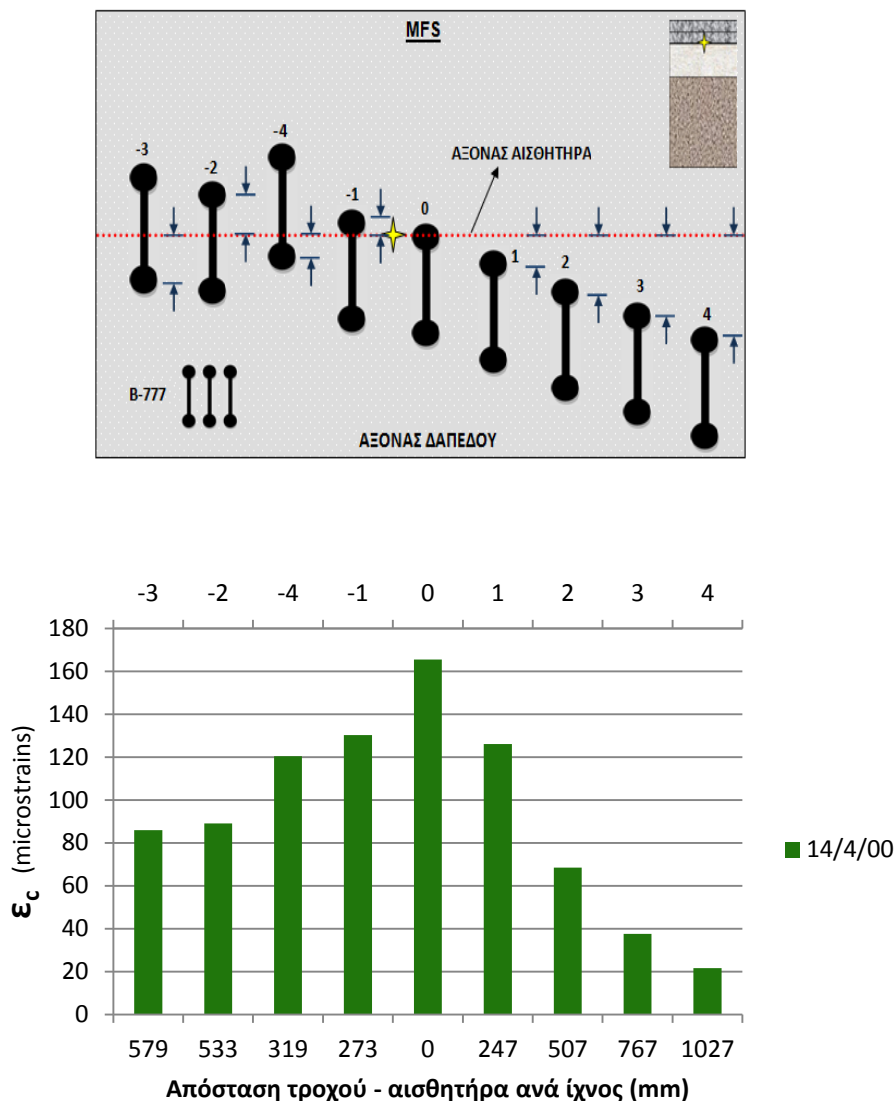
Εικόνα 7.36 Πρότυπο προσομοίωσης LFS, νότιο τμήμα (B-747) – Ιστόγραμμα υπολογισμένων παραμορφώσεων στο μέσον του ασφαλτικού σκυροδέματος

Κάτι για το οποίο αξίζει να γίνει αναφορά, αφορά στις παραμορφώσεις που υπολογίστηκαν στο μέσον του ασφαλτικού σκυροδέματος. Για την ακρίβεια, η μέγιστη τιμή της εφελκυστικής παραμόρφωσης δεν αναπτύσσεται στο ίχνος για το οποίο η απόσταση τροχού αισθητήρα μηδενίζεται (ίχνος "1") όπως αναμενόταν. Αντίθετα, η μέγιστη παραμόρφωση παρατηρείται όταν ο αισθητήρας βρίσκεται ανάμεσα στους δύο τροχούς των αξόνων του φορείου (ίχνος "3"). Ενώ για τα υπόλοιπα ίχνη, οι τιμές των παραμορφώσεων συνάδουν με την απόσταση τροχού-αισθητήρα.

7.3.2 Υπολογισμένες παραμορφώσεις δαπέδου MFS

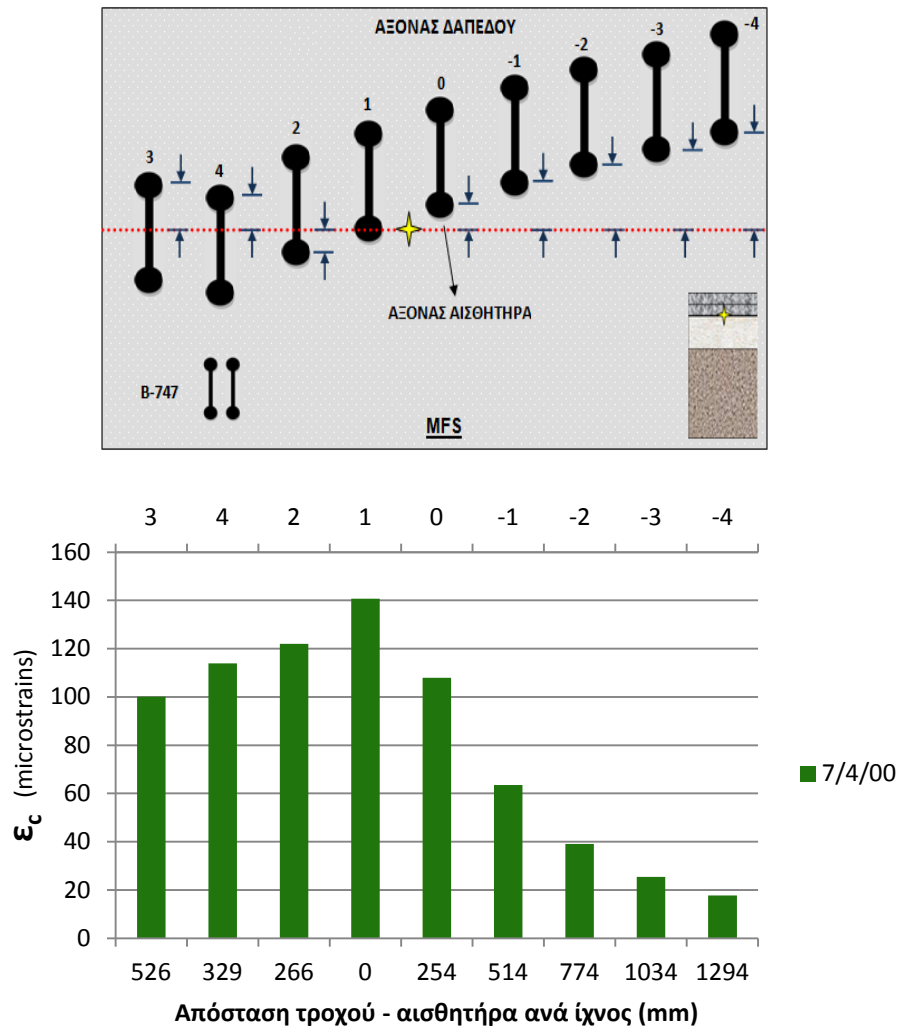
Παρουσιάζονται τα ιστογράμματα των υπολογισμένων παραμορφώσεων με όμοιο τρόπο με αυτόν που παρουσιάστηκαν και για το προηγούμενο δάπεδο.

Στην εικόνα 7.37 φαίνονται οι υπολογισμένες παραμορφώσεις για μία ημέρα, στον πυθμένα των ασφαλτικών του βόρειου τμήματος (B-777). Τις παραμορφώσεις των υπόλοιπων ημερών, τις δείχνει η εικόνα Π7.4 του παραρτήματος Β.



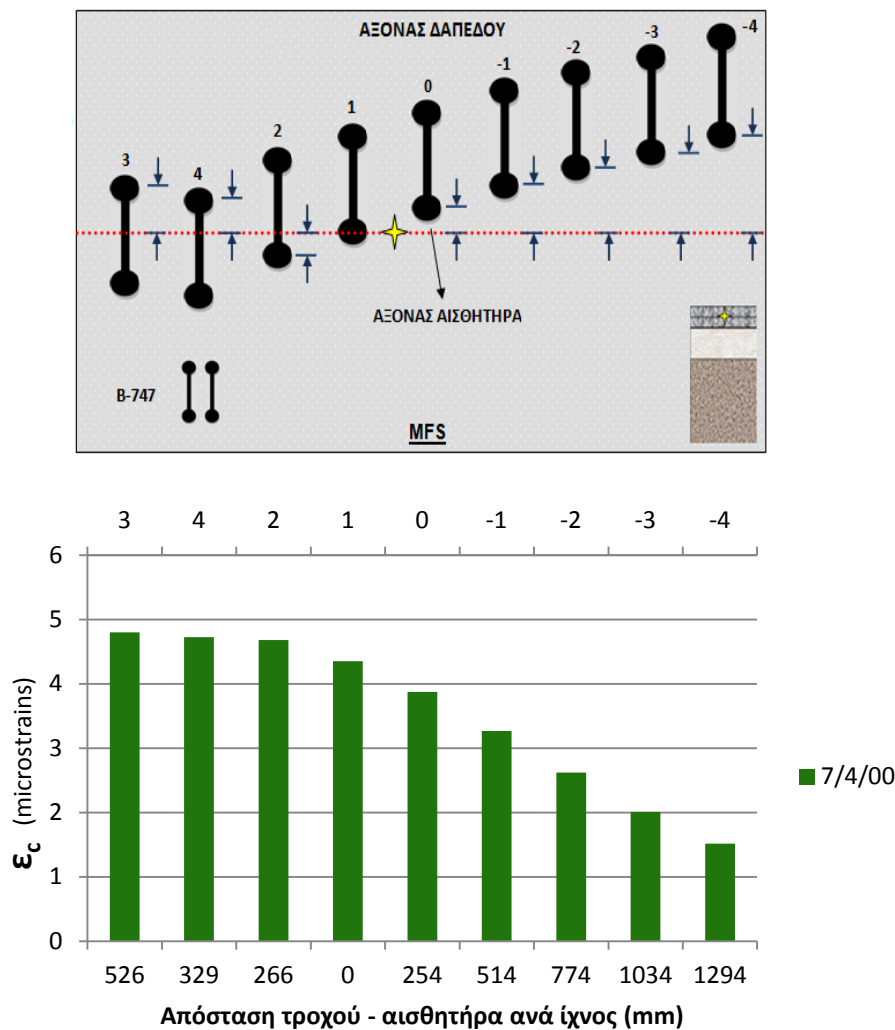
Εικόνα 7.37 Πρότυπο προσομοίωσης MFS, βόρειο τμήμα (B-777) – Ιστόγραμμα υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος

Ακολουθεί η εικόνα 7.38 με το ιστόγραμμα των παραμορφώσεων (ϵ_c) στο νότιο τμήμα του δαπέδου. Τα υπόλοιπα ιστογράμματα για τη συγκεκριμένη θέση φαίνονται στην εικόνα Π7.5 του παραρτήματος Β.



Εικόνα 7.38 Πρότυπο προσομοίωσης MFS, νότιο τμήμα (B-747) – Ιστόγραμμα υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος

Στην εικόνα 7.39 παρατίθεται το αντίστοιχο ιστόγραμμα για το μέσον των ασφαλτικών, ενώ τα υπόλοιπα φαίνονται στην εικόνα Π7.6 του παραρτήματος Β.



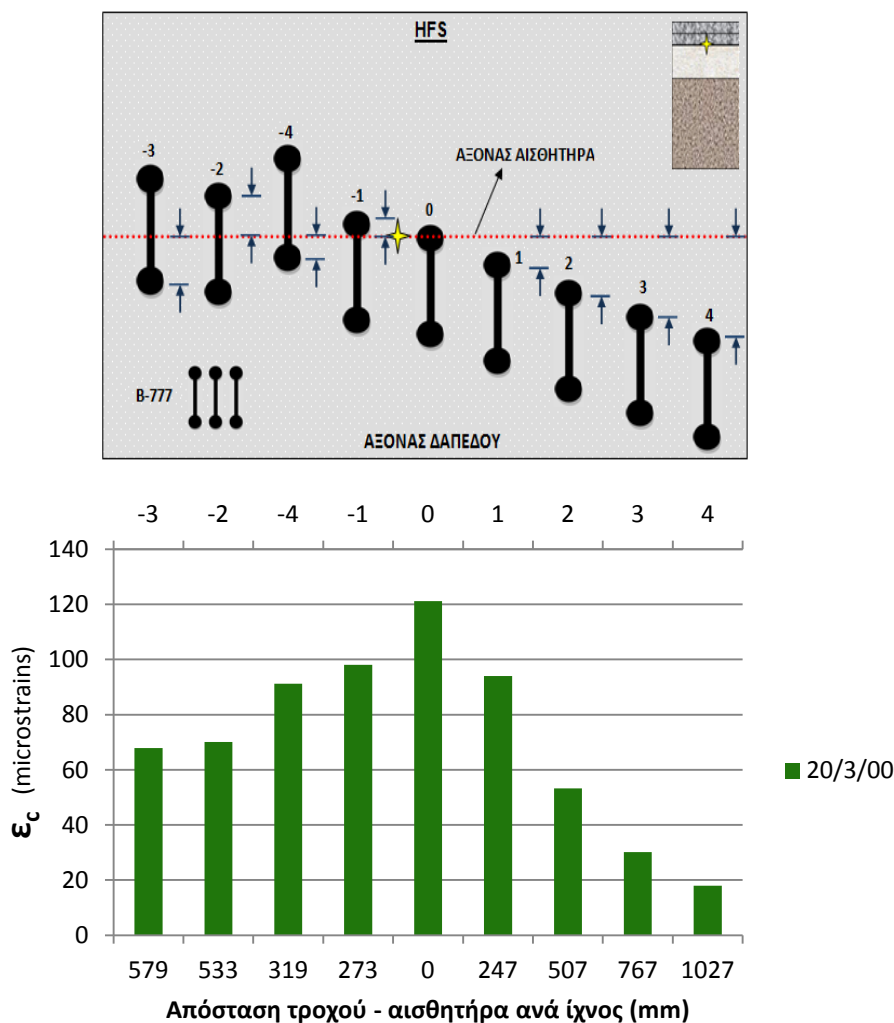
Εικόνα 7.39 Πρότυπο προσομοίωσης MFS, νότιο τμήμα (B-747) – Ιστόγραμμα υπολογισμένων παραμορφώσεων στο μέσον του ασφαλτικού σκυροδέματος

Παρατηρήθηκε και σε αυτό το δάπεδο (για τις δύο πρώτες μέρες) ότι η μέγιστη τιμή της εφελκυστικής παραμόρφωσης (ϵ_c) δεν αναπτύσσεται στο ίχνος για το οποίο η απόσταση τροχού αισθητήρα μηδενίζεται (ίχνος "1") όπως αναμενόταν. Αντίθετα, η μέγιστη παραμόρφωση παρατηρείται όταν ο αισθητήρας βρίσκεται ανάμεσα στους δύο τροχούς των αξόνων του φορείου (ίχνος "3"). Ενώ για τα υπόλοιπα ίχνη, οι τιμές των παραμορφώσεων συνάδουν με την απόσταση τροχού-αισθητήρα. Για τις δύο τελευταίες ημέρες δεν παρατηρείται αυτό το φαινόμενο (εικόνα Π7.6).

7.3.3 Υπολογισμένες παραμορφώσεις δαπέδου HFS

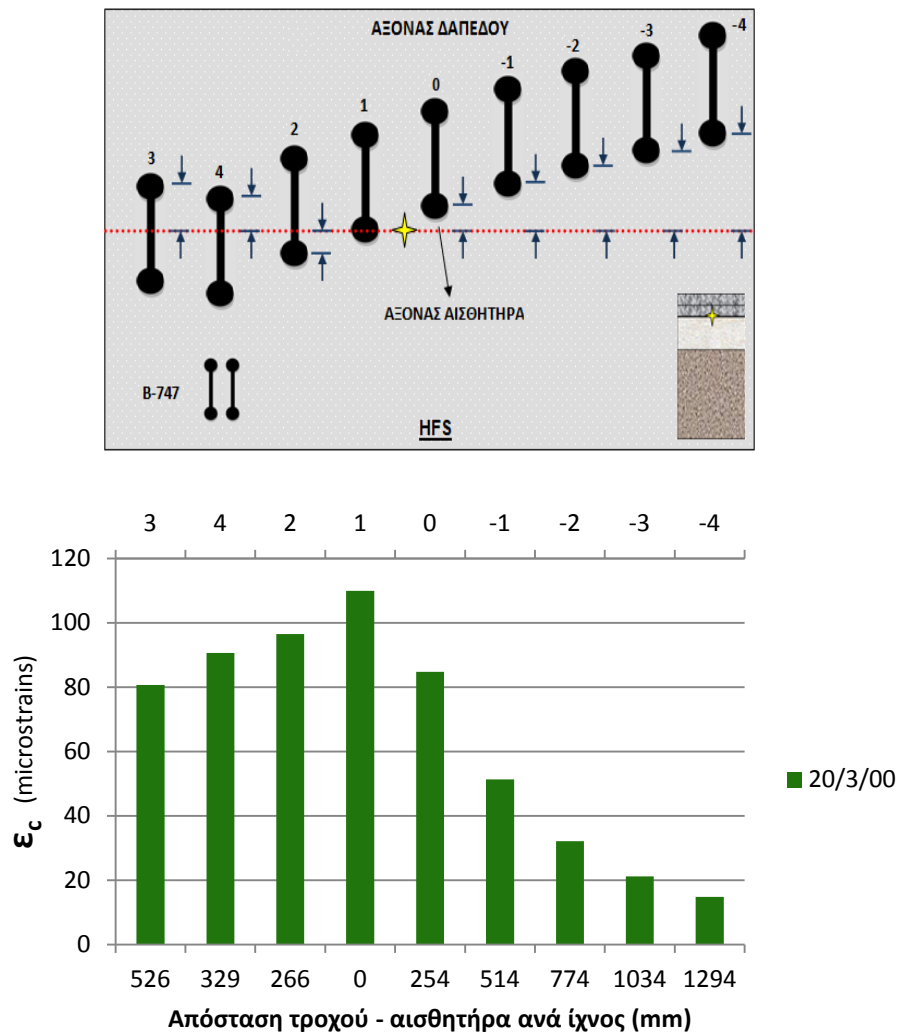
Με όμοιο τρόπο προβάλλονται οι υπολογισμένες παραμορφώσεις και για αυτό το δάπεδο.

Αρχικά, στην εικόνα 7.40 φαίνεται το ιστόγραμμα των υπολογισμένων παραμορφώσεων για την πρώτη ημέρα υπολογισμού στο βόρειο τμήμα του δαπέδου (B-777). Στην εικόνα Π7.7 (παράρτημα Β) φαίνεται το αντίστοιχο ιστόγραμμα της δεύτερης μέρας.



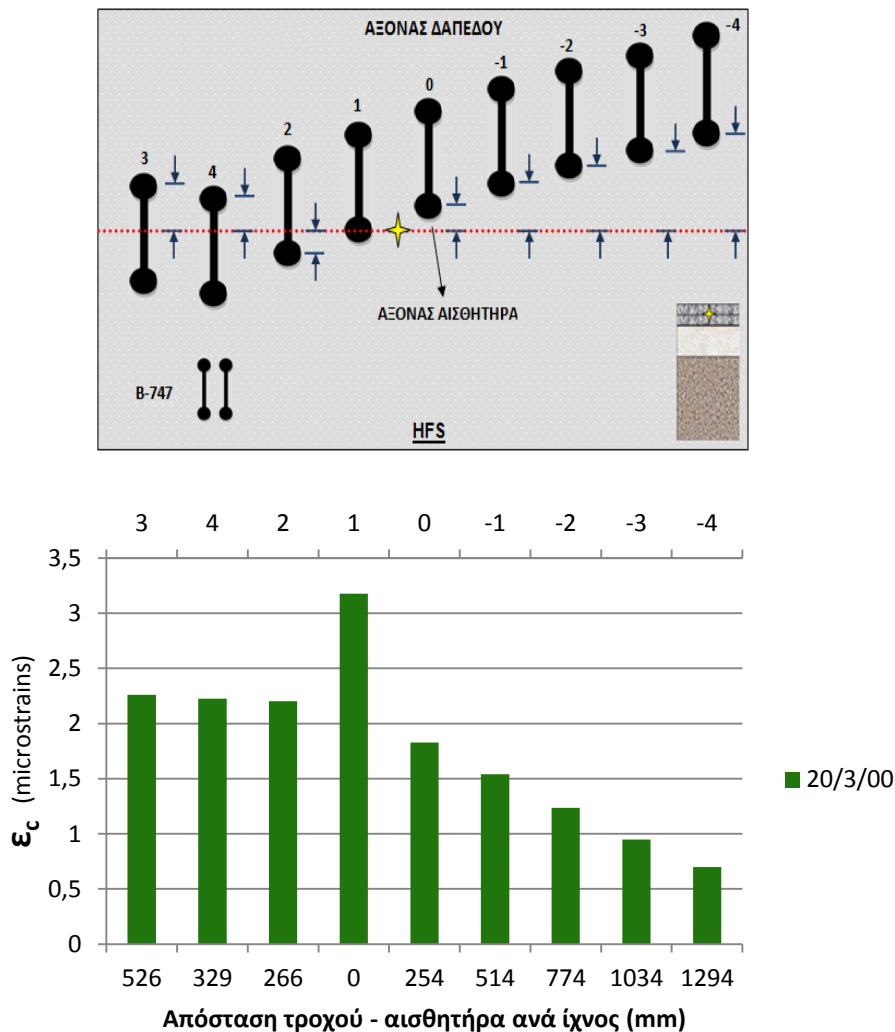
Εικόνα 7.40 Πρότυπο προσομοίωσης HFS, βόρειο τμήμα (B-777) – Ιστόγραμμα υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος

Αντίστοιχα, στην εικόνα 7.41 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα του νότιου τμήματος (B-747), στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος. Το δεύτερο ιστόγραμμα φαίνεται στην εικόνα Π7.8 του παραρτήματος Β.



Εικόνα 7.41 Πρότυπο προσομοίωσης HFS, νότιο τμήμα (B-747) – Ιστόγραμμα υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η εικόνα 7.42 με το ιστόγραμμα των υπολογισμένων παραμορφώσεων στο μέσον του ασφαλτικού σκυροδέματος. Το αντίστοιχο ιστόγραμμα για την 7/4/00 παρατίθεται στην εικόνα Π7.9 του παραρτήματος Β.

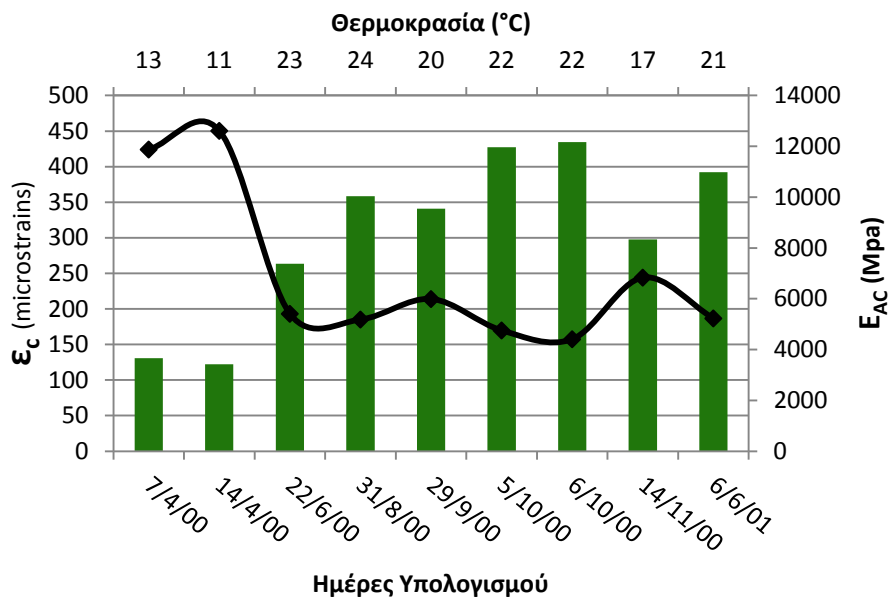


Εικόνα 7.42 Πρότυπο προσομοίωσης HFS, νότιο τμήμα (B-747) – Ιστόγραμμα υπολογισμένων παραμορφώσεων στο μέσον του ασφαλτικού σκυροδέματος

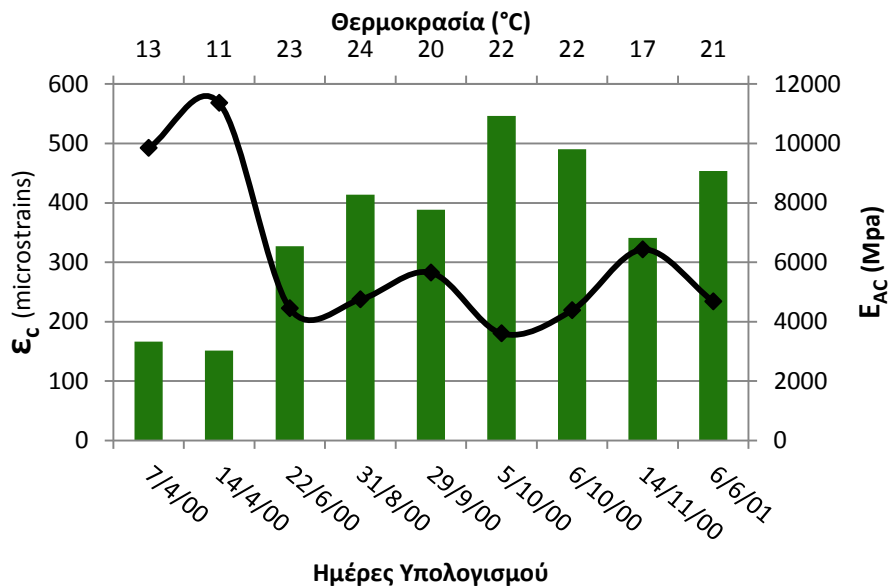
Για το δάπεδο αυτό και όσον αφορά στο μέσον του ασφαλτικού σκυροδέματος, η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση αναπτύσσεται όταν ο τροχός περνάει πάνω από τον αισθητήρα. Ωστόσο και πάλι οι παραμορφώσεις για τα ίχνη εκείνα που ο αισθητήρας βρίσκεται ανάμεσα στους τροχούς των αξόνων, δεν παρουσιάζουν ικανοποιητική μεταβολή.

7.3.4 Απόκριση προτύπων προσομοίωσης συναρτήσει του χρόνου

Στην παρούσα υποενότητα παρατίθενται τα ιστογράμματα των υπολογισμένων παραμορφώσεων για κάθε πρότυπο προσομοίωσης, συναρτήσει του χρόνου. Δηλαδή, φαίνονται συγκεντρωτικά οι υπολογισμένες παραμορφώσεις για το ίχνος όπου η απόσταση του τροχού από τον αισθητήρα μηδενίζεται (μέγιστη τιμή παραμόρφωσης), για κάθε ημέρα που έχει επιλεγεί. Ταυτόχρονα, παρουσιάζεται η μεταβολή των μέτρων ελαστικότητας/δυσκαμψίας, καθώς επίσης και η θερμοκρασία του ασφαλτοσκυροδέματος σε κάθε ημέρα.



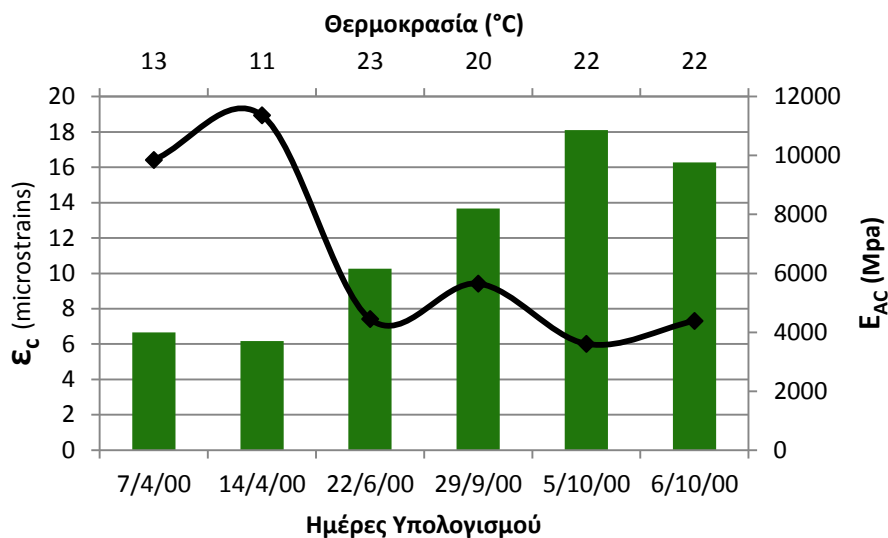
Εικόνα 7.43 Πρότυπο προσομοίωσης LFS, βόρειο τμήμα (B-777) – Ιστόγραμμα υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου



Εικόνα 7.44 Πρότυπο προσομοίωσης LFS, νότιο τμήμα (B-747)– Ιστόγραμμα υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου

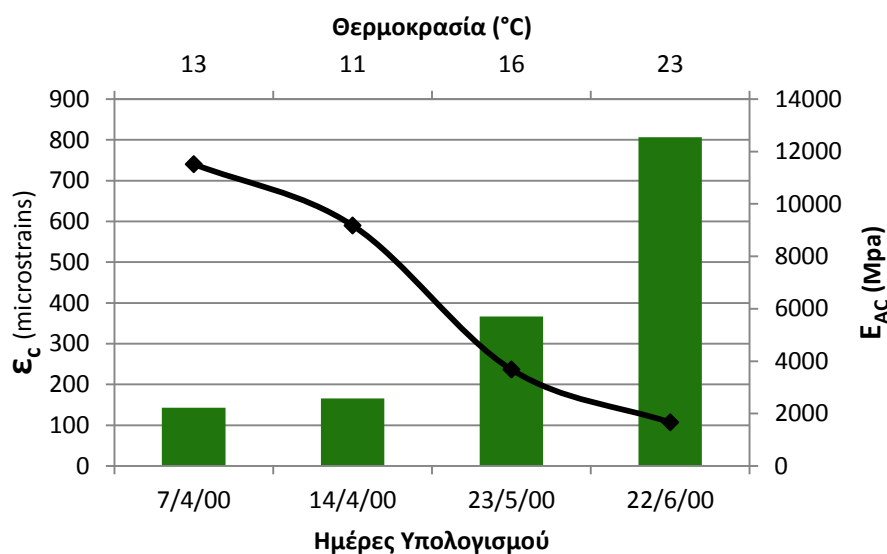
Οι υπολογισμένες παραμορφώσεις του προτύπου προσομοίωσης LFS είναι “συνεπείς” στις μεταβολές των μέτρων ελαστικότητας/δυσκαμψίας, καθώς αυτά μεταβάλλονται υπό την επιρροή της θερμοκρασίας και της αύξησης του αριθμού των διελεύσεων. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μείωση των τιμών των μέτρων ελαστικότητας με την αύξηση της θερμοκρασίας και του αριθμού των δοκιμαστικών φορτίσεων, η οποία

επιφέρει αύξηση στις τιμές των παραμορφώσεων. Ακολουθεί η εικόνα 7.45 με το ιστόγραμμα για το μέσον του δαπέδου.

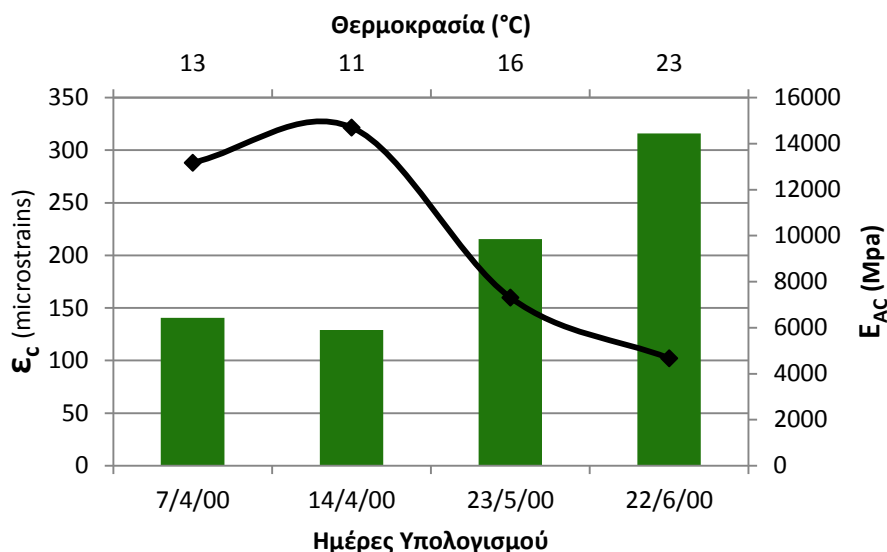


Εικόνα 7.45 Πρότυπο προσομοίωσης LFS, νότιο τμήμα (B-747) – Ιστόγραμμα υπολογισμένων παραμορφώσεων στο μέσον του ασφαλτικού σκυροδέματος συναρτήσεως του χρόνου

Σχετικά με τις παραμορφώσεις στο μέσον των ασφαλτικών για το LFS, διαπιστώθηκε ότι αναπτύχθηκαν κυρίως θλιπτικές παραμορφώσεις, με τις τιμές των εφελκυστικών να κυμαίνονται σε πολύ χαμηλές τιμές σε σύγκριση με τις μετρημένες. Οι εικόνες 7.46 και 7.47 παρουσιάζουν τα ιστογράμματα προσομοίωσης του προτύπου προσομοίωσης του MFS, στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος, για το βόρειο και νότιο τμήμα αντίστοιχα.

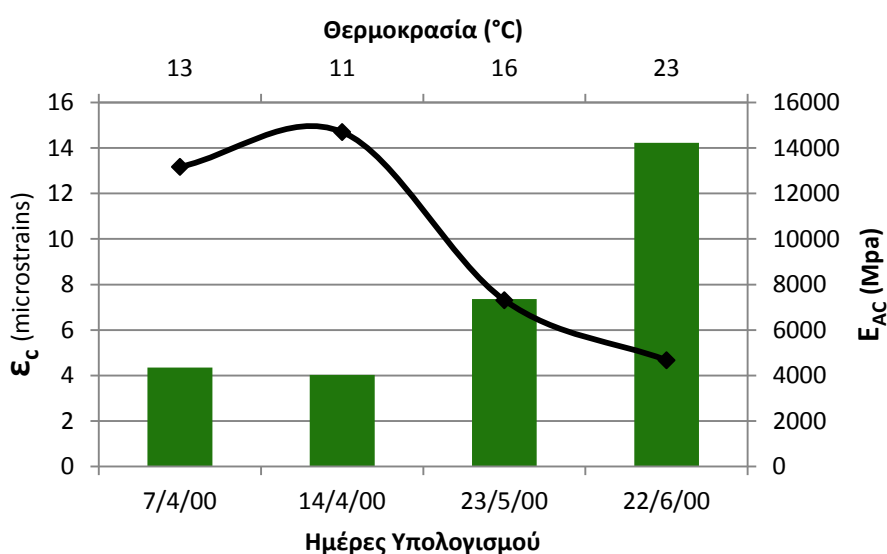


Εικόνα 7.46 Πρότυπο προσομοίωσης MFS, βόρειο τμήμα (B-777) – Ιστόγραμμα υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος συναρτήσεως του χρόνου



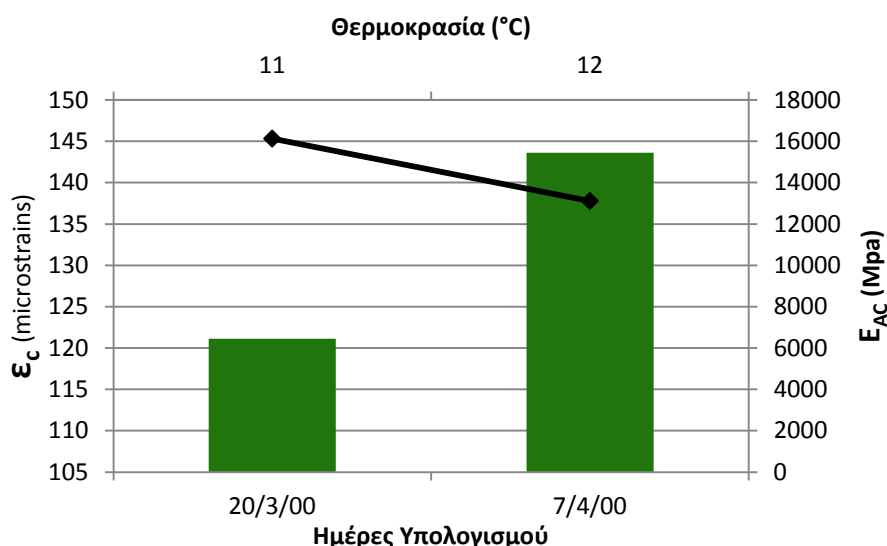
Εικόνα 7.47 Πρότυπο προσομοίωσης MFS, νότιο τμήμα (B-747) – Ιστόγραμμα υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος συναρτήσεϊ του χρόνου

Οι υπολογισμένες παραμορφώσεις του προτύπου προσομοίωσης MFS μεταβάλλονται όπως αναμένεται στις μεταβολές των μέτρων ελαστικότητας/δυσκαμψίας, υπό την επιρροή της θερμοκρασίας και της αύξησης του αριθμού των διελεύσεων. Για την ακρίβεια, παρατηρείται μείωση των τιμών των μέτρων ελαστικότητας με την αύξηση της θερμοκρασίας και του αριθμού των δοκιμαστικών φορτίσεων, η οποία επιφέρει αύξηση στις τιμές των παραμορφώσεων, όπως ακριβώς και για το πρότυπο του LFS. Η επόμενη εικόνα φανερώνει τη συμπεριφορά του συγκεκριμένου προτύπου προσομοίωσης στο μέσον των ασφαλτικών.

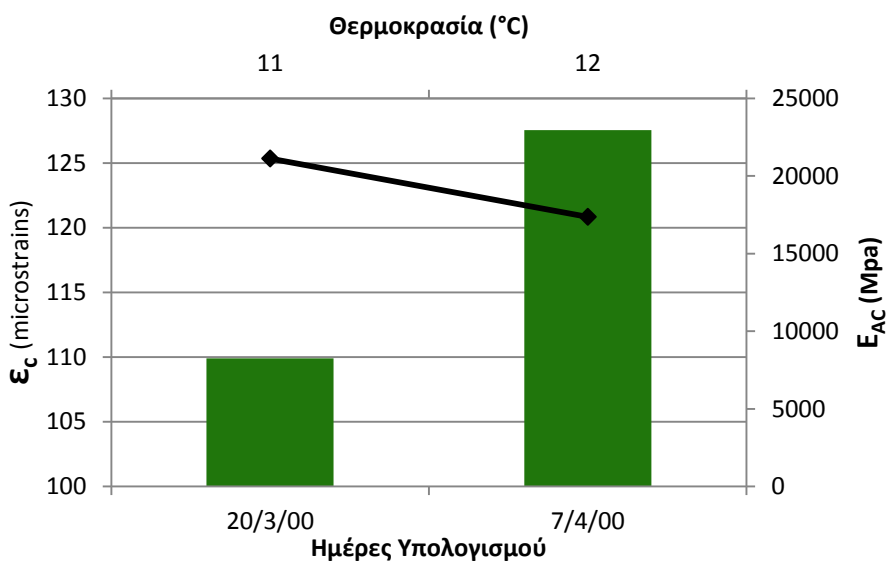


Εικόνα 7.48 Πρότυπο προσομοίωσης MFS, νότιο τμήμα (B-747) – Ιστόγραμμα υπολογισμένων παραμορφώσεων στο μέσον του ασφαλτικού σκυροδέματος συναρτήσεϊ του χρόνου

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα, οι παραμορφώσεις στο μέσον των ασφαλτικών, παρουσιάζουν λογική μεταβολή με τις αλλαγές των τιμών του μέτρου δυσκαμψίας. Ωστόσο, διαπιστώθηκε και για αυτό το πρότυπο ότι αναπτύχθηκαν κυρίως θλιπτικές παραμορφώσεις, με τις τιμές των εφελκυστικών να κυμαίνονται σε πολύ χαμηλές τιμές σε σύγκριση με τις μετρημένες. Στις εικόνες 7.49 και 7.50 παρουσιάζονται οι υπολογισμένες παραμορφώσεις στον πυθμένα των δύο τμημάτων του προτύπου προσομοίωσης HFS.

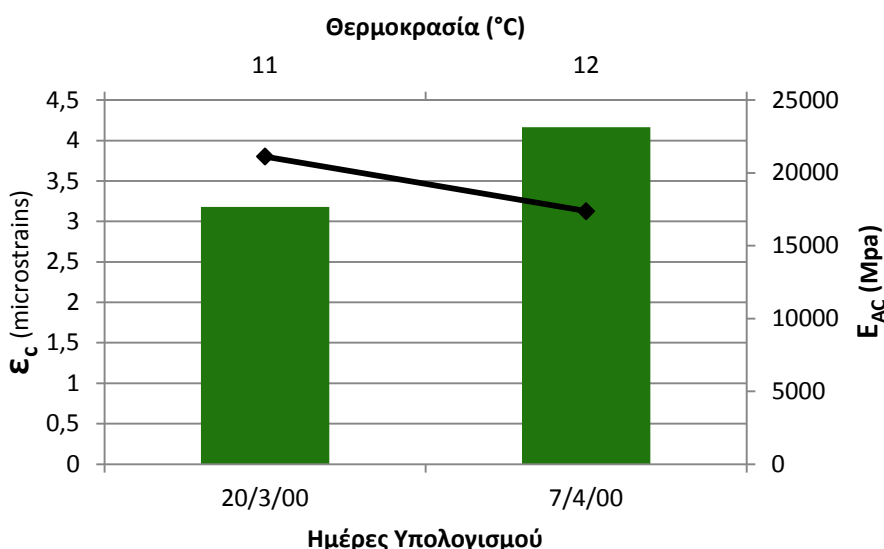


Εικόνα 7.49 Πρότυπο προσομοίωσης HFS, βόρειο τμήμα (B-777) – Ιστόγραμμα υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος συναρτήσεϊ του χρόνου



Εικόνα 7.50 Πρότυπο προσομοίωσης HFS, νότιο τμήμα (B-747) – Ιστόγραμμα υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος συναρτήσεϊ του χρόνου

Για τις δύο ημέρες που έχουν υπολογιστεί οι παραμορφώσεις, φαίνεται ότι είναι “συνεπείς” στις μεταβολές των μέτρων ελαστικότητας/δυσκαμψίας, υπό την επιρροή της θερμοκρασίας και της αύξησης του αριθμού των διελεύσεων. Παρατηρείται η αναμενόμενη μείωση των τιμών των μέτρων ελαστικότητας με την αύξηση της θερμοκρασίας και του αριθμού των δοκιμαστικών φορτίσεων, η οποία επιφέρει αύξηση στις τιμές των παραμορφώσεων. Στην εικόνα 7.51 παρουσιάζονται οι τιμές των υπολογισμένων παραμορφώσεων στο μέσον του ασφαλτικού υλικού του προτύπου προσομοίωσης HFS.



Εικόνα 7.51 Πρότυπο προσομοίωσης HFS, νότιο τμήμα (B-747) – Ιστόγραμμα υπολογισμένων παραμορφώσεων στο μέσον του ασφαλτικού σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου

Παρατηρείται ότι οι παραμορφώσεις στο μέσον των ασφαλτικών μεταβάλλονται με τον αναμενόμενο τρόπο. Ομοίως με τα δύο προηγούμενα πρότυπα, οι θλιπτικές παραμορφώσεις που αναπτύχθηκαν ήταν μεγαλύτερες από τις εφελκυστικές, οι οποίες κυμάνθηκαν σε πολύ χαμηλές τιμές σε σύγκριση με τις μετρημένες. Η διαφορά αυτή φαίνεται ξεκάθαρα από την αναλυτική σύγκριση μεταξύ των μετρημένων (ϵ_m) και των αναλυτικά υπολογισμένων (ϵ_c) εφελκυστικών παραμορφώσεων.

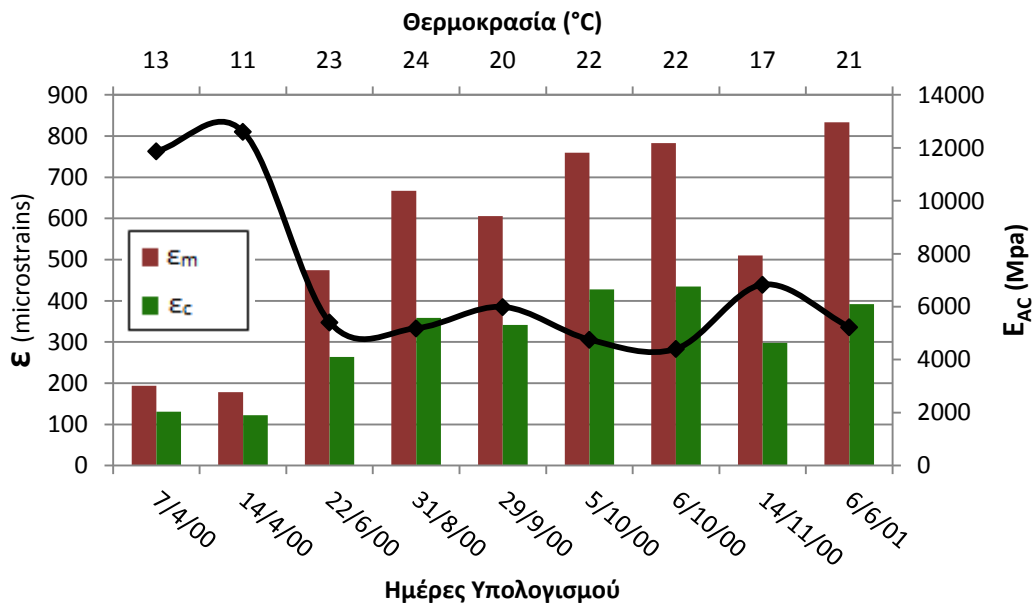
Η σύγκριση αυτή παρουσιάζεται για κάθε δάπεδο χωριστά και χωρίζεται ανάλογα με το αν η θέση του αισθητήρα που εξετάζεται, ταυτίζεται με τη θέση εφαρμογής FWD ή όχι, ως προς τις συντεταγμένες των αξόνων x , y . Επιπροσθέτως, η σύγκριση πραγματοποιείται μέσω ιστογραμμάτων παραμόρφωσης, τα οποία έχουν την ίδια μορφή με τα ιστογράμματα παραμορφώσεων που έγιναν προηγουμένως. Ταυτόχρονα παρουσιάζονται και οι θέσεις των φορέων ανάλογα το ίχνος. Υπενθυμίζεται ότι χάριν ευκρίνειας, εμφανίζεται μόνο ένας άξονας.

Προκειμένου να διαχωριστούν τα ιστογράμματα σύγκρισης των μετρημένων (ϵ_m) και υπολογισμένων (ϵ_c) ανηγμένων παραμορφώσεων, οργανώνονται και παρουσιάζονται σε τρίτο παράρτημα (παράρτημα Γ).

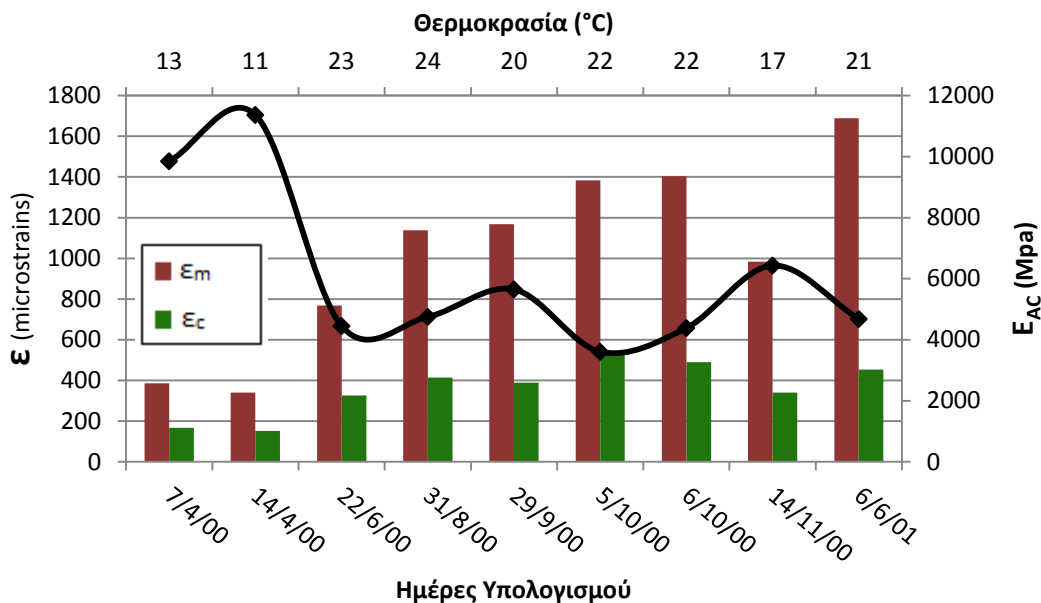
7.3.5 Συγκριτική παρουσίαση μετρημένων και υπολογισμένων παραμορφώσεων συναρτήσει του χρόνου

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται ταυτόχρονα οι μετρημένες (ϵ_m) και οι υπολογισμένες (ϵ_c) παραμορφώσεις, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα σύγκρισης του τρόπου μεταβολής τους, καθώς μεταβάλλονται τα μέτρα ελαστικότητας, υπό την επιρροή της θερμοκρασίας και του αυξανόμενου αριθμού των διελεύσεων.

Στις εικόνες 7.52, 7.53 και 7.54 παρουσιάζονται τα ιστογράμματα στις τρεις θέσεις του δαπέδου με στρώση έδρασης χαμηλής φέρουσας ικανότητας (LFS).

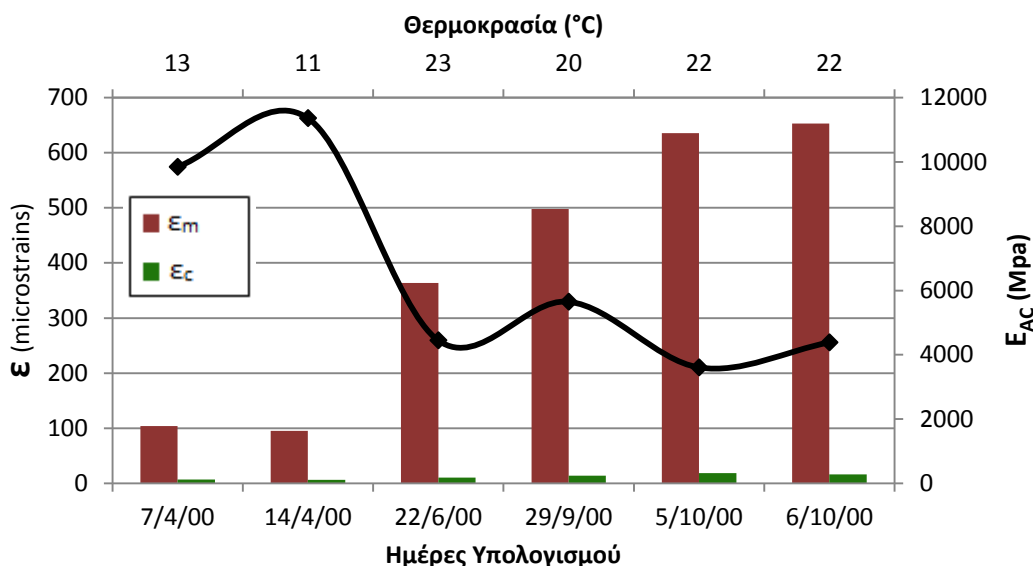


Εικόνα 7.52 Δάπεδο LFS, βόρειο τμήμα (B-777) – Συγκριτικό ιστόγραμμα μετρημένων και υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος, συναρτήσει του χρόνου



Εικόνα 7.53 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα (B-747) – Συγκριτικό ιστόγραμμα μετρημένων και υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος, συναρτήσει του χρόνου

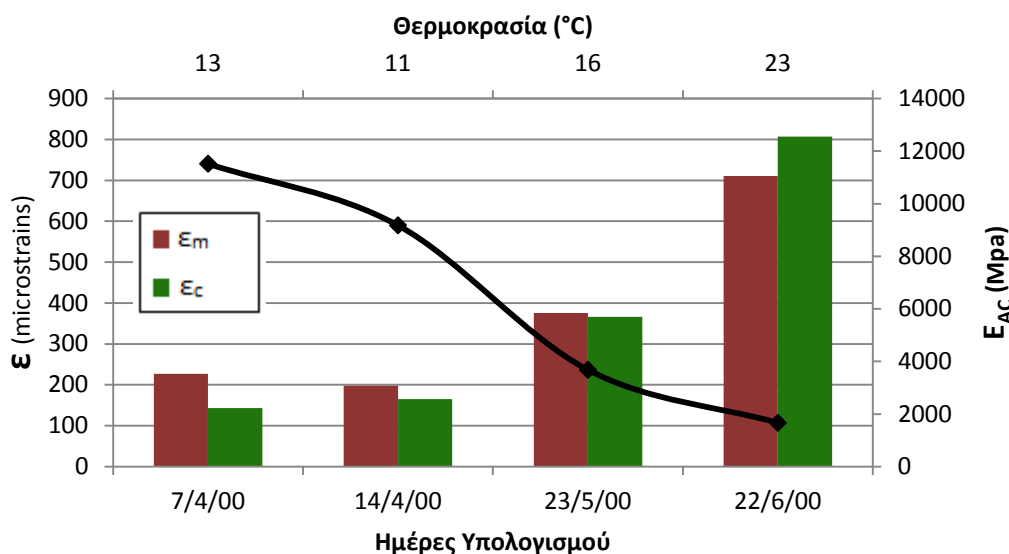
Κατ' αρχάς, θα πρέπει να αναφερθεί ότι έχουν επιλεγεί οι παραμορφώσεις για τα ίχνη εκείνα που ο τροχός διέρχεται ακριβώς πάνω από τον αισθητήρα. Η μεταβολή των αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος, καθώς μεταβάλλονται τα μέτρα ελαστικότητας, είναι ανάλογη εκείνης των μετρημένων. Με άλλα λόγια, μεταβάλλονται με τον ίδιο τρόπο κάτω από την επιρροή της θερμοκρασίας και του αυξανόμενου αριθμού των διελεύσεων.



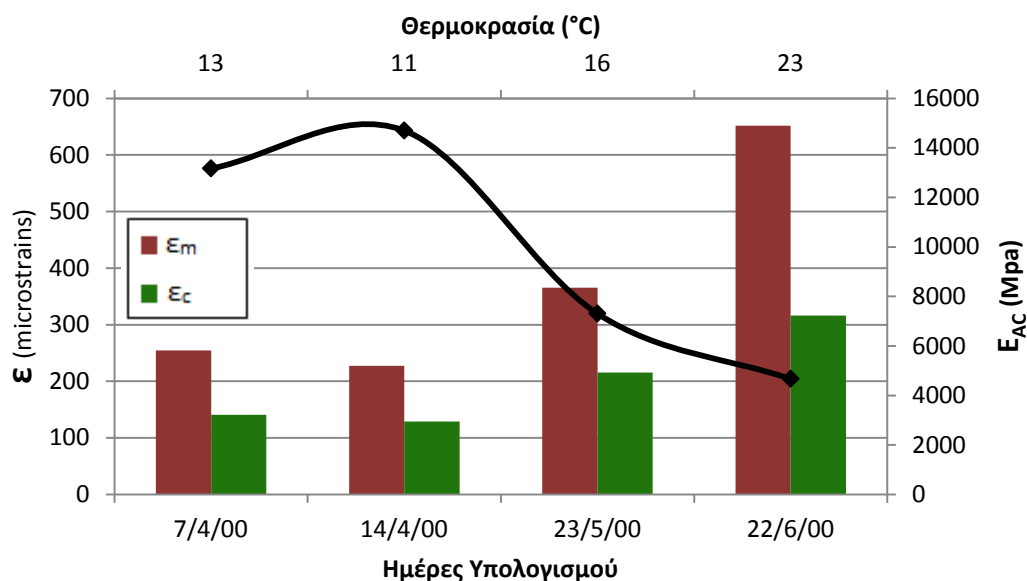
Εικόνα 7.54 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα (B-747) – Συγκριτικό ιστόγραμμα μετρημένων και υπολογισμένων παραμορφώσεων στο μέσον του ασφαλτικού σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου

Εξαίρεση στα παραπάνω αποτελούν οι παραμορφώσεις στο μέσον του ασφαλτικού σκυροδέματος, οι οποίες παραμένουν περίπου σταθερές, ανεξαρτήτως του μεγέθους μεταβολής των μέτρων ελαστικότητας. Ταυτόχρονα, γίνεται σαφής η πολύ μεγάλη ποσοτική διαφορά ανάμεσα στις μετρημένες και τις υπολογισμένες τιμές των παραμορφώσεων για τη συγκεκριμένη θέση της διατομής.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αντίστοιχα ιστογράμματα (εικόνες 7.55, 7.56 και 7.57) για το δάπεδο με στρώση έδρασης μέσης φέρουσας ικανότητας (MFS).

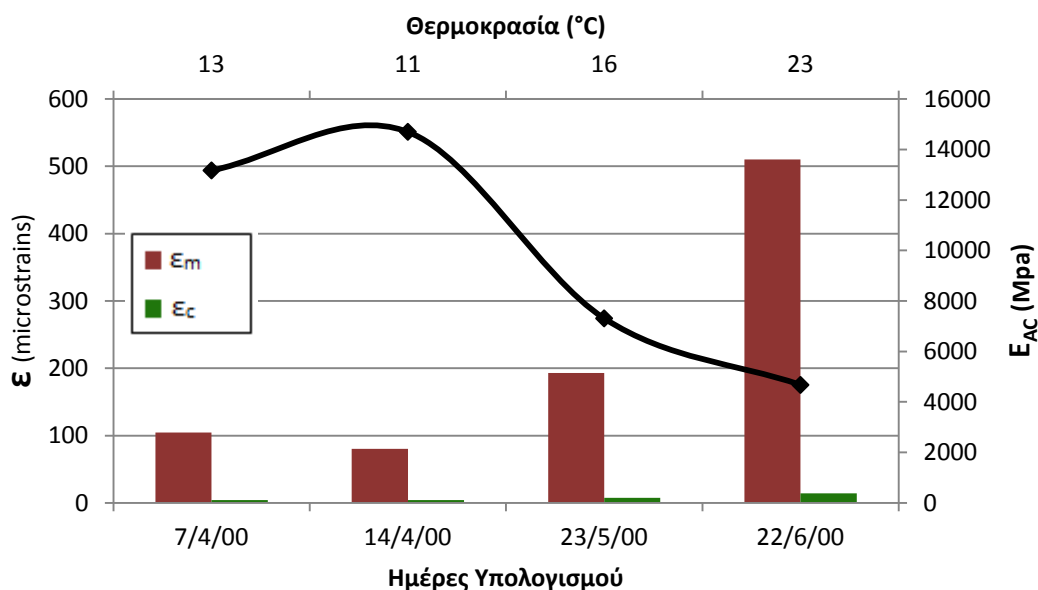


Εικόνα 7.55 Δάπεδο MFS, βόρειο τμήμα (B-777) – Συγκριτικό ιστόγραμμα μετρημένων και υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου



Εικόνα 7.56 Δάπεδο MFS, νότιο τμήμα (B-747)– Συγκριτικό ιστόγραμμα μετρημένων και υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου

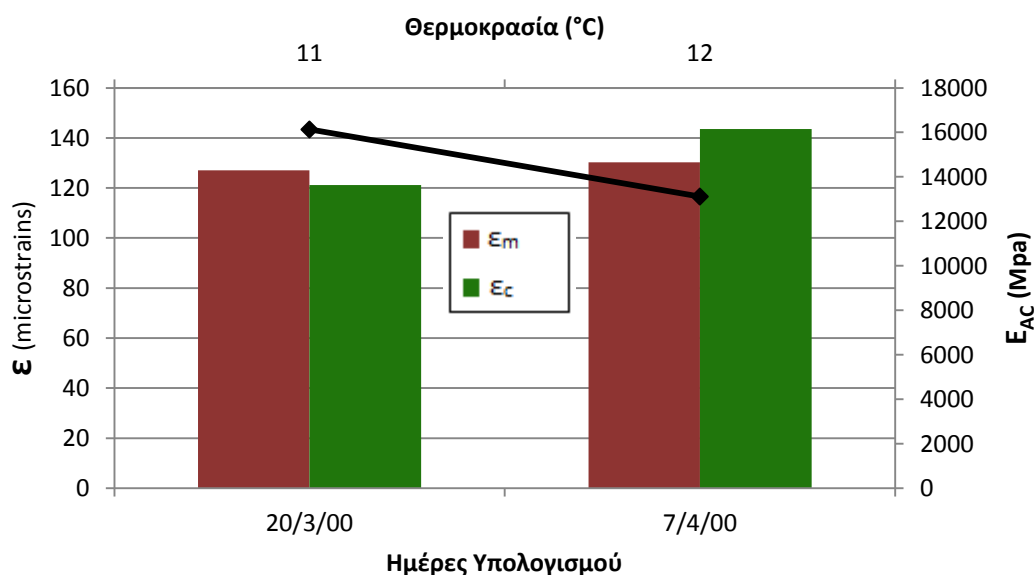
Τα ίδια συμπεράσματα με αυτά του LFS, προκύπτουν και για το συγκεκριμένο δάπεδο. Παρατηρείται ότι η μεταβολή των αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων, είναι επίσης ομοειδής εκείνης των μετρημένων, καθώς μεταβάλλονται τα μέτρα ελαστικότητας. Δηλαδή, μεταβάλλονται με τον ίδιο τρόπο κάτω από την επιρροή της θερμοκρασίας και του αυξανόμενου αριθμού των διελεύσεων.



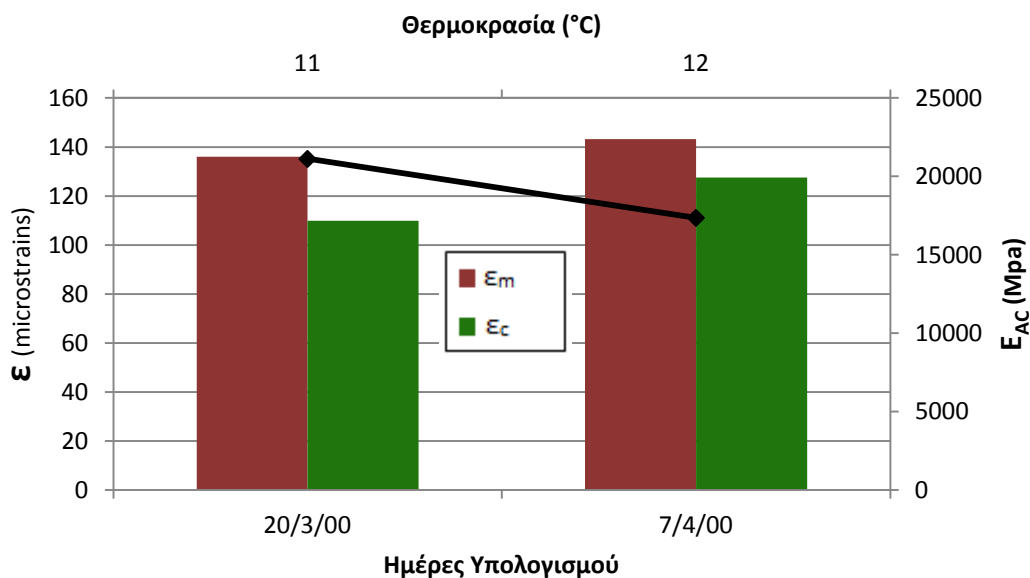
Εικόνα 7.57 Δάπεδο MFS, νότιο τμήμα (B-747)– Συγκριτικό ιστόγραμμα μετρημένων και υπολογισμένων παραμορφώσεων στο μέσον του ασφαλτικού σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου

Σχετικά με τη θέση στο μέσον των ασφαλτικών, διαπιστώνεται ότι και πάλι οι υπολογισμένες παραμορφώσεις δεν ακολουθούν την τάση των μετρημένων, αφού παραμένουν σχεδόν σταθερές και με πολύ υψηλές ποσοτικές διαφορές από τις μετρημένες.

Εν συνεχεία φαίνονται τα συγκριτικά ιστογράμματα μετρημένων και υπολογισμένων παραμορφώσεων για το δάπεδο HFS.

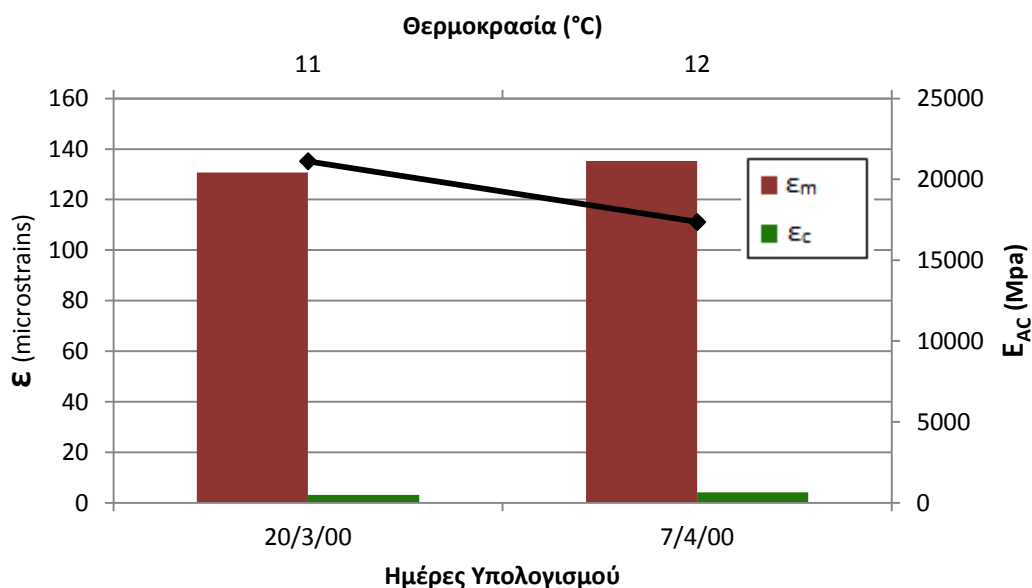


Εικόνα 7.58 Δάπεδο HFS, βόρειο τμήμα (B-777)– Συγκριτικό ιστόγραμμα μετρημένων και υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου



Εικόνα 7.59 Δάπεδο HFS, νότιο τμήμα (B-747)– Συγκριτικό ιστόγραμμα μετρημένων και υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου

Το δείγμα των ημερών είναι πολύ μικρό και επίσης υπενθυμίζεται ότι οι παραμορφώσεις των προτύπων (ε_c) έχουν εκτιμηθεί για διαφορετικές ημέρες από τις μετρημένες (ε_m). Παρ' όλα αυτά, την τάση των μετρημένων παραμορφώσεων την "ακολουθούν" οι υπολογισμένες, οι οποίες μεταβάλλονται ομοειδώς, καθώς αλλάζουν οι τιμές των μέτρων δυσκαμψίας.



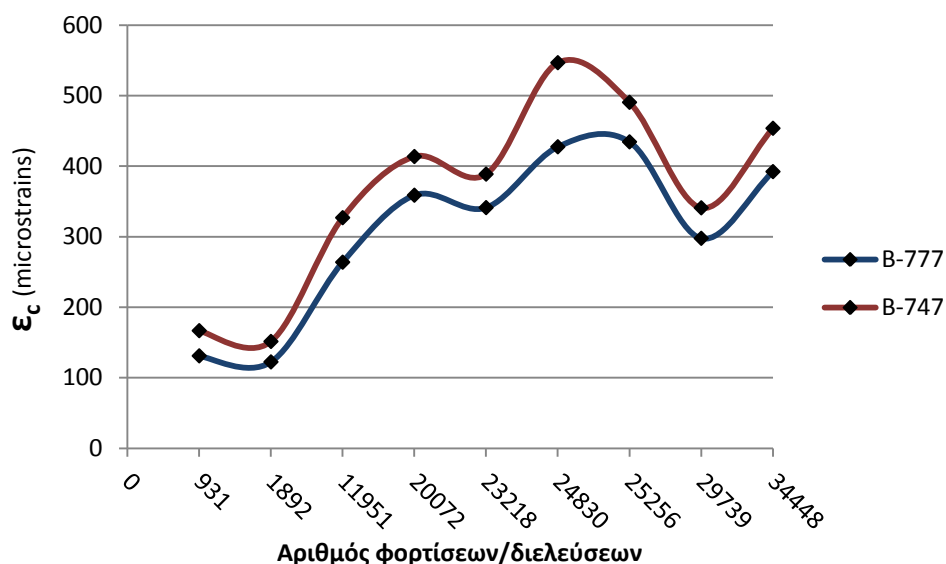
Εικόνα 7.60 Δάπεδο HFS, νότιο τμήμα (B-747)– Συγκριτικό ιστόγραμμα μετρημένων και υπολογισμένων παραμορφώσεων στο μέσον του ασφαλτικού σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου

Όσον αφορά στις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο μέσον, ισχύουν τα ίδια με αυτά που αναφέρθηκαν και για τα άλλα δύο δάπεδα. Δηλαδή, οι παραμορφώσεις φαίνεται να παραμένουν σταθερές, χωρίς να επηρεάζονται ιδιαίτερα από τις μεταβολές των μέτρων ελαστικότητας.

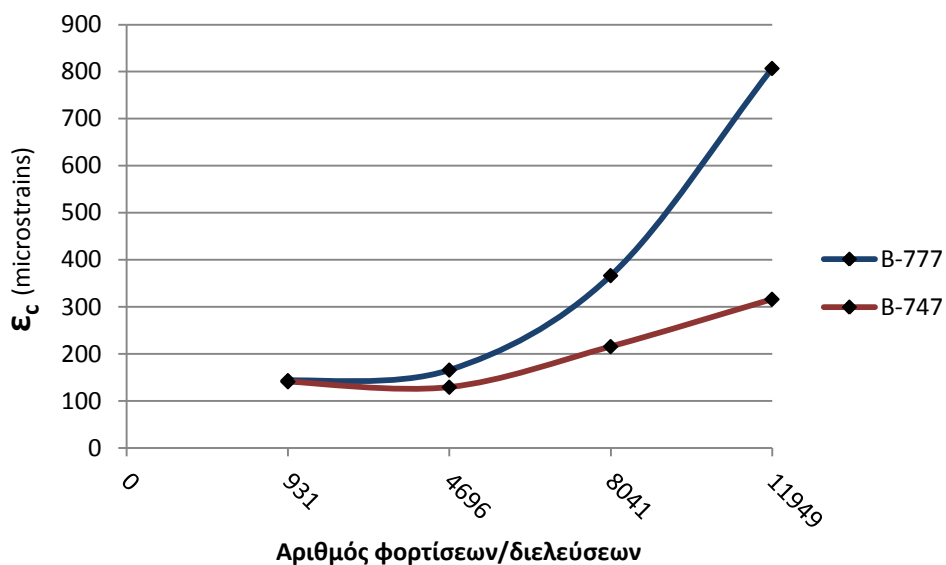
Έπειτα, εξετάζεται αν τα πρότυπα προσομοίωσης παρουσιάζουν ομοειδή συμπεριφορά με τα πειραματικά δάπεδα, σχετικά με την καταπόνηση τους από τους δύο τύπους αεροσκαφών (B-777, B-747).

7.3.6 Συγκριτική καταπόνηση ασφαλτικού σκυροδέματος προτύπων προσομοίωσης από τα B-777 και B-747

Όμοια με την αντίστοιχη σύγκριση που έχει προηγηθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο για τα δάπεδα, συγκρίνονται οι παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλτικών για κάθε πρότυπο χωριστά, ούτως ώστε να φανεί αν η καταπόνηση που προξενείται από τα δύο φορεία ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.



Εικόνα 7.61 Πρότυπο Προσομοίωσης LFS – Διάγραμμα σύγκρισης παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος από B-777 και B-747



Εικόνα 7.62 Πρότυπο Προσομοίωσης MFS – Διάγραμμα σύγκρισης παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος από B-777 και B-747

Παρατηρείται ότι η απόκριση των προτύπων υπό την καταπόνηση των δύο φορείων είναι όμοια με αυτήν των δαπέδων. Συγκεκριμένα, στο πρότυπο του LFS αναπτύσσονται μεγαλύτερες παραμορφώσεις από το B-747. Στο MFS, από τις 4000 διελεύσεις και έπειτα οι παραμορφώσεις από το B-777 είναι μεγαλύτερες, αν και η διαφορά τους από τις παραμορφώσεις που προκαλεί το B-747 είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη που παρατηρήθηκε στο πραγματικό δάπεδο. Για το HFS, τα στοιχεία δεν επαρκούν, ούτως ώστε να προκύψει μια τέτοια σύγκριση.

8 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

8.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο συγκρίθηκαν οι τιμές των παραμορφώσεων, όπως μετρήθηκαν από τους αισθητήρες των δαπέδων, με τις τιμές που προέκυψαν από τον αναλυτικό υπολογισμό των προτύπων προσομοίωσης, υπό τη μορφή ιστογραμμάτων. Ωστόσο, η σύγκριση αυτή έδωσε μόνο μία ποιοτική εικόνα της διαφοράς των παραπάνω τιμών. Η ποσοτικοποίηση του/της σφάλματος/απόκλισης των παραπάνω τιμών επιτυγχάνεται μέσω στατιστικής ανάλυσης. Αρχικά, γίνεται χρήση της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης, προκειμένου να εξεταστεί η ύπαρξη ή μη γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των δύο ομάδων τιμών (μετρημένων και υπολογισμένων). Εν συνεχεία, πραγματοποιείται η ποσοτικοποίηση του σφάλματος των τιμών, μέσω του συντελεστή της “τετραγωνικής ρίζας του μέσου τετραγωνικού ποσοστιαίου σφάλματος” (Root Mean Square Percentage Error – RMSPE).

8.2 Αρχές γραμμικής συσχέτισης με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης και συντελεστής RMSPE

Στην πράξη βρίσκουμε συχνά ότι δύο ή περισσότερες μεταβλητές συνδέονται με κάποια σχέση και επιδιώκουμε να διατυπώσουμε τη σχέση αυτή σε μαθηματική μορφή, προσδιορίζοντας μία εξίσωση που συνδέει τις μεταβλητές.

Αρχικά γίνεται η συλλογή των δεδομένων με τις αντίστοιχες τιμές των μεταβλητών και έπειτα ο προσδιορισμός των σημείων $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Έτσι προκύπτει ένα σύνολο διασπαρμένων σημείων, δηλαδή ένα σμήνος σημείων που συχνά καλείται διάγραμμα διασποράς.

Από το διάγραμμα διασποράς είναι συχνά εύκολο να σχεδιάσουμε μια ομαλή καμπύλη που να προσεγγίζει τα δεδομένα, δηλαδή να περνάει κοντά από τα σημεία αυτά. Μια τέτοια καμπύλη καλείται προσεγγιστική καμπύλη. Στην περίπτωση που η προσέγγιση των δεδομένων πραγματοποιείται από μία ευθεία, λέμε ότι υπάρχει μία γραμμική σχέση μεταξύ των μεταβλητών.

Το γενικό πρόβλημα του προσδιορισμού των εξισώσεων των προσεγγιστικών καμπυλών που προσαρμόζεται σε ορισμένα δεδομένα, καλείται προσαρμογή καμπύλης.

Ένας από τους κύριους σκοπούς της προσαρμογής καμπυλών είναι η εκτίμηση μιας από τις μεταβλητές, της εξαρτημένης μεταβλητής, από την άλλη, την ανεξάρτητη μεταβλητή. Η μέθοδος ή η διαδικασία εκτιμήσεως καλείται συχνά παλινδρόμηση. Εάν η y πρόκειται να εκτιμηθεί από την x με βάση μια εξίσωση, καλούμε την εξίσωση αυτή εξίσωση παλινδρομήσεως της y ως προς (ή επί την) x και την καμπύλη που παριστάνει, καμπύλη παλινδρομήσεως της y ως προς (ή επί την) x .

Γενικά, σε ένα σμήνος σημείων μπορούν να προσαρμοστούν περισσότερες από μία καμπύλες μιας ορισμένης μορφής. Από όλες τις προσεγγιστικές καμπύλες για ένα δεδομένο σμήνος σημείων, η καμπύλη που παρουσιάζει την ιδιότητα $d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2 =$ ελάχιστο,

είναι η καμπύλη με την καλύτερη προσαρμογή. Με τα d_i να εκφράζουν τη διαφορά μεταξύ της τιμής y_i και της αντίστοιχης τιμής της καμπύλης και μπορεί να είναι θετική, αρνητική ή μηδενική.

Μια καμπύλη λοιπόν, που πληροί την παραπάνω ιδιότητα λέμε ότι έχει προσαρμοστεί στα δεδομένα με βάση την αρχή των ελαχίστων τετραγώνων και καλείται καμπύλη παλινδρομήσεως ελαχίστων τετραγώνων ή απλά καμπύλη ελαχίστων τετραγώνων.

Η καμπύλη ελαχίστων τετραγώνων έχει το μικρότερο τυπικό σφάλμα εκτιμήσεως $S_{y,x}$ της εξαρτημένης μεταβλητής y από την ανεξάρτητη μεταβλητή x . Το σφάλμα αυτό αποτελεί ένα μέτρο του πόσο διασπαρμένα είναι τα σημεία γύρω από την καμπύλη και δίδεται από τη σχέση:

$$S_{y,x} = \sqrt{\frac{\sum (y - y_{εκ})^2}{n}} \quad (8.1)$$

Όπου :

$y_{εκ}$: εκτίμηση της τιμής του y για δεδομένο x από την καμπύλη παλινδρόμησης της y ως προς x .

Αποδεικνύεται επίσης ότι το $s_{y,x}^2$ για την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων, μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της διασποράς και του συντελεστή συσχέτισης με βάση τη σχέση:

$$s_{y,x}^2 = s_y^2 (1 - r^2) \quad (8.2)$$

Όπου το r καλείται δειγματικός συντελεστής συσχέτισης και ορίζεται από τη σχέση :

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \quad (8.3)$$

με s_x και s_y οι διασπορές των x και y αντίστοιχα, ενώ s_{xy} η συνδιασπορά τους. Έτσι, η σχέση 8.3 γίνεται :

$$r = \frac{\sum [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum x_i^2 - n\bar{x}^2} \sqrt{\sum y_i^2 - n\bar{y}^2}} \quad (8.4)$$

Ο συντελεστής αυτός εκφράζει το πόσο καλά προσαρμόζεται η ευθεία παλινδρόμησης ελαχίστων τετραγώνων στα δεδομένα. Οι τιμές που δύναται να πάρει βρίσκονται στο διάστημα $-1 \leq r \leq 1$, ή διαφορετικά $r^2 \leq 1$. Όσο το r προσεγγίζει κατ' απόλυτη τιμή τη μονάδα, τόσο καλύτερα προσαρμόζεται η ευθεία στα δεδομένα. Στην

περίπτωση που $r = \pm 1$ (ή $r^2 = 1$), τότε έχουμε πλήρη γραμμική συσχέτιση και πλήρη γραμμική παλινδρόμηση. Εύκολα προκύπτει βάσει της σχέσης 8.2, ότι όσο μεγαλύτερη είναι η απόκλιση του r^2 από τη μονάδα, τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του τυπικού σφάλματος εκτιμήσεως.

Επιπροσθέτως, οι θετικές τιμές του r υποδεικνύουν ότι το y τείνει να αυξηθεί όταν αυξάνεται το x (η κλίση της ευθείας ελαχίστων τετραγώνων είναι θετική), ενώ οι αρνητικές τιμές φανερώνουν μείωση του y για αντίστοιχη αύξηση του x (η κλίση είναι αρνητική).

Το τετράγωνο του δειγματικού συντελεστή συσχέτισεως (r^2) συμβολίζεται ως R^2 και καλείται συντελεστής προσδιορισμού. Ο συντελεστής προσδιορισμού εκφράζει το ποσοστό της διασποράς της τυχαίας μεταβλητής y που εξηγείται με βάση το μοντέλο παλινδρόμησης. Οι τιμές του κυμαίνονται στο διάστημα $[0,1]$ και όσο πιο κοντά βρίσκονται στη μονάδα, τόσο ισχυρότερη γίνεται η γραμμική σχέση εξάρτησης των μεταβλητών x και y .

Τονίζεται ότι οι παραπάνω σχέσεις εκφράζουν γραμμική συσχέτιση μεταξύ δύο μεταβλητών. Αν εφαρμόσουμε π.χ. τη σχέση 8.4 για μεταβλητές που δε συνδέονται γραμμικά, τότε η τιμή του συντελεστή συσχέτισεως κατ' απόλυτη τιμή και κατ' επέκταση και του συντελεστή προσδιορισμού είναι αρκετά μικρότερη της μονάδας. Σε αυτήν την περίπτωση οφείλουμε να συμπεράνουμε όχι ότι υπάρχει μικρή συσχέτιση, αλλά ότι υπάρχει μικρή γραμμική συσχέτιση, αφού είναι πιθανό να υπάρχει μεγάλη μη γραμμική συσχέτιση (Spiegel M.R., 1975).

Αναφορικά με το μέγεθος του σφάλματος μεταξύ των τιμών δύο μεταβλητών, ο συντελεστής παλινδρόμησης R^2 δε δίδει καμία πληροφορία. Καθώς δύο μεταβλητές μπορεί να είναι πλήρως γραμμικά συσχετισμένες ($R^2 = 1$), αλλά οι τιμές τους να διαφέρουν κατά πολύ. Για παράδειγμα, οι μεταβλητές y , x που συνδέονται με τη σχέση $y = 100x$ είναι πλήρως γραμμικά συσχετισμένες, αλλά όπως γίνεται αντιληπτό το μέγεθος του σφάλματος των τιμών τους είναι πολύ μεγάλο. Μία ποιοτική εικόνα της απόκλισης των τιμών δύο μεταβλητών είναι η απόσταση/διασπορά τους από την ευθεία $y = x$ του διαγράμματος διασποράς τους. Όσο πιο κοντά βρίσκονται στην ευθεία αυτή τόσο μικρότερη είναι η διαφορά τους. Στην περίπτωση που ικανοποιούν την εξίσωση $y = x$, τότε η διαφορά τους είναι μηδενική.

Η ποσοτικοποίηση του σφάλματος των τιμών δύο μεταβλητών επιτυγχάνεται μέσω του συντελεστή της τετραγωνικής ρίζας του μέσου τετραγωνικού ποσοστιαίου σφάλματος (RMSPE). Ο συντελεστής αυτός εκφράζει ό,τι ακριβώς και ο συντελεστής RMSE για τον οποίο έχει γίνει ήδη αναφορά. Δηλαδή, αποτελεί ένα μέτρο των διαφορών μεταξύ των τιμών δύο μεταβλητών, ή καλύτερα αντιπροσωπεύει την ακρίβεια για μία πρόβλεψη/εκτίμηση τιμών. Εν προκειμένω, φανερώνει το μέγεθος του σφάλματος μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων παραμορφώσεων ως μέσο όρο και για τα εννιά ίχνη, εκφρασμένο σε ποσοστό. Προκύπτει επομένως, ότι όσο μικρότερη είναι η τιμή του συντελεστή, τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια του αναλυτικού υπολογισμού. Ο τύπος του RMSPE είναι ο ακόλουθος :

$$RMSPE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^V \left(\frac{(A_i - S_i)}{A_i} \right)^2}{V}} \quad (8.5)$$

Όπου :

A_i : οι πραγματικές – μετρημένες τιμές, με $i=1,2,\dots,V$

S_i : οι εκτιμημένες τιμές, με $i=1,2,\dots,V$ και

V : το πλήθος των τιμών

Τα διαγράμματα διασποράς των μετρημένων (ϵ_m) και υπολογισμένων (ϵ_c) παραμορφώσεων παρατίθενται για κάθε δάπεδο χωριστά στο Παράρτημα Δ της παρούσας εργασίας. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζεται η ευθεία $y = x$, ούτως ώστε να υπάρχει μία ποιοτική εικόνα του σφάλματος των τιμών ανάλογα με τη διασπορά τους από τη συγκεκριμένη ευθεία. Ταυτόχρονα αναγράφεται και η τιμή του συντελεστή RMSPE ως ποσοστό, που “ποσοτικοποιεί” το σφάλμα μεταξύ των τιμών. Η γραμμική συσχέτιση των τιμών ελέγχεται μέσω του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης R^2 , ο οποίος αναγράφεται για κάθε ημέρα χωριστά σε συγκεντρωτικούς πίνακες.

8.3 Συγκεντρωτικά συμπεράσματα από τη στατιστική ανάλυση

8.3.1 Εισαγωγή

Από τη στατιστική επεξεργασία που προηγήθηκε προέκυψαν οι τιμές του συντελεστή RMSPE, φανερώνοντας έτσι το ποσοστό του σφάλματος μεταξύ υπολογισμένων και μετρημένων παραμορφώσεων. Παράλληλα, μέσω της γραμμικής συσχέτισης βρέθηκαν οι τιμές του συντελεστή προσδιορισμού R^2 , μέσω του οποίου προκύπτει ο βαθμός της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των τιμών. Προκειμένου να υπάρξει μία συγκεντρωτική εικόνα, οι τιμές των δύο αυτών συντελεστών πινακοποιούνται για κάθε θέση χωριστά, σε καθένα από τα τρία δάπεδα. Κατ’ αυτόν τον τρόπο γίνεται και ο διαχωρισμός των θέσεων μέτρησης-εκτίμησης των παραμορφώσεων ανάλογα με την ταύτισή τους ή μη, με τις θέσεις εφαρμογής FWD. Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τιμές των δύο συντελεστών με αύξουσα σειρά για το συντελεστή RMSPE.

Θα πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερα ότι ο συντελεστής RMSPE δεν αντιπροσωπεύει την ποσοστιαία διαφορά των τιμών των παραμορφώσεων, αλλά την ακρίβεια της μεθόδου υπολογισμού, εκφρασμένη σε ποσοστό (βεβαίως, εμμέσως υποδεικνύεται και η διαφορά μεταξύ των τιμών). Επαναλαμβάνεται επομένως, ότι όσο μικρότερη είναι η τιμή του, τόσο μικρότερο το ποσοστό του σφάλματος της μεθόδου, δηλαδή τόσο μεγαλύτερη η ακρίβεια στην εκτίμηση των υπολογισμένων παραμορφώσεων σε σχέση με τις μετρημένες.

Αναφορικά με το συντελεστή προσδιορισμού R^2 , υπενθυμίζεται ότι φανερώνει το βαθμό της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των τιμών των παραμορφώσεων. Με άλλα λόγια, δείχνει αν οι εκτιμημένες τιμές μεταβάλλονται με τον ίδιο τρόπο που μεταβάλλονται και οι μετρημένες, από ίχνος σε ίχνος. Όσο πιο υψηλές τιμές παίρνει ο συγκεκριμένος συντελεστής, τόσο μεγαλύτερη γραμμική συσχέτιση υποδηλώνεται. Δηλαδή, η μεταβολή των αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων, καθώς διαφοροποιείται το ίχνος διέλευσης, είναι ανάλογη/όμοια της μεταβολής των μετρημένων.

8.3.2 Τιμές συντελεστών και συμπεράσματα για το δάπεδο LFS

Παρουσιάζονται οι πίνακες για κάθε τμήμα χωριστά ανάλογα με την ταύτιση ή μη του αισθητήρα με τη θέση εφαρμογής FWD.

Πίνακας 8.1 Τιμές συντελεστών RMSPE και R² για το LFS, στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος – Ταύτιση θέσεως αισθητήρων με θέση εφαρμογής FWD

LFS – Πυθμένας ασφαλτικού σκυροδέματος					
ΒΟΡΕΙΟ ΤΜΗΜΑ			ΝΟΤΙΟ ΤΜΗΜΑ		
Ημέρα	RMSPE (%)	R ²	Ημέρα	RMSPE (%)	R ²
22/6/00	41,6	0,99	22/6/00	52,2	0,94
7/4/00	41,9	0,99	7/4/00	54,2	0,97
14/4/00	43,6	0,99	14/4/00	54,3	0,98
31/8/00	45,7	0,99	5/10/00	59,1	0,93
5/10/00	48,9	0,99	31/8/00	59,4	0,94
6/10/00	51,3	0,98	6/10/00	59,5	0,92
29/9/00	52,9	0,98	29/9/00	64,8	0,94
6/6/01	53,4	0,99	14/11/00	64,8	0,94
14/11/00	55,3	0,94	6/6/01	68,1	0,92

Πίνακας 8.2 Τιμές συντελεστών RMSPE και R² για το LFS, στο μέσον του ασφαλτικού σκυροδέματος – Απόκλιση θέσεως αισθητήρα από θέση εφαρμογής FWD

LFS – Μέσον ασφαλτικού σκυροδέματος		
ΝΟΤΙΟ ΤΜΗΜΑ		
Ημέρα	RMSPE (%)	R ²
7/4/00	68,5	0,21
14/4/00	69,2	0,32
22/6/00	87,8	0,39
29/9/00	91,2	0,53
5/10/00	90,8	0,52
6/10/00	90,8	0,51

Όπως φαίνεται και στον πίνακα 8.1, για τους αισθητήρες στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος και κάτω ακριβώς από θέση εφαρμογής FWD, οι μικρότερες τιμές του σφάλματος προέκυψαν για το βόρειο τμήμα (B-777). Ο RMSPE κυμάνθηκε από

41,6 έως 55,3 %, ποσοστά που κρίνονται ιδιαίτερα υψηλά. Οι τιμές αυτές υποδεικνύουν ότι οι μετρημένες παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερες από τις αναλυτικά υπολογισμένες σε ποσοστά που κυμαίνονται από 71,2 % (με CoV = 10,6 %) έως και 132,7 % (με CoV = 49,6 %). Όσον αφορά στο συντελεστή R^2 , κυμάνθηκε από 0,94 έως και 0,99, γεγονός που υποδεικνύει πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των υπό ανάλυση παραμορφώσεων.

Αντίστοιχα, στο νότιο τμήμα του δαπέδου (B-747), επίσης για τον πυθμένα του ασφαλικού σκυροδέματος, ο συντελεστής RMSPE παρουσιάστηκε αυξημένος και οι τιμές του κυμάνθηκαν από 52,2 έως 68,1 %. Δηλαδή, οι μετρημένες από τους αισθητήρες παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερες από τις υπολογισμένες σε ποσοστά από 110,7 % (CoV = 22,7 %) έως και 218,4 % (CoV = 21,3 %). Ενώ και για αυτό το τμήμα του δαπέδου, η γραμμική συσχέτιση των παραμορφώσεων είναι ισχυρή, με το R^2 να παρουσιάζει τιμές από 0,92 έως 0,98.

Στο μέσον της ενιαίας ασφαλικής στρώσης του δαπέδου αυτού, οι τιμές του RMSPE μεγιστοποιούνται. Από τον πίνακα 8.2 φαίνεται ότι το σφάλμα εκτίμησης είναι μεταξύ του 68,5 και 90,8 %, κάτι το οποίο υποδεικνύει ότι οι μετρημένες παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερες από τις υπολογισμένες κατά 3 έως και 14 φορές. Ταυτόχρονα η γραμμική συσχέτιση των παραμορφώσεων παρουσιάζεται πολύ ασθενής, με το R^2 να παίρνει τιμές από 0,21 έως 0,51.

8.3.3 Τιμές συντελεστών και συμπεράσματα για το δάπεδο MFS

Ομοίως, παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών στους ακόλουθους πίνακες.

Πίνακας 8.3 Τιμές συντελεστών RMSPE και R^2 για το MFS, στον πυθμένα του ασφαλικού σκυροδέματος – Ταύτιση θέσεως αισθητήρα με θέση εφαρμογής FWD

MFS – ΒΟΡΕΙΟ ΤΜΗΜΑ (B-777)		
Πυθμένας ασφαλικού σκυροδέματος		
Ημέρα	RMSPE (%)	R^2
14/4/00	13,5	0,99
23/5/00	14,3	0,98
22/6/00	15,5	0,95
7/4/00	27,5	0,97

Πίνακας 8.4 Τιμές συντελεστών RMSPE και R^2 για το MFS στο νότιο τμήμα – Απόκλιση θέσεως αισθητήρων από θέση εφαρμογής FWD

MFS – ΝΟΤΙΟ ΤΜΗΜΑ (B-747)					
Πυθμένας ασφαλτικού σκυροδέματος			Μέσον ασφαλτικού σκυροδέματος		
Ημέρα	RMSPE (%)	R^2	Ημέρα	RMSPE (%)	R^2
7/4/00	44,4	0,99	14/4/00	74,4	0,22
14/4/00	44,6	0,99	7/4/00	78,7	0,22
23/5/00	48,3	0,99	23/5/00	86,8	0,49
22/6/00	55,9	0,98	22/6/00	94,7	0,83

Για το δάπεδο αυτό, η μέθοδος υπολογισμού των παραμορφώσεων παρουσίασε μεγαλύτερη ακρίβεια. Συγκεκριμένα, για τον πυθμένα του ασφαλτοσκυροδέματος στο βόρειο τμήμα (B-777), όπου η θέση του αισθητήρα μέτρησης παραμορφώσεων ταυτίζεται με τη θέση εφαρμογής FWD, το μέγεθος του σφάλματος είναι από 13,5 μέχρι και 27,5 % (πίνακας 8.3). Η διαφορά, δηλαδή, μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων παραμορφώσεων κυμαίνεται από 14,4 έως 37,1 % (με τους συντελεστές μεταβλητότητας 55,4 % και 47,5 %), με μεγαλύτερες τις πειραματικά μετρημένες. Επιπλέον, η γραμμική συσχέτιση των παραμορφώσεων είναι πολύ ισχυρή, καθώς η ελάχιστη τιμή που έλαβε το R^2 ήταν 0,95.

Ο RMSPE παρουσιάστηκε αυξημένος στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος του νότιου τμήματος (B-747), όπου ο αισθητήρας αποκλίνει από τη θέση εφαρμογής FWD κατά 70 cm. Όπως παρουσιάζεται και στον πίνακα 8.4, κυμάνθηκε από 44,4 έως και 55,9 %. Ή διαφορετικά, οι υπολογισμένες παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερες κατά 80,2 έως και 128,9 % (CoV = 15,6 και 25,1 % αντίστοιχα) από τις υπολογισμένες. Επιπροσθέτως και σε αυτό το τμήμα η γραμμική συσχέτιση των παραμορφώσεων είναι πολύ καλή, αφού ο συντελεστής R^2 παρουσιάζει ελάχιστη τιμή ίση με 0,98.

Από τον ίδιο πίνακα προκύπτει και η απόκλιση των υπολογισμένων παραμορφώσεων από τις μετρημένες στο μέσον της ενιαίας ασφαλτικής στρώσης. Ο συντελεστής της ρίζας του μέσου ποσοστιαίου σφάλματος πήρε τιμές από 74,4 έως 94,7 %. Οι υπολογισμένες παραμορφώσεις παρουσιάστηκαν κατά 5,5 έως και 20,7 φορές μικρότερες από αυτές που μετρήθηκαν στη συγκεκριμένη θέση. Ενώ παράλληλα και η γραμμική τους συσχέτιση ήταν γενικώς ασθενής, μιας και ο συντελεστής προσδιορισμού έλαβε τιμές από 0,22 μέχρι και 0,83.

8.3.4 Τιμές συντελεστών και συμπεράσματα για το δάπεδο HFS

Στους πίνακες 8.5 και 8.6 που ακολουθούν, παρατίθενται οι τιμές των δύο συντελεστών στις διάφορες θέσεις του συγκεκριμένου δαπέδου.

Πίνακας 8.5 Τιμές συντελεστών RMSPE και R^2 για το HFS, στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος – Ταύτιση θέσεως αισθητήρα με θέση εφαρμογής FWD

HFS – ΒΟΡΕΙΟ ΤΜΗΜΑ (B-777)		
Πυθμένας ασφαλτικού σκυροδέματος		
Ημέρες	RMSPE (%)	R^2
5/4/00 7/4/00	18,4	0,90
16/3/00 20/3/00	28,6	0,90

Πίνακας 8.6 Τιμές συντελεστών RMSPE και R^2 για το HFS, στο νότιο τμήμα – Απόκλιση θέσεως αισθητήρων από θέση εφαρμογής FWD

HFS – ΝΟΤΙΟ ΤΜΗΜΑ (B-747)					
Πυθμένας ασφαλτικού σκυροδέματος			Μέσον ασφαλτικού σκυροδέματος		
Ημέρες	RMSPE (%)	R^2	Ημέρες	RMSPE (%)	R^2
16/3/00 20/3/00	22,1	0,96	5/4/00 7/4/00	92,3	0,79
5/4/00 7/4/00	27,6	0,95	16/3/00 20/3/00	95,5	0,86

Για το δάπεδο HFS, ο πίνακας 8.5 δίνει τα στατιστικά αποτελέσματα του βόρειου τμήματος (B-777), για τον πυθμένα των ασφαλτικών, όπου ο αισθητήρας βρίσκεται κάτω ακριβώς από θέση εφαρμογής FWD. Υπενθυμίζεται ότι οι παραμορφώσεις έχουν υπολογιστεί για άλλες ημέρες από αυτές στις οποίες λήφθηκαν οι μετρημένες παραμορφώσεις, με την ίδια όμως θερμοκρασία και χωρίς να έχει μεταβληθεί ο αριθμός των διελεύσεων. Ο συντελεστής RMSPE πήρε τις τιμές 18,4 και 28,6 %, κάτι το οποίο ερμηνεύεται ως διαφορά στις μετρημένες και υπολογισμένες παραμορφώσεις, της τάξεως του 17,8 και 38,6 % αντίστοιχα, με μεγαλύτερες τις μετρημένες (με συντελεστές διακύμανσης 49,8 % και 54,3 %). Επιπλέον, η γραμμική συσχέτιση είναι πολύ καλή, με το συντελεστή R^2 να παίρνει την τιμή 0,9 και για τα δύο ζεύγη ημερών.

Ομοίως για το νότιο τμήμα (B-747), στον πυθμένα του ασφαλτοσκυροδέματος, αν και η θέση του αισθητήρα αποκλίνει από τη θέση εφαρμογής FWD κατά 70 cm περίπου, οι τιμές του σφάλματος είναι όμοιες με αυτές του βόρειου τμήματος. Για την ακρίβεια, τα ποσοστά του σφάλματος εκτίμησης είναι 22,1 και 27,6 % (πίνακας 8.6), κάτι το οποίο αποτιμάται σε διαφορά μεταξύ των παραμορφώσεων τουλάχιστον κατά 27,6 % (CoV = 46,3 %), με μεγαλύτερες τις μετρημένες. Επίσης, η γραμμική συσχέτιση είναι ισχυρή, αφού ο συντελεστής R^2 έλαβε τις τιμές 0,95 και 0,96.

Στο μέσον του ασφαλτικού σκυροδέματος, ο RMSPE λαμβάνει τις μέγιστες τιμές, όπως άλλωστε και για τα άλλα δύο δάπεδα, οι οποίες είναι 92,3 και 95,5 %. Η διαφορά, επομένως, μεταξύ των παραμορφώσεων είναι πολύ μεγάλη και συγκεκριμένα οι μετρημένες παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερες εν συγκρίσει με τις υπολογισμένες κατά 20

έως και 25 φορές περίπου. Βέβαια, στην περίπτωση του δαπέδου αυτού για τη συγκεκριμένη θέση, ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις αντίστοιχες των άλλων δαπέδων. Έτσι, η γραμμική συσχέτιση των παραμορφώσεων κρίνεται σχετικά καλή, αφού οι τιμές του R^2 είναι 0,79 και 0,86.

8.3.5 Γενικά συμπεράσματα

Παρατηρώντας τις τιμές του συντελεστή RMSPE, οι οποίες βρίσκονται σε αύξουσα σειρά στους πίνακες των δαπέδων, προκύπτει ότι κατά κανόνα αυξάνονται με την αύξηση του αριθμού των διελεύσεων. Εξαιρέση αποτελεί το βόρειο τμήμα του δαπέδου MFS που η μέγιστη τιμή προέκυψε για την πρώτη ημέρα. Γενικώς, οι τιμές του συντελεστή είναι παραπλήσιες για ημέρες που δεν απέχουν πολύ μεταξύ τους.

Επιπλέον, παρατηρώντας τα διαγράμματα διασποράς των δαπέδων, εύκολα συμπεραίνει κανείς ότι η μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ των μετρημένων και εκτιμημένων παραμορφώσεων παρουσιάζεται για τις υψηλότερες τιμές τους, δηλαδή για τα ίχνη εκείνα που η απόσταση τροχού-αισθητήρα ελαχιστοποιείται.

Συνοψίζοντας, οι παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλικών του βόρειου τμήματος (B-777) καθενός δαπέδου, παρουσίασαν μικρότερες τιμές σφάλματος εν συγκρίσει με τις αντίστοιχες του νότιου τμήματος (B-747) των τριών δαπέδων.

Σχετικά με την εκτίμηση στον πυθμένα των ασφαλικών, οι μικρότερες τιμές σφάλματος προέκυψαν για το βόρειο τμήμα του MFS, οι οποίες ήταν κοντά στο 15 %, με εξαίρεση την πρώτη μέρα που το σφάλμα ήταν της τάξεως του 27,5 %, δηλαδή ποσοστά σχετικά ικανοποιητικά. Ενώ σε όλες τις άλλες θέσεις των δαπέδων LFS και MFS, η ελάχιστη τιμή του συντελεστή RMSPE προέκυψε μεγαλύτερη του 41 %. Το γεγονός αυτό, καθιστά την ακρίβεια της μεθόδου για τις θέσεις αυτές χαμηλή και κατ' επέκταση τις διαφορές των τιμών των μετρημένων και υπολογισμένων παραμορφώσεων σημαντικές. Στο δάπεδο HFS τα αντίστοιχα ποσοστά για τον πυθμένα των ασφαλικών ήταν από 18,4 έως και 28,6 %. Το δάπεδο αυτό παρουσίασε το χαμηλότερο σφάλμα για το νότιο τμήμα σε σχέση με τα άλλα δύο δάπεδα.

Όσον αφορά στη γραμμική συσχέτιση των παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλικού σκυροδέματος, κρίνεται πολύ ισχυρή και στα τρία δάπεδα, αφού η χαμηλότερη τιμή του R^2 είναι 0,90.

Από την άλλη μεριά, η εκτίμηση των παραμορφώσεων στο μέσον του ασφαλτοσκυροδέματος παρουσίασε εξαιρετικά υψηλές τιμές σφάλματος και για τα τρία δάπεδα. Συγκεκριμένα, η χαμηλότερη τιμή για τη συγκεκριμένη θέση ήταν 52,2 % (LFS) και η υψηλότερη ξεπέρασε το 95 % (HFS). Έτσι, οι τιμές των μετρημένων παραμορφώσεων έφτασαν να είναι μέχρι και 25 φορές μεγαλύτερες από τις υπολογισμένες.

Τέλος, ιδίως για τα δάπεδα LFS και MFS, η γραμμική συσχέτιση των παραμορφώσεων στο μέσον κρίνεται ως πολύ ασθενής. Δηλαδή, η μεταβολή των υπολογισμένων παραμορφώσεων από ίχνος σε ίχνος, δεν "ακολουθήσε" τη μεταβολή των μετρημένων αντίστοιχα.

9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να συνδράμει στη διερεύνηση της απόκρισης των εύκαμπτων οδοστρωμάτων των αεροδρομίων. Για την ακρίβεια, εξετάζονται οι οριζόντιες ανηγμένες εφελκυστικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται κατά τη διαμήκη διεύθυνση, δηλαδή κατά τη διεύθυνση κίνησης των φορείων. Για το σκοπό αυτό, αξιοποιούνται τα δεδομένα από τις δοκιμαστικές φορτίσεις στην εγκατάσταση της NARTF. Μελετώνται, λοιπόν οι παραμορφώσεις τόσο στον πυθμένα της ασφαλτικής στρώσης, όσο και στο μέσον αυτής, υπό τις φορτίσεις των δοκιμαστικών φορείων. Στα φορεία αυτά έχει διαμορφωθεί σύστημα τροχών τέτοιο, ώστε να προσομοιάζονται αυτά των αεροσκαφών νέας γενιάς της πολιτικής αεροπορίας, B-777 και B-747 αντίστοιχα. Πέραν όμως της διερεύνησης των αναπτυσσόμενων από τις δοκιμαστικές φορτίσεις παραμορφώσεων, υπολογίζονται αναλυτικά μέσω προσομοίωσης οι αντίστοιχες παραμορφώσεις, με τη βοήθεια της θεωρίας των πεπερασμένων στοιχείων. Κατ' αυτόν τον τρόπο, δίνεται η δυνατότητα σύγκρισης των μετρημένων (ϵ_m) και αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων (ϵ_c) και ως εκ τούτου η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την απόκλιση και το σφάλμα της μεθόδου υπολογισμού.

Αρχικά, η ανάλυση των καταγεγραμμένων από τους αισθητήρες παραμορφώσεων φανέρωσε την ισχυρότατη εξάρτησή τους από τη θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, τα δάπεδα με τη χαμηλή (LFS) και μέση (MFS) φέρουσα ικανότητα στρώσης έδρασης (CBR 4 και CBR 8 αντίστοιχα) παρουσίασαν όμοια συμπεριφορά με τη μεταβολή της θερμοκρασίας και στα δύο τμήματά τους. Παρατηρήθηκε συνεχής αύξηση των παραμορφώσεων με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η σύγκριση των παραμορφώσεων για τις θερμοκρασίες των 12 και 13 °C, φανέρωσε αύξηση των παραμορφώσεων για τους 13 °C, αν και τα δάπεδα έχουν υποστεί λιγότερες φορτίσεις σε αυτήν τη θερμοκρασία. Το ίδιο προκύπτει και από τη σύγκριση των παραμορφώσεων για τις ημέρες με τις θερμοκρασίες των 16 και 19 °C αντίστοιχα. Αντίθετα, στους 23 °C αναπτύσσονται μεγαλύτερες παραμορφώσεις σε σχέση με αυτές στους 24 °C. Βέβαια, στους 23 °C τα δάπεδα έχουν υποστεί περισσότερες φορτίσεις. Επιπλέον, οι παραμένουσες παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερες σε υψηλότερες θερμοκρασίες λόγω των ιξωδοελαστικών ιδιοτήτων του ασφαλτικού σκυροδέματος. Ο ρυθμός αύξησης των παραμορφώσεων προέκυψε ίσως με 14,5 % για το βόρειο τμήμα (B-777) του LFS και 11,8 % για το νότιο (B-747). Τα αντίστοιχα ποσοστά για το MFS είναι 18,4 % και 15,6 %. Συνοπτικά, η αύξηση της θερμοκρασίας από τους 11 °C στους 23 °C επέφερε αύξηση των παραμορφώσεων κατά 166 % για το βόρειο (B-777) και 126 % για το νότιο τμήμα (B-747) του LFS αντίστοιχα. Στο MFS παρατηρήθηκαν μεγαλύτερα ποσοστά αύξησης. Συγκεκριμένα, στο βόρειο τμήμα (B-777) οι παραμορφώσεις αυξήθηκαν κατά 258 % και στο νότιο (B-747) κατά 187 %.

Η αύξηση που φανερώνουν τα παραπάνω ποσοστά συνδιαμορφώνεται και από την αύξηση στον αριθμό των διελεύσεων, δηλαδή της καταπόνησης που προκαλείται από τις φορτίσεις. Γι αυτό, εξετάστηκε η μεταβολή των παραμορφώσεων συναρτήσει της αύξησης του αριθμού των υφιστάμενων διελεύσεων για ημέρες με περίπου την ίδια θερμοκρασία (± 1 °C). Εξετάστηκε μόνο το δάπεδο με στρώση έδρασης χαμηλής φέρουσας ικανότητας (LFS), καθότι μόνο για αυτό το δάπεδο βρέθηκαν ημέρες δοκιμών με την ίδια θερμοκρασία ή έστω με απόκλιση κατά 1 °C. Συγκεκριμένα εντοπίστηκαν τέσσερις ημέρες, με τη θερμοκρασία να βρίσκεται στους 23 έως και 24 °C. Προέκυψε λοιπόν και στα δύο τμήματα του δαπέδου, ότι οι παραμορφώσεις αυξάνονται με την αύξηση των διελεύσεων των δύο

φορείων. Για την ακρίβεια, ο ρυθμός αύξησης των παραμορφώσεων στο βόρειο τμήμα (B-777) είναι ίσος με 6,9 % και στο νότιο (B-747) 8,6 %. Παρατηρήθηκε επίσης, συνολική αύξηση στις τιμές των παραμορφώσεων κοντά στο 20 % για το βόρειο τμήμα (B-777) και 27 % για το νότιο (B-747), για αύξηση του αριθμού των διελεύσεων κατά δέκα χιλιάδες (από 9843 σε 19873 διελεύσεις).

Σχετικά με το δάπεδο με τη στρώση έδρασης χαμηλής φέρουσας ικανότητας (LFS), οι ημέρες δοκιμών ήταν περισσότερες, οπότε δόθηκε η δυνατότητα πληρέστερης διερεύνησης της απόκρισης του δαπέδου αυτού. Ένας ακόμη παράγοντας επιρροής των παραμορφώσεων που εξετάστηκε, ήταν αυτός του μεγέθους του φορτίου ανά τροχό. Η συμπεριφορά του δαπέδου στην αύξηση του φορτίου ανά τροχό ήταν η αναμενόμενη. Παρατηρήθηκε ότι οι παραμορφώσεις αυξάνονται με την αύξηση του φορτίου. Η συνολική μεταβολή στις παραμορφώσεις εξαιτίας της αύξησης του φορτίου από 200,2 kN (17/8/00) σε 289,1 kN (1/9/00), επέφερε αύξηση της τάξεως του 43-44 % (με συντελεστές μεταβλητότητας 12,8 % και 11,6 % αντίστοιχα), με τις δύο ημέρες να μη διαφέρουν θερμοκρασιακά (24°C).

Η ταχύτητα των δοκιμαστικών φορείων αποτέλεσε ακόμη έναν παράγοντα επιρροής των παραμορφώσεων που διερευνήθηκε για το LFS. Προέκυψε ότι ο υποδιπλασιασμός της ταχύτητας προκάλεσε μεγάλη αύξηση στις ανηγμένες παραμορφώσεις και για τους τρεις αισθητήρες που αξιοποιήθηκαν στις διάφορες θέσεις του δαπέδου. Συγκεκριμένα, για την ίδια μέρα δοκιμών (8/11/00), κατά την οποία η ταχύτητα των φορείων μειώθηκε στο μισό, οι παραμορφώσεις αυξήθηκαν κατά 13 % στο βόρειο τμήμα (B-777) και κατά 18 % στο νότιο (B-747), με τους συντελεστές μεταβλητότητας να είναι 41,6 % και 59,2 % αντίστοιχα.

Προκειμένου να υπάρξει ένας απολογισμός σχετικά με την επιρροή της ταχύτητας, του φορτίου και ιδίως της καταπόνησης του δαπέδου από τις υφιστάμενες διελεύσεις έως την τελευταία ημέρα δοκιμών, συγκρίθηκαν οι παραμορφώσεις των ημερών με τις ακραίες τιμές ταχύτητας και φορτίου, αλλά με την ίδια θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, στις 13/6/00 το φορτίο ανά τροχό είχε την αρχική τιμή (200,2 KN) και η ταχύτητα τη μέγιστη τιμή (8 km/h), ενώ η θερμοκρασία της επιφάνειας του καταστρώματος ήταν στους 21 °C. Στις 6/6/01, το δάπεδο είχε την ίδια θερμοκρασία, το φορτίο ανά τροχό έχει τη μέγιστη τιμή (289,1 KN) και η ταχύτητα έχει μειωθεί στο μισό (4 km/h). Η σύγκριση λοιπόν αυτή, φανέρωσε μεγάλη αύξηση των παραμορφώσεων, η οποία οφείλεται κυρίως στην αύξηση του φορτίου με την ταυτόχρονη μείωση της ταχύτητας, καθώς επίσης και στην καταπόνηση του δαπέδου από τις φορτίσεις των φορείων. Συγκεκριμένα, για το βόρειο τμήμα (B-777), το μέσο ποσοστό αύξησης των παραμορφώσεων ήταν 130 %, ενώ για το νότιο (B-747) 99 % (με τους συντελεστές διακύμανσης στο 7,65 % και 13,7 % αντίστοιχα). Συνοψίζοντας, το δάπεδο διερευνήθηκε ως προς πολλούς παράγοντες, εκ των οποίων η θερμοκρασία φάνηκε να είναι ο σημαντικότερος από αυτούς. Ωστόσο, τόσο η αύξηση στο φορτίο, όσο και η μείωση της ταχύτητας του οχήματος επηρέασαν το δάπεδο, αυξάνοντας τις τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων. Μάλιστα, ο συνδυασμός του μέγιστου φορτίου ανά τροχό και της χαμηλότερης ταχύτητας, για τη σχετικά υψηλή θερμοκρασία των 21 °C, έδωσε τις μέγιστες παραμορφώσεις.

Επιπλέον, το γεγονός ότι αξιοποιήθηκαν στοιχεία και από τα δύο τμήματα των δαπέδων, έδωσε την ευκαιρία συγκριτικής ανάλυσης των παραμορφώσεων που προκλήθηκαν από τα δύο φορεία. Με άλλα λόγια, δόθηκε η δυνατότητα σύγκρισης της καταπόνησης του ασφαλτικού σκυροδέματος που προκάλεσαν τα φορεία B-777 και B-747. Όσον αφορά στο δάπεδο LFS, το φορείο τύπου B-747 προκάλεσε μεγαλύτερη φθορά σε

σχέση με το B-777. Συγκεκριμένα, οι παραμορφώσεις που αναπτύχθηκαν από τις διελεύσεις του B-747 ήταν κατά 81 % (μέσο ποσοστό για τις ημέρες που επιλέχθηκαν, με συντελεστή διακύμανσης 16,8 %) μεγαλύτερες από αυτές του B-777. Ωστόσο, ο ρυθμός αύξησης των παραμορφώσεων προέκυψε περίπου ο ίδιος και για τα δύο φορεία, ίσος με 11,5 %. Για το MFS (δάπεδο με στρώση έδρασης μέσης φέρουσας ικανότητας), μέχρι τις πρώτες 4000 περίπου διελεύσεις, προκλήθηκαν κατά 8 % μεγαλύτερες παραμορφώσεις από το φορείο τύπου B-747. Ενώ, απ' τις 5000 διελεύσεις και έπειτα, το B-777 προκάλεσε μεγαλύτερες παραμορφώσεις, με μέσο ποσοστό διαφοράς 7 % (με συντελεστές διακύμανσης 73 και 47 % αντίστοιχα). Επιπλέον, ο ρυθμός αύξησης των παραμορφώσεων από το B-777 είναι 17,7 %, ενώ του B-747 παρουσιάστηκε μικρότερος, ίσος με 14,8 %. Έτσι, ενώ για το LFS είναι ξεκάθαρο ότι το B-747 προκάλεσε σαφώς μεγαλύτερη καταπόνηση, για το MFS φάνηκε ότι το B-777 προξένησε μεγαλύτερη καταπόνηση με την πάροδο του χρόνου. Σχετικά με το HFS (δάπεδο με στρώση έδρασης υψηλής φέρουσας ικανότητας), το B-747 προκάλεσε κατά 9 % μεγαλύτερες παραμορφώσεις από το B-777 (ο συντελεστής διακύμανσης των ποσοστιαίων διαφορών ισούται με 15,8 %). Οι ρυθμοί αύξησης των παραμορφώσεων κυμάνθηκαν σε χαμηλές τιμές και συγκεκριμένα 2,9 % για το B-777 και 3,1 % για το B-747.

Χρήσιμα συμπεράσματα προέκυψαν και από τη σύγκριση των παραμορφώσεων μεταξύ των τριών δαπέδων. Διαπιστώθηκε ότι οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται από το B-777 είναι μεγαλύτερες στο MFS εν συγκρίσει με τις παραμορφώσεις των δύο άλλων δαπέδων. Για την ακρίβεια, οι παραμορφώσεις στο MFS είναι κατά 13,6 % (CoV = 17,8 %) μεγαλύτερες από αυτές του LFS μέχρι τις πρώτες 4000 διελεύσεις περίπου, με το ποσοστό να αυξάνεται σε 40,2 % (CoV = 28,2 %) έπειτα και κατά 59 % αντίστοιχα από το HFS (CoV = 1,5 %), παρόλο που το τελευταίο έχει υποστεί περίπου έξι φορές περισσότερες διελεύσεις. Αντίθετα, οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται από το B-747 στο LFS είναι κατά 48,8 % (CoV = 8,4 %) μεγαλύτερες από τις παραμορφώσεις του MFS μέχρι τις πρώτες 4700 διελεύσεις, με το ποσοστό να μειώνεται σε 22,5 % (CoV = 38,5 %) για τις επόμενες διελεύσεις και κατά 150 % αντίστοιχα από αυτές του HFS (CoV = 0,77 %). Τέλος, η μεγάλη διαφορά στις παραμορφώσεις του δαπέδου HFS σε σχέση με τα δύο άλλα δάπεδα, παρόλο που επαναλαμβάνεται ότι είχε υποστεί περίπου εξαπλάσιες διελεύσεις έως τις συγκεκριμένες ημέρες, έρχεται σε συμφωνία με τα ευρήματα άλλων ερευνητών. Για παράδειγμα, ο Gopalakrishnan (2009) που υποστήριξε ότι για να επιτευχθεί ήβωση της τάξεως των 25,4 mm, απαιτούνται 10^{10} διελεύσεις των φορείων (B-777, B-747), με φορτίο ανά τροχό στους 20,4 t (200,2 kN).

Ένα ακόμη ενδιαφέρον συμπέρασμα προέκυψε από το γεγονός ότι η διαφορά των παραμορφώσεων μεταξύ του MFS και του LFS αυξήθηκε για το βόρειο τμήμα (B-777), καθώς αυξάνονταν ο αριθμός των διελεύσεων. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι ο ρυθμός καταπόνησης του MFS είναι μεγαλύτερος από αυτόν του LFS. Πράγματι, τα ποσοστά του ρυθμού αύξησης των παραμορφώσεων από τις 531 διελεύσεις έως τις 11951 είναι 14,4 % για το MFS και 11 % για το LFS. Ενώ στο νότιο τμήμα (B-747), η διαφορά στις παραμορφώσεις μεταξύ του LFS και του MFS μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των διελεύσεων. Έτσι, φαίνεται ότι και για αυτό το τμήμα, ο ρυθμός καταπόνησης του MFS είναι μεγαλύτερος από αυτόν του LFS. Τα ποσοστά του ρυθμού αύξησης των παραμορφώσεων από τις 531 έως τις 11951 διελεύσεις είναι 11,9 % για το MFS και 8,7 % για το LFS.

Όσον αφορά στις παραμορφώσεις που αναπτύχθηκαν στο μέσον της ασφαλικής στρώσης, παρουσιάστηκαν σταθερά μικρότερες από τις αντίστοιχες στον πυθμένα της και στα τρία δάπεδα. Γεγονός που επιβεβαιώνει ότι τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη αναπτύσσονται

στον πυθμένα των ασφαλικών. Οι τιμές των παραμορφώσεων, λοιπόν, στον πυθμένα των ασφαλικών ήταν αυξημένες κατά 170 % (5/10/00) έως και 681 % (14/4/00), σε σχέση με αυτές στο μέσον, για το δάπεδο LFS (CoV = 35,4 και 31,3 % αντίστοιχα). Για το MFS η διαφορά κυμάνθηκε σε μεγαλύτερα ποσοστά, από 133 % (22/6/00) έως και 799 % (14/4/00), με τους συντελεστές διακύμανσης ίσους με 60,3 και 34,2 %. Τέλος, στο HFS οι τιμές απέχουν λιγότερο και τα ποσοστά ήταν 78 % για τις 16/3/00 και 128 % για τις 5/4/00 και οι συντελεστές μεταβλητότητας έλαβαν τις τιμές 47,5 % και 81,6 %. Αντίθετα, οι θλιπτικές ανηγμένες παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο μέσον, παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές (κατ' απόλυτη τιμή) από τις εφελκυστικές.

Κάποιες γενικές παρατηρήσεις αφορούν στη διακύμανση των παραμορφώσεων, καθώς μεταβάλλεται η εγκάρσια θέση των φορέων στα δάπεδα. Όπως αναμενόταν, η τιμή της παραμόρφωσης που δίδει ο εκάστοτε αισθητήρας, μεγιστοποιείται για τη θέση όπου ο τροχός διέρχεται ακριβώς πάνω από τον αισθητήρα και μειώνεται καθώς αυξάνεται η απόσταση τους. Επιπροσθέτως, η κλίση της μεταβολής των τιμών των παραμορφώσεων είναι μικρότερη προς το εσωτερικό του φορείου, δηλαδή όταν ο αισθητήρας βρίσκεται ανάμεσα στους δύο τροχούς, σε σχέση με την κατεύθυνση εξωτερικά του φορείου. Πιθανό αίτιο αυτής της συμπεριφοράς αποτελεί η αλληλεπίδραση των τροχών, όταν ο αισθητήρας βρίσκεται ανάμεσά τους.

Επόμενο στάδιο της εργασίας αποτέλεσε η χρήση των δεδομένων από τις μη καταστρεπτικές δοκιμές, προκειμένου να εκτιμηθούν τα μέτρα δυσκαμψίας/ελαστικότητας των υλικών των δαπέδων, μέσω της διαδικασίας του ανάστροφου υπολογισμού (back-analysis). Σε κάθε δάπεδο υπολογίστηκαν τα μέτρα ελαστικότητας των υλικών σε τρεις θέσεις (βόρειο, νότιο τμήμα και επί των αξόνων). Έτσι, δόθηκε η δυνατότητα σύγκρισης της δομικής κατάστασης των δαπέδων μεταξύ των δύο τμημάτων και του αξονίου. Η διαφορά στα μέτρα δυσκαμψίας μεταξύ των τμημάτων και του αξονίου υποδεικνύει τη φθορά που προκαλούν τα δύο φορεία, καθώς οι μεταβολές των μέτρων ελαστικότητας του αξονίου είναι αποτέλεσμα αποκλειστικά της θερμοκρασίας. Τα μέτρα ελαστικότητας μειώθηκαν δραστικά με την αύξηση της θερμοκρασίας και του αριθμού των διελεύσεων και στα τρία δάπεδα.

Σχετικά με το LFS (δάπεδο με στρώση έδρασης χαμηλής φέρουσας ικανότητας), τα μέτρα δυσκαμψίας στον άξονα παρουσίασαν όπως αναμενόταν τις μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με αυτές των δύο τμημάτων του δαπέδου. Επιπλέον, οι τιμές στο βόρειο τμήμα (B-777) είναι μεγαλύτερες από αυτές του νότιου (B-747). Δηλαδή, η καταπόνηση που προκαλείται από το B-747 είναι μεγαλύτερη από αυτή του B-777, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται και από τις τιμές των παραμορφώσεων στον πυθμένα των ασφαλικών. Αντίθετα, στο MFS οι τιμές των μέτρων δυσκαμψίας στο νότιο τμήμα (B-747) είναι μεγαλύτερες από αυτές του βόρειου (B-777), κάτι το οποίο αναμενόταν βάσει και των τιμών των παραμορφώσεων στην κρίσιμη θέση του πυθμένα των ασφαλικών. Επίσης για το MFS, οι τιμές στον άξονα παρουσιάζουν μια μικρή αύξηση σε σχέση με τις τιμές του νότιου τμήματος (B-747), χωρίς να παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά, γεγονός που φανερώνει ότι η καταπόνηση στο νότιο τμήμα κυμάνθηκε σε μικρά επίπεδα μέχρι τις συγκεκριμένες ημερομηνίες δοκιμών.

Στο HFS τα μέτρα ελαστικότητας στο νότιο τμήμα (B-747) είναι μεγαλύτερα από αυτά στο βόρειο (B-777), κάτι το οποίο υποδεικνύει μεγαλύτερες παραμορφώσεις στο βόρειο τμήμα. Όμως αυτό έρχεται σε αντίθεση με τη σύγκριση των παραμορφώσεων, όπως κατεγράφησαν από τους αισθητήρες στον πυθμένα των ασφαλικών για τις προηγούμενες

ημέρες δοκιμών. Επιπλέον, τα μέτρα ελαστικότητας στον άξονα έχουν χαμηλότερες τιμές από αυτές του νότιου τμήματος. Πιθανό αίτιο των παραπάνω αναντιστοιχιών είναι το γεγονός ότι στις μέρες που επιλέχθηκαν για την εύρεση των μέτρων ελαστικότητας στο συγκεκριμένο δάπεδο, δεν πραγματοποιήθηκαν δοκιμές από τα φορεία.

Η διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού έδωσε πολλές τιμές μέτρων ελαστικότητας με διαφορετικούς συντελεστές σφάλματος RMSE κάθε φορά. Οι τελικές τιμές επιλέχθηκαν βάσει της εμπειρίας και μετά από συνεκτίμηση όλων των παραγόντων επιρροής (περιβαλλοντικές συνθήκες κλπ), καθώς επίσης και με βάση το κριτήριο του προγράμματος $BAKFAA\ 2\% < CoV(RMSE) < 5\%$. Προκειμένου να αξιολογηθεί η επιρροή που έχει το κριτήριο αυτό στις τιμές των μέτρων ελαστικότητας, συγκρίθηκαν τα μέτρα δυσκαμψίας που προέκυψαν ικανοποιώντας το κριτήριο αυτό, με αυτά που εκτιμήθηκαν με την ελάχιστη τιμή του σφάλματος RMSE και κατ' επέκταση του CoV. Απεδείχθη λοιπόν, ότι οι διαφορές των μέτρων δυσκαμψίας για διαφορετικές τιμές του $CoV(RMSE)$ είναι μικρές. Δηλαδή, η διαφορά των τιμών του CoV δεν επηρέασε με ανάλογο τρόπο τις τιμές των μέτρων δυσκαμψίας που έδωσε το πρόγραμμα. Έτσι, το γεγονός ότι δεν επιλέχθηκαν τα μέτρα ελαστικότητας με τις μικρότερες τιμές του RMSE, δεν αλλοιώνει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, μιας και οι τιμές είναι παραπλήσιες.

Εν συνεχεία χρησιμοποιήθηκαν τα μέτρα ελαστικότητας στο πρόγραμμα προσομοίωσης ABAQUS, ούτως ώστε να υπολογιστούν οι παραμορφώσεις στα πρότυπα προσομοίωσης των δαπέδων, μέσω της θεωρίας των πεπερασμένων στοιχείων. Οι υπολογισμένες παραμορφώσεις των προτύπων προσομοίωσης διέφεραν ανάλογα με τις τιμές των μέτρων ελαστικότητας/δυσκαμψίας, καθώς αυτά μεταβάλλονταν υπό την επιρροή της θερμοκρασίας και της αύξησης του αριθμού των διελεύσεων. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε μείωση των τιμών των μέτρων ελαστικότητας με την αύξηση της θερμοκρασίας και του αριθμού των δοκιμαστικών φορτίσεων, η οποία επέφερε αύξηση στις τιμές των παραμορφώσεων.

Τα πρότυπα προσομοίωσης παρουσίασαν ομοειδή συμπεριφορά με αυτή των δοκιμαστικών δαπέδων. Για παράδειγμα, οι παραμορφώσεις στο βόρειο τμήμα του LFS (B-777) βρέθηκαν μικρότερες από αυτές του νότιου (B-747), ενώ αντίστοιχα του MFS μεγαλύτερες, όπως ακριβώς συνέβη και με τις μετρημένες παραμορφώσεις.

Η σύγκριση μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα των ασφαλικών έδειξε ότι η μεταβολή των αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων (ϵ_c), καθώς μεταβάλλονται τα μέτρα ελαστικότητας είναι ανάλογη εκείνης των μετρημένων (ϵ_m). Με άλλα λόγια, μεταβάλλονται με τον ίδιο τρόπο κάτω από την επιρροή της θερμοκρασίας και του αυξανόμενου αριθμού των διελεύσεων. Επιπλέον και οι υπολογισμένες παραμορφώσεις παρουσιάζουν ανάλογη κλίση μεταβολής. Δηλαδή, προς το εσωτερικό των φορέων (κέντρο βάρους φόρτισης) η κλίση παρουσιάζεται μικρότερη εν συγκρίσει με αυτή προς το εξωτερικό τους. Επίσης, οι μέγιστες τιμές παραμορφώσεων βρέθηκαν για τη θέση όπου η απόσταση τροχού-αισθητήρα μηδενίζεται. Ενώ, οι παραμορφώσεις μειώνονταν, καθώς ο τροχός απομακρύνονταν από τον αισθητήρα.

Εξαίρεση στα παραπάνω αποτελούν οι παραμορφώσεις που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη μέθοδο στο μέσον των ασφαλικών. Καθότι, διαπιστώθηκε ότι αναπτύχθηκαν κυρίως θλιπτικές παραμορφώσεις, με τις τιμές των εφελκυστικών να κυμαίνονται σε πολύ χαμηλές τιμές σε σύγκριση με τις μετρημένες. Επιπλέον, ιδίως για το LFS, η μεταβολή των παραμορφώσεων για τα ίχνη εκείνα όπου ο αισθητήρας βρίσκεται ανάμεσα στους τροχούς,

δεν ήταν όμοια με αυτή που συνέβη στην πράξη. Αφού, η μέγιστη τιμή της εφελκυστικής παραμόρφωσης δεν παρουσιάστηκε για τη θέση στην οποία ο τροχός βρίσκεται πάνω από τον αισθητήρα, όπως αναμενόταν. Το ίδιο παρατηρήθηκε και για το MFS στις πρώτες δύο ημέρες που υπολογίστηκαν οι παραμορφώσεις.

Τελικό στάδιο της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η στατιστική επεξεργασία των αναλυτικά υπολογισμένων και των πειραματικά μετρημένων παραμορφώσεων, μέσω της μεθόδου της γραμμικής συσχέτισης και του συντελεστή RMSPE. Μέσω του συντελεστή προσδιορισμού R^2 , ξεκαθαρίζεται αν οι εκτιμημένες τιμές μεταβάλλονται με τον ίδιο τρόπο που μεταβάλλονται και οι μετρημένες, από ίχνος σε ίχνος. Ενώ, μέσω του RMSPE φαίνεται το ποσοστό σφάλματος της εκτίμησης των παραμορφώσεων και εμμέσως υποδεικνύεται η διαφορά μεταξύ των τιμών.

Όσον αφορά στη γραμμική συσχέτιση των παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος, κρίνεται πολύ ισχυρή και στα τρία δάπεδα, αφού η χαμηλότερη τιμή του R^2 είναι 0,90.

Από την άλλη μεριά, ιδίως για τα δάπεδα LFS και MFS, η γραμμική συσχέτιση των παραμορφώσεων στο μέσον κρίνεται ως πολύ ασθενής. Δηλαδή, η μεταβολή των υπολογισμένων παραμορφώσεων από ίχνος σε ίχνος, δεν “ακολουθήσε” τη μεταβολή των μετρημένων αντίστοιχα.

Αναφορικά με το συντελεστή RMSPE, προέκυψε ότι κατά κανόνα αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των διελεύσεων. Εξαιρέση αποτέλεσε το βόρειο τμήμα (B-777) του δαπέδου MFS (CBR 8) που η μέγιστη τιμή προέκυψε για την πρώτη ημέρα. Γενικώς, οι τιμές του συντελεστή είναι παραπλήσιες για ημέρες που δεν απέχουν πολύ μεταξύ τους.

Επιπλέον, η μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ των μετρημένων και εκτιμημένων παραμορφώσεων παρουσιάστηκε για τις υψηλότερες τιμές τους, δηλαδή για τα ίχνη εκείνα που η απόσταση τροχού-αισθητήρα ελαχιστοποιείται.

Οι παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλτικών του βόρειου τμήματος (B-777) καθενός δαπέδου, παρουσίασαν μικρότερες τιμές σφάλματος εν συγκρίσει με τις αντίστοιχες του νότιου τμήματος (B-747) των τριών δαπέδων. Οι μικρότερες τιμές σφάλματος προέκυψαν για το βόρειο τμήμα (B-777) του δαπέδου με στρώση έδρασης μέσης φέρουσας ικανότητας (MFS), οι οποίες ήταν κοντά στο 15 %, με εξαίρεση την πρώτη μέρα που το σφάλμα ήταν της τάξεως του 27,5 %, δηλαδή ποσοστά σχετικά ικανοποιητικά. Με άλλα λόγια, η μέθοδος προσομοίωσης εκτίμησε ακριβέστερα τις παραμορφώσεις από τη διάταξη του B-777. Ενώ σε όλες τις άλλες θέσεις των δαπέδων LFS και MFS (B-747), η ελάχιστη τιμή του συντελεστή RMSPE προέκυψε μεγαλύτερη του 41 %, φτάνοντας μέχρι και 68,1 %. Το γεγονός αυτό, καθιστά την ακρίβεια της μεθόδου για τις θέσεις αυτές χαμηλή και κατ' επέκταση τις διαφορές των τιμών των μετρημένων και υπολογισμένων παραμορφώσεων σημαντικές (της τάξεως του 71,2 % κατ' ελάχιστον, έως και 218,4 %). Στο δάπεδο HFS (CBR 20) τα αντίστοιχα ποσοστά του RMSPE για τον πυθμένα των ασφαλτικών ήταν από 18,4 έως και 28,6 %. Το δάπεδο αυτό παρουσίασε το χαμηλότερο σφάλμα για το νότιο τμήμα (B-747) σε σχέση με τα άλλα δύο δάπεδα.

Από την άλλη μεριά, η εκτίμηση των παραμορφώσεων στο μέσον του ασφαλτοσκυροδέματος παρουσίασε εξαιρετικά υψηλές τιμές σφάλματος και για τα τρία δάπεδα. Συγκεκριμένα, η χαμηλότερη τιμή για τη συγκεκριμένη θέση ήταν 52,2 % (LFS) και η υψηλότερη ξεπέρασε το 95 % (HFS). Έτσι, οι τιμές των μετρημένων παραμορφώσεων έφτασαν να είναι μέχρι και 25 φορές μεγαλύτερες από τις υπολογισμένες.

Προφανώς δεν αναμένονταν πλήρης ταύτιση μεταξύ των υπολογισμένων και των μετρημένων παραμορφώσεων, αφού οι διάφορες παραδοχές που έγιναν κατά τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού, δε συνάδουν με αυτά που ίσχυσαν επί του πρακτέου κατά τις δοκιμαστικές φορτίσεις.

Για παράδειγμα, ο υπολογισμός των μέτρων ελαστικότητας από το πρόγραμμα ΒΑΚΦΑΑ θεωρεί τη συμπεριφορά των υλικών ως γραμμική ελαστική. Ως εκ τούτου, στο πρόγραμμα προσομοίωσης εισάγονται τα συγκεκριμένα γραμμικά ελαστικά μέτρα δυσκαμψίας. Όμως, από τη διεθνή βιβλιογραφία προκύπτει ότι η θεώρηση των μέτρων ελαστικότητας ως μη γραμμικά στις μεθόδους προσομοίωσης, δίδει τιμές παραμορφώσεων που παρουσιάζουν μικρότερη απόκλιση από τις μετρημένες, σε σχέση με τις τιμές που προκύπτουν από τη χρήση γραμμικών μέτρων ελαστικότητας.

Επιπροσθέτως, οι τιμές που εξάγονται από το πρόγραμμα προσομοίωσης αφορούν μία μόνο διέλευση και είναι επί της ουσίας στιγμιαίες. Αντιθέτως, οι μετρημένες τιμές προέκυψαν ως ο μέσος όρος των μέγιστων τιμών πολλών διελεύσεων του οχήματος, για το ίδιο ίχνος. Έτσι, είναι λογικό να υπάρχουν αποκλίσεις, αφού η μετρημένη τιμή εκφράζει ένα σύνολο φορτίσεων (λαμβάνοντας τις μέγιστες τιμές τους) και δε μπορεί να ταυτιστεί με τη μεμονωμένη φόρτιση που επιβάλλεται στο πρόγραμμα προσομοίωσης. Ιδίως για το LFS όπου ο αριθμός των διελεύσεων για ορισμένες ημέρες είναι αρκετά μεγάλος, αυξάνεται η διακύμανση των μέγιστων μετρημένων τιμών.

Επιπλέον, στο πρόγραμμα προσομοίωσης δε λαμβάνεται υπόψη ο παράγοντας της ταχύτητας του οχήματος. Δηλαδή, στα πρότυπα προσομοίωσης γίνεται στατική και όχι δυναμική ανάλυση, η οποία προκαλεί την ανάπτυξη διατμητικών τάσεων.

Στην πράξη, η διέλευση καθενός από τους άξονες ενός φορείου, επιφέρει ολοένα και μεγαλύτερη παραμόρφωση στο οδόστρωμα. Δηλαδή, στην περίπτωση ενός φορείου με διπλό τροχό-τριπλό άξονα, ο τελευταίος άξονας θα προκαλέσει μεγαλύτερο μέγεθος παραμορφώσεων από το δεύτερο και ο δεύτερος αντίστοιχα από τον πρώτο. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στις ιξωδοελαστικές ιδιότητες των ασφαλτικών υλικών, καθώς το οδόστρωμα δεν προλαβαίνει να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση (προ φόρτισης) πριν φορτιστεί εκ νέου απ' τον επόμενο κινούμενο άξονα (Gopalakrishnan and Thompson, 2004 και Gopalakrishnan et al., 2006). Όμως, το φαινόμενο αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα κατασκευαστικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία θεωρούν ότι ο πρώτος και ο τελευταίος άξονας του φορείου με την προαναφερθείσα διάταξη, προκαλούν την ίδια παραμόρφωση στο κατάστρωμα, αφού τα φορτία λαμβάνονται υπόψη ως στατικά και σε απόλυτη συμμετρία.

Ακόμη, παρουσιάζεται διαφορά στην αποτύπωση του τροχού στο μοντέλο προσομοίωσης (η επιφάνεια επαφής τροχού-οδοστρώματος θεωρήθηκε κυκλική), σε σχέση με την πραγματική κατά τις πειραματικές δοκιμές. Επιπλέον, δε θα πρέπει να αποκλειστούν τυχόν ανακρίβειες από την τράπεζα δεδομένων της εγκατάστασης (π.χ. τιμές πιέσεων ελαστικών κλπ).

Σχετικά με το κατά πόσο επηρεάζει τα αποτελέσματα η απόκλιση της θέσεως εφαρμογής FWD από τον αισθητήρα, δεν προέκυψε κάποια συγκεκριμένη τάση. Για παράδειγμα, στο νότιο τμήμα του MFS (B-747), όπου υπάρχει απόκλιση μεταξύ αισθητήρα – θέσεως FWD, τα σφάλματα εκτίμησης ήταν μεγαλύτερα από ότι στο βόρειο τμήμα (B-777) που υπάρχει ταύτιση. Όμως, η ίδια συμπεριφορά παρατηρήθηκε και στο LFS, όπου οι θέσεις μέτρησης FWD ταυτίζονται με τις θέσεις των αισθητήρων και στα δύο τμήματα (ως προς x,

γ). Ενώ, στο HFS οι τιμές των σφαλμάτων ήταν παραπλήσιες και στα δύο τμήματα, αν και στο νότιο ο αισθητήρας δε βρίσκεται ακριβώς κάτω από τη θέση εφαρμογής FWD.

Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα της παρούσας ανάλυσης δεν ήταν μονοσήμαντα. Γενικώς τα ποσοστά σφάλματος, ιδίως για το δάπεδο με στρώση έδρασης χαμηλής φέρουσας ικανότητας, κυμάνθηκαν σε υψηλά ποσοστά. Υπάρχουν όμως ενδείξεις για μείωση του σφάλματος, καθώς η φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης των δαπέδων αυξάνεται. Προκύπτει, λοιπόν, η ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση της μεθόδου προσομοίωσης, ιδίως για τα δάπεδα με υψηλότερες τιμές φέρουσας ικανότητας των στρώσεων έδρασής τους.

Απεδείχθη επίσης, ότι η εκτίμηση των παραμορφώσεων στις μη κρίσιμες θέσεις των προτύπων (μέσον ασφαλτικού σκυροδέματος) θα πρέπει να αποφεύγεται, καθότι είναι ιδιαίτερα ανακριβής. Την ανακρίβεια αυτή άλλωστε στις μη κρίσιμες θέσεις την έχουν τονίσει και άλλοι ερευνητές (Kim, 2007 και Kim et al., 2008).

Δε θα πρέπει να παραληφθεί το γεγονός ότι η εγκατάσταση είναι πλήρως στεγασμένη και ως εκ τούτου τα δάπεδα δεν υπόκεινται στις πραγματικές περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. βροχή, χιόνι, παγετός). Θεωρείται λοιπόν, ότι τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων θα ήταν διαφορετικά αν τα δάπεδα εκτίθεντο σε ελεύθερο περιβάλλον, όπως συμβαίνει στην πράξη με όλα τα οδοστρώματα των αεροδρομίων.

Καταλήγοντας, προκύπτει η ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση της μεθόδου προσομοίωσης με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων, αφού οι πτυχές που επηρεάζουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων είναι πολλές. Έντονο ενδιαφέρον θα είχε η μελέτη της επιρροής των διαφόρων σχημάτων του αποτυπώματος του τροχού στην απόκριση των δαπέδων (κυκλικό, ελλειψοειδές, κλπ). Βασικό πεδίο διερεύνησης αποτελεί επίσης η εξέταση της συμπεριφοράς των προτύπων προσομοίωσης σε διαφορετικές διαμορφώσεις τροχών (μεγαλύτερος αριθμός τροχών, διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των τροχών, κλπ). Επαναλαμβάνεται, όπως έχει τονιστεί και από τη διεθνή βιβλιογραφία, η απαίτηση για διερεύνηση της μεθόδου υπό τη θεώρηση της συμπεριφοράς των ασύνδετων υλικών ως μη γραμμική ελαστική. Χρήσιμο θα ήταν η αντίστοιχη ερευνητική μεθοδολογία να εφαρμοστεί και στα δύσκαμπτα δάπεδα της εγκατάστασης NARTF και να συγκριθεί η συμπεριφορά μεταξύ των δύο ειδών δαπέδων (εύκαμπτα, δύσκαμπτα). Τέλος, αντίστοιχη ανάλυση θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί για τις παραμένουσες παραμορφώσεις των δαπέδων σχετικά με τη διερεύνηση της φθοράς τους.

BIBΛIOΓPAΦIA – ANAΦOPES

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

Ahlvin, R.G. (1991). "Origin of developments for structural design of pavements", Technical Report GL-91-26, Waterways Experiment Station, US Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS, USA.

Al-Qadi, I. L., Nassar, W. M., Loulizi, A., Flintsch, G. W., and Freeman, T. E. (2000). "Flexible Pavement Instrumentation at the Virginia Smart Road", *CD-ROM Proceedings of the 79th Annual Meeting of Transportation Research Board*, Washington, D.C., USA

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (1986). "Guide for Design of Pavement Structure", Vol. 2.

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).

Anderson, D. A., and Sebaaly, P. E. (1989). "In Situ Strain Measurements in Hot-Mix Asphalt Pavements", *Proceedings of the First International Symposium on the State of the Art of Pavement Response Monitoring Systems for Roads and Airports, Lebanon, NH*.

Bhattacharjee, S., Gould, J. S., Mallick, R. B., and Hugo, F. (2004). "Use of MMLS3 Scaled Accelerated Loading for Fatigue Characterization of Hot Mix Asphalt _HMA_ in the laboratory", *Proceedings of the Second International Conference on Accelerated Pavement Testing*, University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA.

Ceylan, H. (2002). "Analysis and Design of Concrete Pavement Systems Using Artificial Neural Networks", Ph.D Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, USA.

Ceylan, H., Guclu, A., Tutumluer, E., Thompson, M.R. (2005). "Backcalculation of full-depth asphalt pavement layer moduli considering nonlinear stress-dependent subgrade behavior", *International Journal of Pavement Engineering*, 6(3):171-182.

Deacon, J. A. (1971). "Equivalent Passages of Aircraft with Respect to Fatigue Distress of Flexible Airfield Pavements", *Proceedings of AAPT*, Vol. 40.

Donovan, 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, MN, USA.

Erlingsson, S., and Ingason, T. (2004). "Performance of Two Thin Pavement Structures during Accelerated Pavement Testing Using a Heavy Vehicle Simulator", *Proceedings of the Second International Conference on Accelerated Pavement Testing*, University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA.

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.

Federal Aviation Administration (FAA), National Airport Pavement Test Facility (NAPTF) webpage <http://www.airporttech.tc.faa.gov/naptf/index.asp>, FAA Airport Technology, Research and Technology Branch, AAR-410, William J. Hughes Technical Center, Atlantic City International Airport, New Jersey

Garg, N. (2001). "Posttrafficking Testing at the National Airport Pavement Test Facility: Test Item MFC", Report DOT/FAA/AR-TN01/49, Federal Aviation Administration, Atlantic City, NJ, USA.

Garg, N., and Gordon F. Hayhoe. (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 Hayhoe G. F. (2008). "Permanent Deformation Behavior of the Granular Layers Tested at the FAA's National Airport Pavement Test Facility", 82nd Annual Meeting Transportation Research Board, Washington, D.C., USA.

Garg, N., Marsey, W.H. (2002). "Comparison Between Falling Weight Deflectometer and Static Deflection Measurements on Flexible Pavement at the National Airport Pavement Facility (NAPTF)", *Proceedings of the 2002 FAA Airport Technology Conference, Chicago, IL, USA.*

Gervais, E. L., Hayhoe, G. F., and Garg, N. (2003). "Towards a Permanent ACN Solution for 6-Wheel Landing Gear Aircraft", *Proceedings of the 2003 ASCE Airfield Pavement Specialty Conference, Las Vegas, NV, USA.*

Ghuzlan, K. A. and Carpenter, S. H. (2000), "An Energy-Derived/Damage-Based Failure Criteria for Fatigue Testing", *Proceedings of the 79th TRB Annual Meeting, Washington, D.C., 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.

Gomez-Ramirez, F.M., Thompson, M.R. (2002). "Characterizing Aircraft Multiple Wheel Load Interaction for Airport Flexible Pavement Design", FAA COE Research Report No.20, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, 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. (2005). "Prediction of National Airport Pavement Test Facility Pavement Layer Moduli from Heavy Weight Deflectometer Test Data Using Artificial Neural Networks", *Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa.*

Gopalakrishnan, K. (2008). "Evaluation of accelerated deterioration in NAPTF flexible test pavements", *Journal of Zhejiang university SCIENCE A.*

Gopalakrishnan, K. (2009). "Early-Life Permanent Deformation Characteristics of High-Strength Subgrade Full-Scale Test Pavements", *The Open Transportation Journal - Open Transport J*, vol. 3, no. 1, pp. 63-69.

Gopalakrishnan, K., and Thompson M.R. (2004). "Performance Analysis of Airport Flexible Pavement Subjected to New Generation Aircraft", FAA Center of Excellence (COE) Report No.

27, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, USA.

Gopalakrishnan, K., and Thompson, M. R. (2003). "Rutting Study of NAPTF Flexible Pavement Test Sections", *Proceedings of the 2003 ASCE Airfield Pavement Specialty Conference*, Las Vegas, NV, 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 2004 FAA Airport Technology Transfer Conference*, Atlantic City, NJ, 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.

Gopalakrishnan, K., Thompson, M.R., and A. Manik (2007), "Rapid Finite-Element Based Airport Pavement Moduli Solutions using Neural Networks", *International Journal of Information and Mathematical Sciences* 3:1

Gopalakrishnan, K., Thompson, M.R., and Manik A. (2006). "Multi-Depth Deflectometer Dynamic Response Measurements under Simulated New Generation Aircraft Gear Loading", *Journal of Testing and Evaluation*, Volume 34, Issue 6.

Groenendijk, J. (1998). "Accelerated Testing and Surface Cracking of Asphaltic Concrete Pavements", PhD Dissertation, Delft University of Technology, Netherlands.

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. (2003). "Posttraffic Testing on Medium-Strength Subgrade Flexible Pavements at the National Airport Pavement Test Facility (NAPTF)", *Proceedings of the Airfield Pavement Specialty Conference*, ASCE, Reston, Virginia, USA

Hayhoe, G. F., and Garg, N. (2003). "Posttraffic Testing on Medium-Strength Subgrade Flexible Pavements at The National Airport Pavement Test Facility", *Proceedings of the 2003 ASCE Airfield Pavement Specialty Conference*, Las Vegas, NV, USA.

Hayhoe, G. H. (2004). "Traffic Testing Results from the FAA's National Airport Pavement Test Facility", *Proceedings of the Second International Conference on Accelerated Pavement Testing*, University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA.

Hayhoe, G.F., Garg, N., and Dong M. (2003). "Permanent Deformations During Traffic Tests on Flexible Pavements at the National Airport Pavement Test Facility", *Proceedings of the 2003 Airfield Pavement Specialty Conference (APSC)*, Las Vegas, Nevada, USA.

Hicks, R.G. (1970). "Factors Influencing the Resilient Properties of Granular Materials", Ph.D Thesis, University of California, Berkeley, California, USA.

Huebner K.H. et al. (2001). "The Finite Element Method for Engineers", 4th Edition, New York, John Wiley & Sons, Inc.

Huekelom, W. and Klomp, A.J.G. (1962). "Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavement During and After Construction", *Proceedings International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavement*, Ann Arbor, MI.

- Huhtala, M., and Pihlajamäki, J. (1991). "Strain and Stress Measurements in Pavements", *Proceedings of the Second International Symposium on Pavement Response Monitoring Systems for Roads and Airfields*, Hanover, NH.
- 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 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, Goa, India.
- Krarpup, J. (1991). "Instrumentation for a Full-Scale Pavement Test in the Danish Road Testing Machine", *Proceedings of the Second International Symposium on Pavement Response Monitoring Systems for Roads and Airfields*, Hanover, NH.
- Leigh, J. W., and Roadway, B. (1998). "Layered Elastic Pavement Design-Recent Developments", *Proceedings of 19th ARRB Conference*, Sydney, Australia.
- McQueen, R. D., Marsey, W., and Arze, J. M. (2001). "Analysis of Nondestructive Data on Flexible Pavement Acquired at the National Airport Pavement Test Facility", *Proceedings of the 2001 ASCE Airfield Pavement Specialty Conference*, Chicago, IL, USA.
- Mohammad, F. A., Collop, A. C., and Brown, S. F. (2005). "Effects of Surface Cracking on Responses in Flexible Pavements", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport*, Vol. 158, No. TR2.
- Mojarrad, H. (2011). "Three – Dimensional Nonlinear Finite Element Analysis of Airport Pavements", PhD Dissertation, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina.
- Nazarian, S. and K. M. Boddspati. (1995). "Pavement-Falling Weight Deflection Interaction Using Dynamic Finite Element Analysis," In *Transportation Research Record 1449*, TRB, National Research Council, Washington, D., C., 123-133.
- NCHRP (National Co-operative Highway Research Program). (1990). "Calibrated Mechanistic Structural Analysis Procedures for Pavements", Final Report, National Research Council, Washington, D.C., p.1-26.
- Raad, L. and Figueroa, J.L. (1980). "Load response of transportation support systems", *The Journal of Transportation Engineering ASCE*, 16(TE1):111-128.
- Rahman, M.T., Mahmud, K., Ahsan, S. (2011). " Stress – Strain Characteristics of Flexible Pavement Using Finite Element Analysis", *International Journal of Civil and Structural Engineering*, volume 2, no 1.
- 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.
- Sebaaly, P. E., and Tabatabaee, N. (1991). "Field Evaluation of Strain Gauges in Asphalt Concrete Pavements", *Proceedings of the Second International Symposium on Pavement Response Monitoring Systems for Roads and Airfields*, Hanover, NH.

- Sharp, K. G., and Johnson-Clarke, J. R. (1997). "Australian Experience in the Accelerated Testing of Pavements", *Proceedings of the Thirteenth International Road Federation (IRF) World Meeting*, Toronto, Canada.
- Spiegel, R. M. (1975). "Probability and Statistics", New York, McGraw – Hill. Ελλ. Μετάφραση (1977), "Πιθανότητες και Στατιστική", (Μετάφραση Περισίδης Σ.), Αθήνα, Εκδοτική Εταιρεία ΕΣΠΙ.
- Sukumaran, B., Chamala, N., Willis, M., Davis, J., Jurewicz, S. and Kyatham, V. (2004). "Three Dimensional Finite Element Modeling of Flexible Pavements", *Proceedings of the FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference Atlantic City*, New Jersey, USA.
- Teubert, C. A., Brill, D. R. and Jia, Q. (2002). "Data Management at the National Airport Test Facility (NAPTF)", *Proceeding of the 2002 Federal Aviation Administration Airport Technology Transfer Conference*.
- Thompson, M. R., and Nauman, D. (1993). "Rutting Rate Analysis of the AASHO Road Test Flexible Pavements", Transportation Research Record 1384, Transportation Research Board, Washington, D.C., USA.
- Thompson, M.R., and Garg, N. (1999). "Wheel Load Interaction: Critical Airport Pavement Responses", *Proceedings of the Federal Aviation Administration Airport Technology Transfer Conference*, Atlantic City, NJ, USA.
- Thompson, M.R., and Robnett, Q.L., (1979). "Resilient properties of subgrade soils", *The Journal of Transportation Engineering ASCE*, 105(1):71-89.
- Thompson, M.R., Tutumluer, E., and Bejarano, M. (1998). "Granular Material and Soil Moduli Review of the Literature", FAA COE Research Report No.1, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, USA.
- Ullidtz, P., and Larsen, E.H.J. (1989), "State-of-the-Art Stress, Strain, and Deflection Measurements", *Proceedings of the First International Symposium on the State of the Art of Pavement Response Monitoring Systems for Roads and Airports*, Lebanon, NH.
- US COE (2001), "O&M: PAVER, Asphalt surfaced airfields pavement condition index (PCI)", UFC Manual 3-270-06, U.S. Army Corps of Engineers (Preparing Activity).
- 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.
- Vogelzang, C. H., and Bouman, S. R. (1991). "In Situ Stress and Strain Measurements in Dynamically Loaded Asphalt Pavement Structures," *Proceedings of the Second International Symposium on Pavement Response Monitoring Systems for Roads and Airfields*, Hanover, NH.
- 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.
- Xu, B., Ranjithan, S.R., and Kim, Y.R. (2001). "Development of Relationships Between FWD Deflections and Asphalt Pavement Layer Condition Indicators", *81st Annual Meeting of the TRB*, Washington, D.C., 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.

Αράβας, Ν. (2001). "Εγχειρίδιο χρήσης του εκπαιδευτικού λογισμικού Abaqus – Οδηγός χρήσης από απόσταση", Κέντρο Δικτύου Τηλεματικής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.

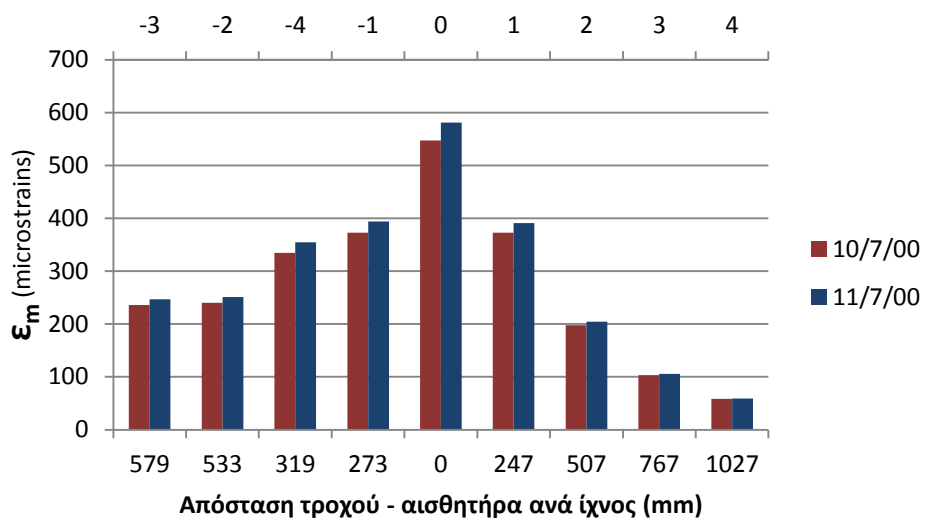
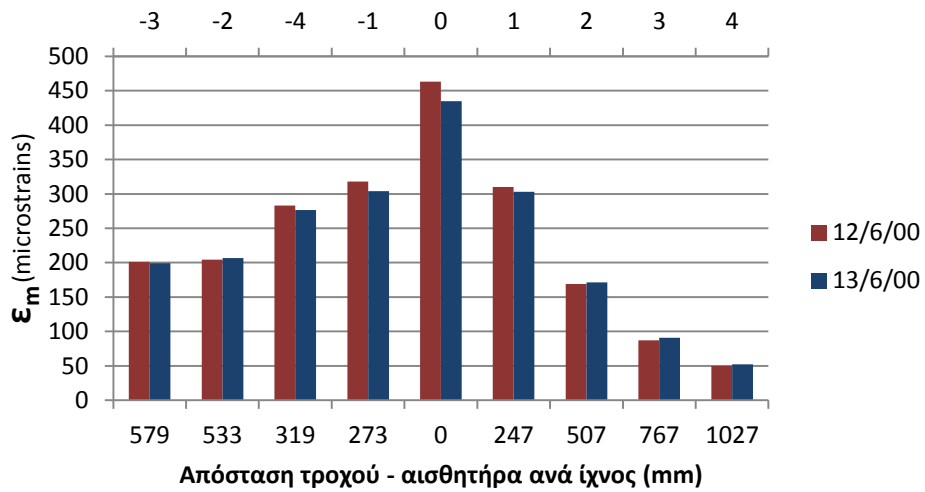
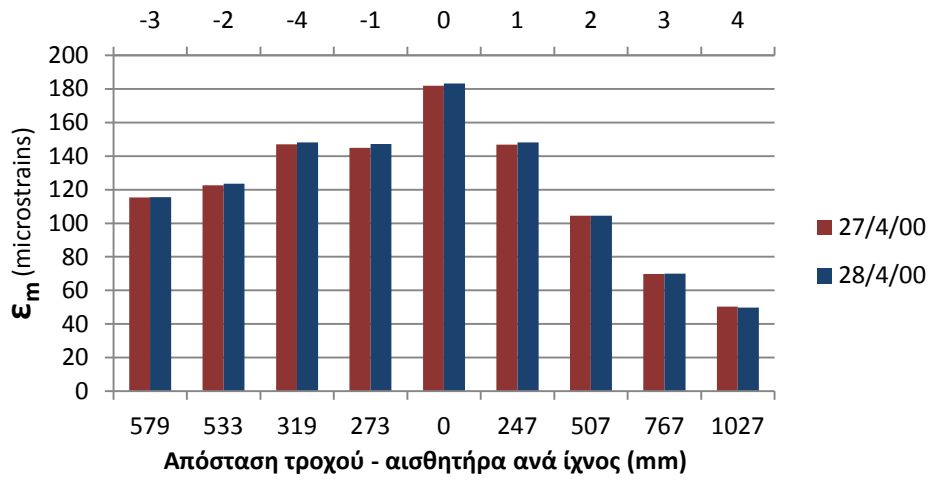
Λοΐζος, Α. (2011). "Οδοστρώματα – Σημειώσεις Μαθήματος", Αθήνα, Έκδοση ΕΜΠ.

Λοΐζος, Α. (2011). "Οδοστρώματα Οδών και Αεροδρομίων – Σημειώσεις Μαθήματος", Αθήνα, Έκδοση ΕΜΠ.

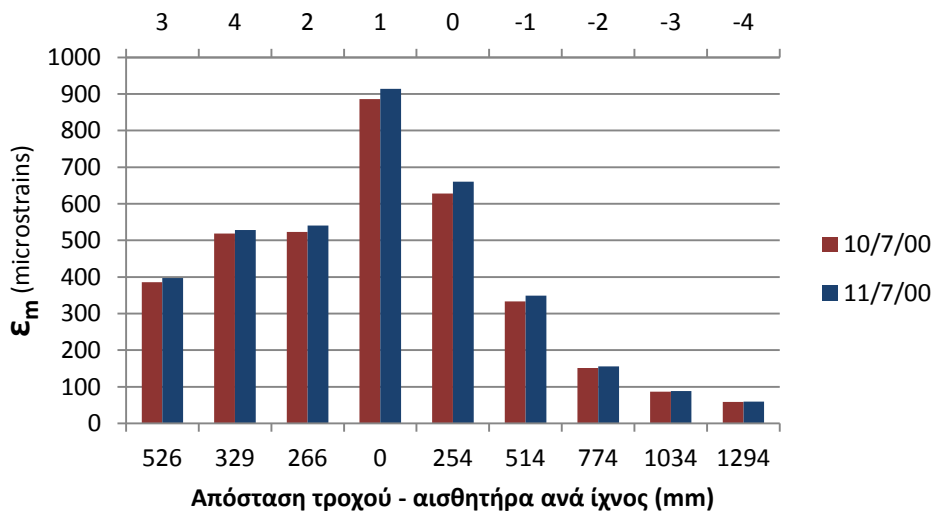
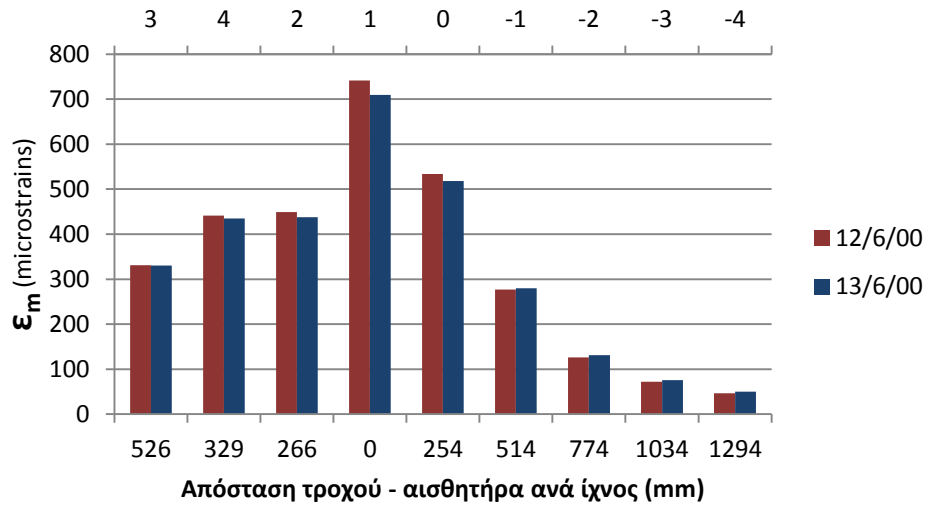
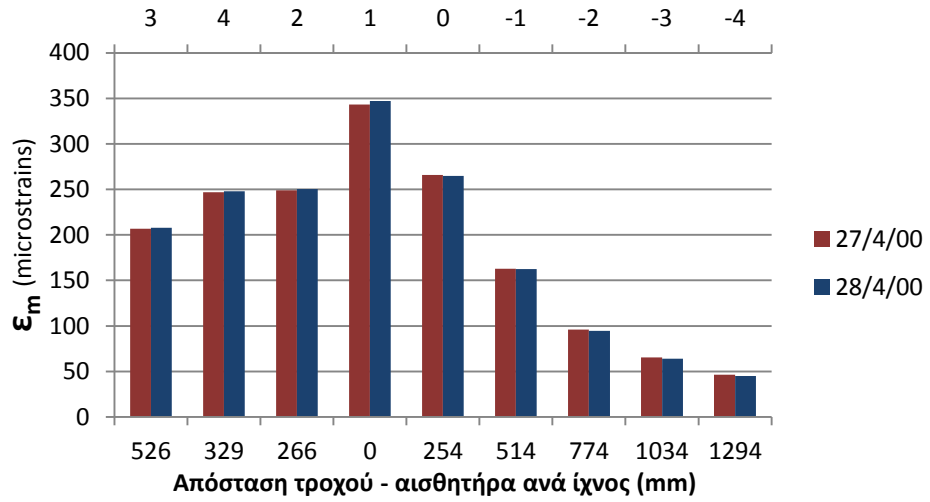
Σακελλαρίου Μ.Γ. και Κοζάνης Σ. (1997). "Ανάπτυξη Προγράμματος Πεπερασμένων Στοιχείων", Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων, ΕΜΠ, Αθήνα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

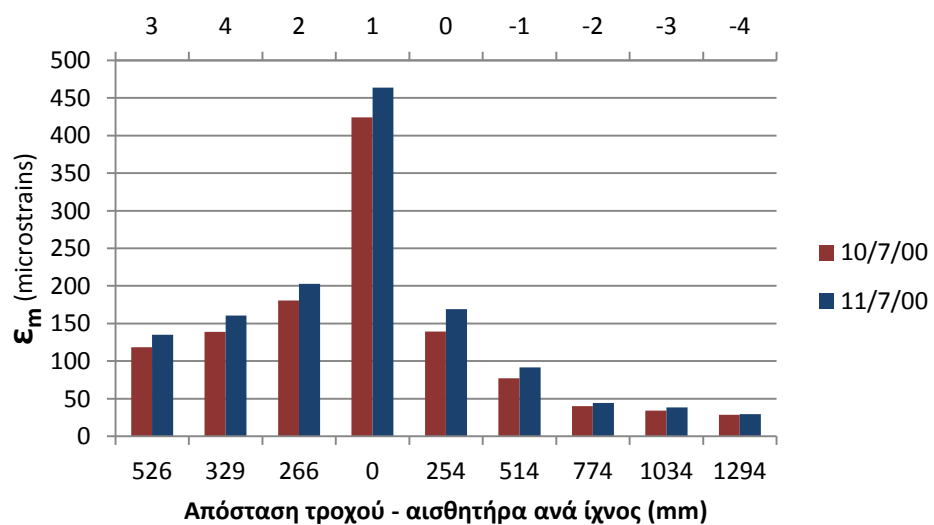
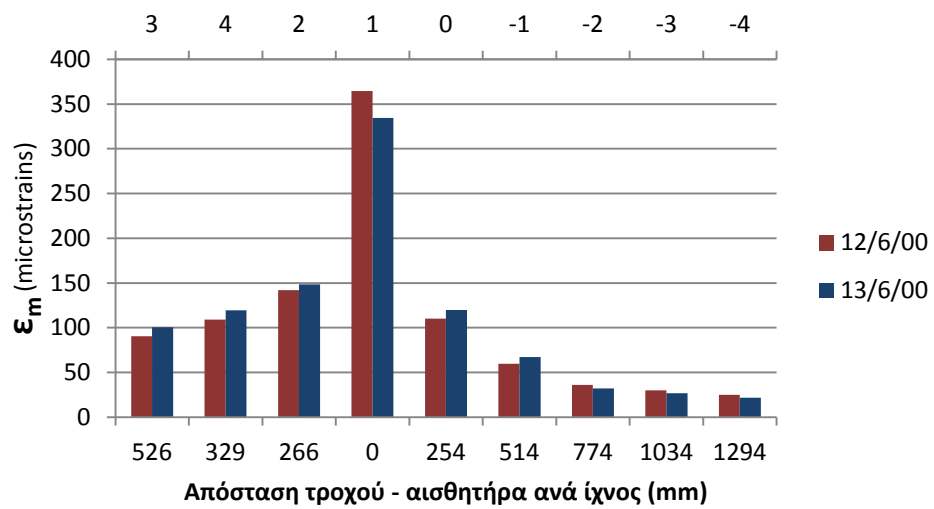
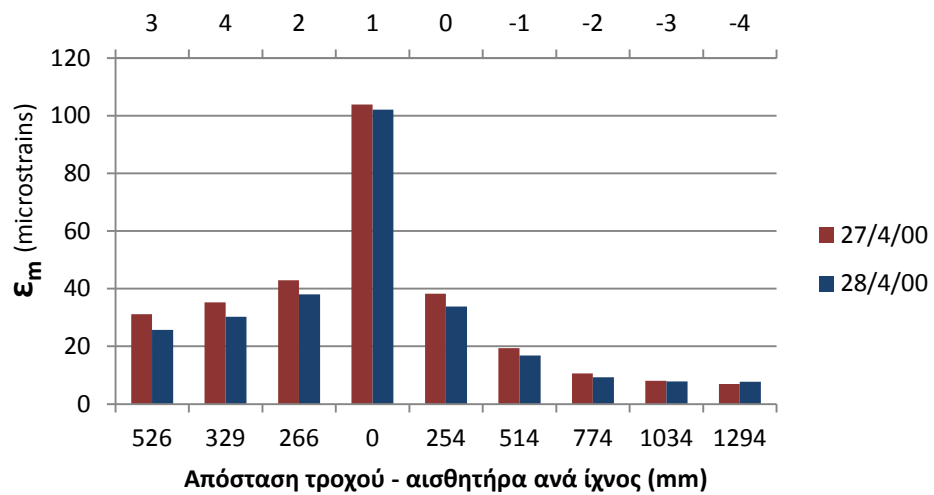
ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ



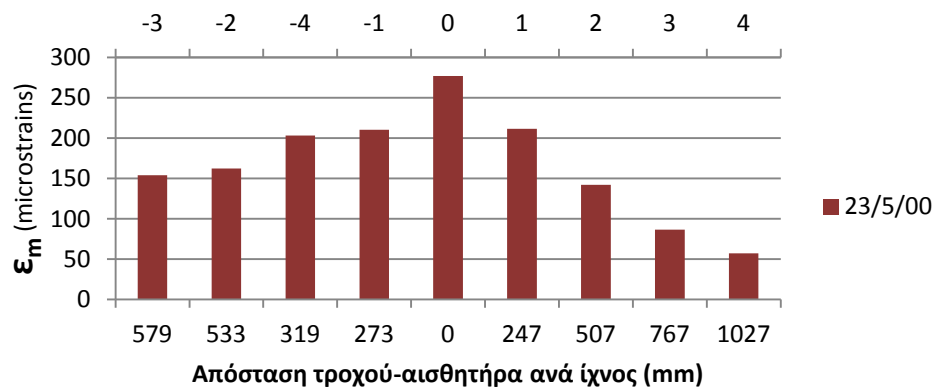
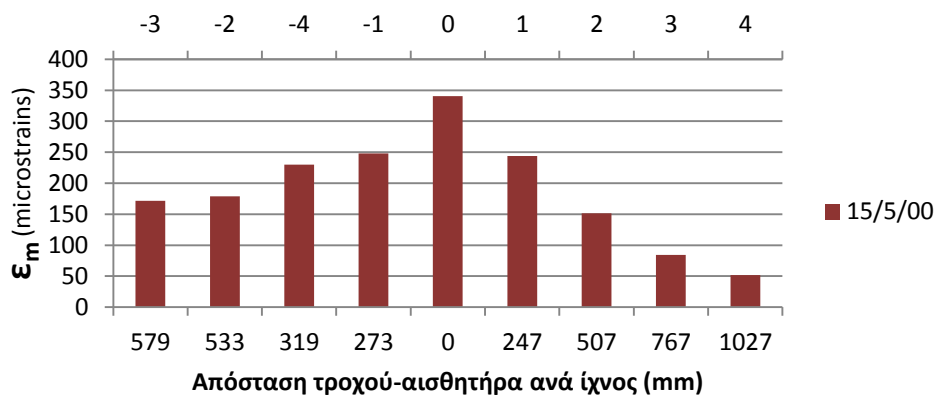
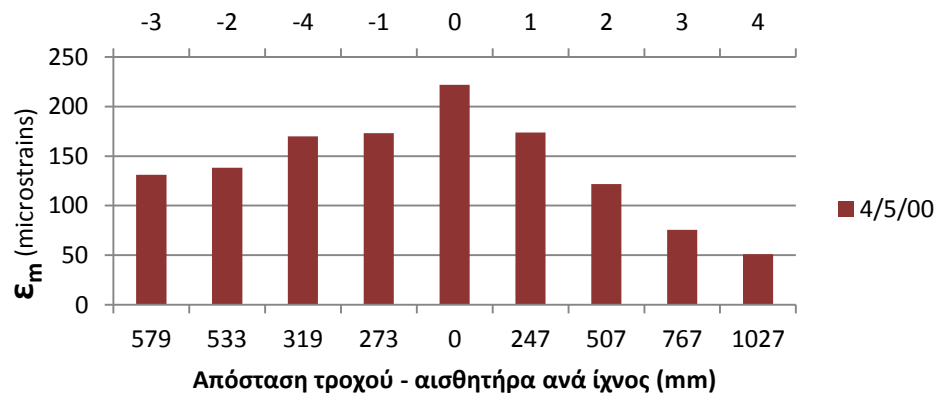
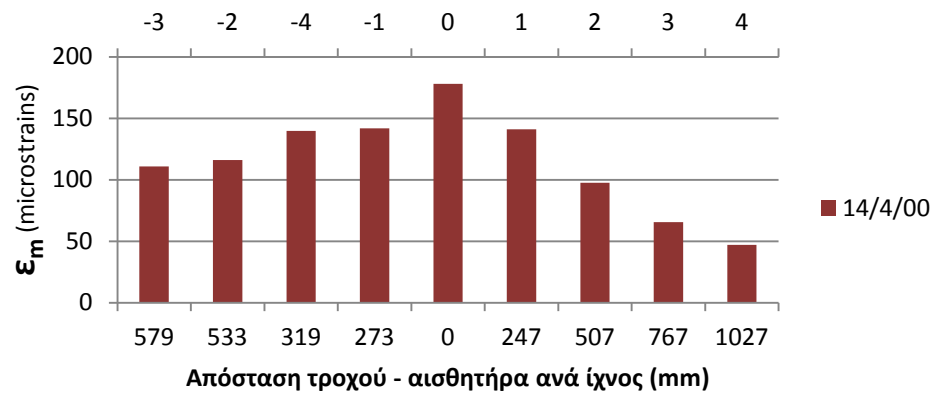
Εικόνα Π6.1 Δάπεδο LFS, βόρειο τμήμα (B-777)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για διαδοχικές ημέρες



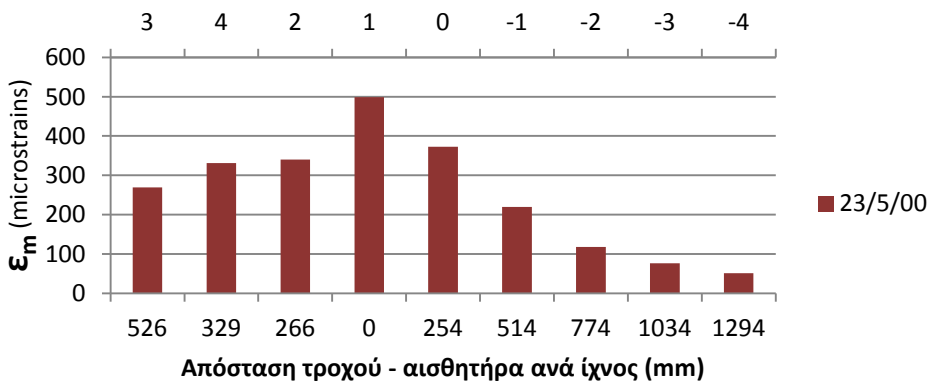
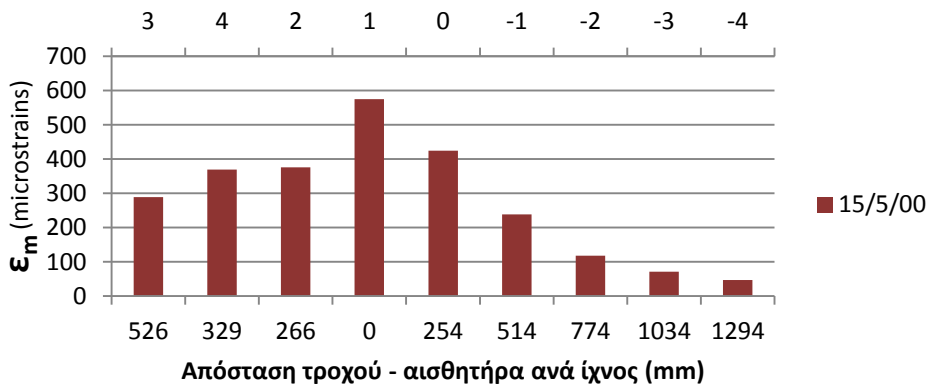
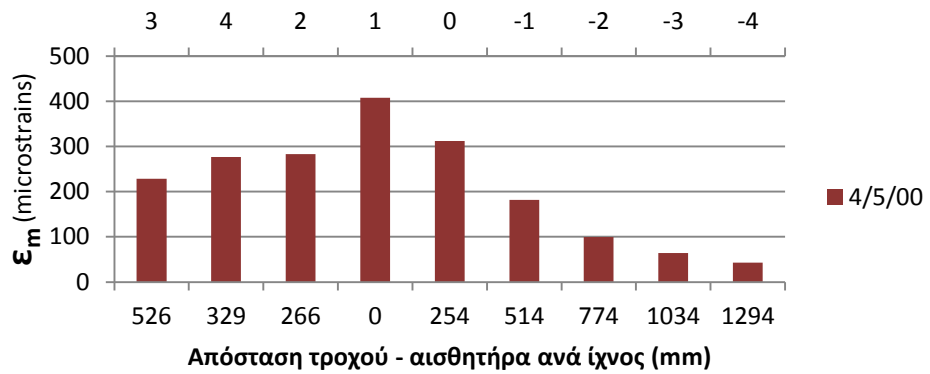
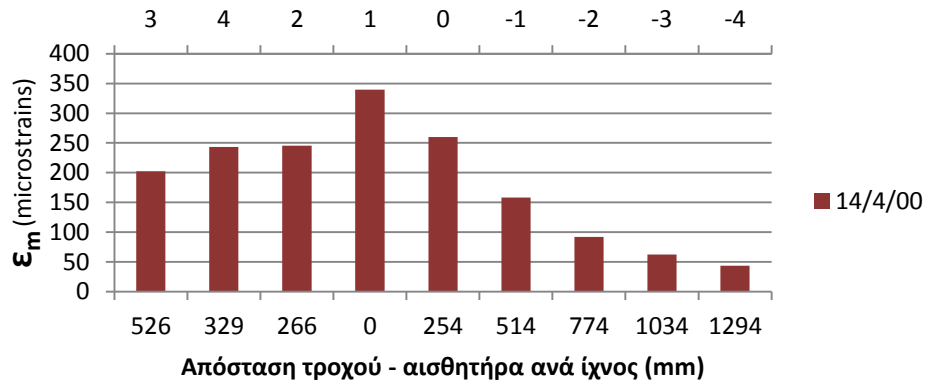
Εικόνα Π6.2 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για διαδοχικές ημέρες



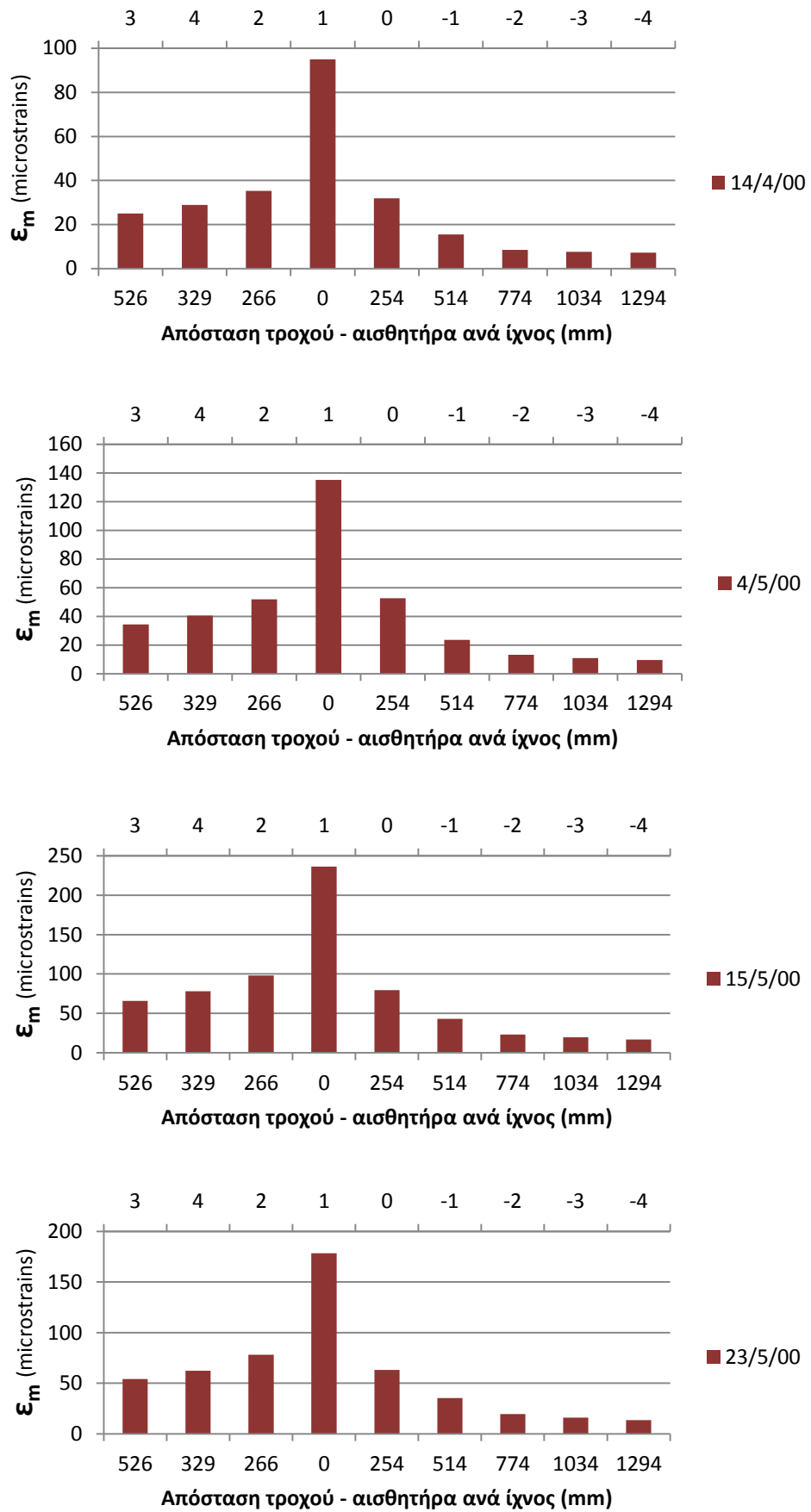
Εικόνα Π6.3 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης, για διαδοχικές ημέρες



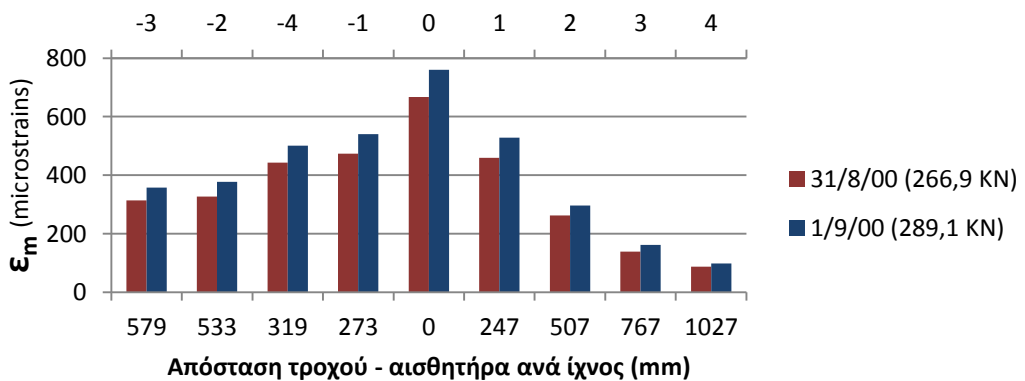
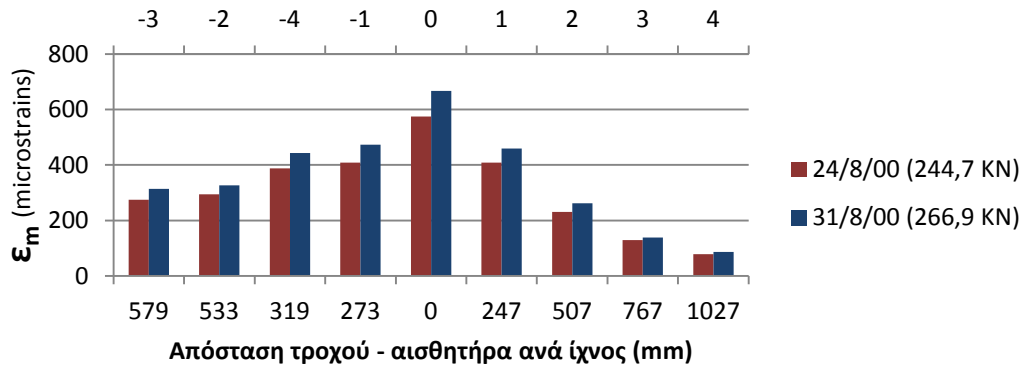
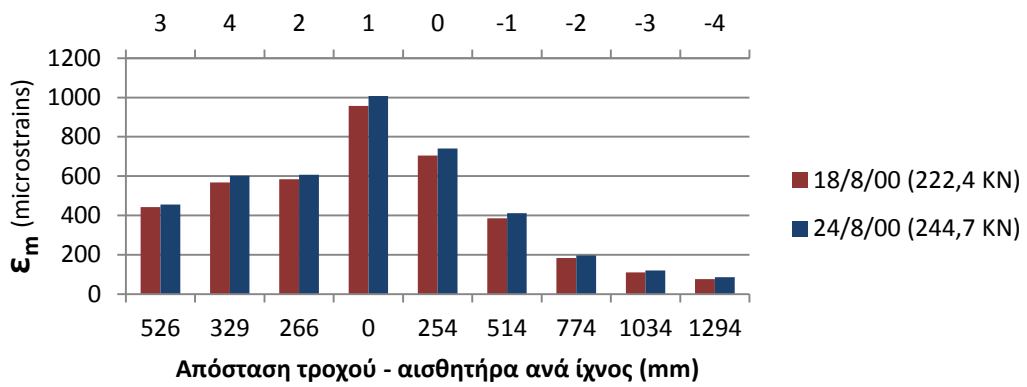
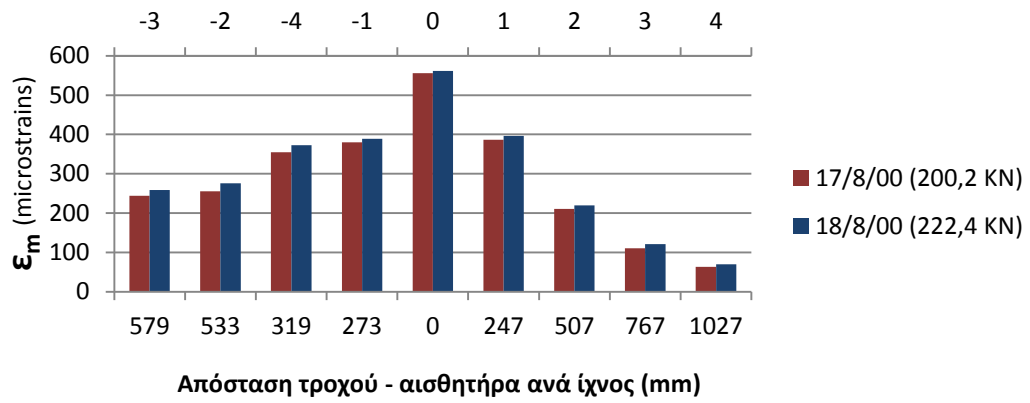
Εικόνα Π6.4 Δάπεδο LFS, βόρειο τμήμα (B-777)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για μεμονωμένες ημέρες σε διάφορες θερμοκρασίες



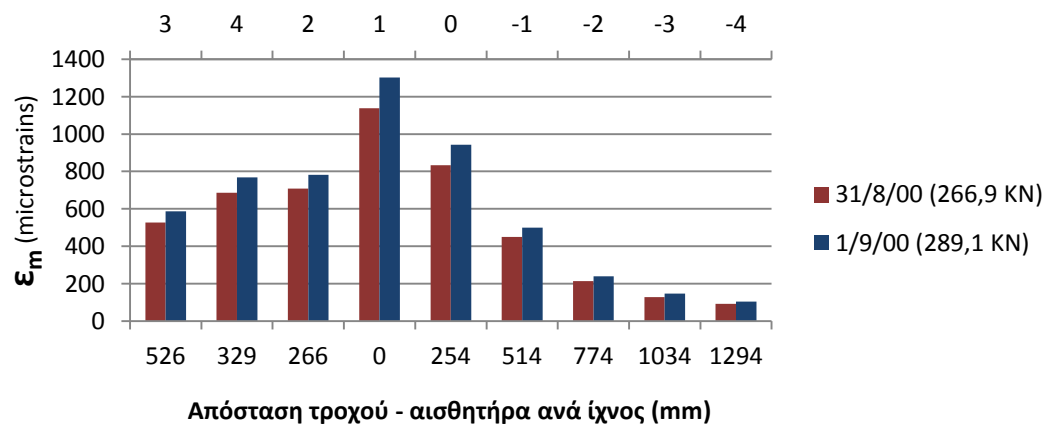
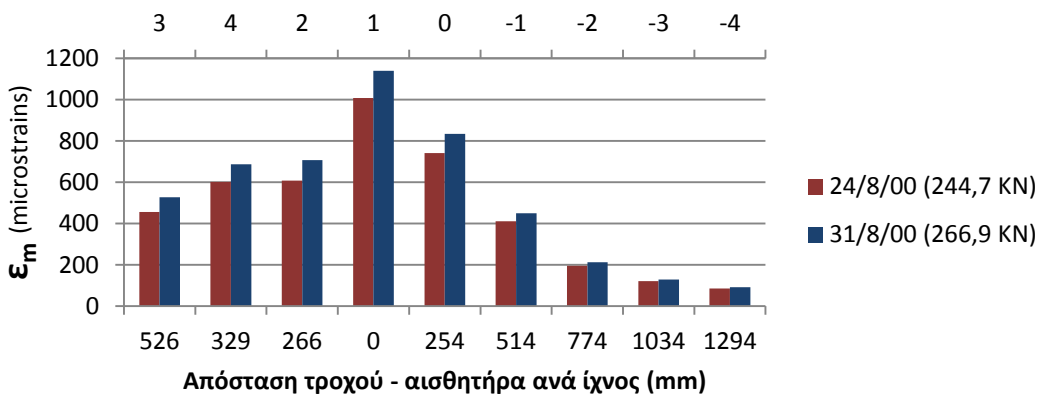
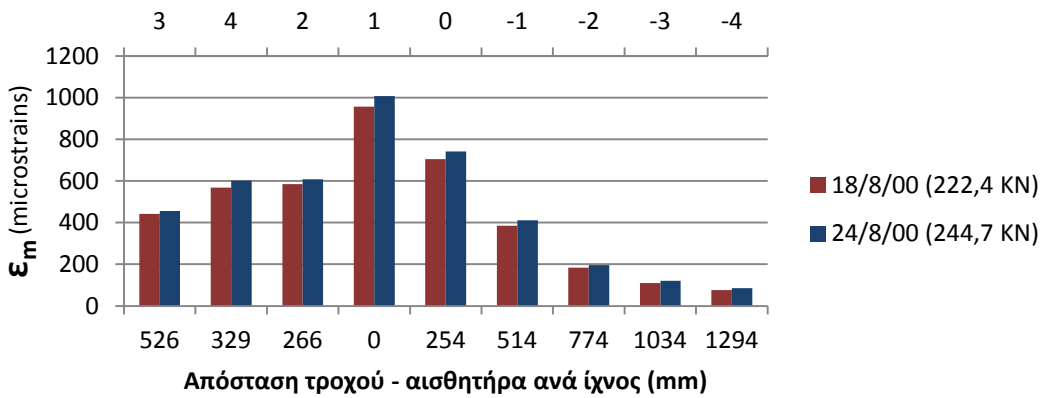
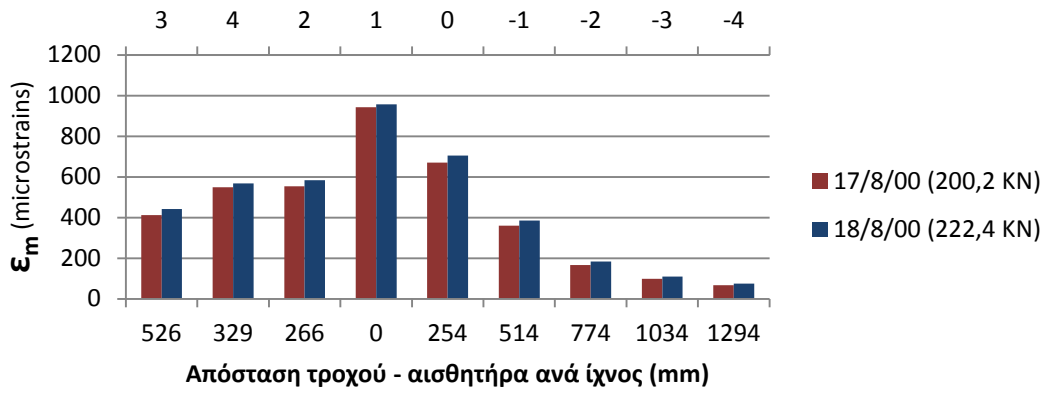
Εικόνα Π6.5 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για μεμονωμένες ημέρες σε διάφορες θερμοκρασίες



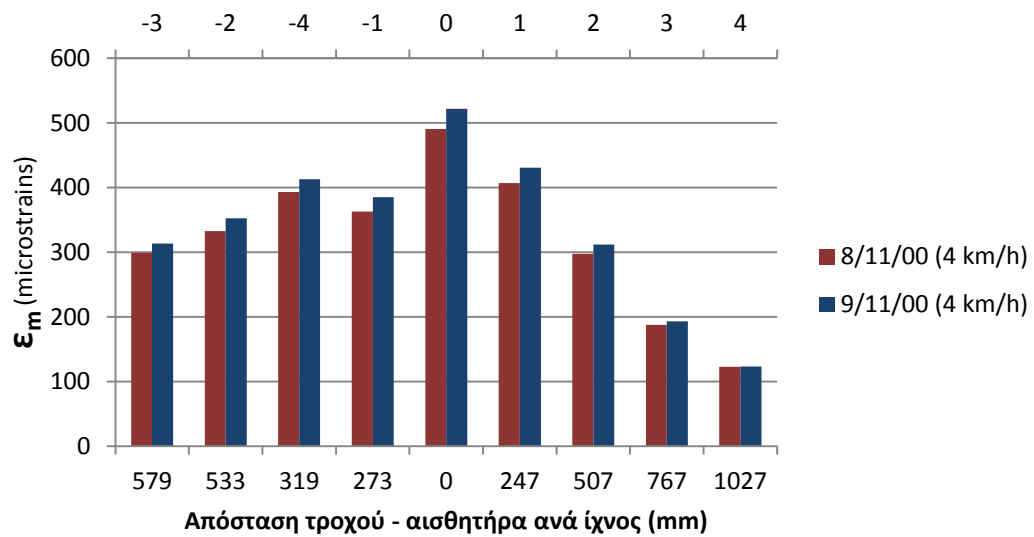
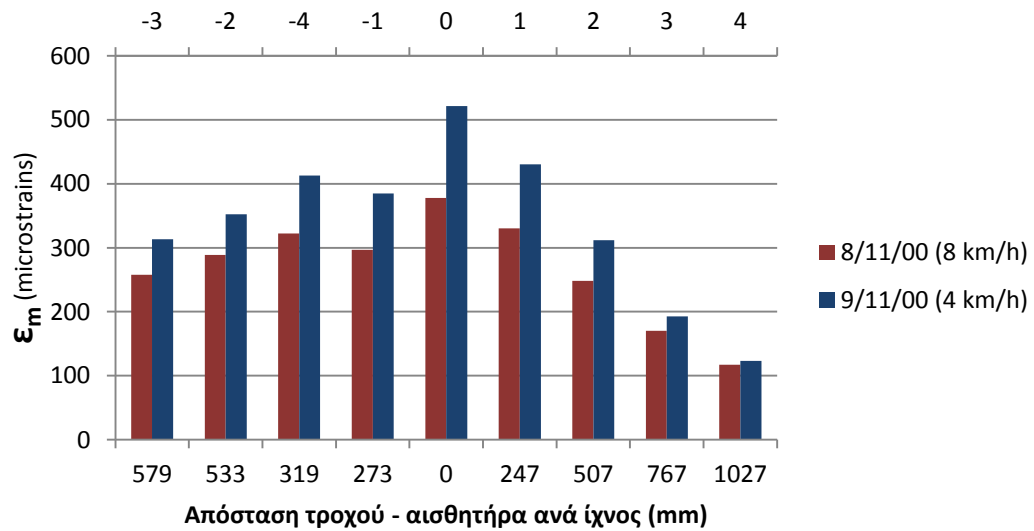
Εικόνα Π6.6 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης, για μεμονωμένες ημέρες σε διάφορες θερμοκρασίες



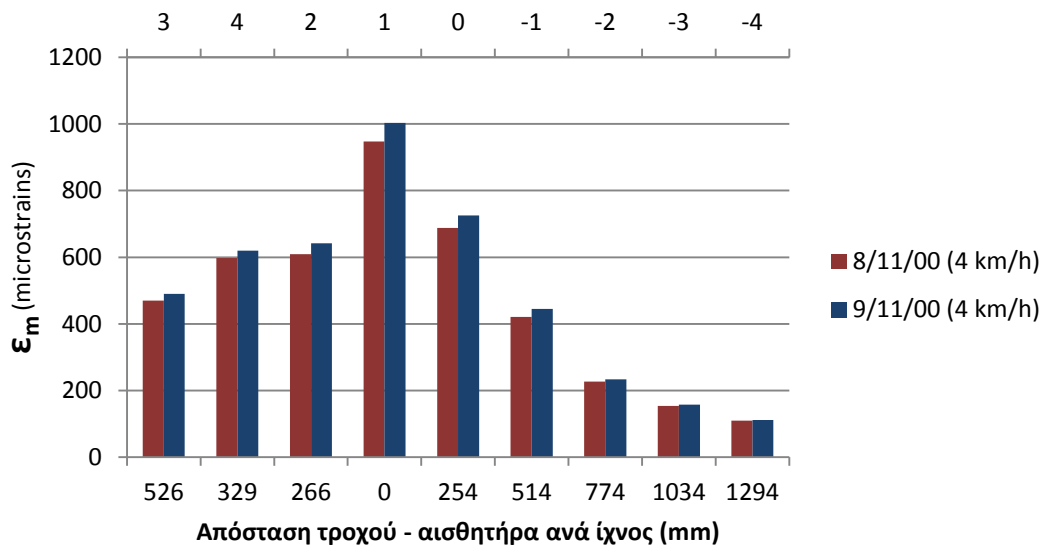
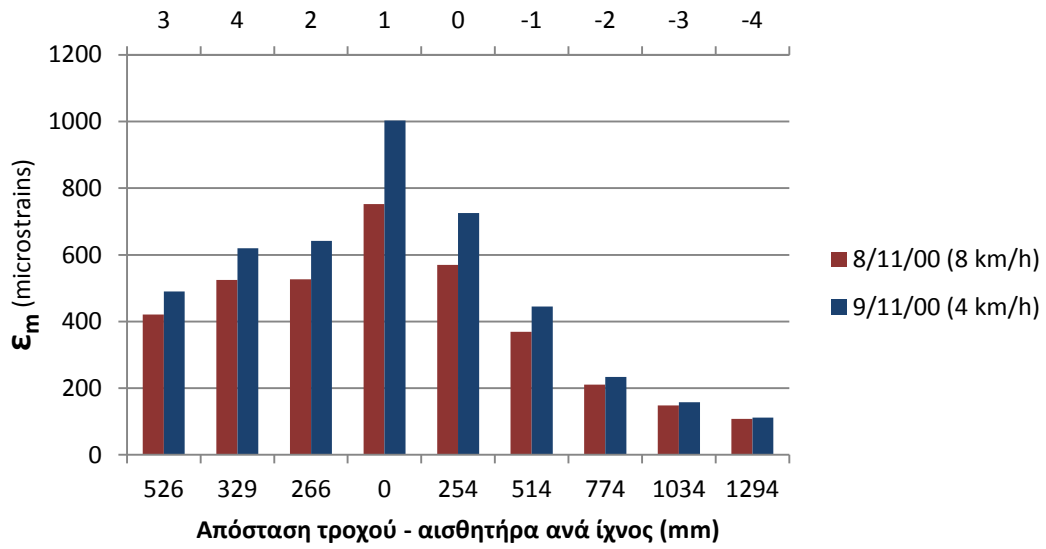
Εικόνα Π6.7 Δάπεδο LFS, βόρειο τμήμα (B-777)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για δοκιμές με διαφορετικά φορτία ανά τροχό



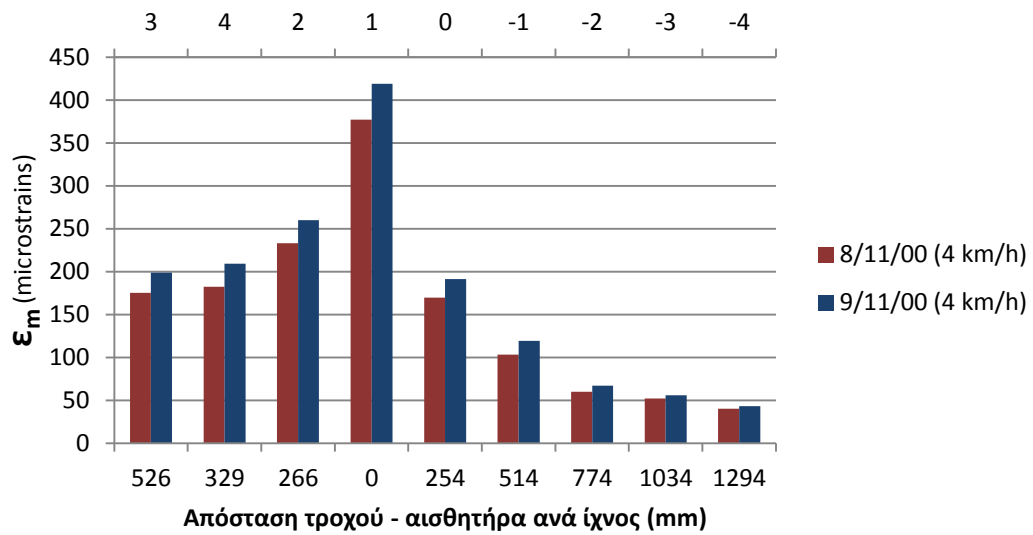
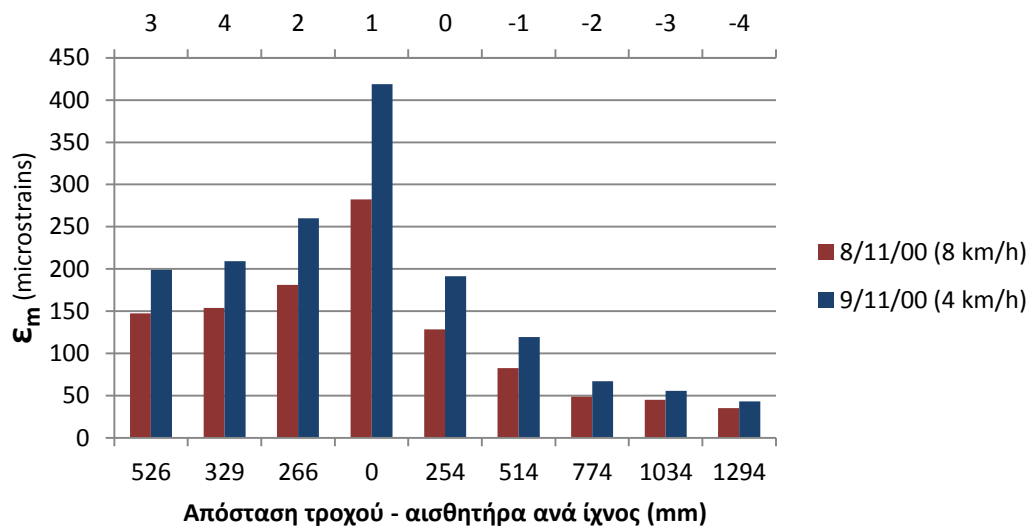
Εικόνα Π6.8 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για δοκιμές με διαφορετικά φορτία ανά τροχό



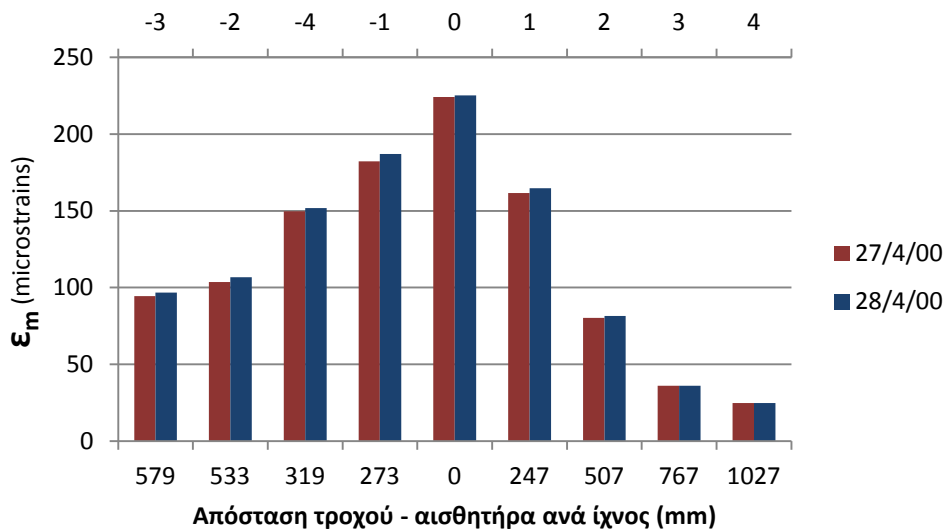
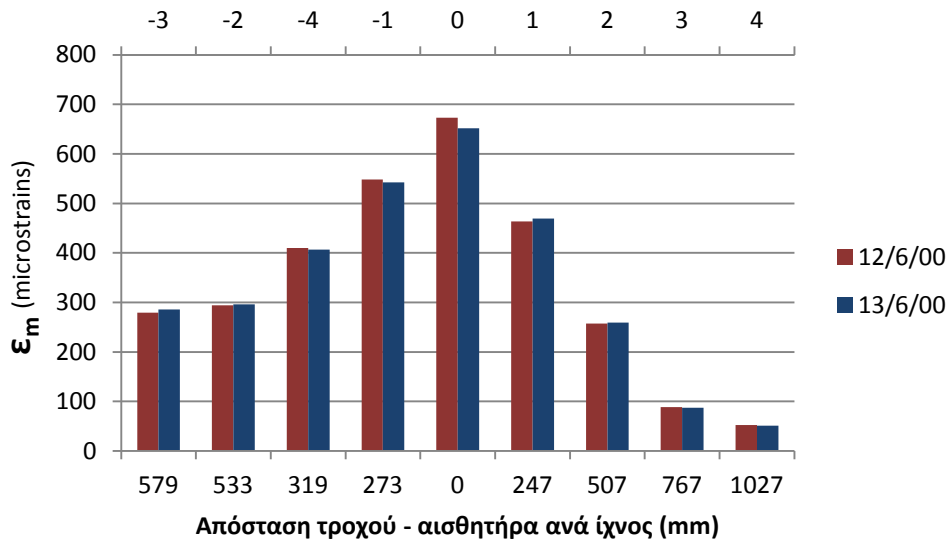
Εικόνα Π6.9 Δάπεδο LFS, βόρειο τμήμα (B-777)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για δοκιμές με μειωμένη ταχύτητα οχήματος και μέγιστο φορτίο ανά τροχό



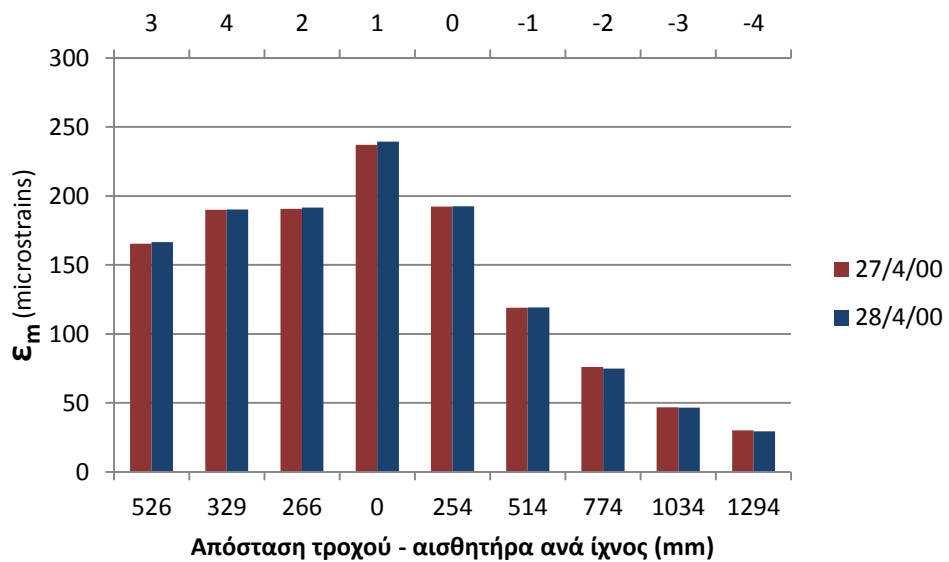
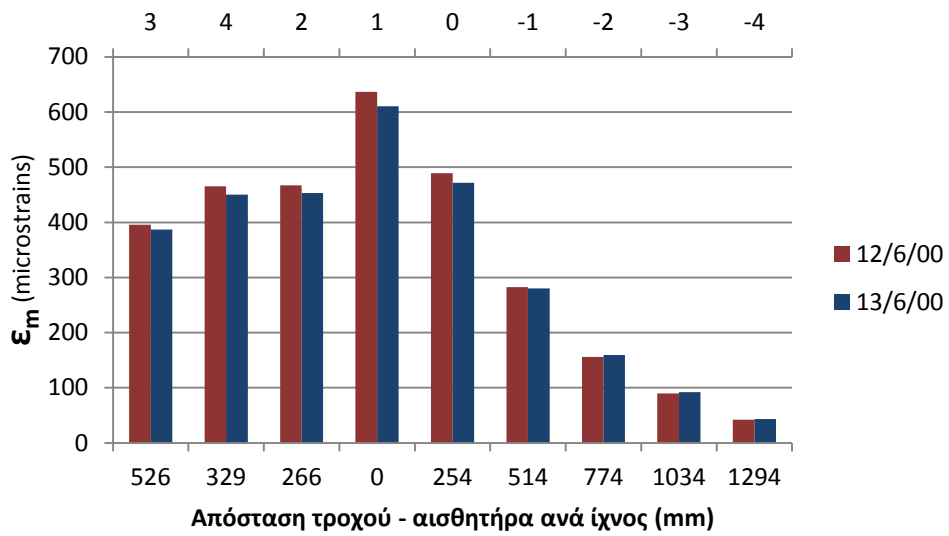
Εικόνα Π6.10 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για δοκιμές με μειωμένη ταχύτητα οχήματος και μέγιστο φορτίο ανά τροχό



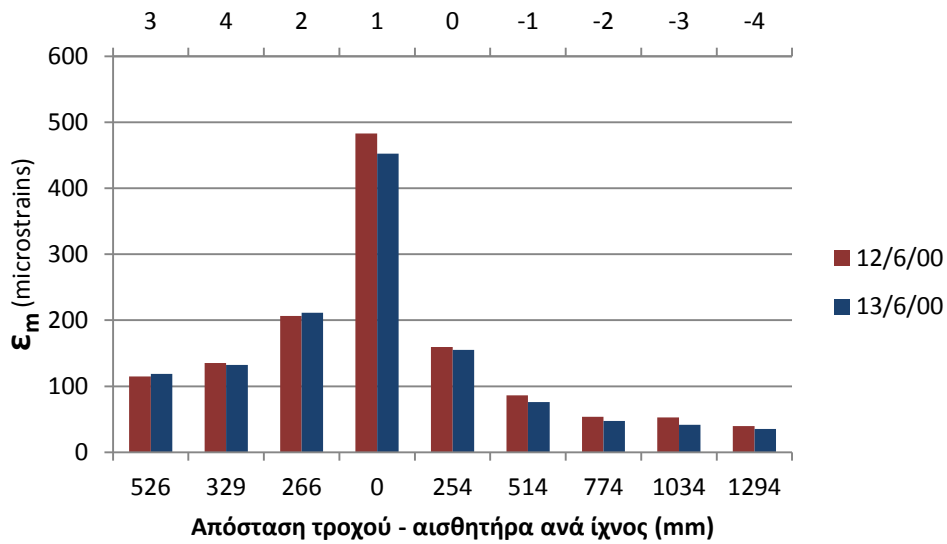
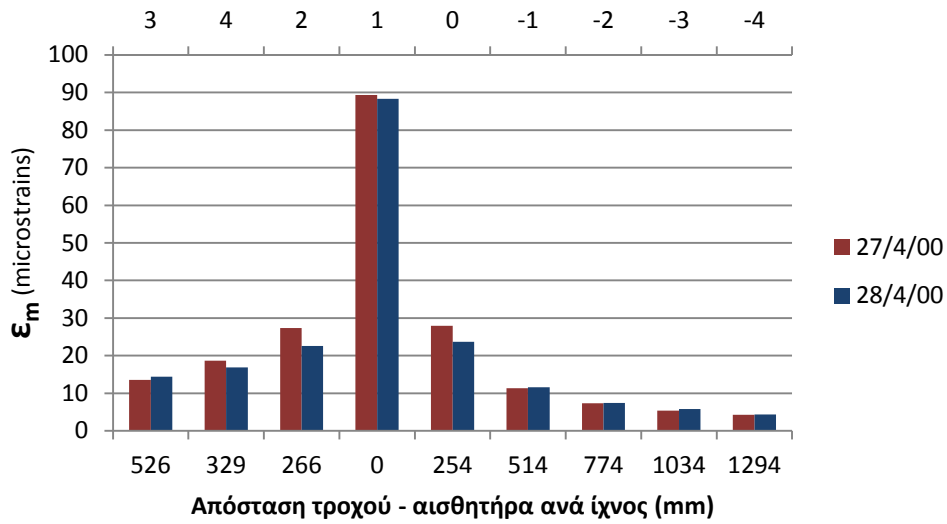
Εικόνα Π6.11 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης, για δοκιμές με μειωμένη ταχύτητα οχήματος και μέγιστο φορτίο ανά τροχό



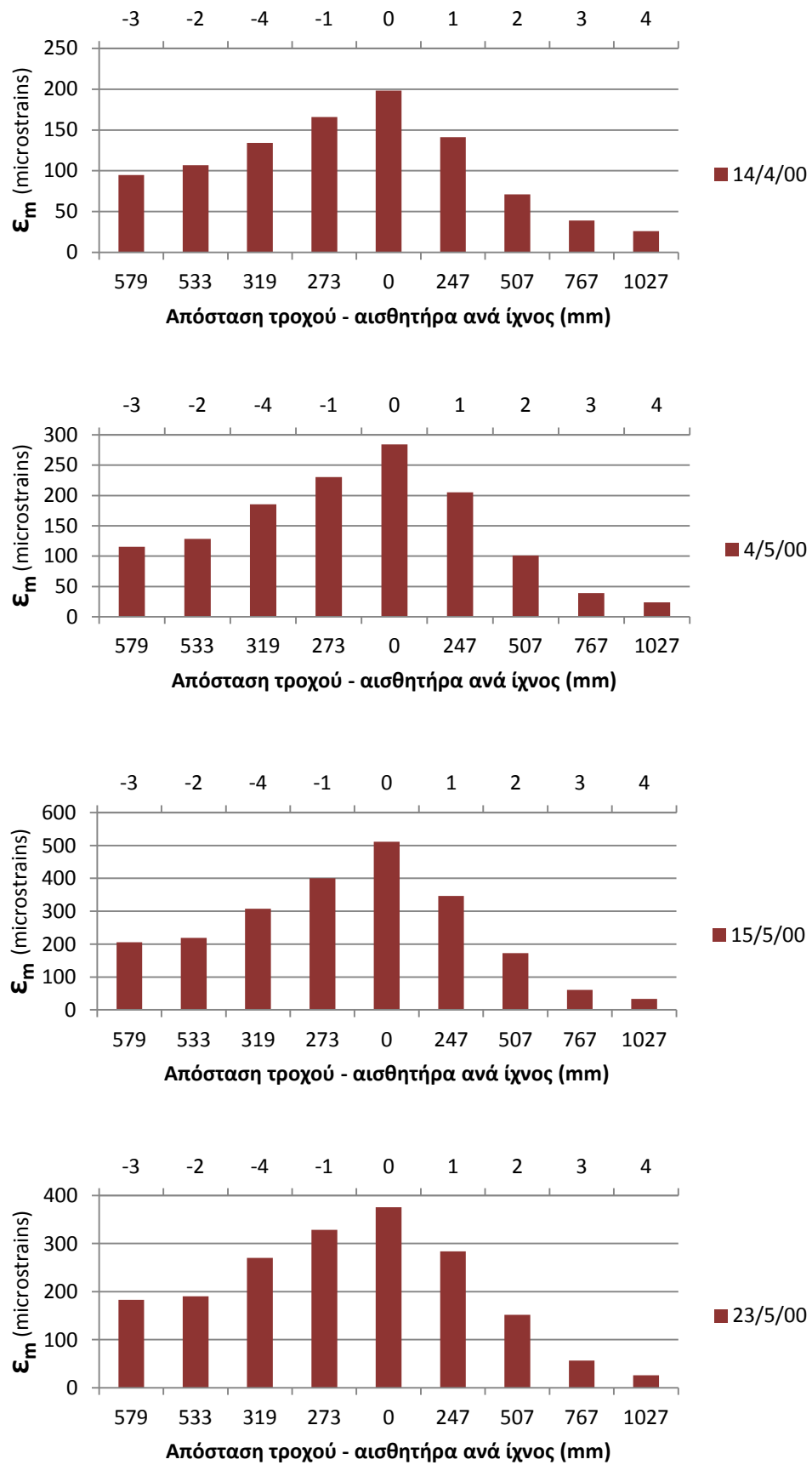
Εικόνα Π6.12 Δάπεδο MFS, βόρειο τμήμα (B-777)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για διαδοχικές ημέρες



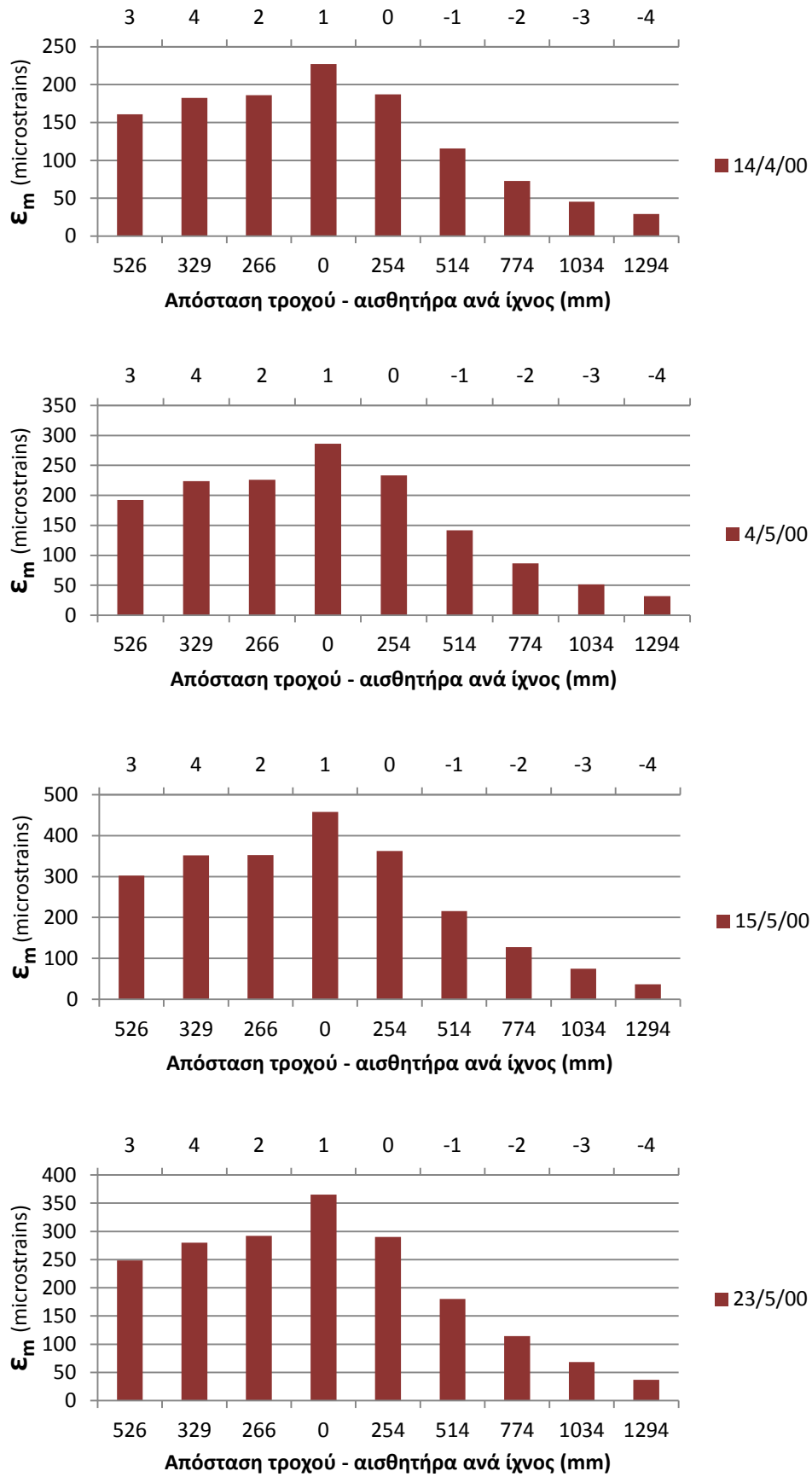
Εικόνα Π6.13 Δάπεδο MFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για διαδοχικές ημέρες



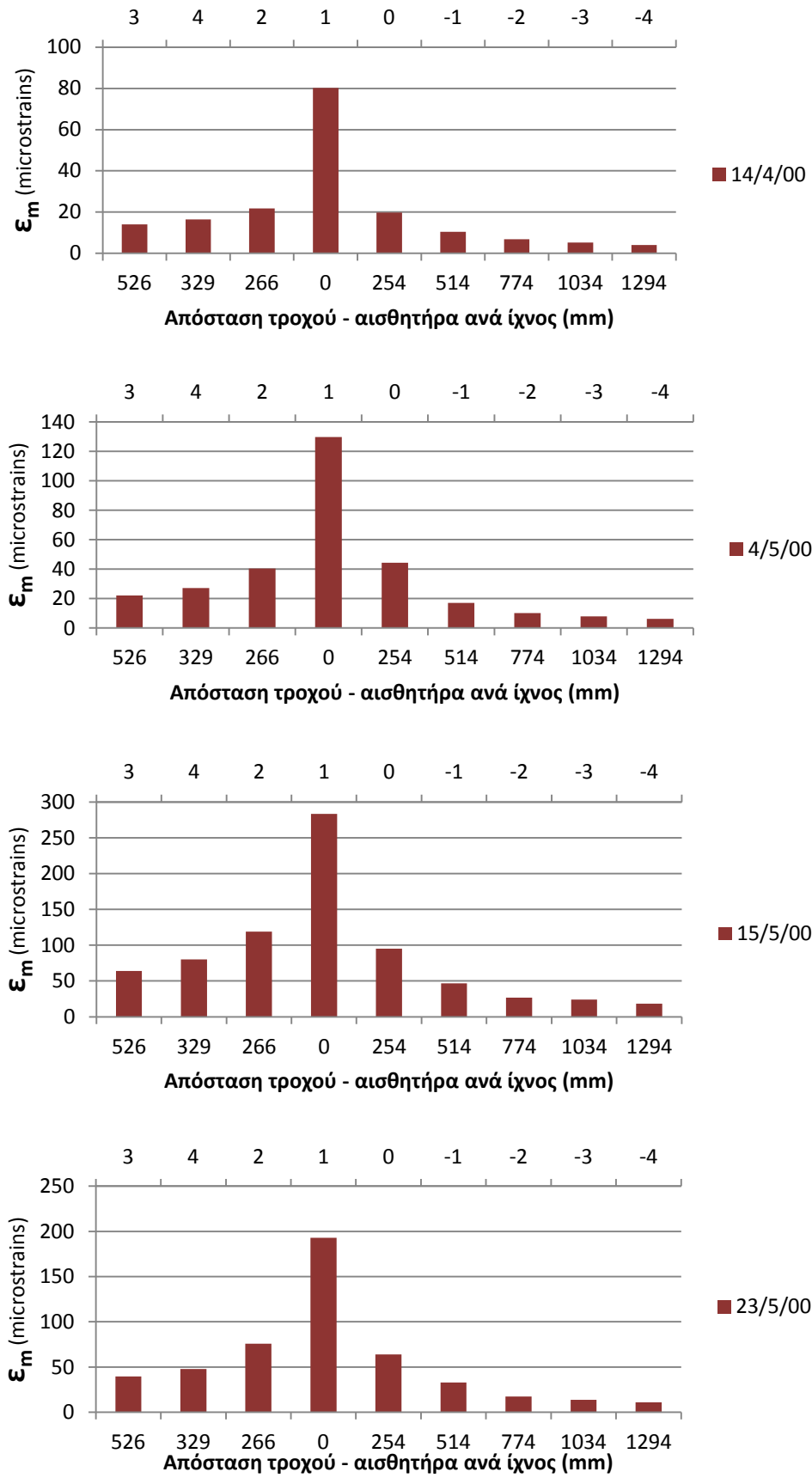
Εικόνα Π6.14 Δάπεδο MFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης, για διαδοχικές ημέρες



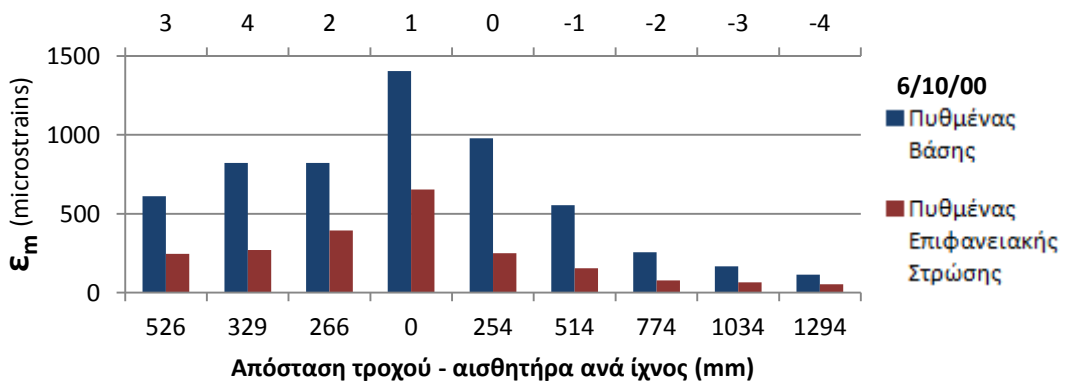
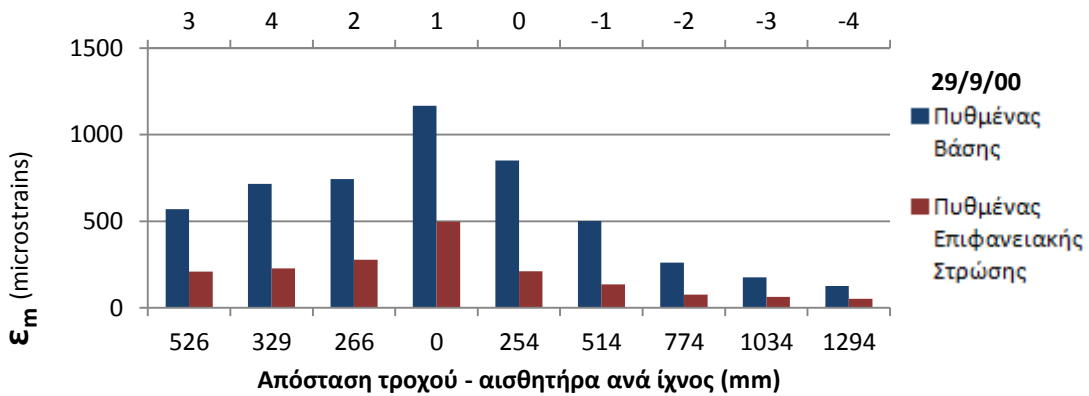
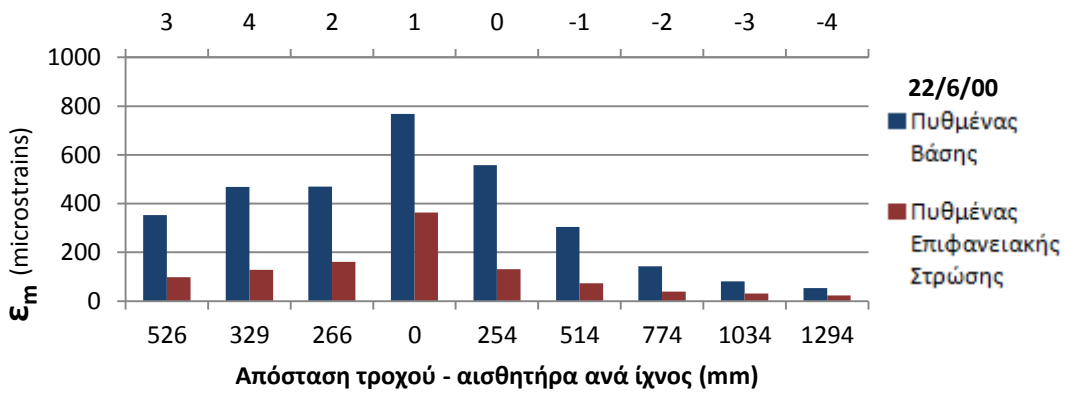
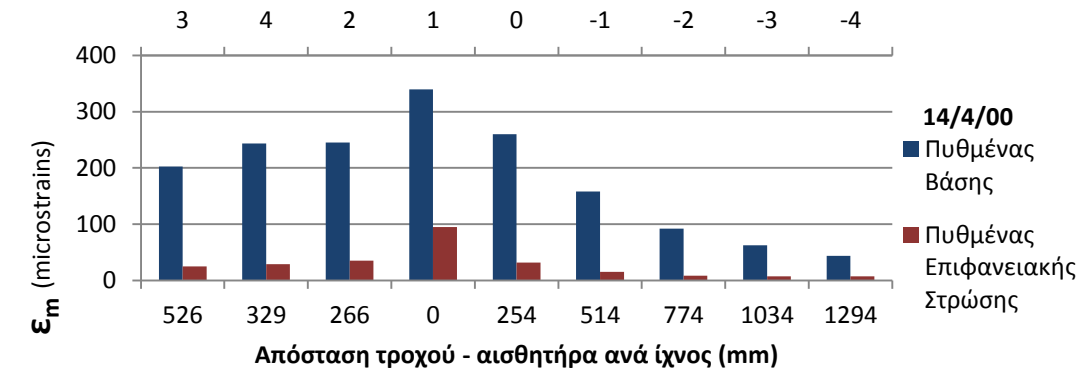
Εικόνα Π6.15 Δάπεδο MFS, βόρειο τμήμα (B-777)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για μεμονωμένες ημέρες σε διάφορες θερμοκρασίες

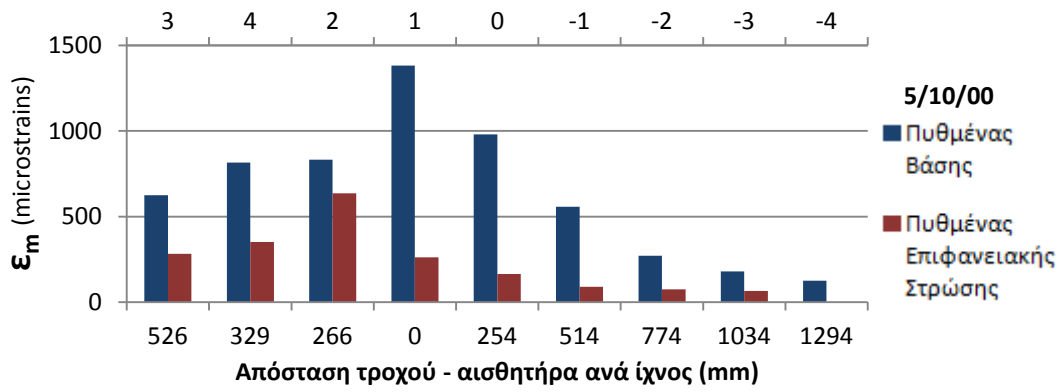


Εικόνα Π6.16 Δάπεδο MFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της βάσης, για μεμονωμένες ημέρες σε διάφορες θερμοκρασίες

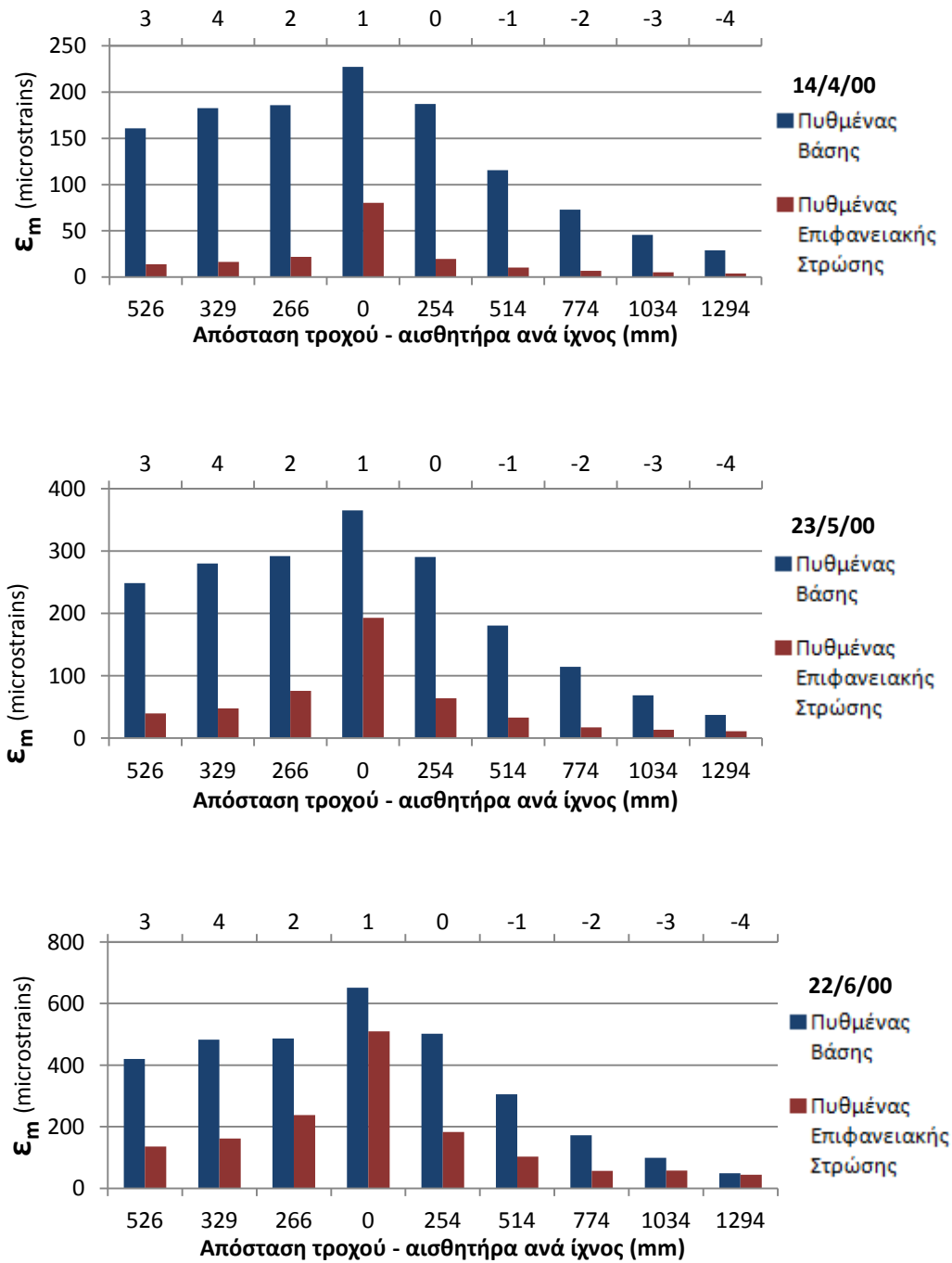


Εικόνα Π6.17 Δάπεδο MFS, νότιο τμήμα (B-747)-Ιστογράμματα παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης, για μεμονωμένες ημέρες σε διάφορες θερμοκρασίες

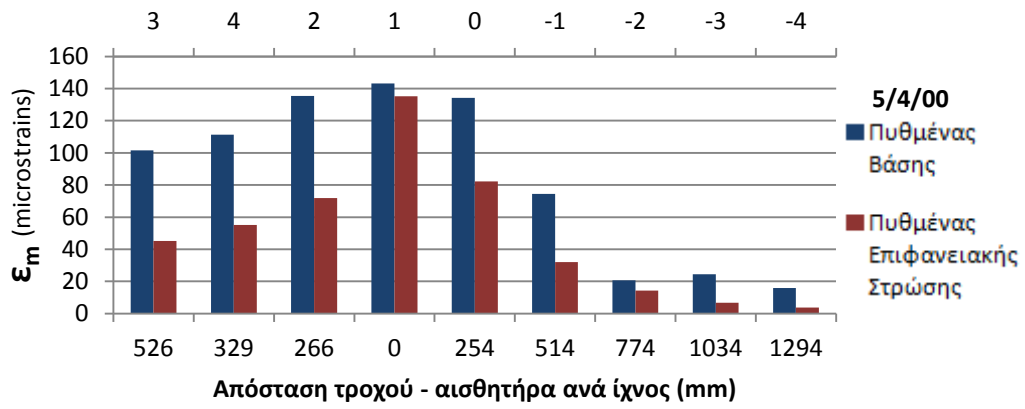




Εικόνα Π6.18 Δάπεδο LFS – Ιστογράμματα σύγκρισης παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης και στον πυθμένα της βάσης



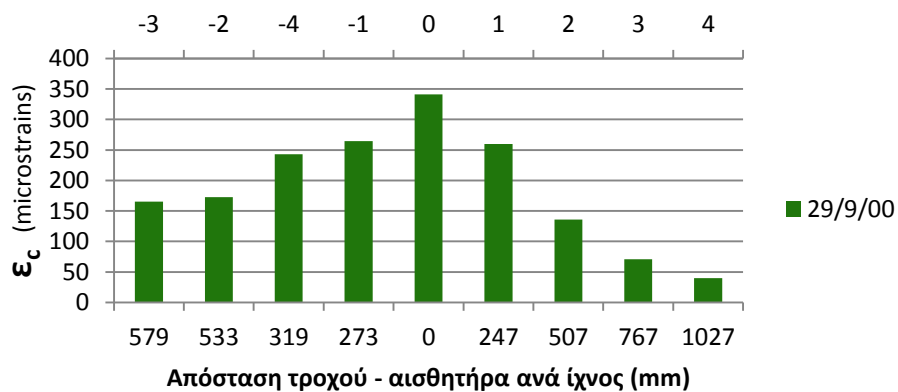
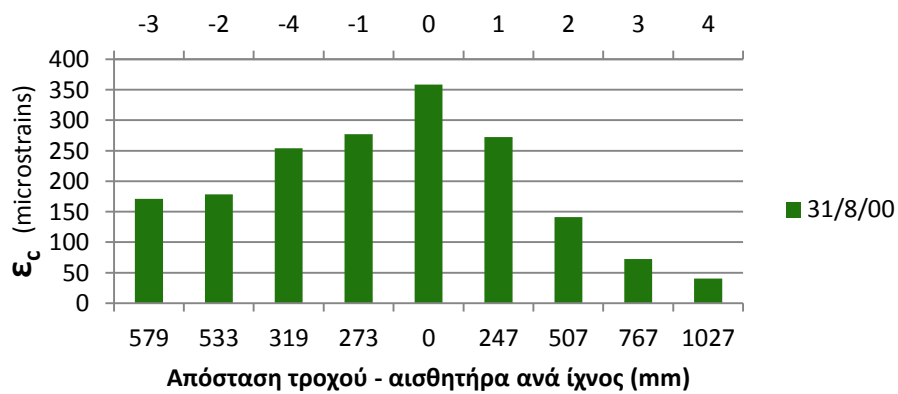
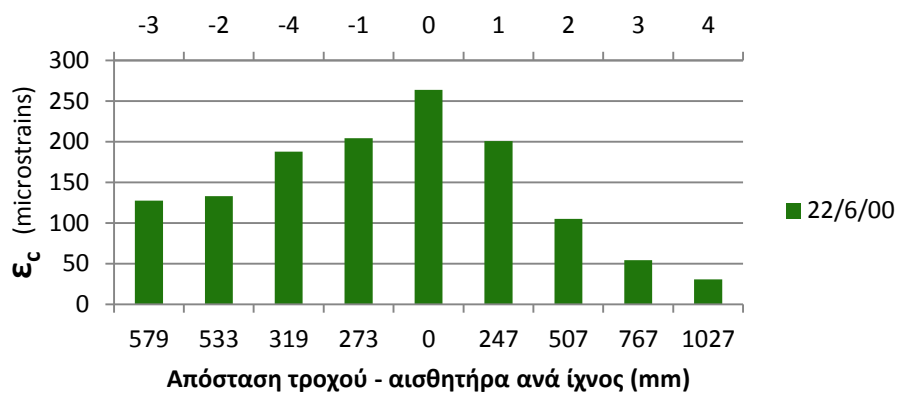
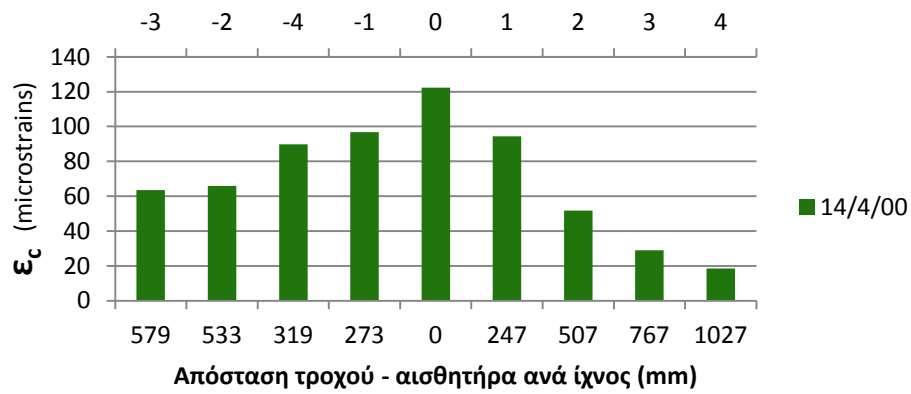
Εικόνα Π6.19 Δάπεδο MFS – Ιστογράμματα σύγκρισης παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης και στον πυθμένα της βάσης

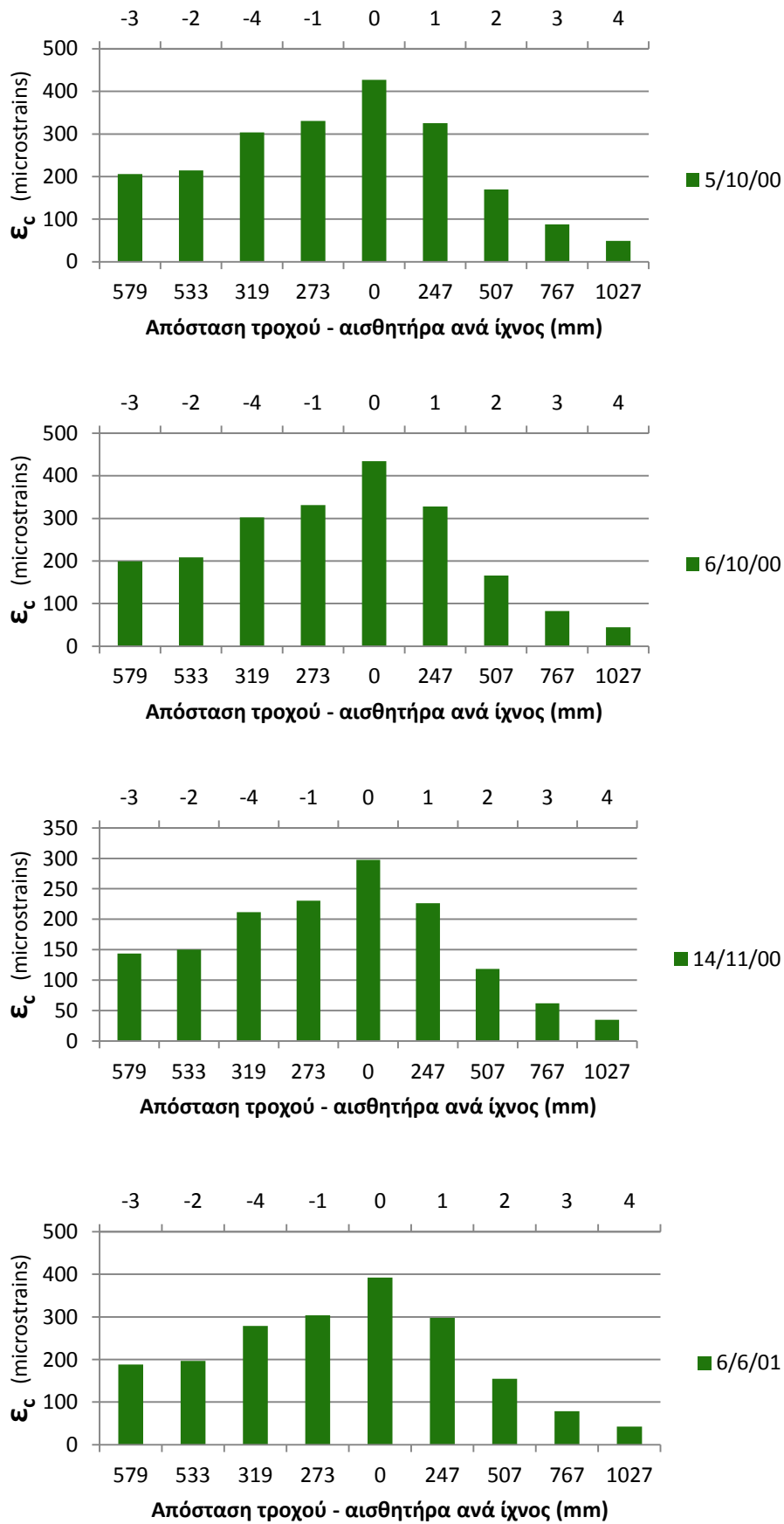


Εικόνα Π6.20 Δάπεδο HFS – Ιστόγραμμα σύγκρισης παραμορφώσεων ασφαλτικού σκυροδέματος στον πυθμένα της επιφανειακής στρώσης και στον πυθμένα της βάσης

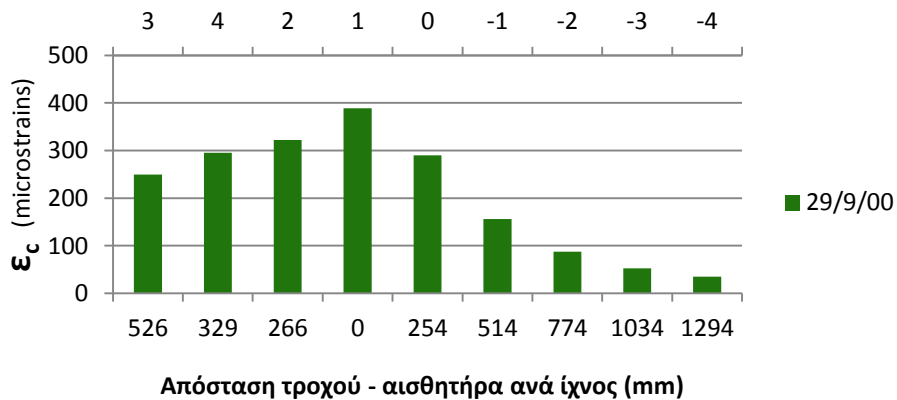
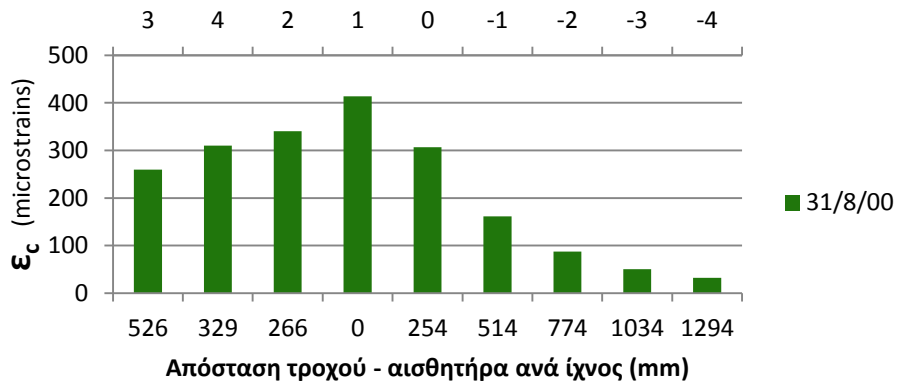
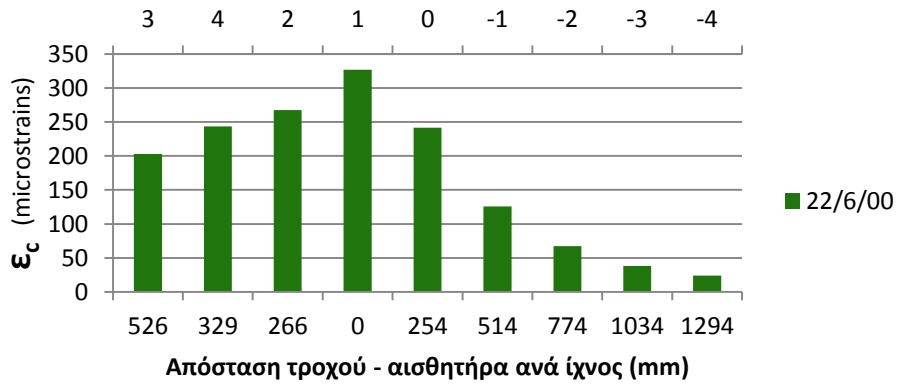
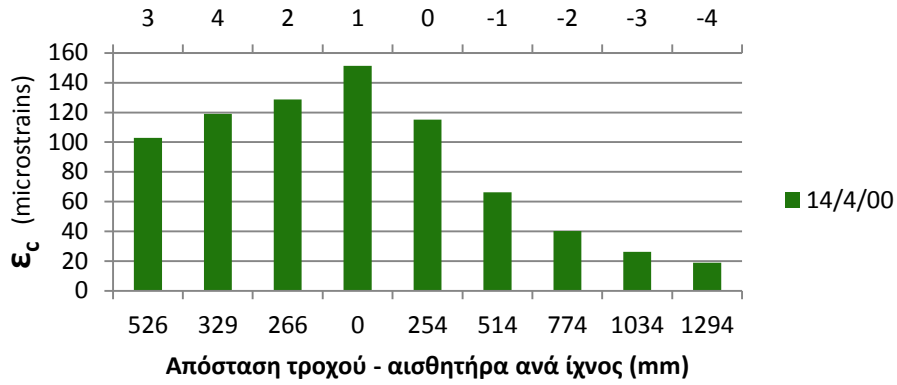
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

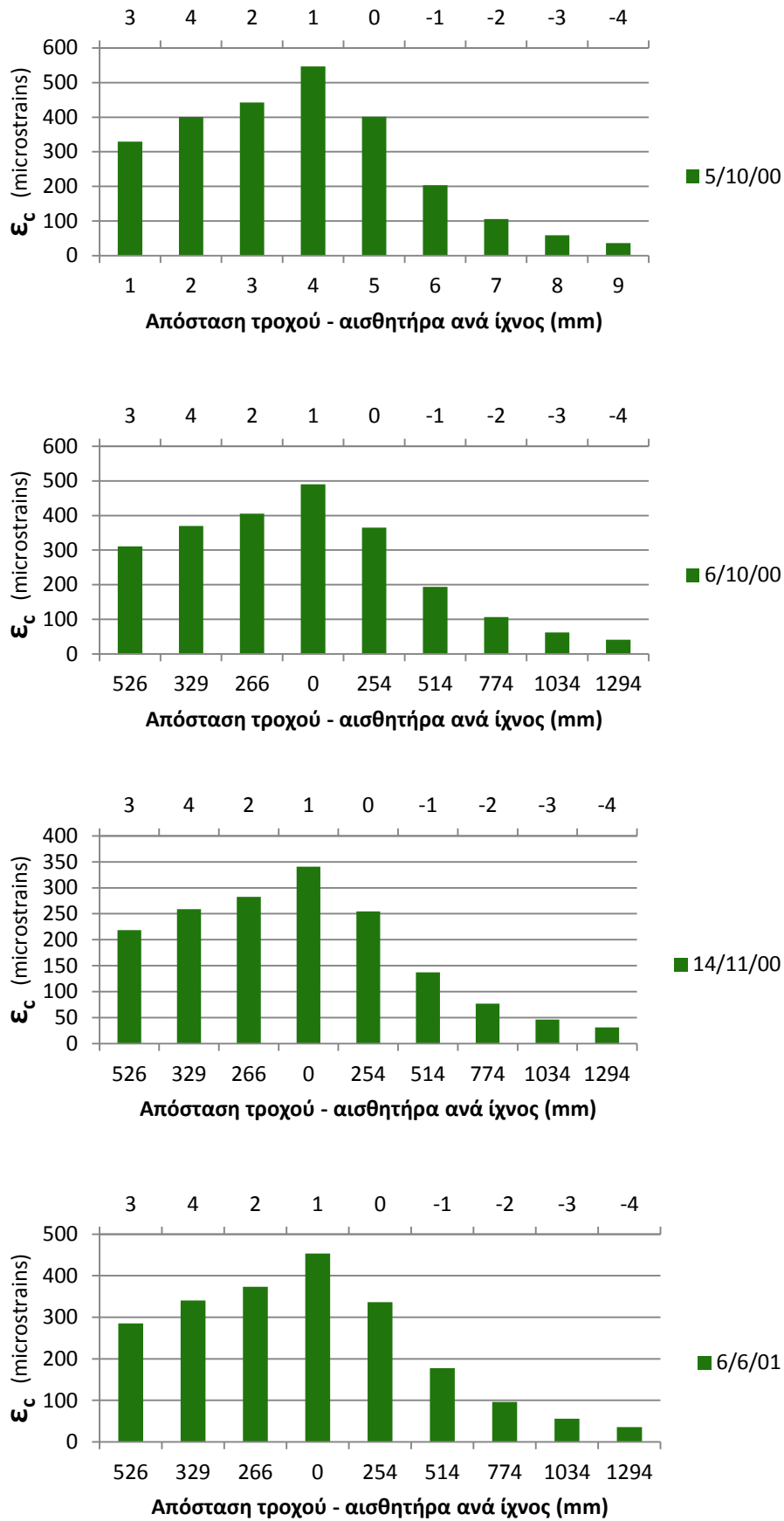
ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ



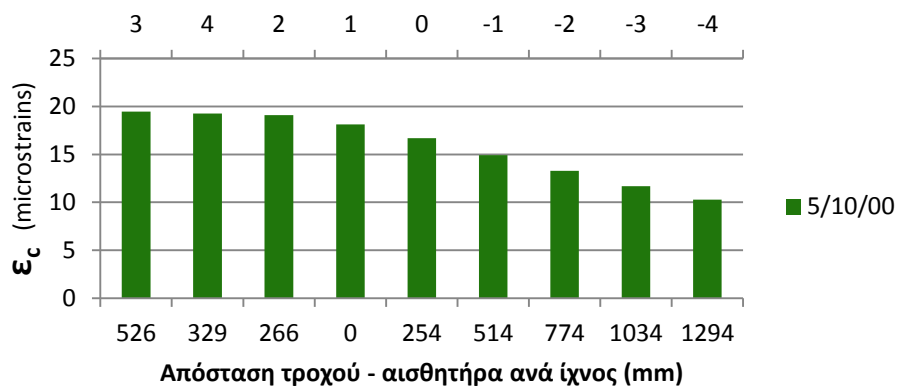
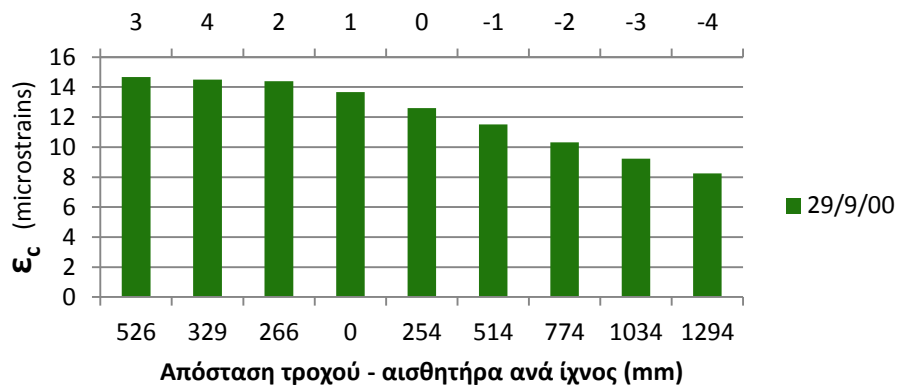
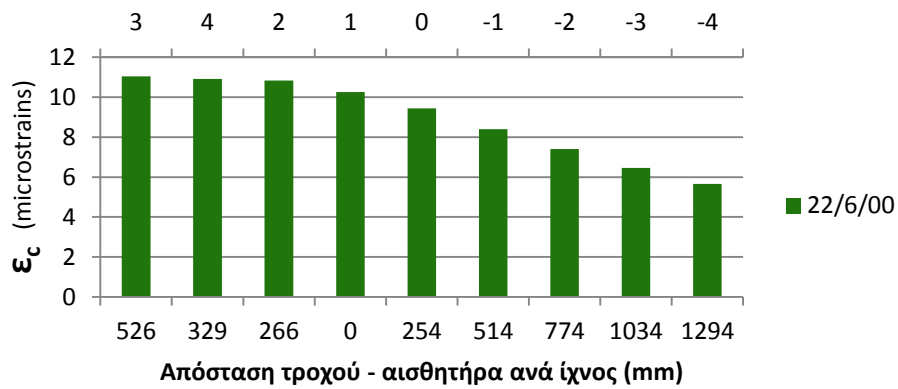
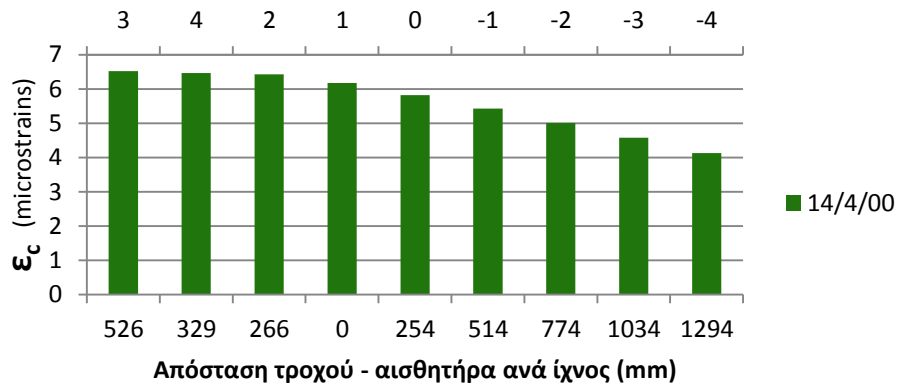


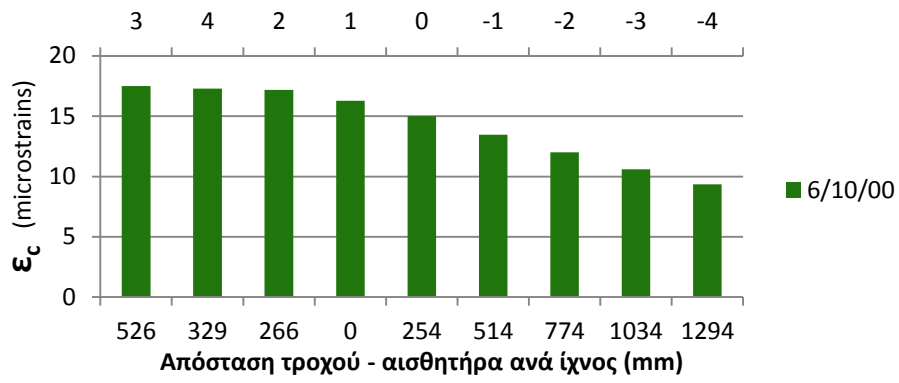
Εικόνα Π7.1 Πρότυπο προσομοίωσης LFS, βόρειο τμήμα (B-777) – Ιστογράμματα υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος



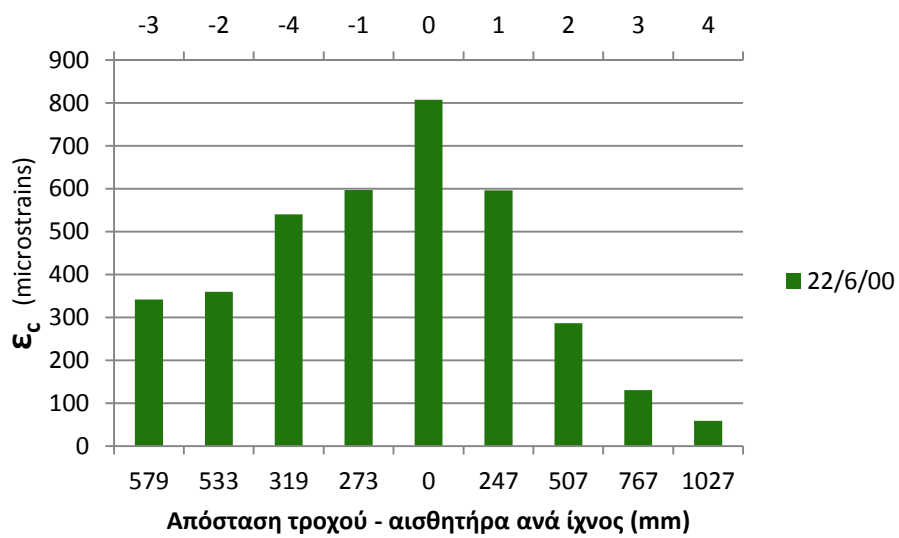
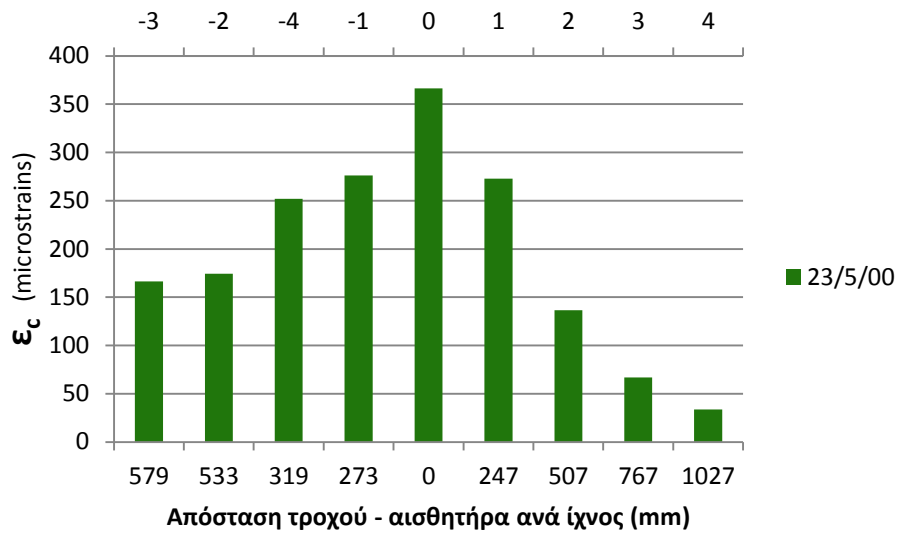


Εικόνα Π7.2 Πρότυπο προσομοίωσης LFS, νότιο τμήμα (B-747) – Ιστογράμματα υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος

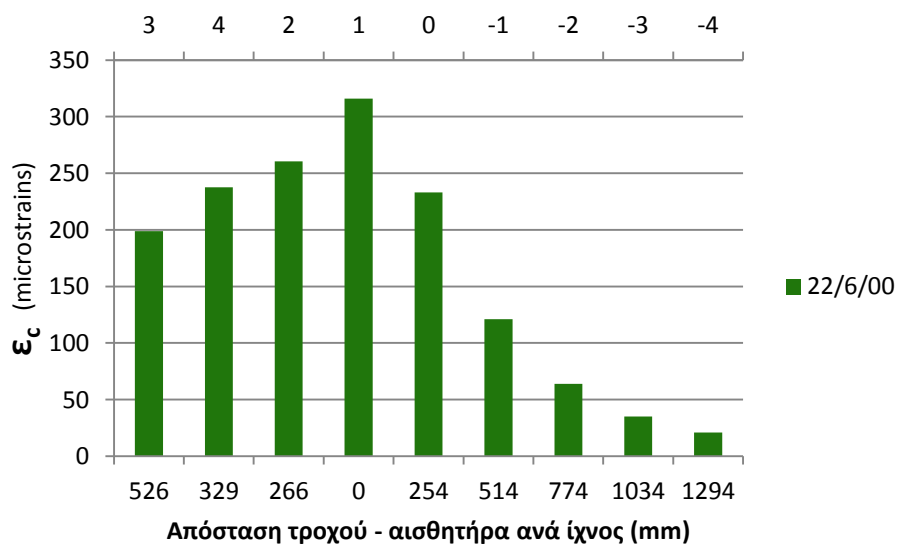
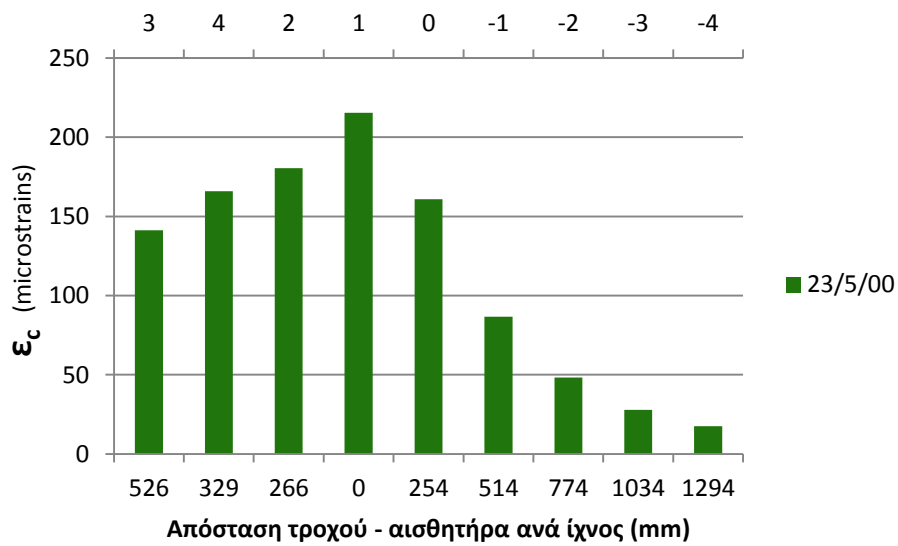
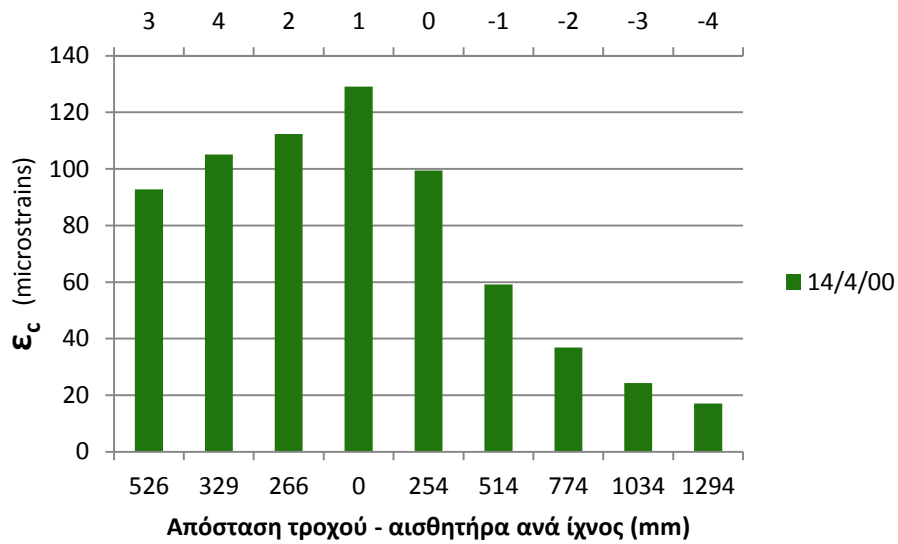




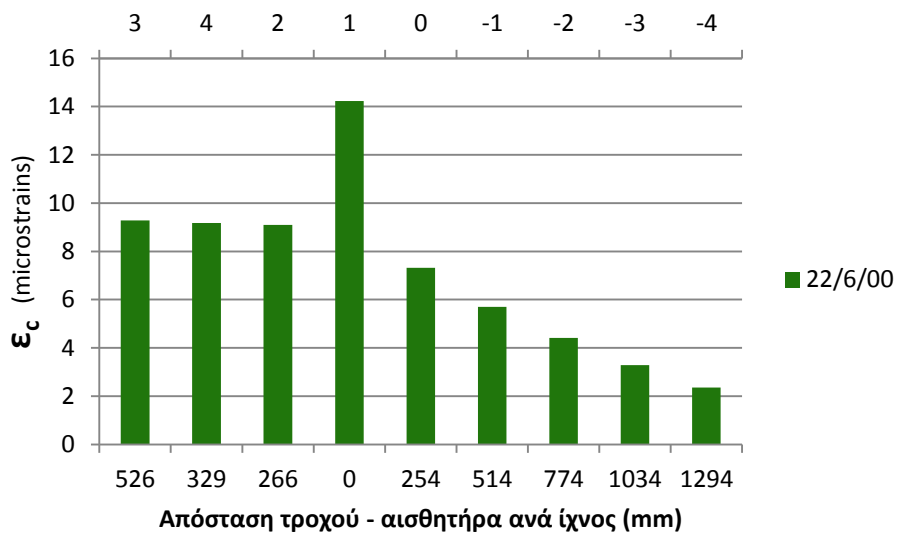
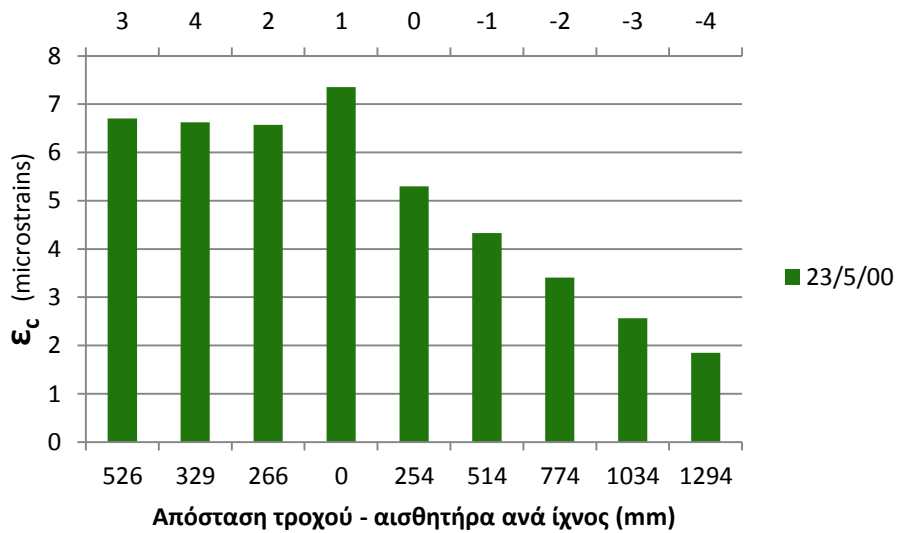
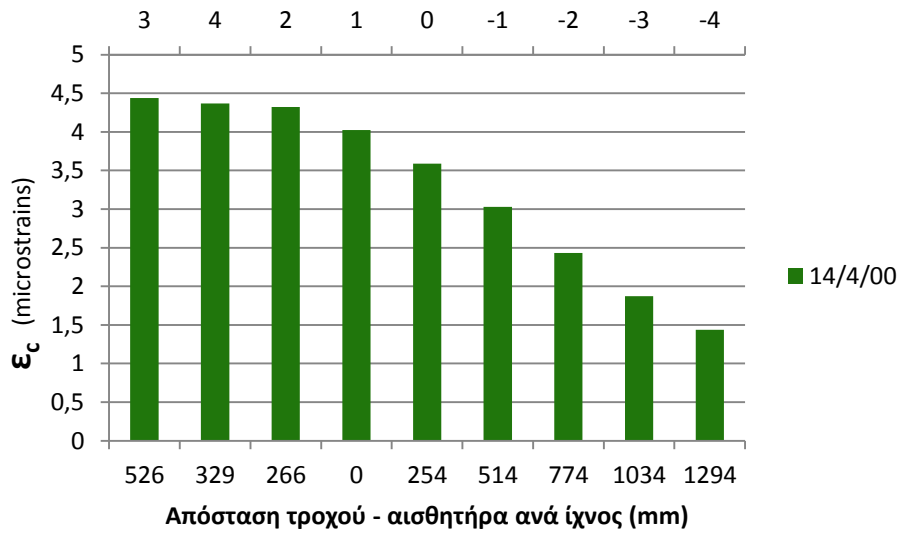
Εικόνα Π7.3 Πρότυπο προσομοίωσης LFS, νότιο τμήμα (B-747) – Ιστογράμματα υπολογισμένων παραμορφώσεων στο μέσον του ασφαλτικού σκυροδέματος



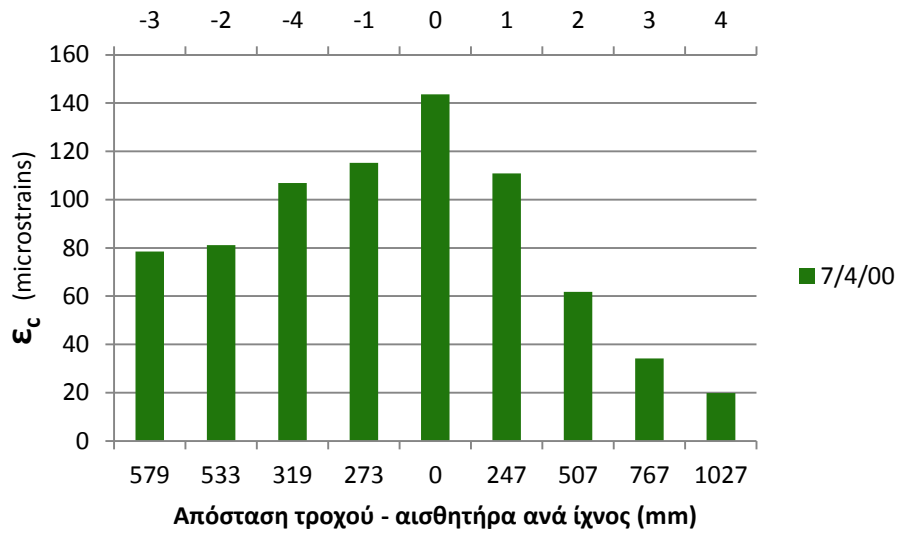
Εικόνα Π7.4 Πρότυπο προσομοίωσης MFS, βόρειο τμήμα (B-777) – Ιστογράμματα υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος



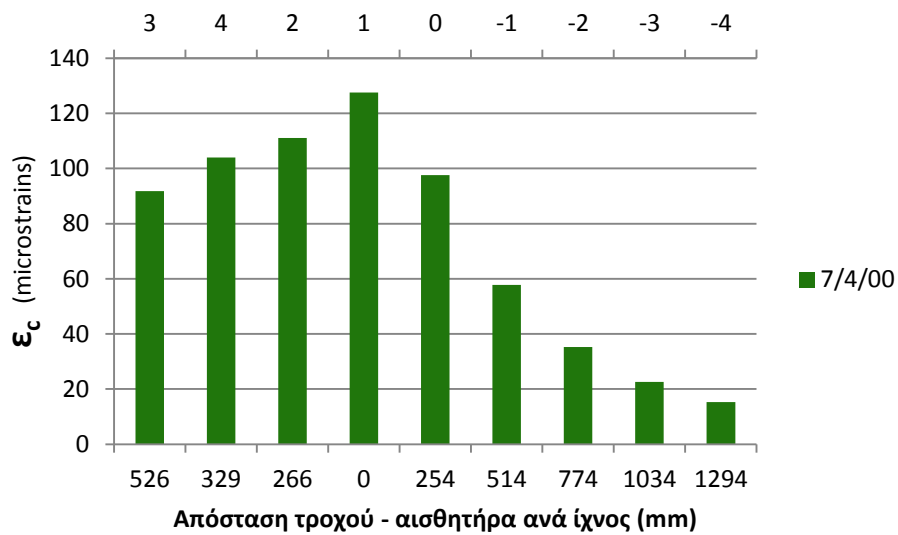
Εικόνα Π7.5 Πρότυπο προσομοίωσης MFS, νότιο τμήμα (B-747) – Ιστογράμματα υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος



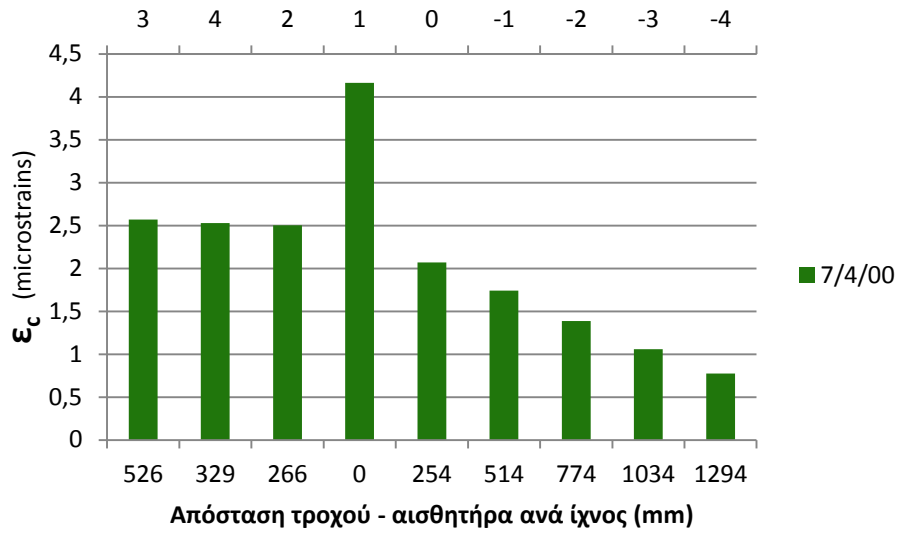
Εικόνα Π7.6 Πρότυπο προσομοίωσης MFS, νότιο τμήμα (B-747) – Ιστογράμματα υπολογισμένων παραμορφώσεων στο μέσον του ασφαλτικού σκυροδέματος



Εικόνα Π7.7 Πρότυπο προσομοίωσης HFS, βόρειο τμήμα (B-777) – Ιστόγραμμα υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος



Εικόνα Π7.8 Πρότυπο προσομοίωσης HFS, νότιο τμήμα (B-747) – Ιστόγραμμα υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος



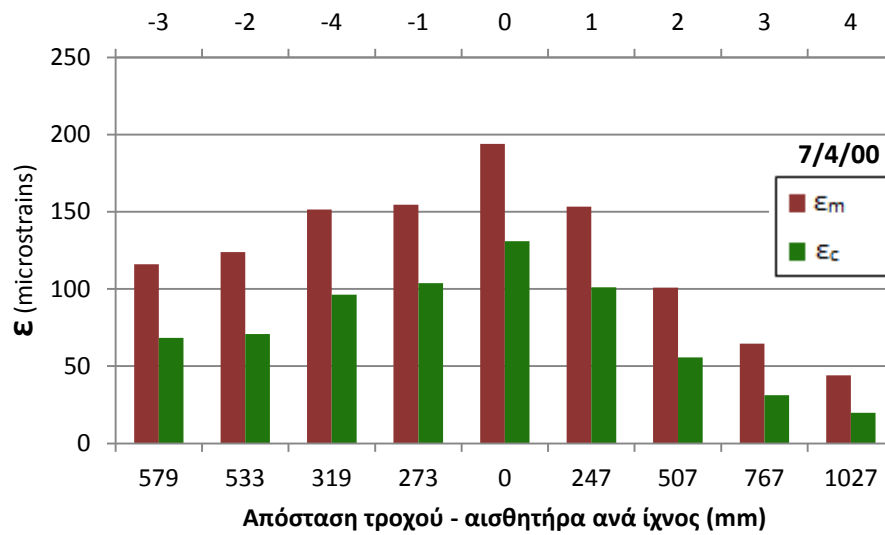
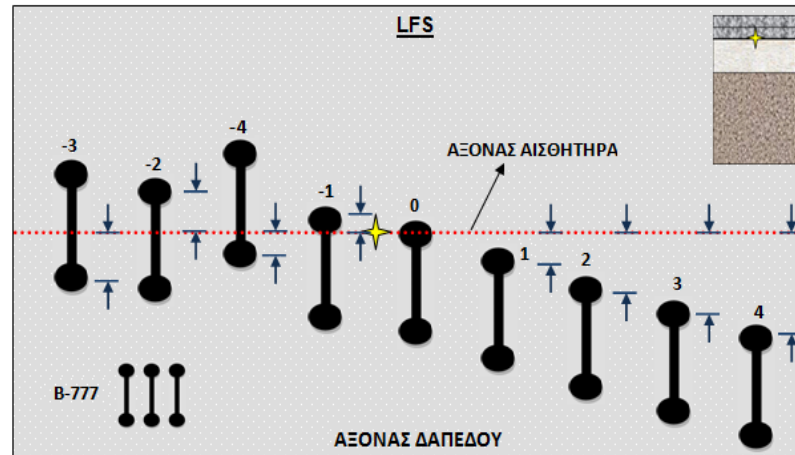
Εικόνα Π7.9 Πρότυπο προσομοίωσης HFS, νότιο τμήμα (B-747) – Ιστόγραμμα υπολογισμένων παραμορφώσεων στο μέσον του ασφαλτικού σκυροδέματος

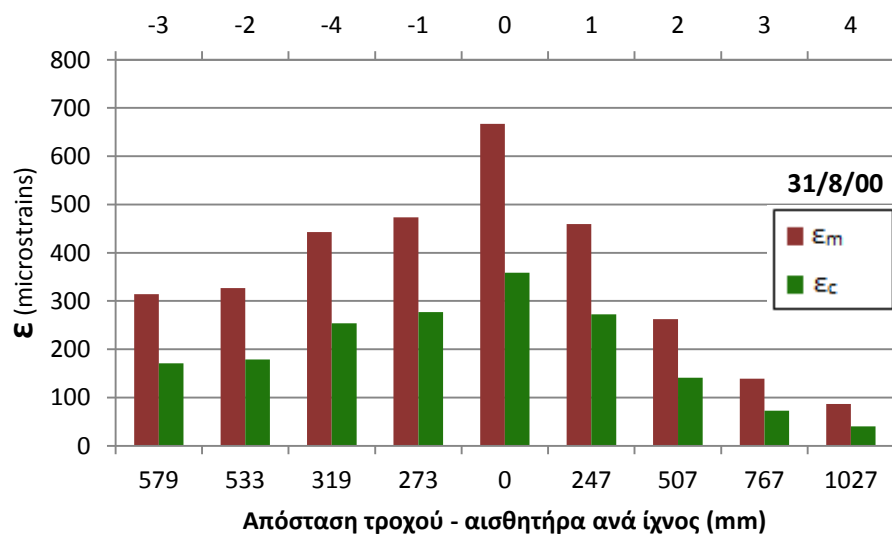
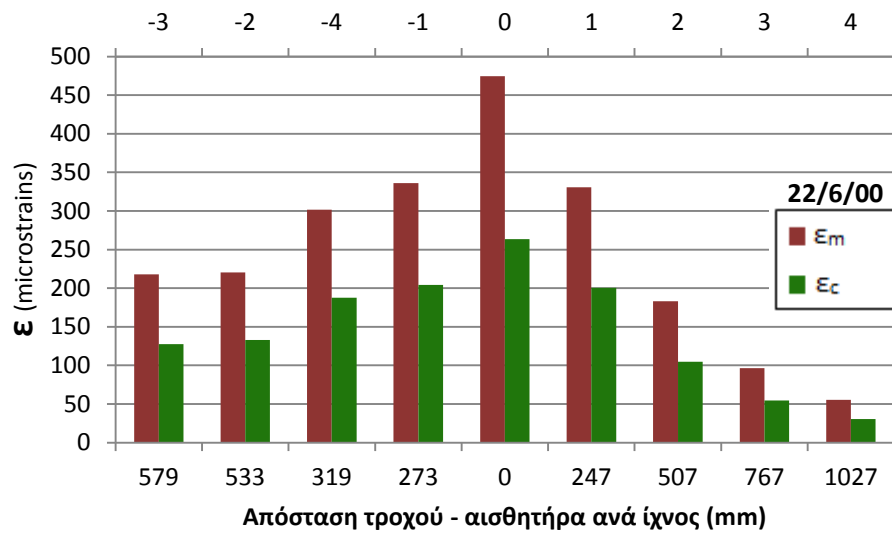
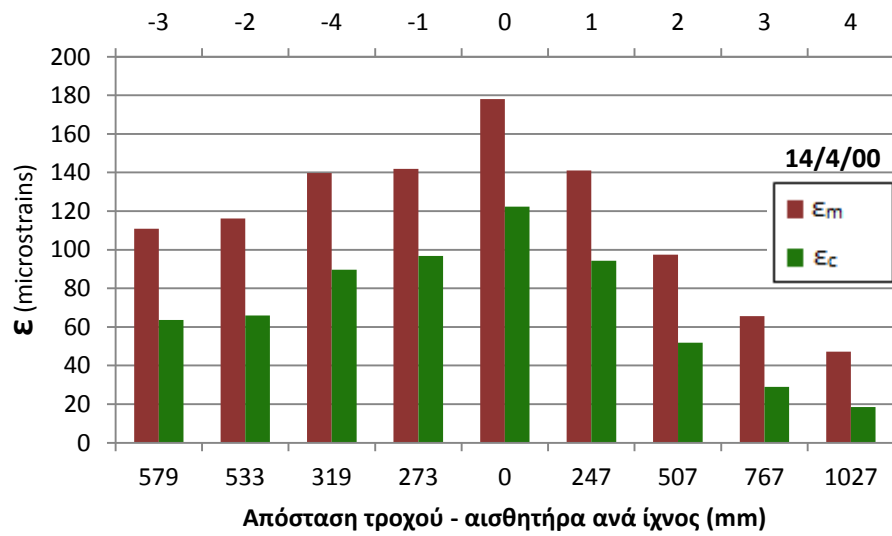
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

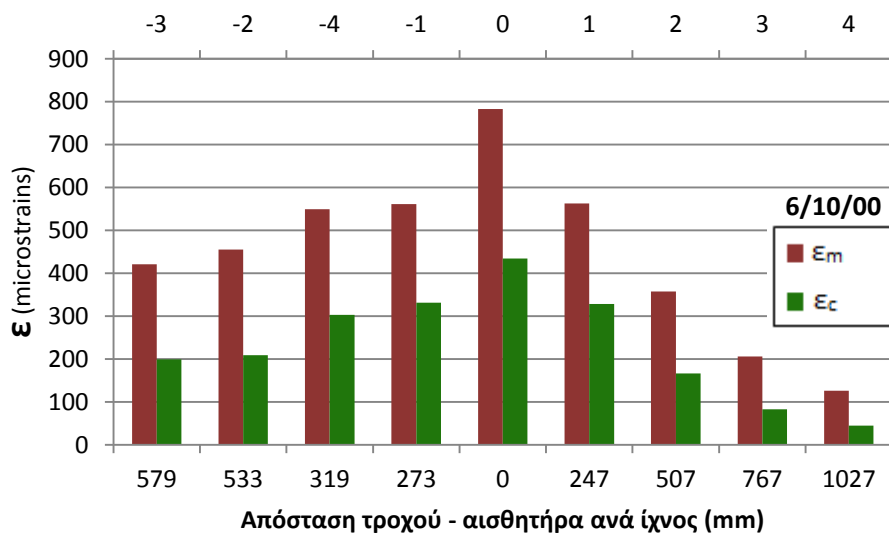
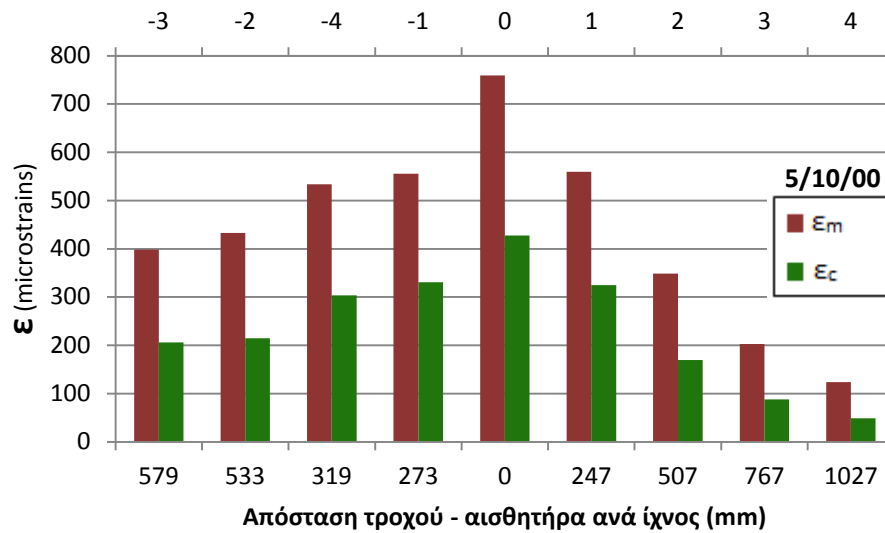
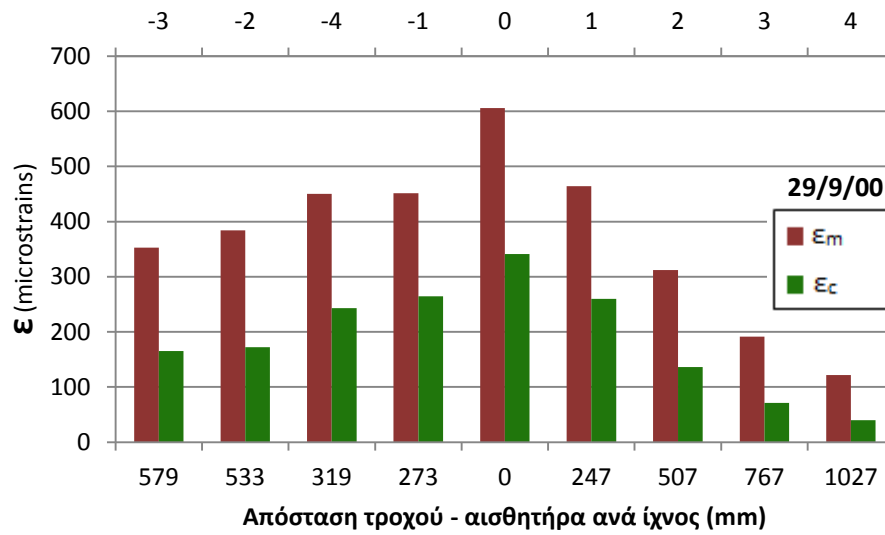
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

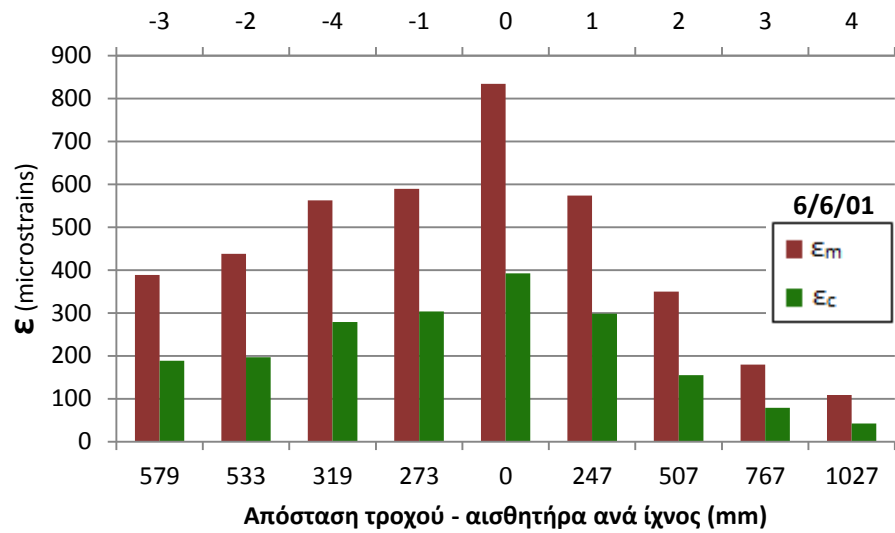
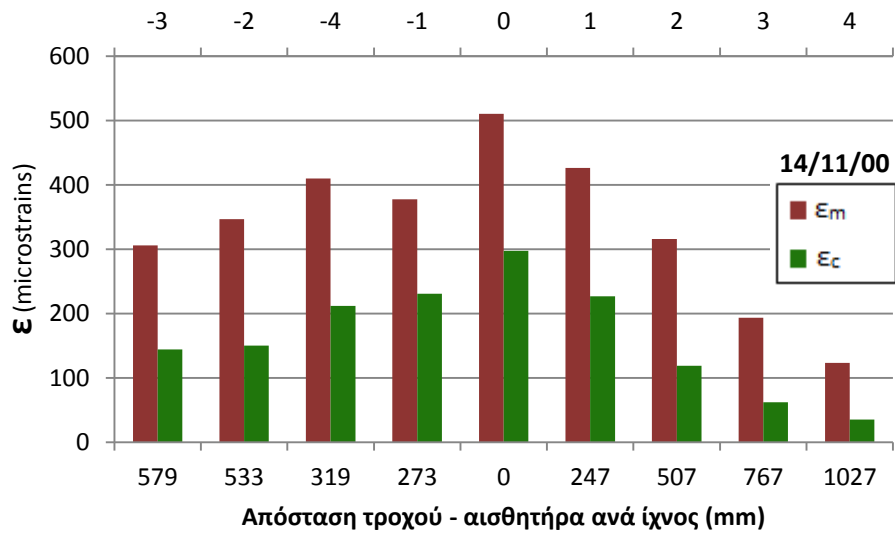
Γ.7.1 Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων παραμορφώσεων για το LFS

Γ.7.1.1 Σύγκριση για ταύτιση θέσεως εφαρμογής FWD – αισθητήρα

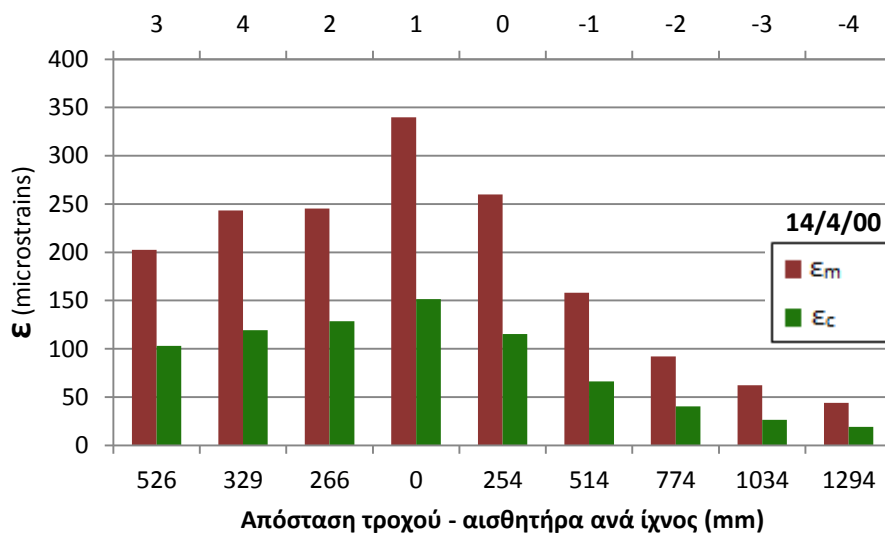
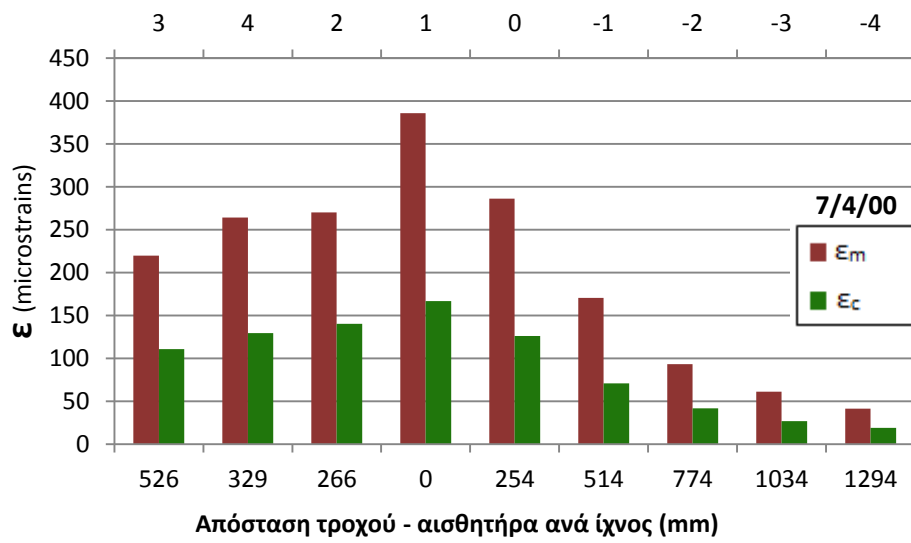
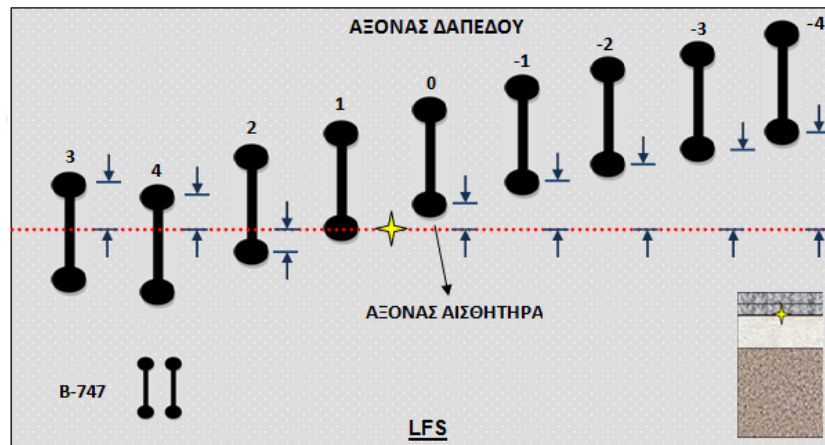


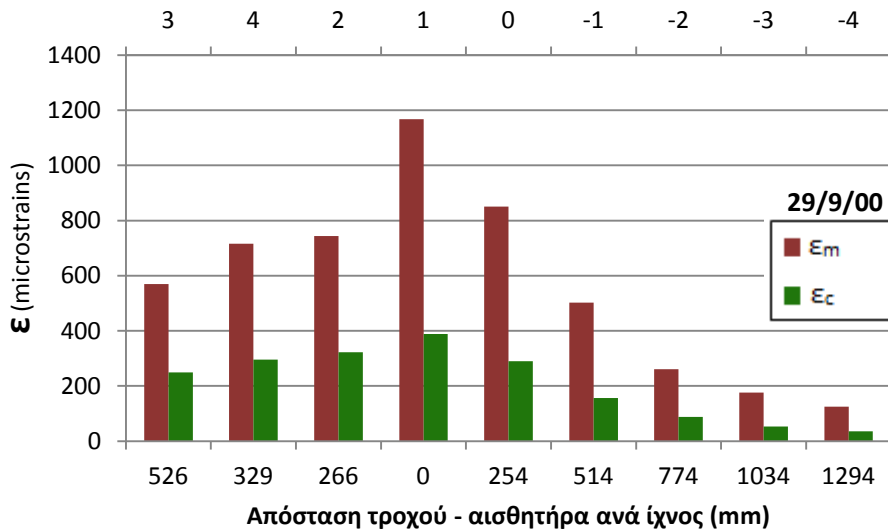
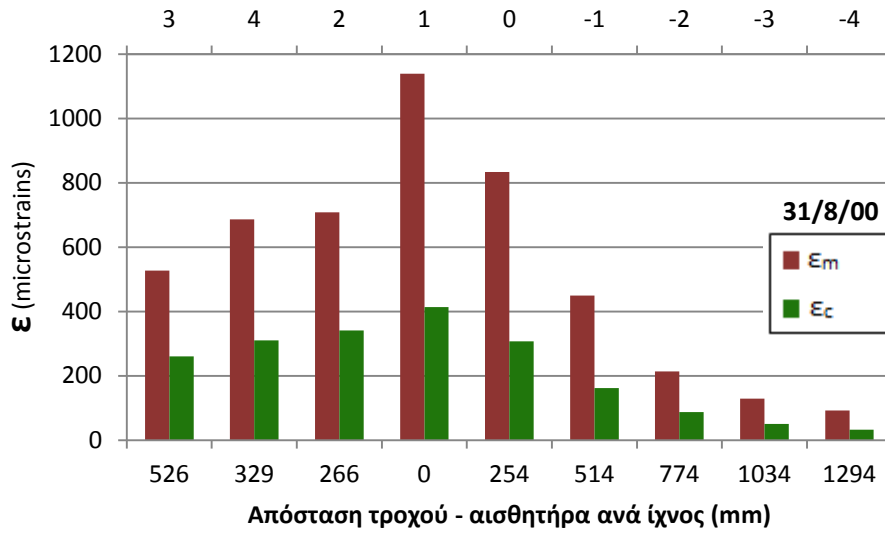
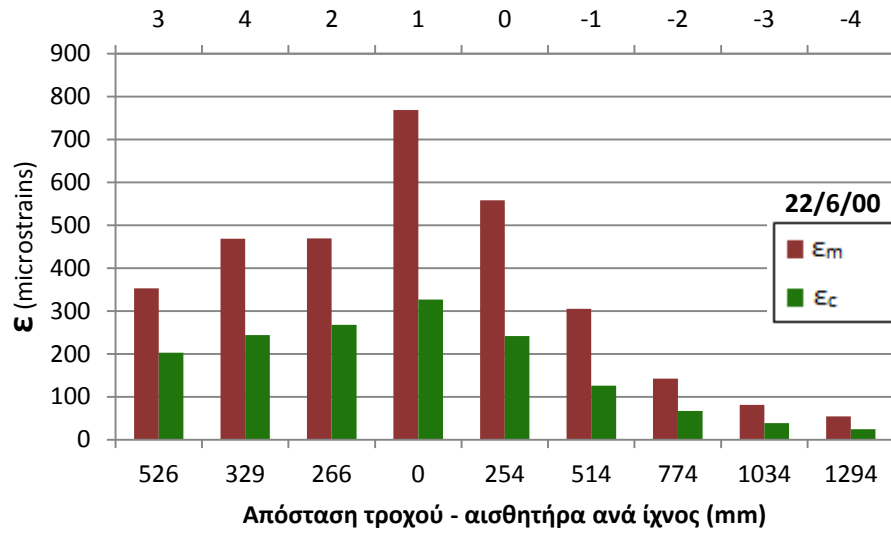


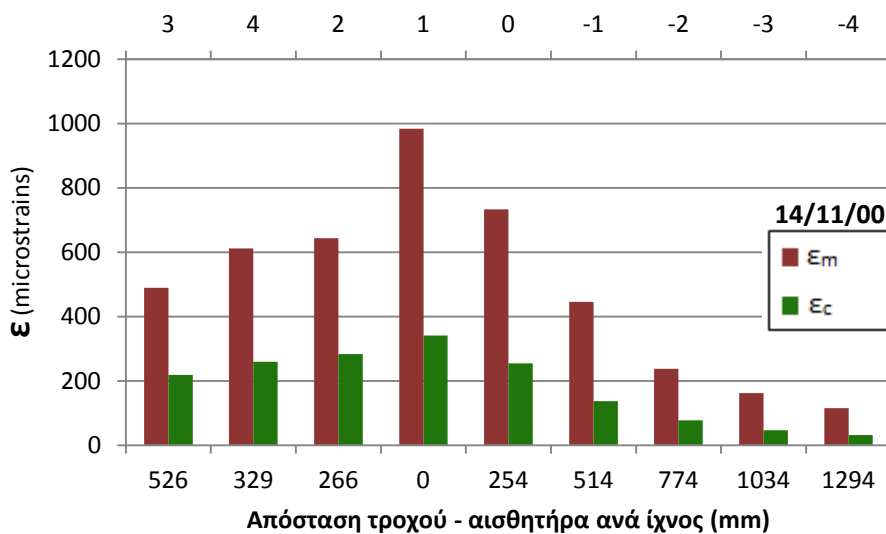
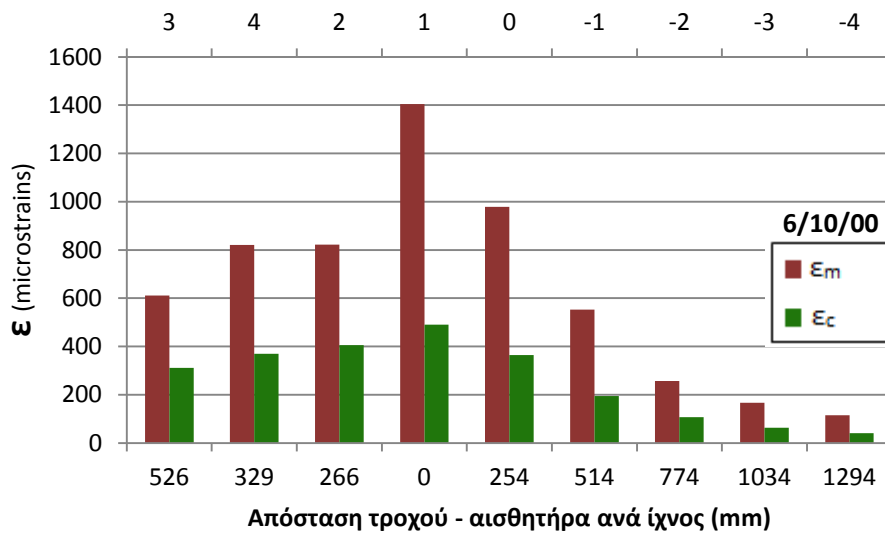
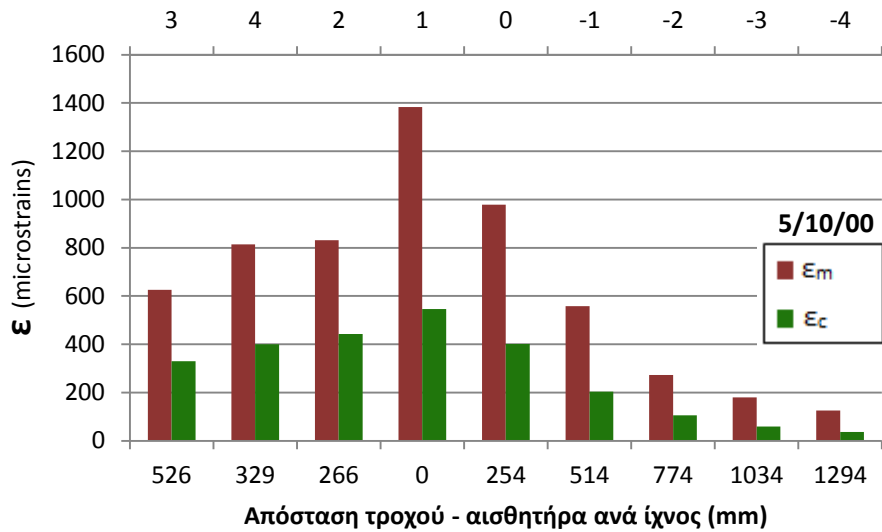


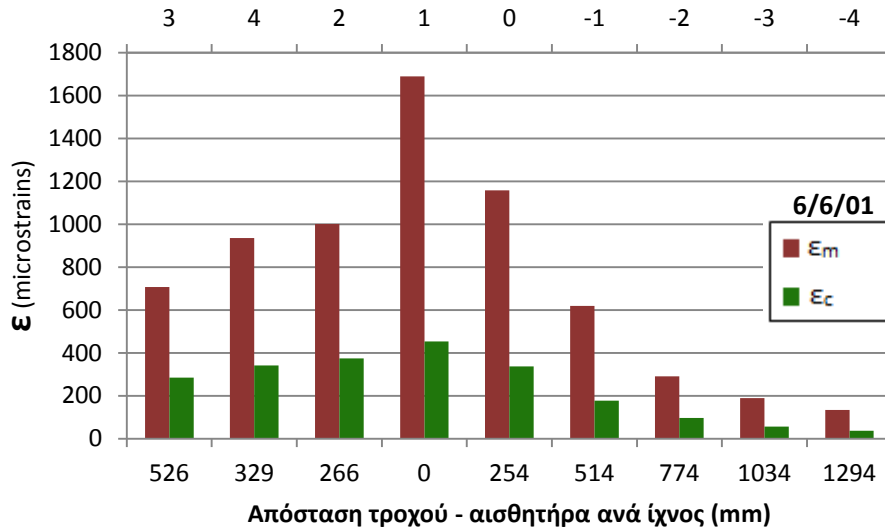


Εικόνα Γ.7.1 Δάπεδο LFS, βόρειο τμήμα (B-777) – Σύγκριση πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος



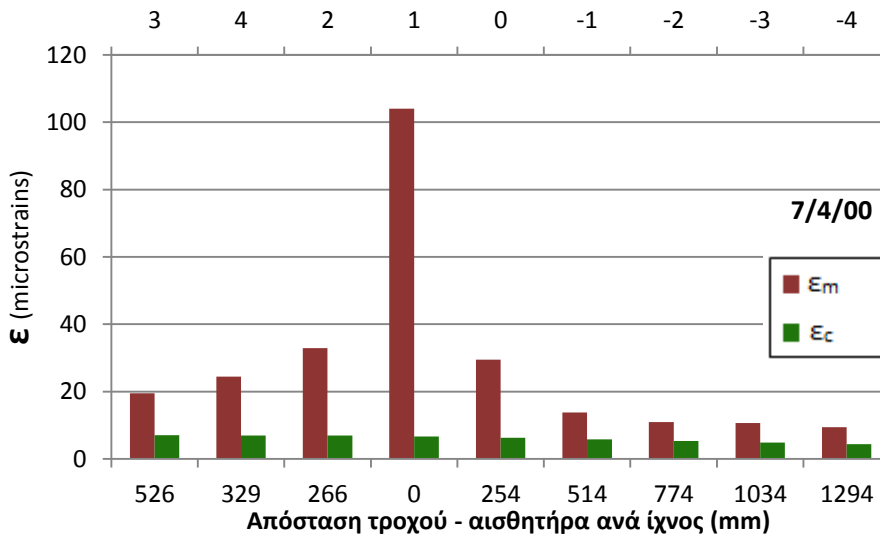
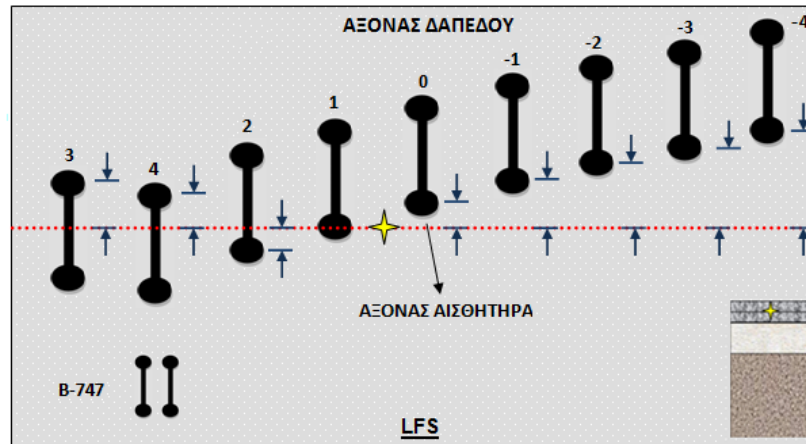


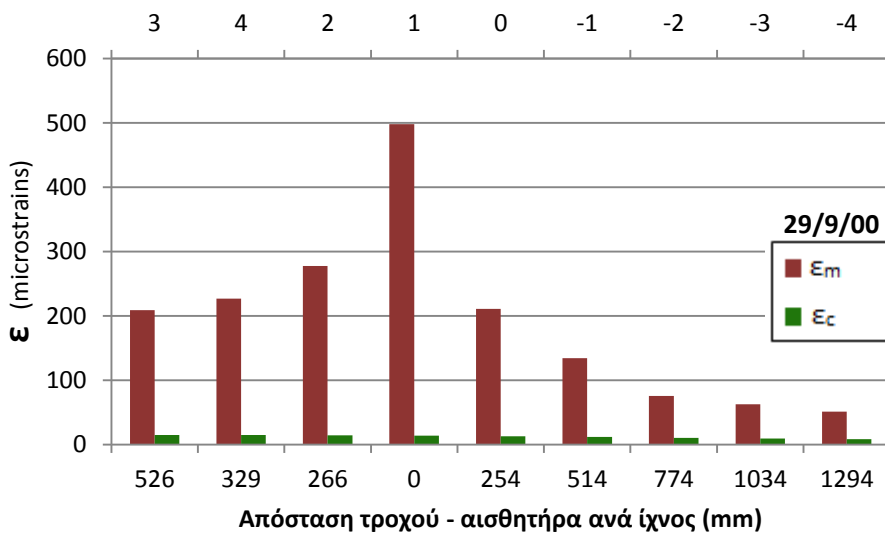
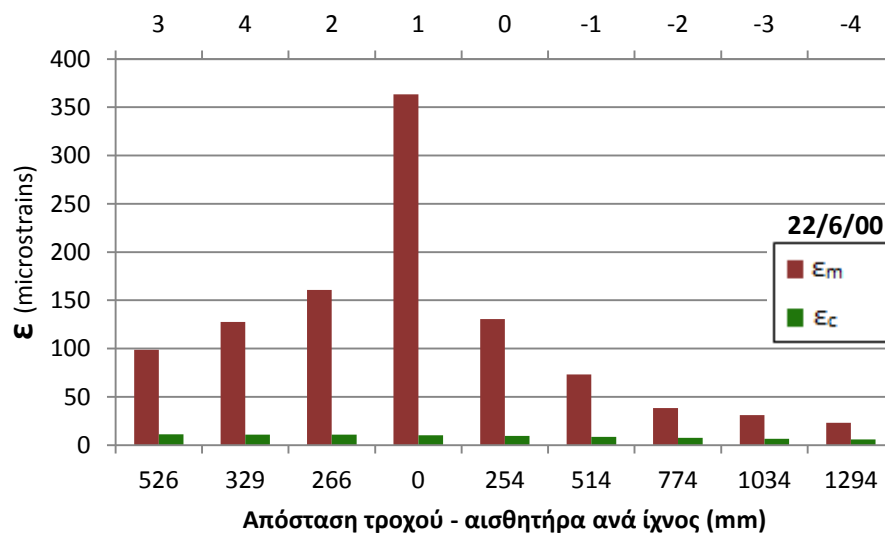
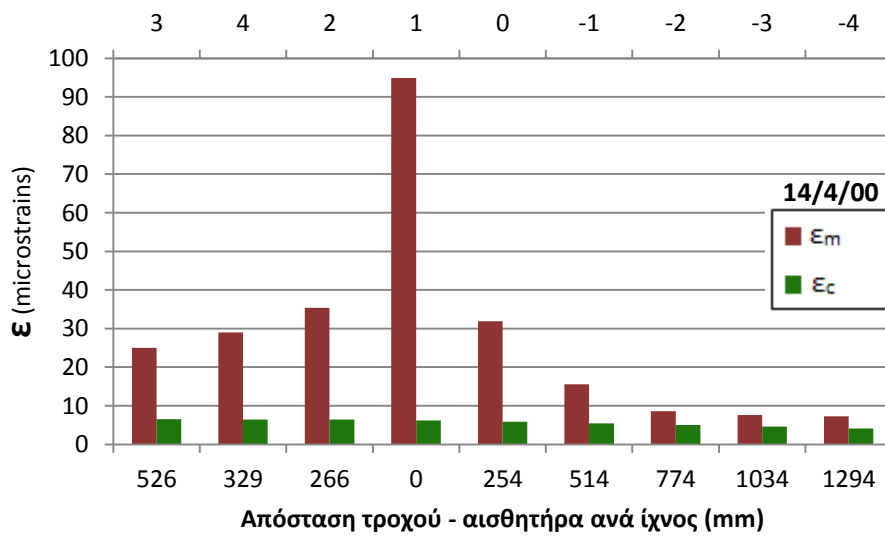


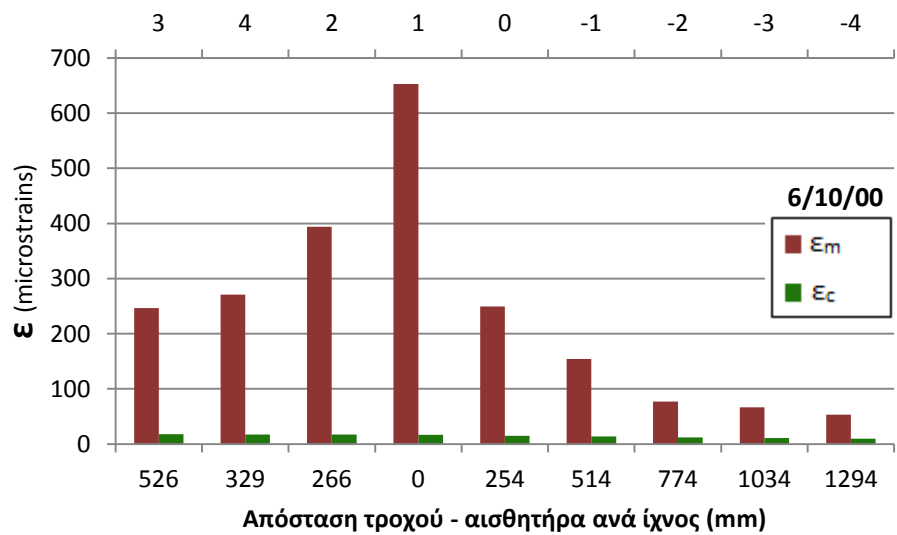
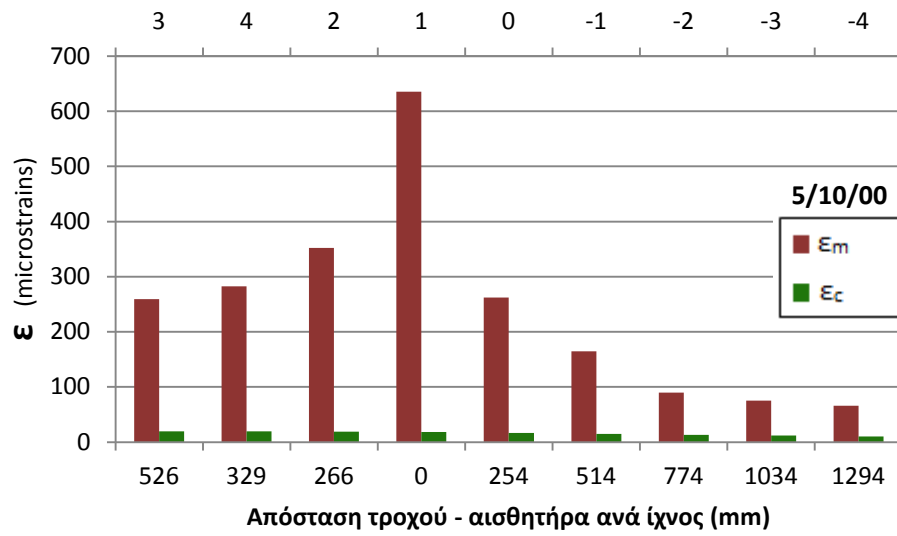


Εικόνα Γ.7.2 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα (B-747) – Σύγκριση πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος

Γ.7.1.2 Σύγκριση για απόκλιση θέσεως εφαρμογής FWD – αισθητήρα



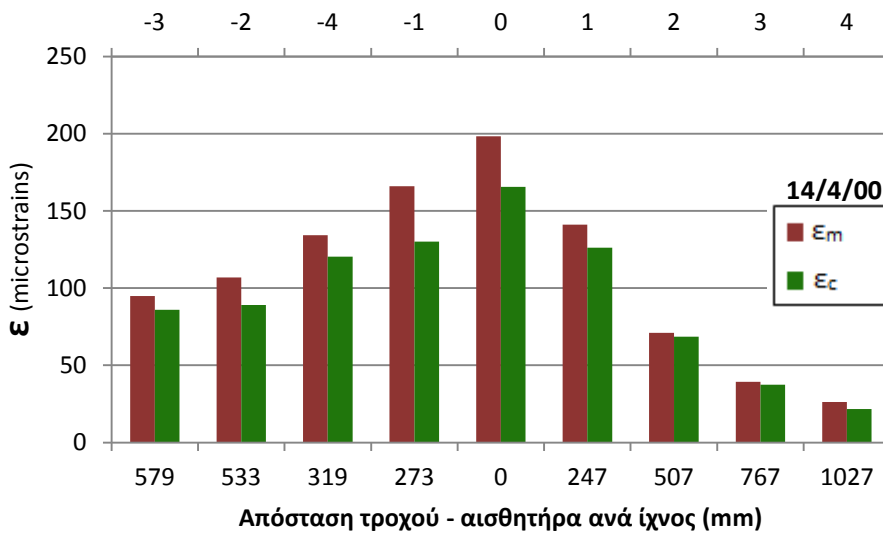
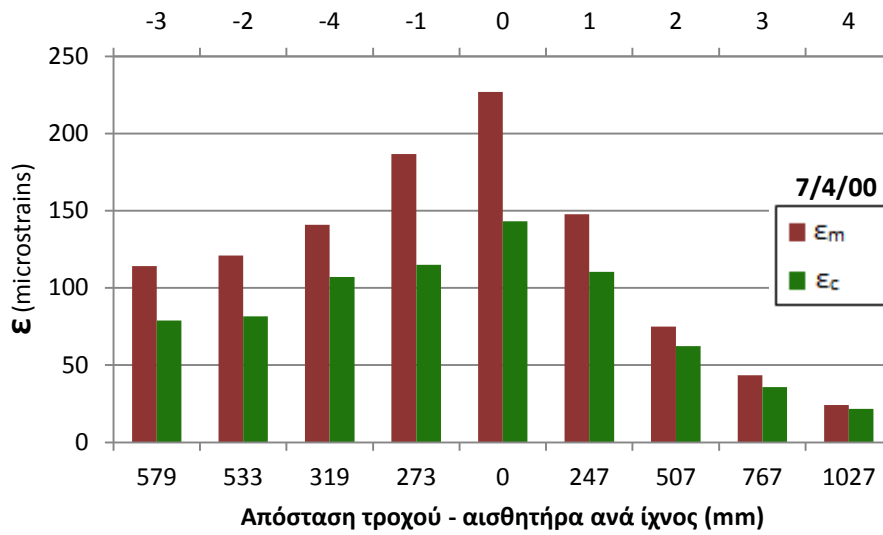
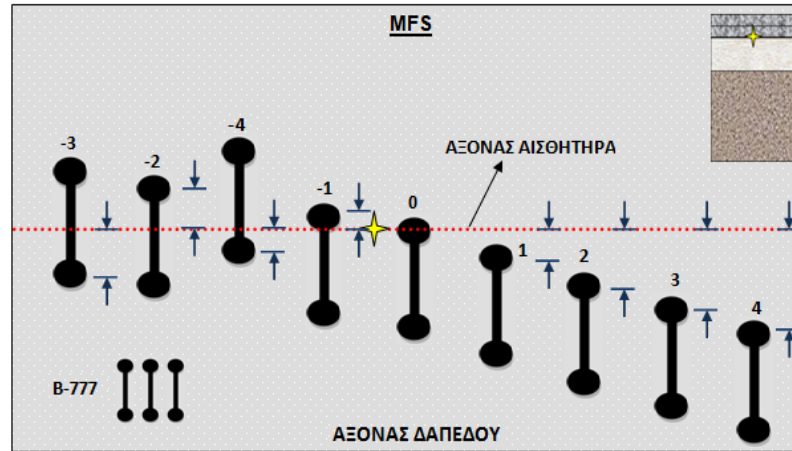


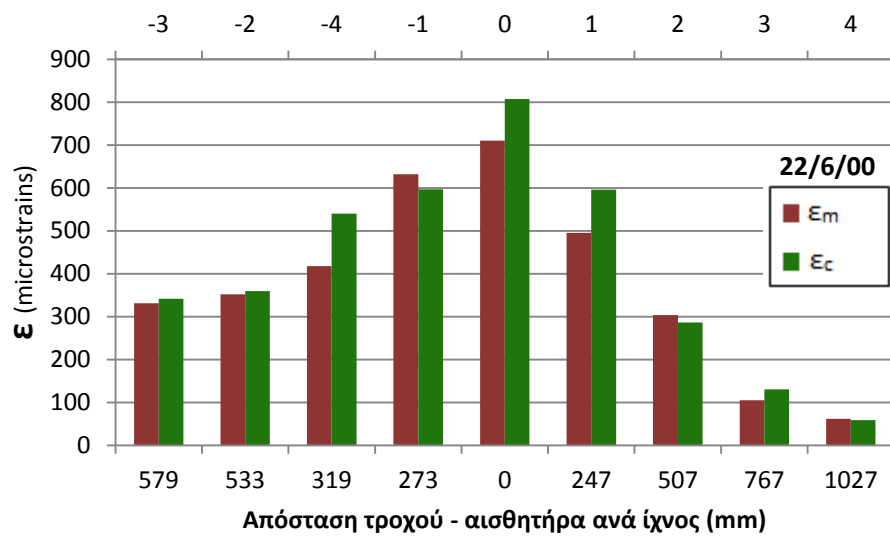
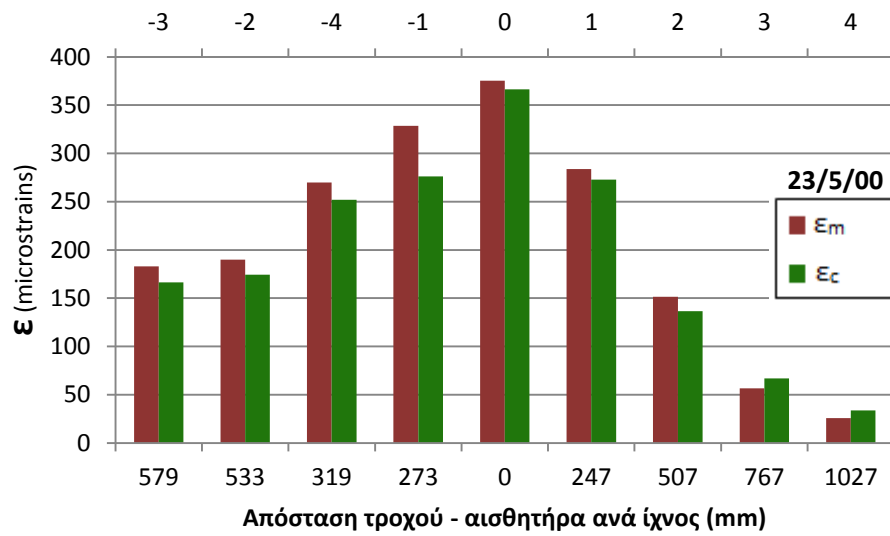


Εικόνα Γ.7.3 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα (B-747) – Σύγκριση πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων στο μέσον του ασφαλτικού σκυροδέματος

Γ.7.2 Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων παραμορφώσεων για το MFS

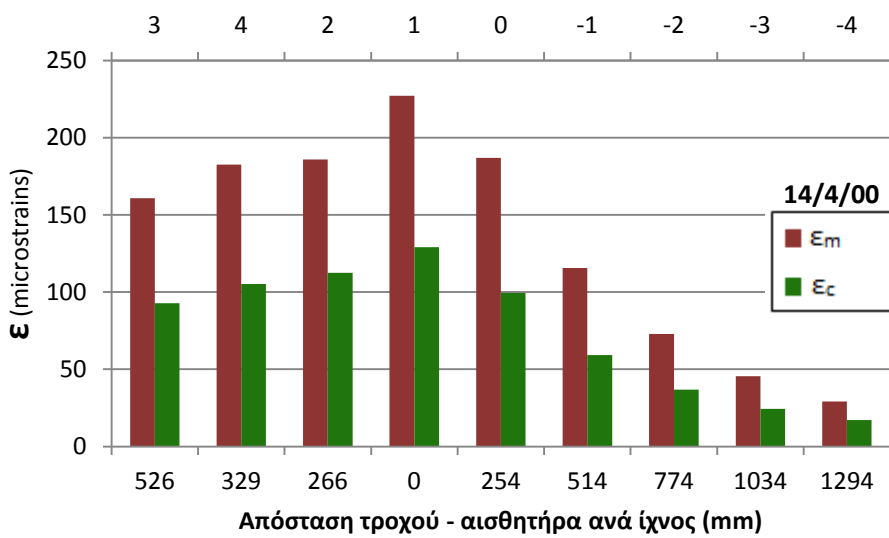
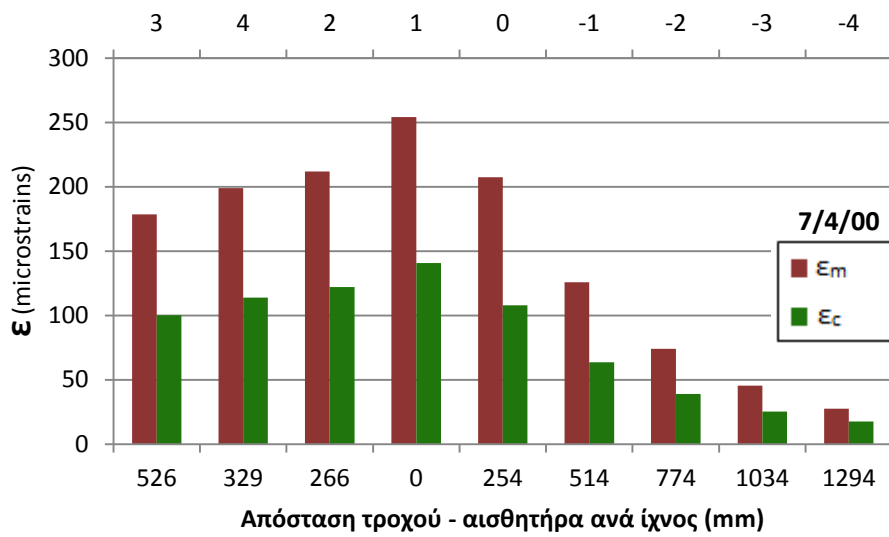
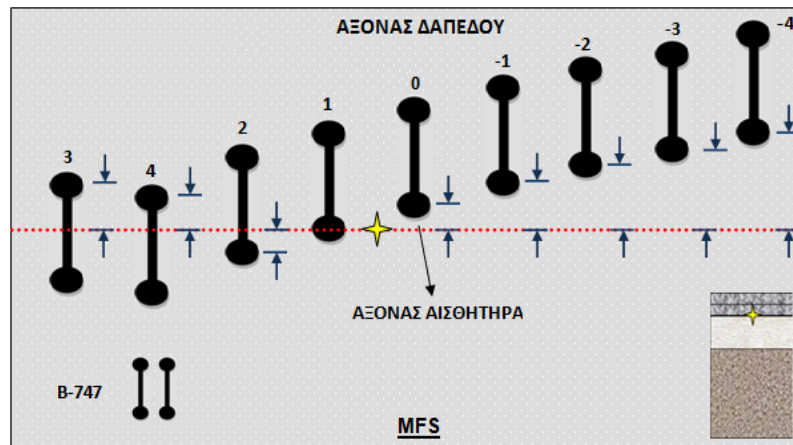
Γ.7.2.1 Σύγκριση για ταύτιση θέσεως εφαρμογής FWD – αισθητήρα

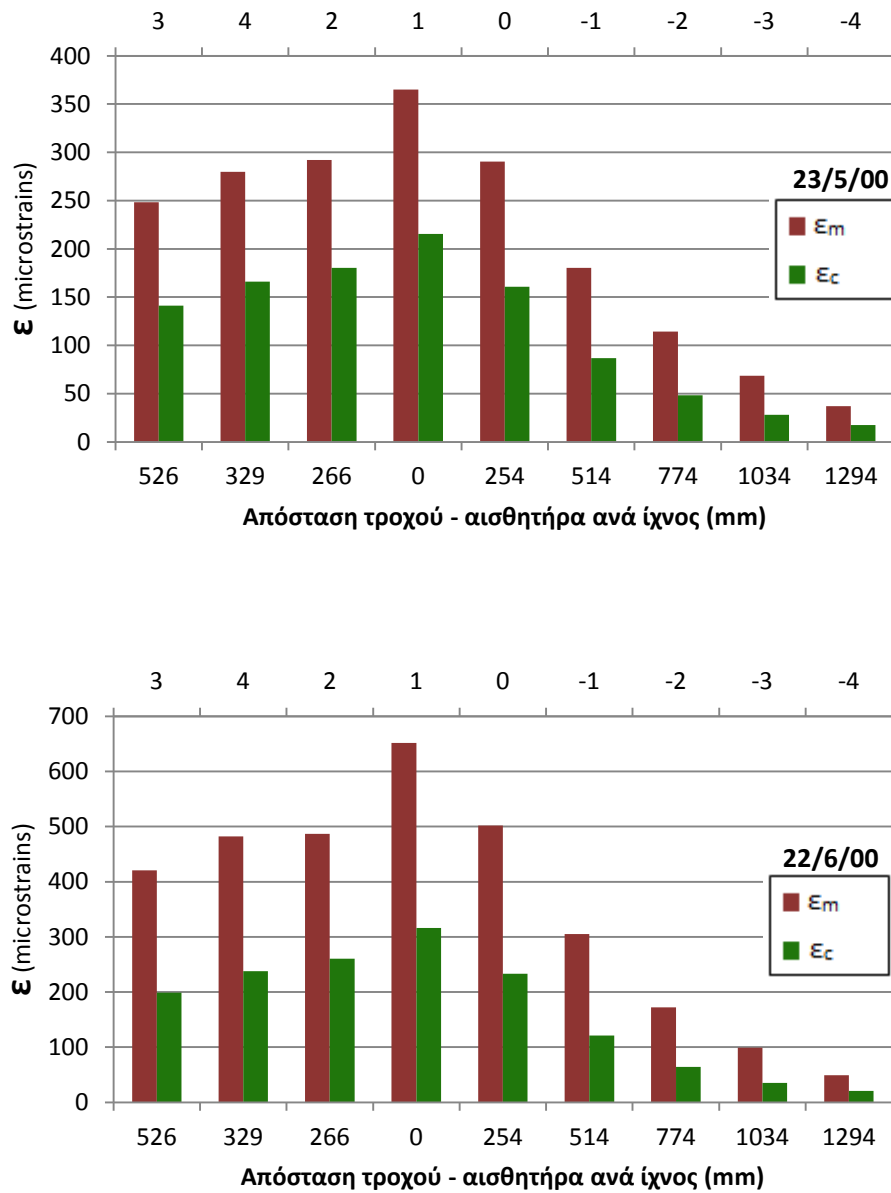




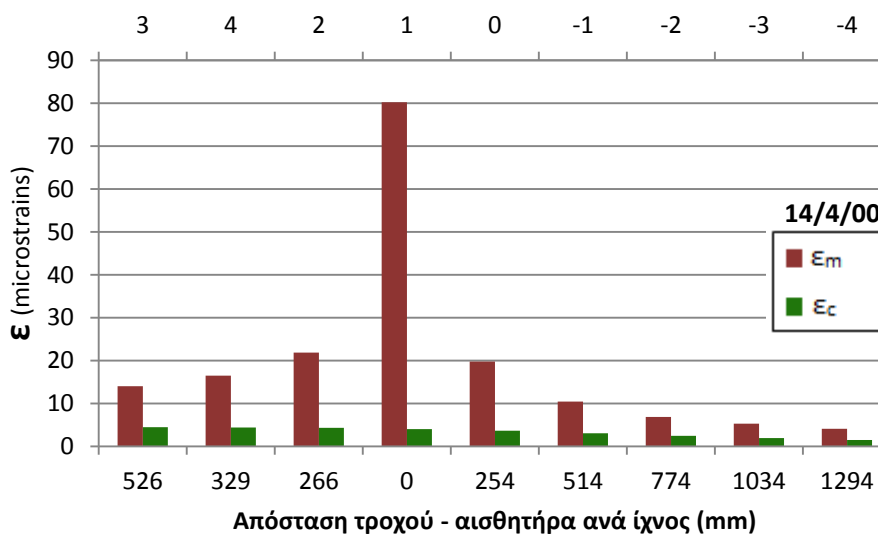
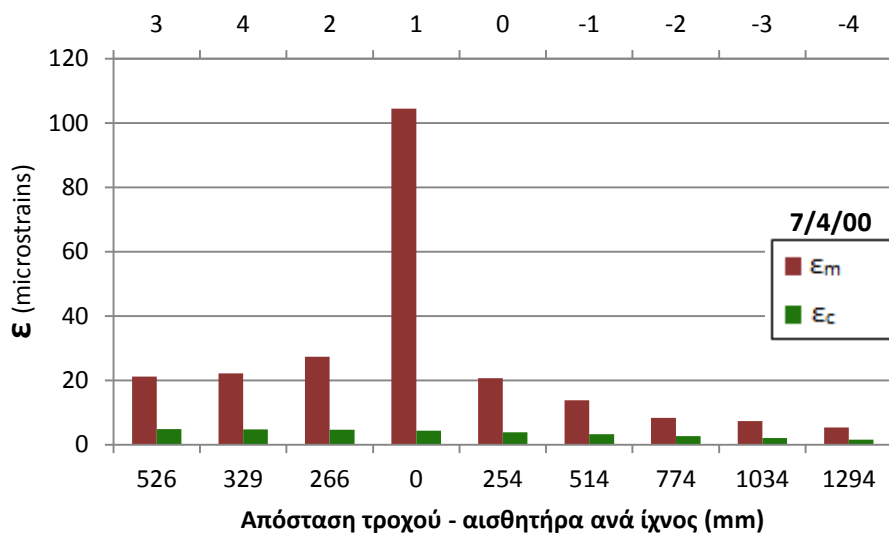
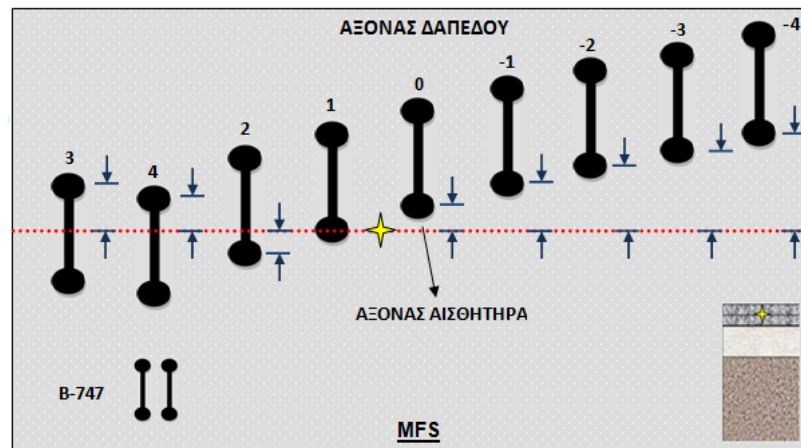
Εικόνα Γ.7.4 Δάπεδο MFS, βόρειο τμήμα (B-777) – Σύγκριση πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος

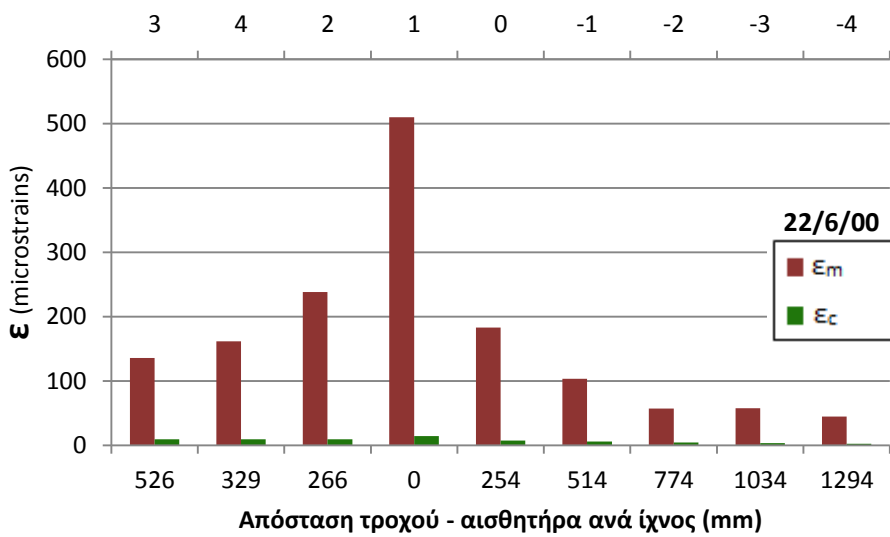
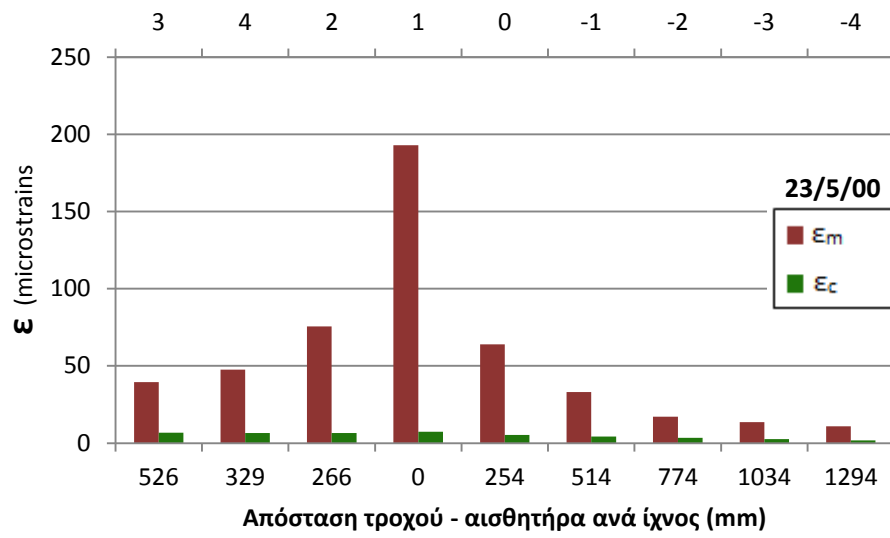
Γ.7.2.2 Σύγκριση για απόκλιση θέσεως εφαρμογής FWD – αισθητήρα





Εικόνα Γ.7.5 Δάπεδο MFS, νότιο τμήμα (B-747) – Σύγκριση πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος



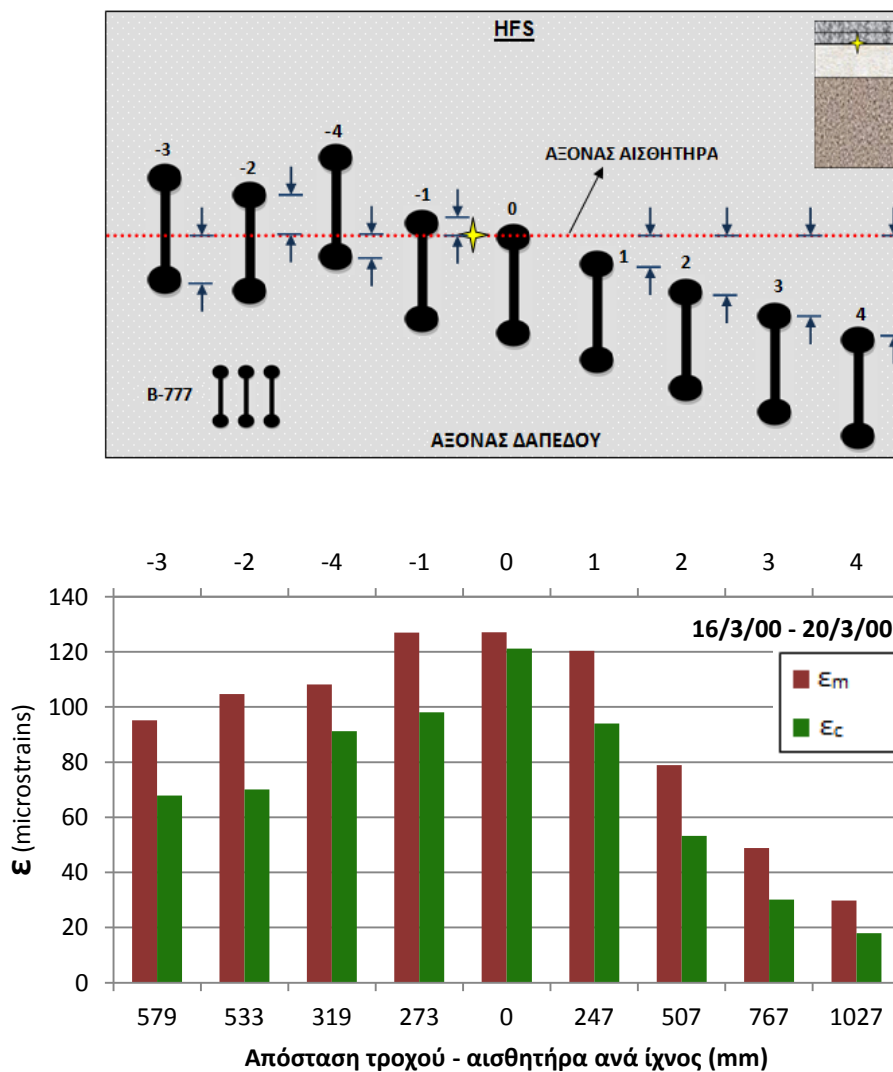


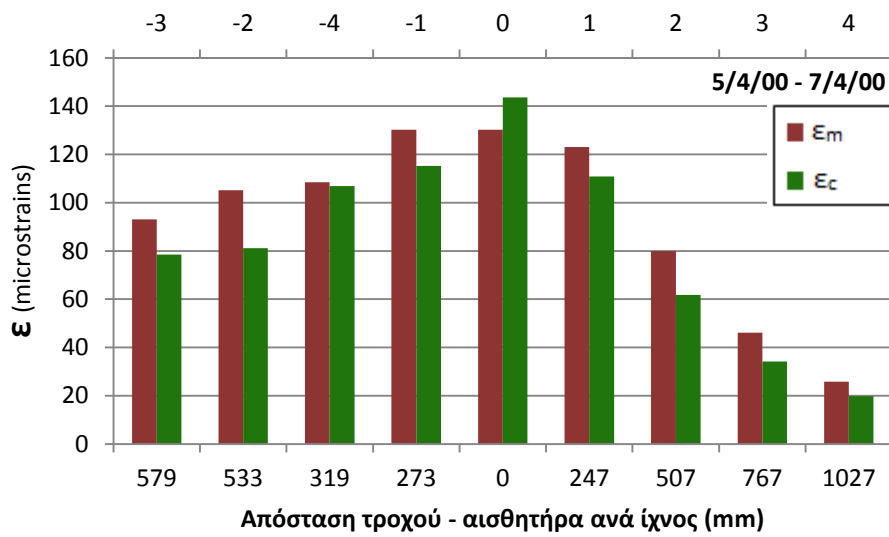
Εικόνα Γ.7.6 Δάπεδο MFS, νότιο τμήμα (B-747) – Σύγκριση πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων στο μέσον του ασφαλτικού σκυροδέματος

Γ.7.3 Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων παραμορφώσεων για το HFS

Για το δάπεδο αυτό, οι αναλυτικά υπολογισμένες παραμορφώσεις υπολογίστηκαν για δύο ημέρες που δεν έγιναν δοκιμαστικές φορτίσεις, αλλά μόνο εφαρμογές FWD (20/3/00 και 7/4/00). Οι παραμορφώσεις που προέκυψαν συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες μετρημένες των αμέσως προηγούμενων ημερών κατά τις οποίες πραγματοποιήθηκαν δοκιμές (16/3/00 και 5/4/00 αντίστοιχα). Στο διάστημα που μεσολάβησε το δάπεδο παρέμεινε αφόρτιστο και επιπλέον οι μέρες των οποίων οι παραμορφώσεις συγκρίνονται, έχουν την ίδια θερμοκρασία.

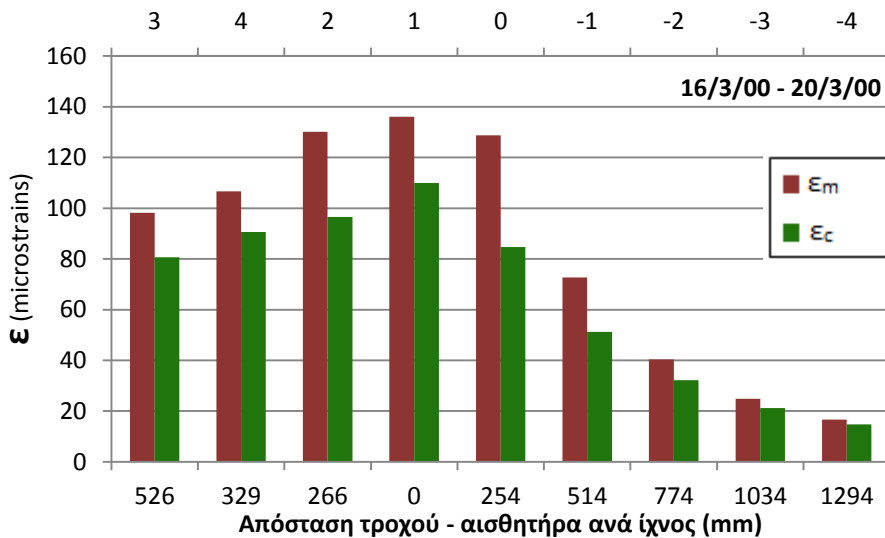
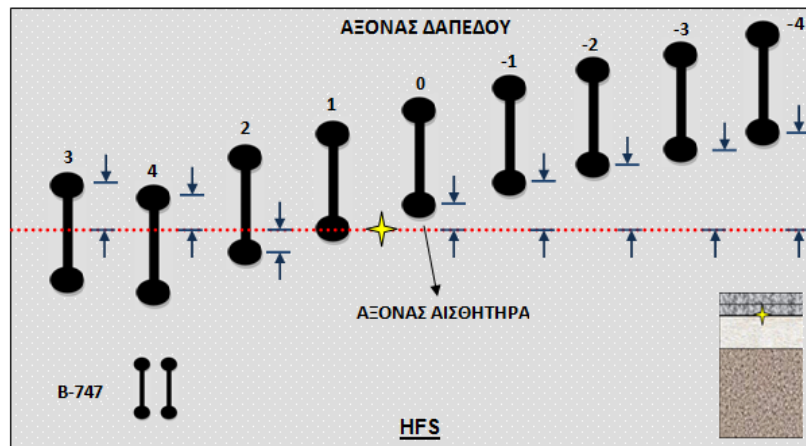
Γ.7.3.1 Σύγκριση για ταύτιση θέσεως εφαρμογής FWD – αισθητήρα

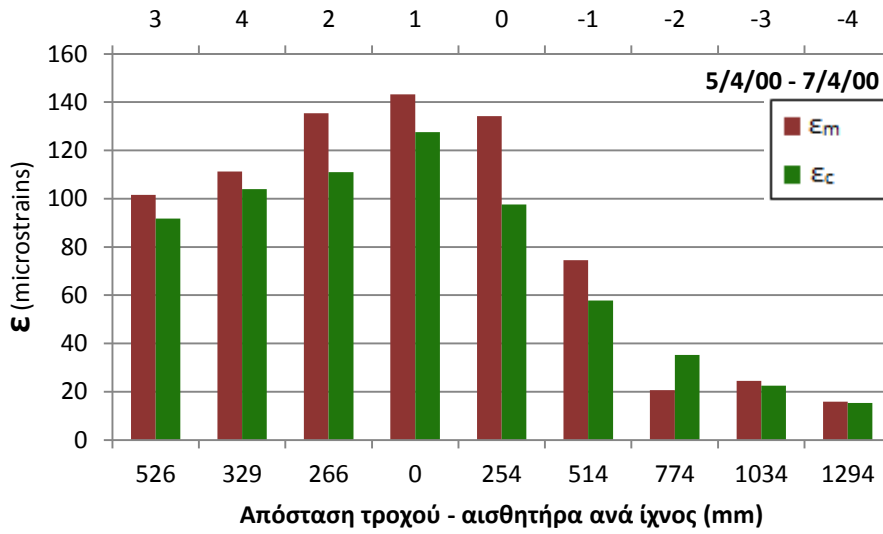




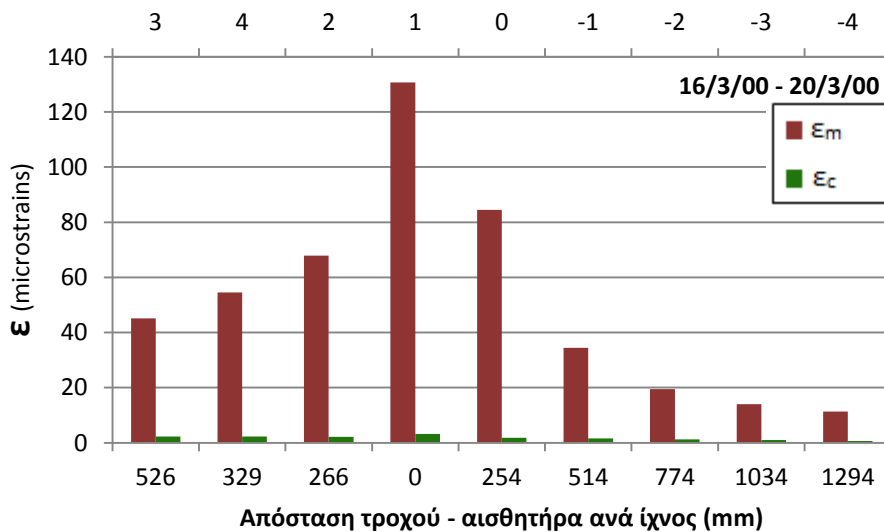
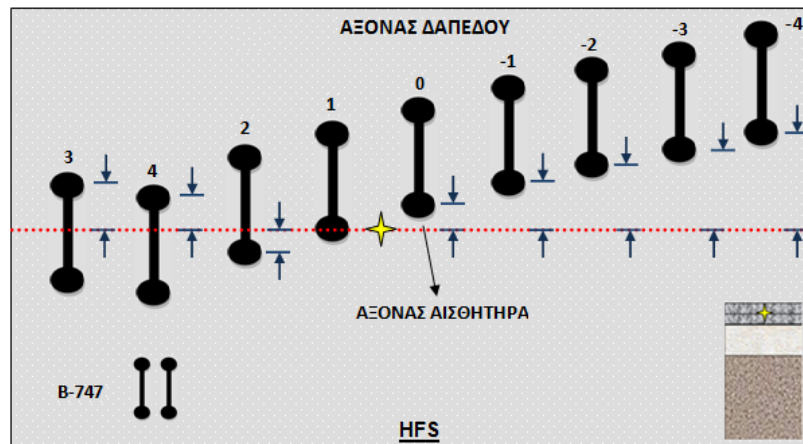
Εικόνα Γ.7.7 Δάπεδο HFS, βόρειο τμήμα (B-777) – Σύγκριση πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος

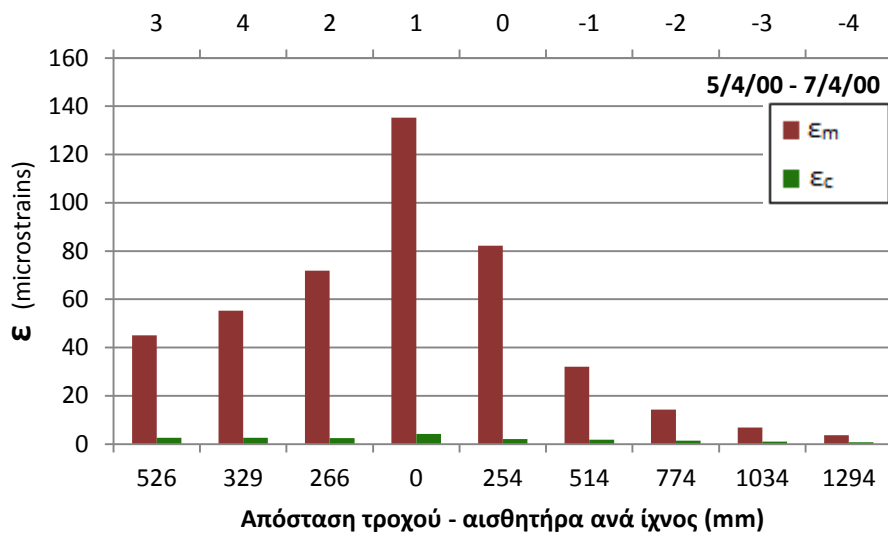
Γ.7.3.2 Σύγκριση για απόκλιση θέσεως εφαρμογής FWD – αισθητήρα





Εικόνα Γ.7.8 Δάπεδο HFS, νότιο τμήμα (B-747) – Σύγκριση πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος





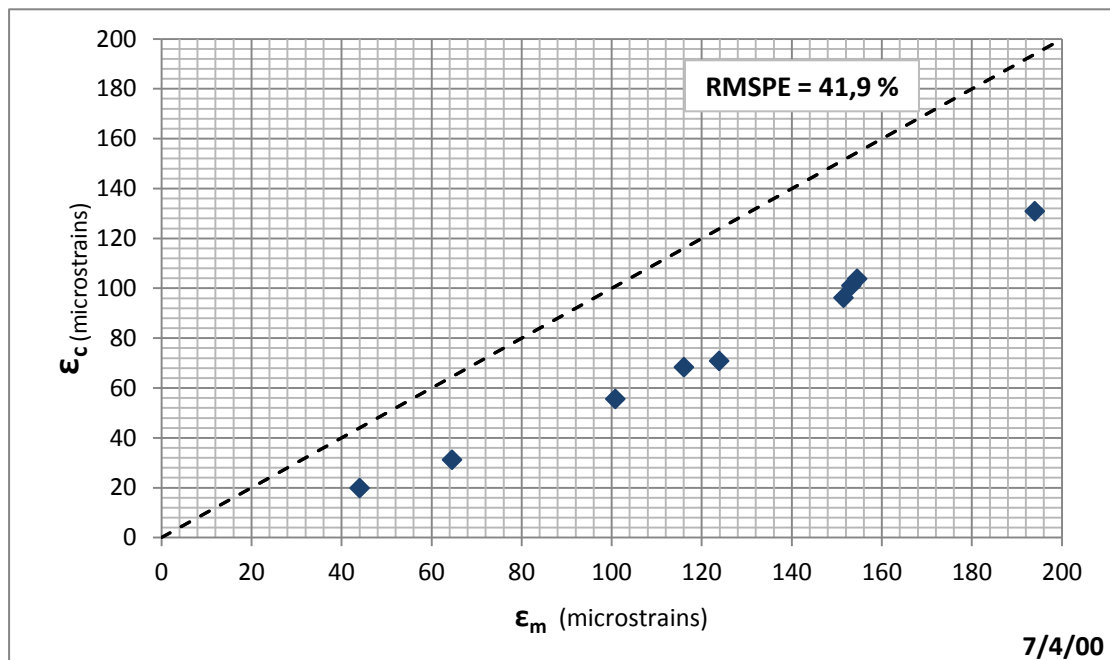
Εικόνα Γ.7.9 Δάπεδο HFS, νότιο τμήμα (B-747) – Σύγκριση πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων στο μέσον του ασφαλτικού σκυροδέματος

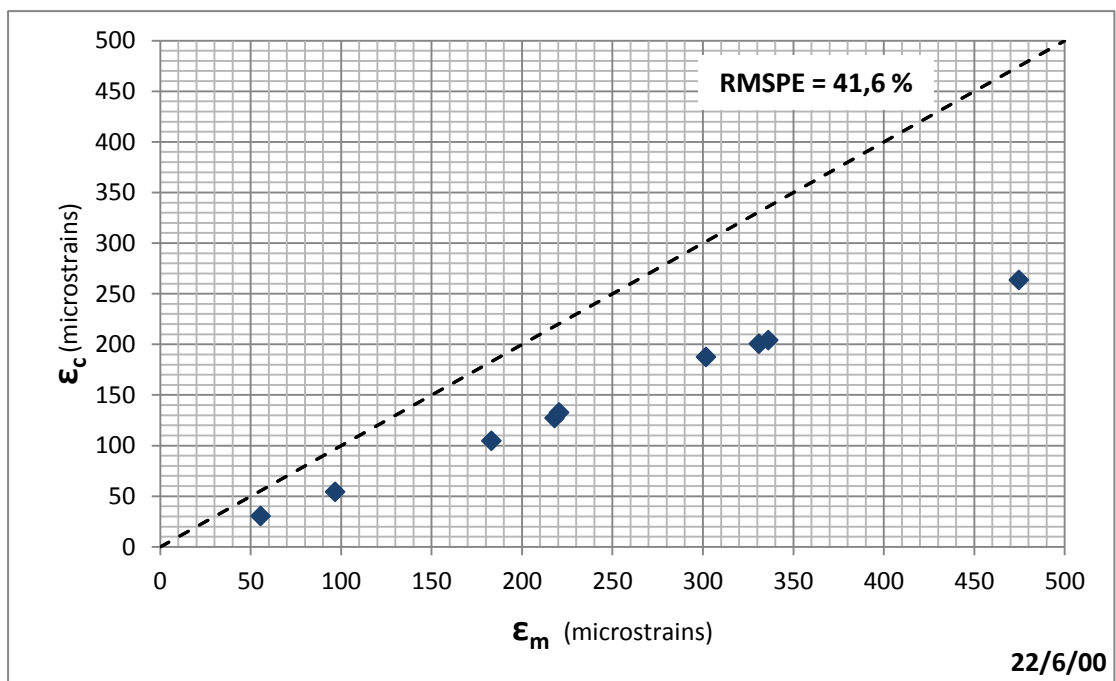
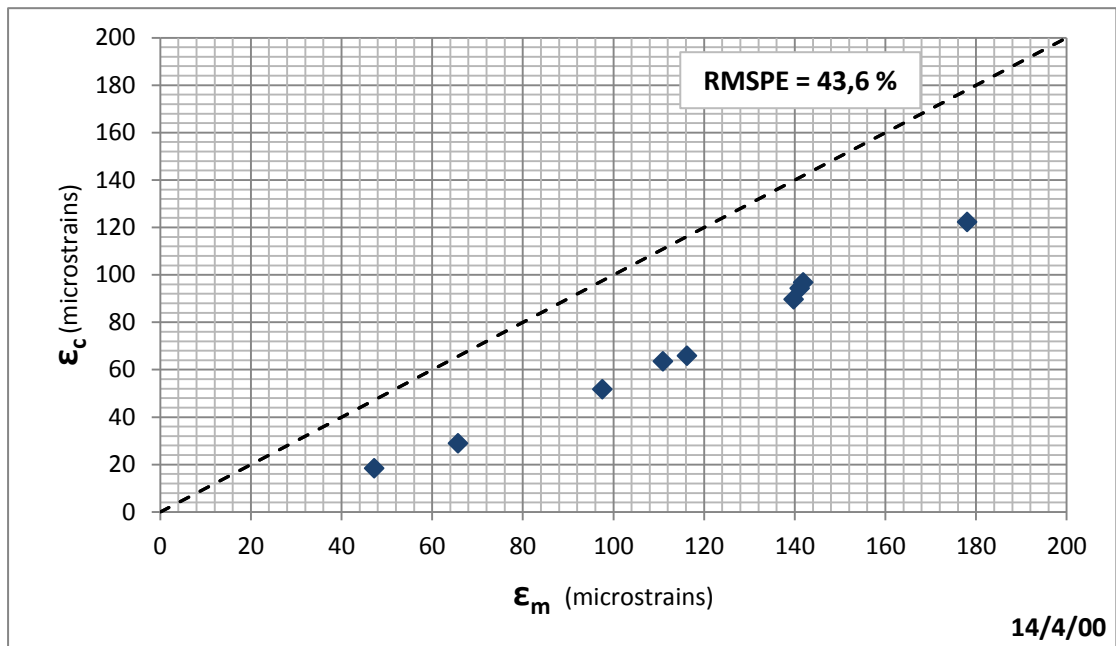
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

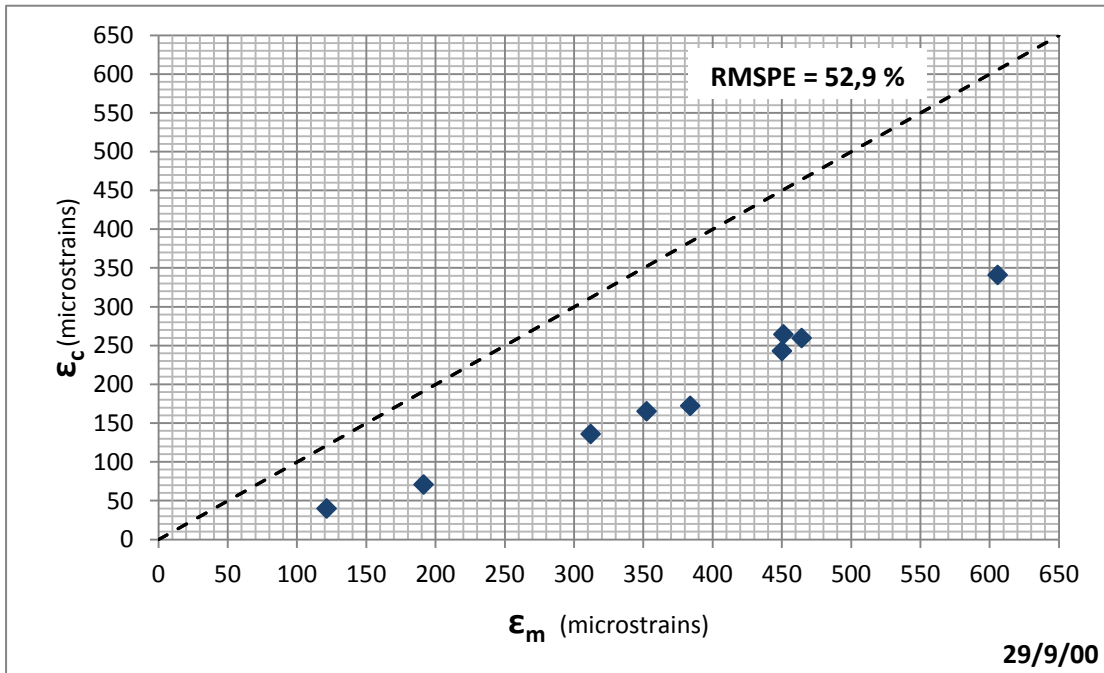
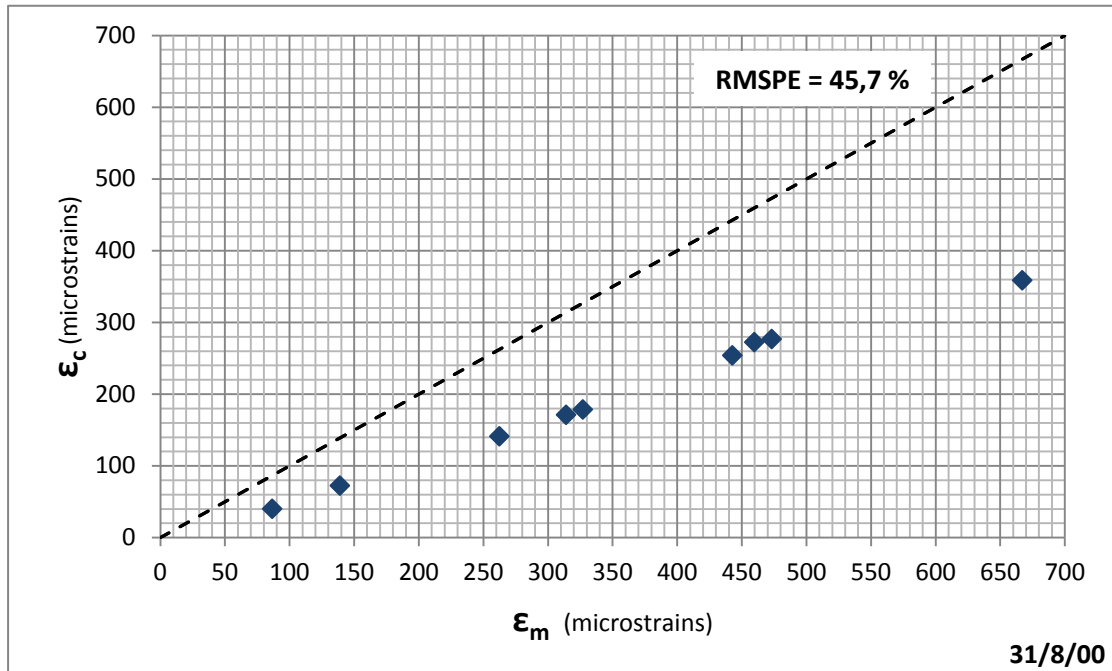
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

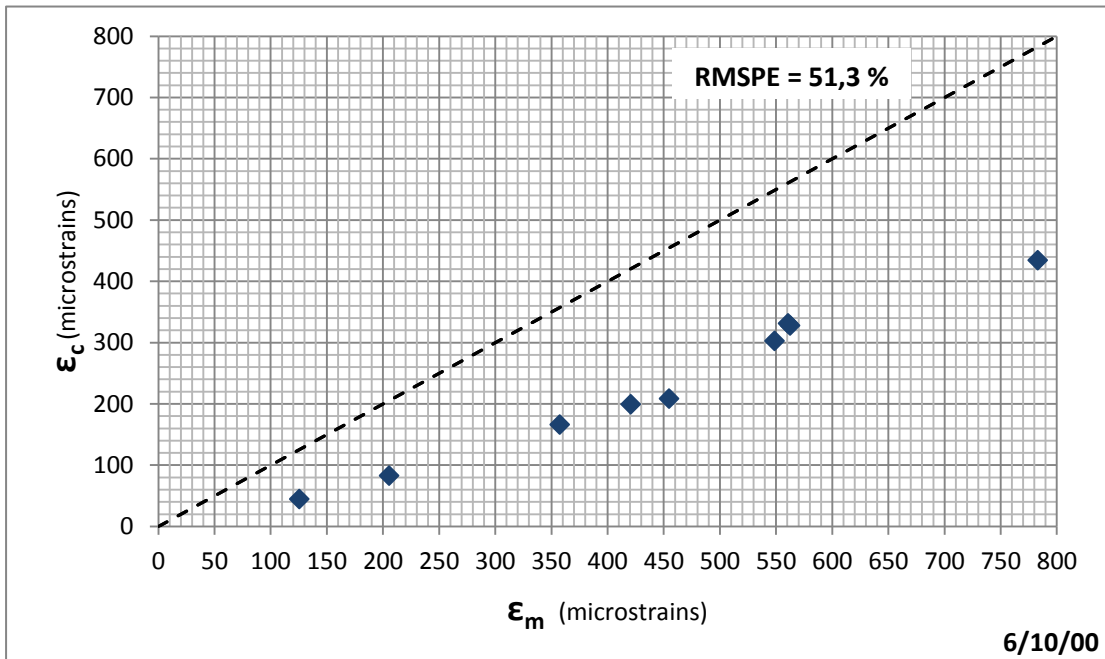
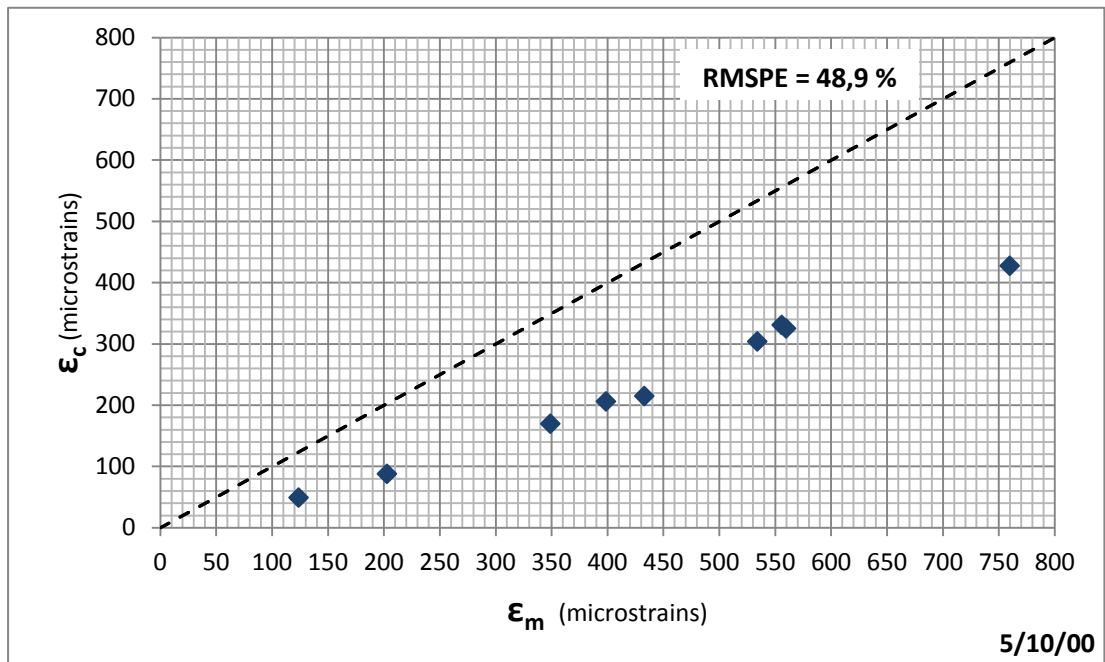
Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα διασποράς των μετρημένων (ϵ_m) και υπολογισμένων (ϵ_c) παραμορφώσεων για κάθε δάπεδο χωριστά. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζεται η ευθεία $y = x$, ούτως ώστε να υπάρχει μία ποιοτική εικόνα του σφάλματος των τιμών ανάλογα με τη διασπορά τους από τη συγκεκριμένη ευθεία. Ταυτόχρονα αναγράφεται και η τιμή του συντελεστή RMSPE ως ποσοστό, που "ποσοτικοποιεί" το σφάλμα μεταξύ των τιμών.

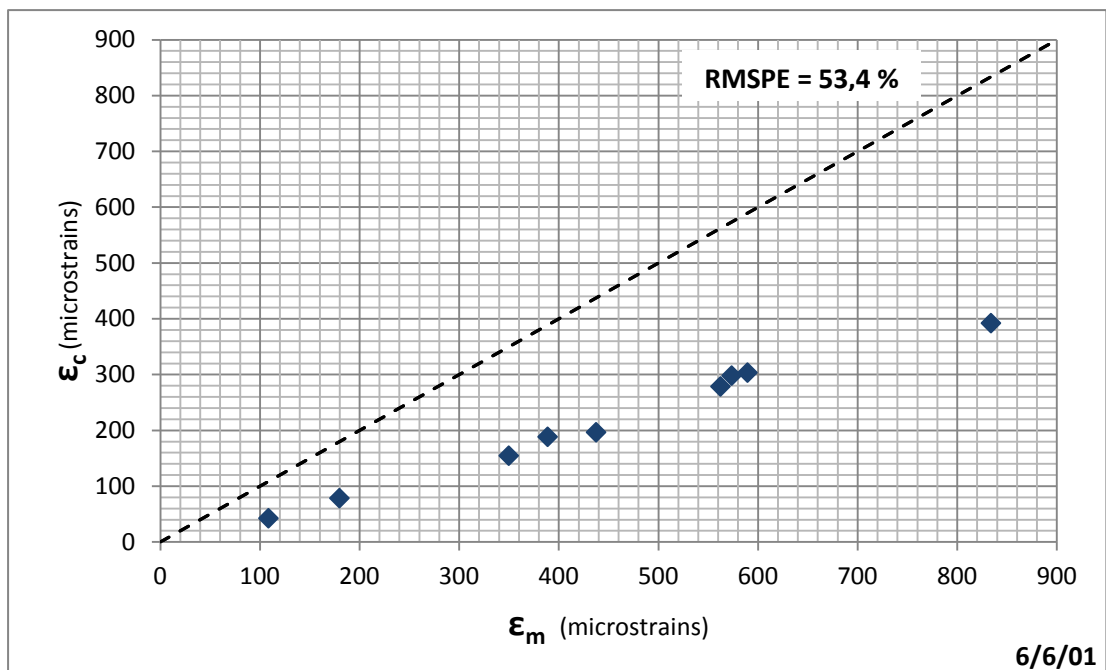
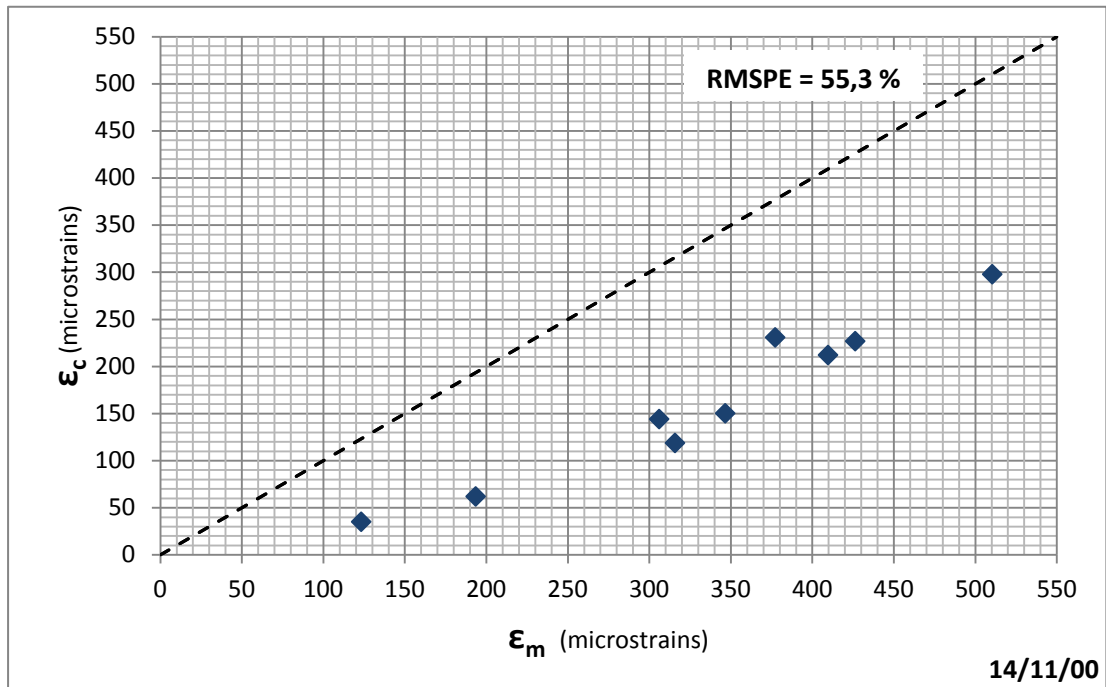
Δ.8.1 Διαγράμματα διασποράς παραμορφώσεων δαπέδου LFS



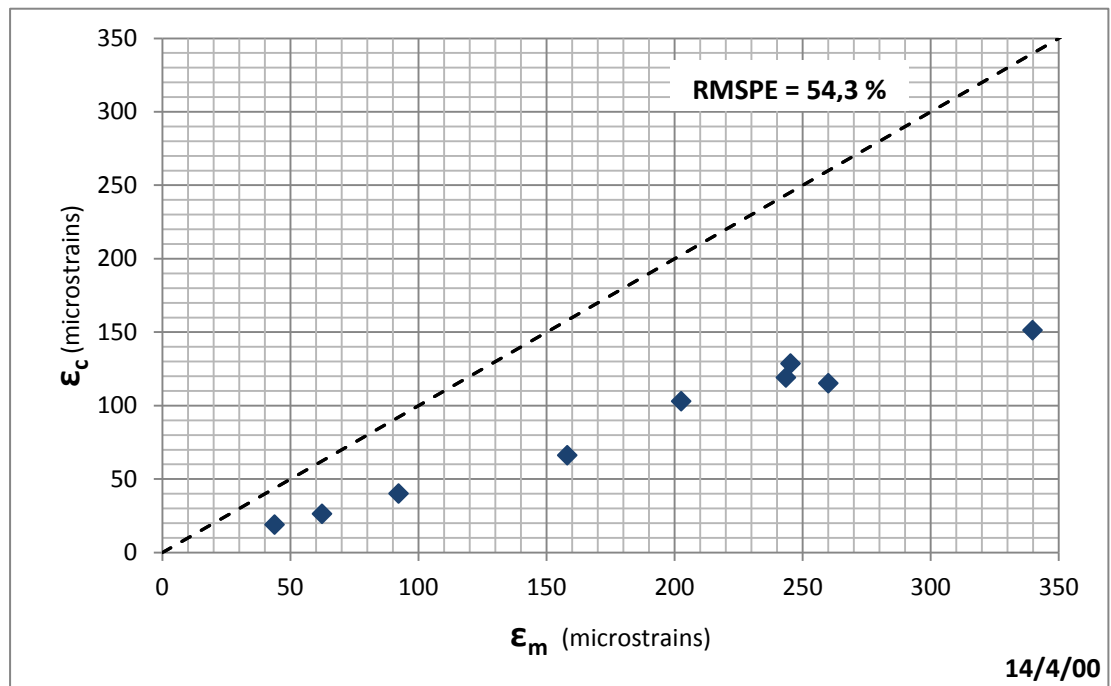
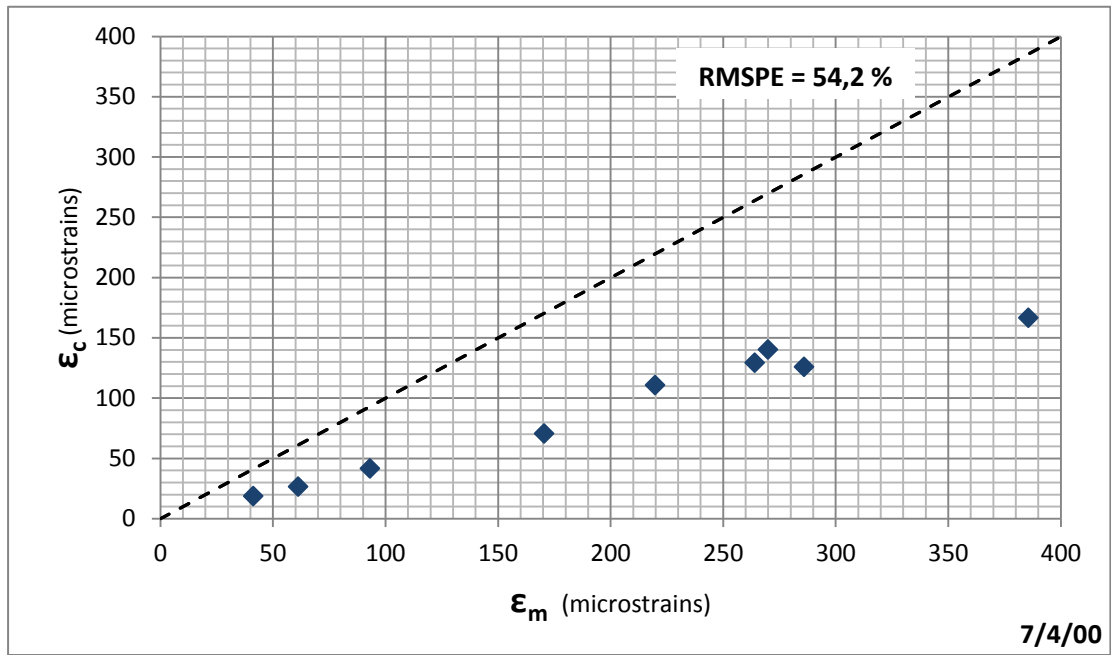


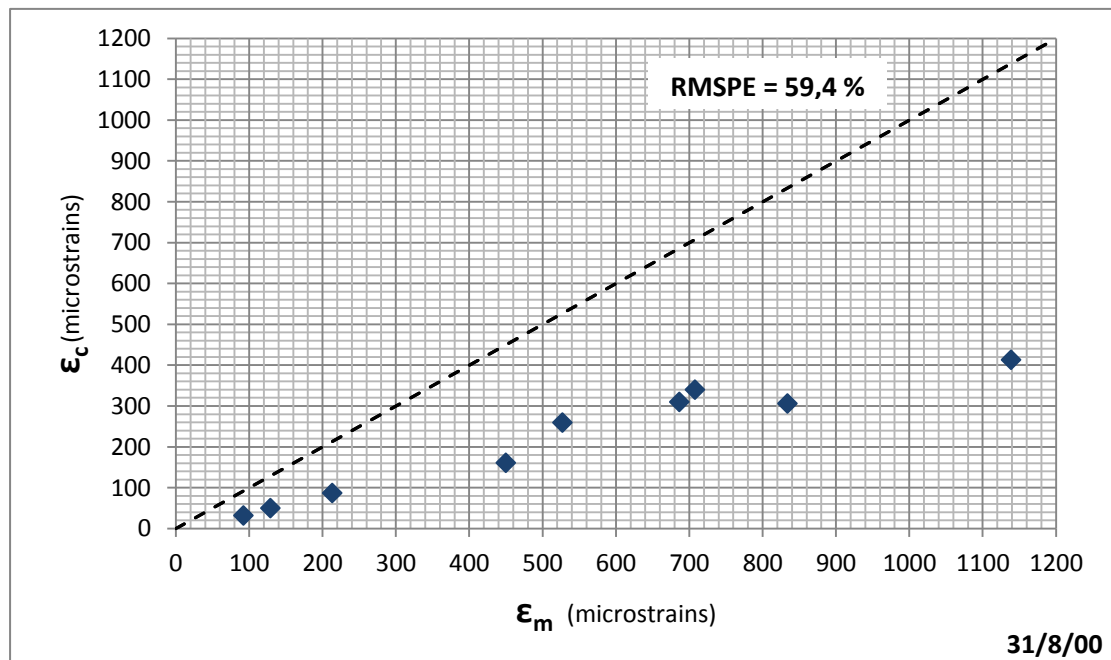
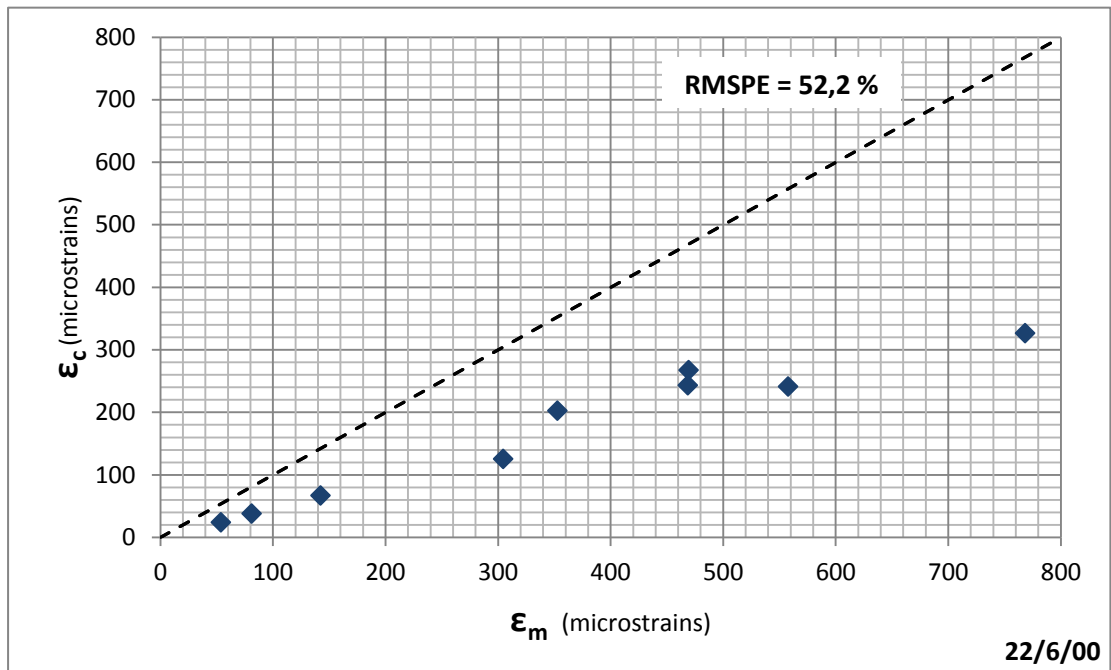


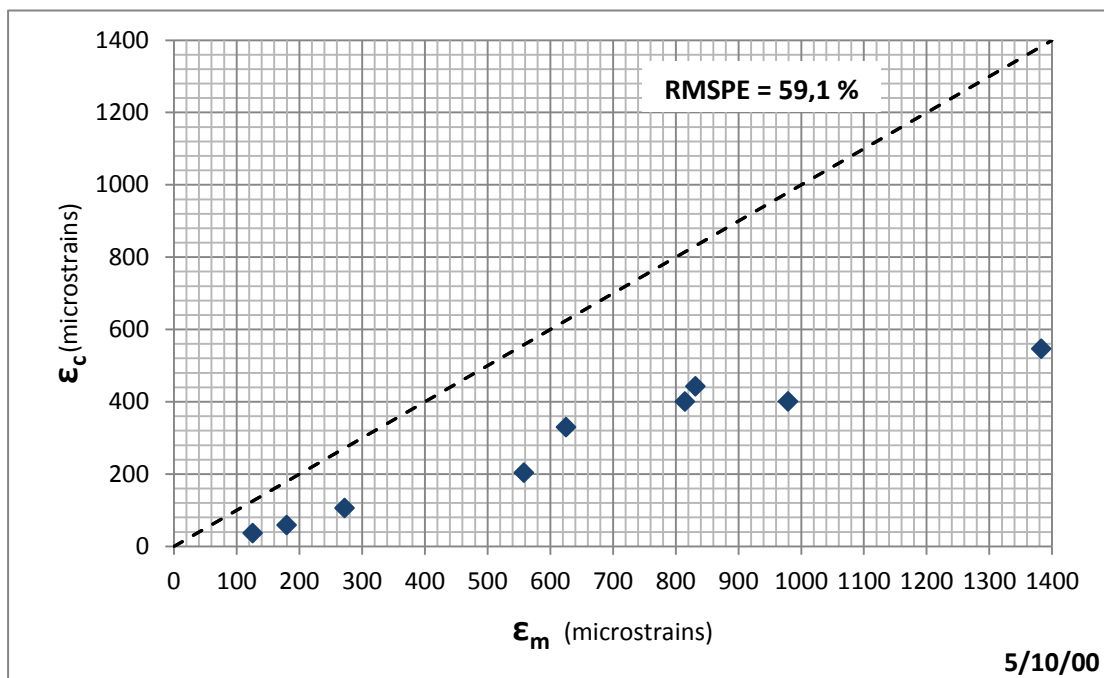
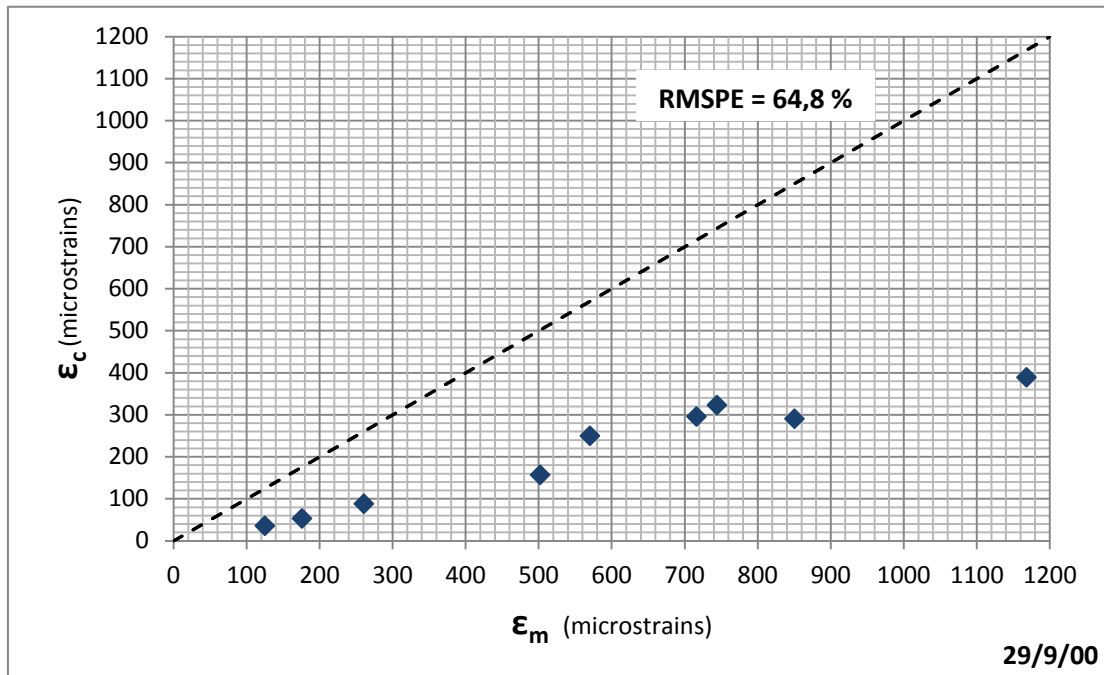


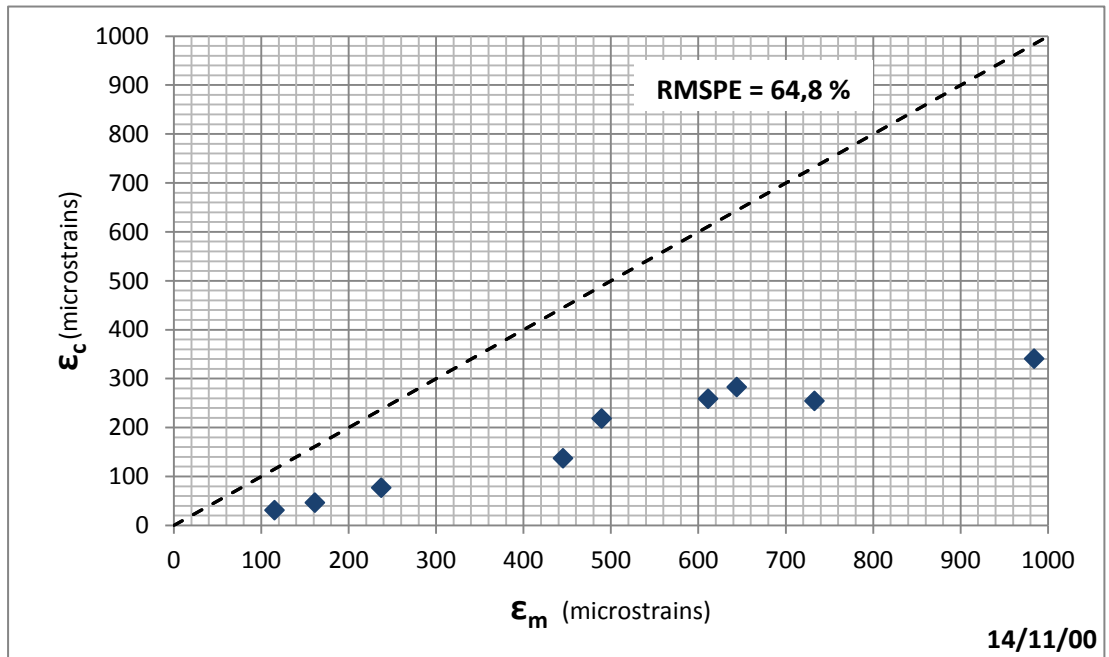
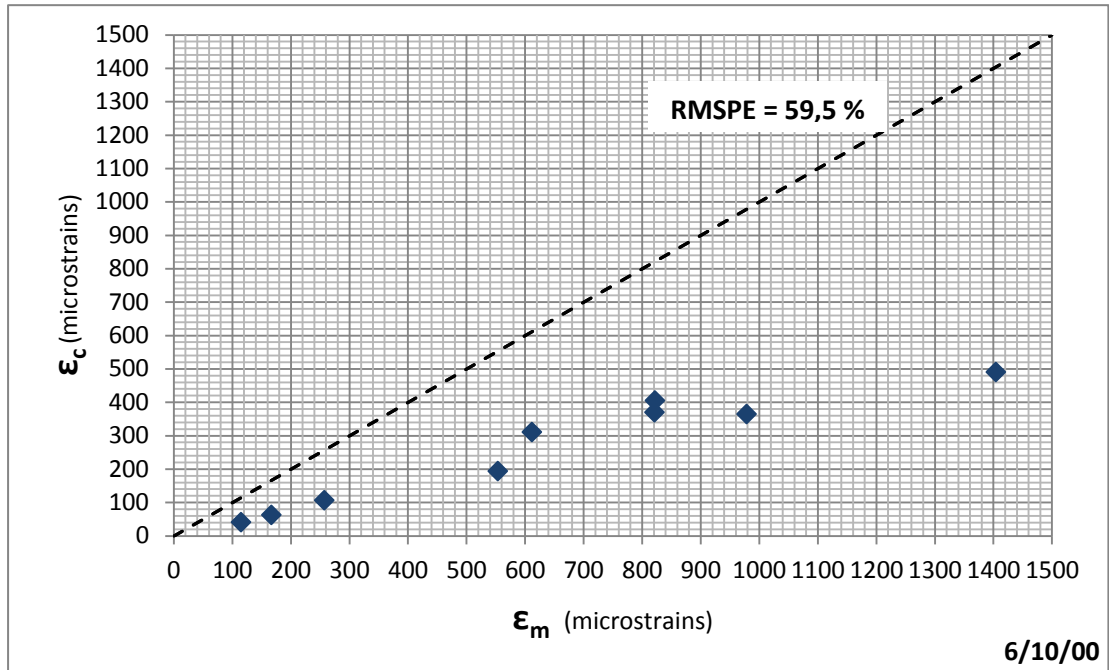


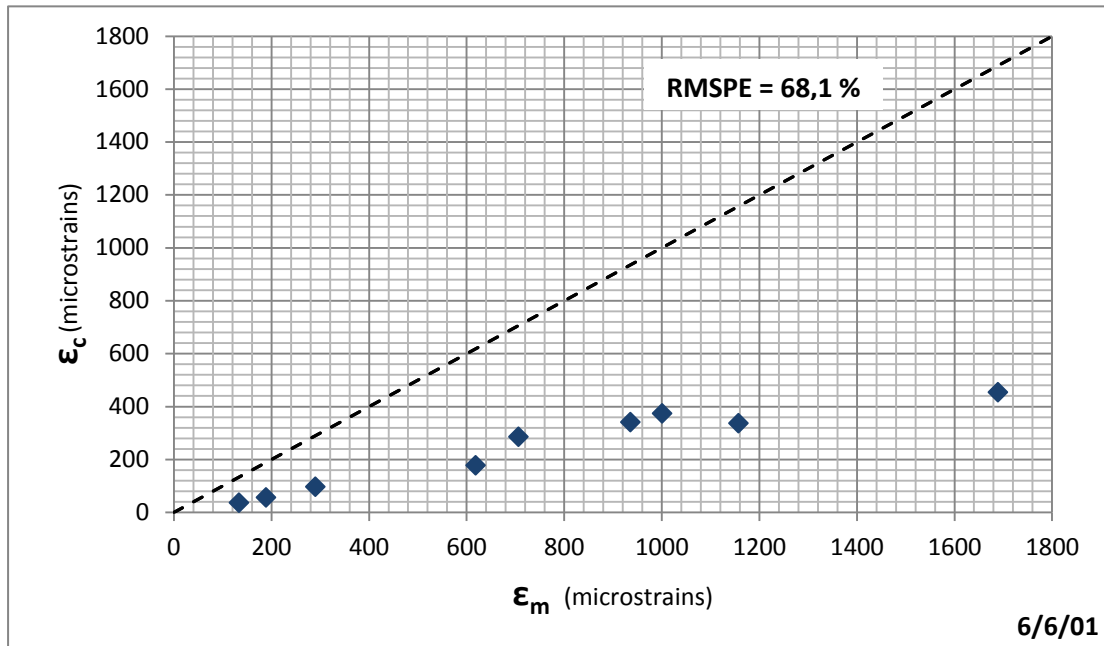
Εικόνα Δ.8.1 Δάπεδο LFS, βόρειο τμήμα (B-777) – Διαγράμματα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος



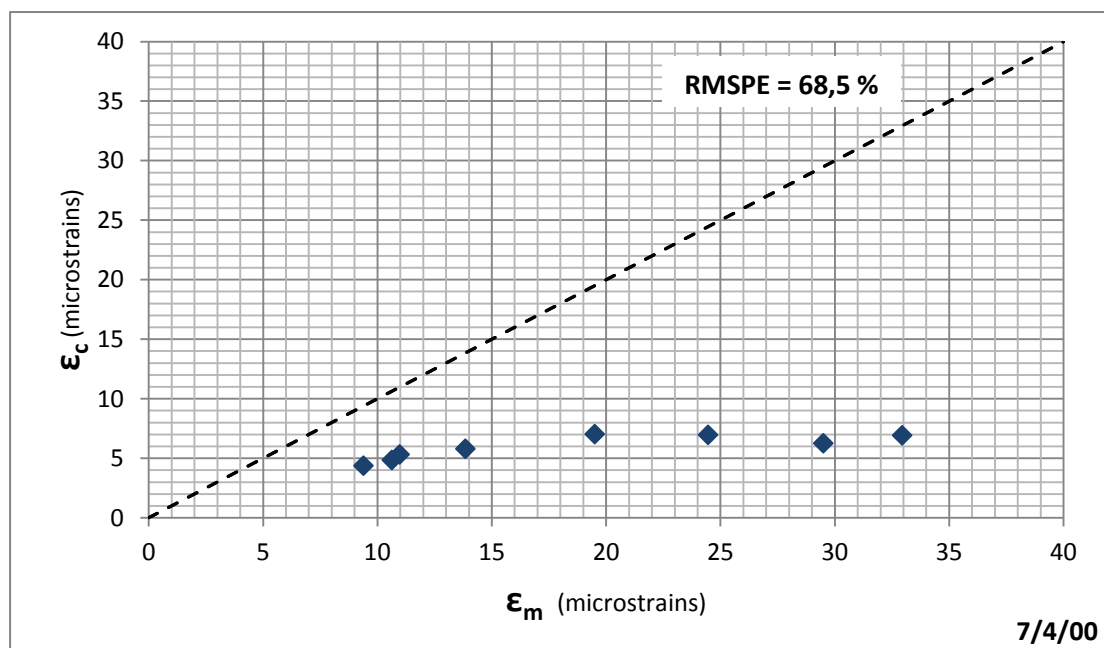


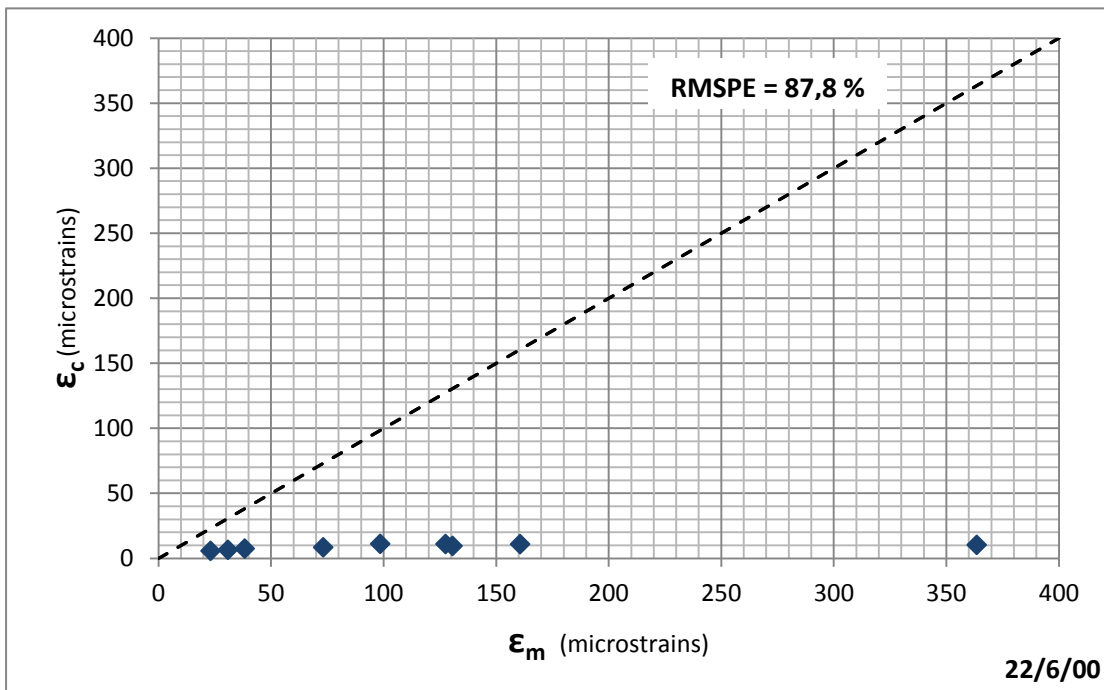
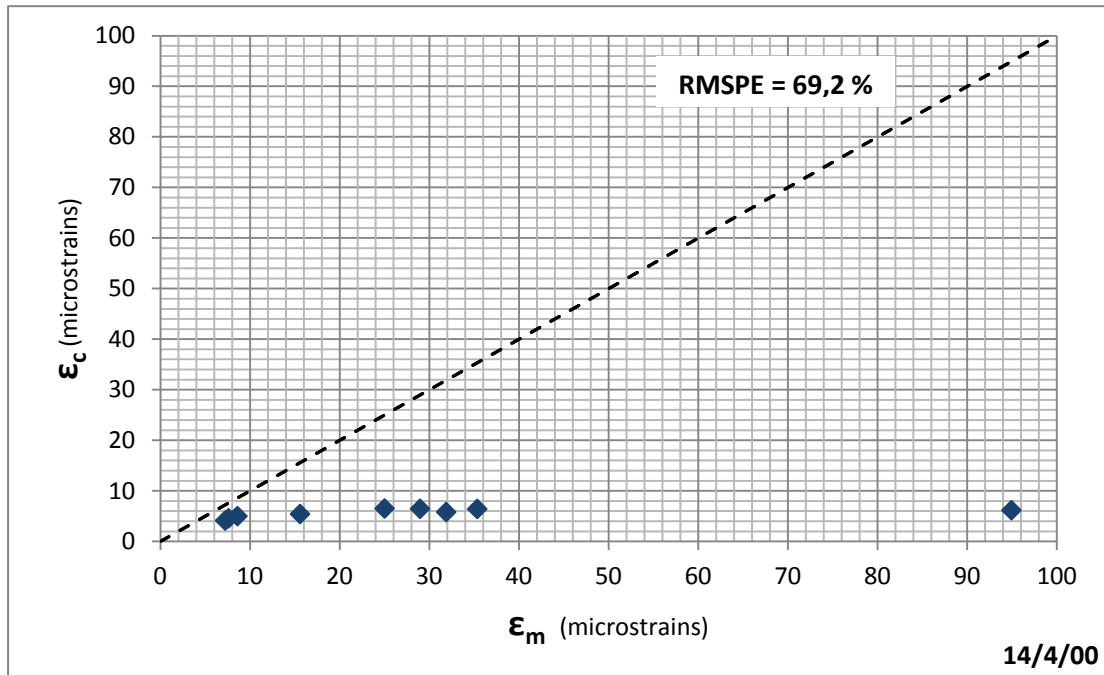


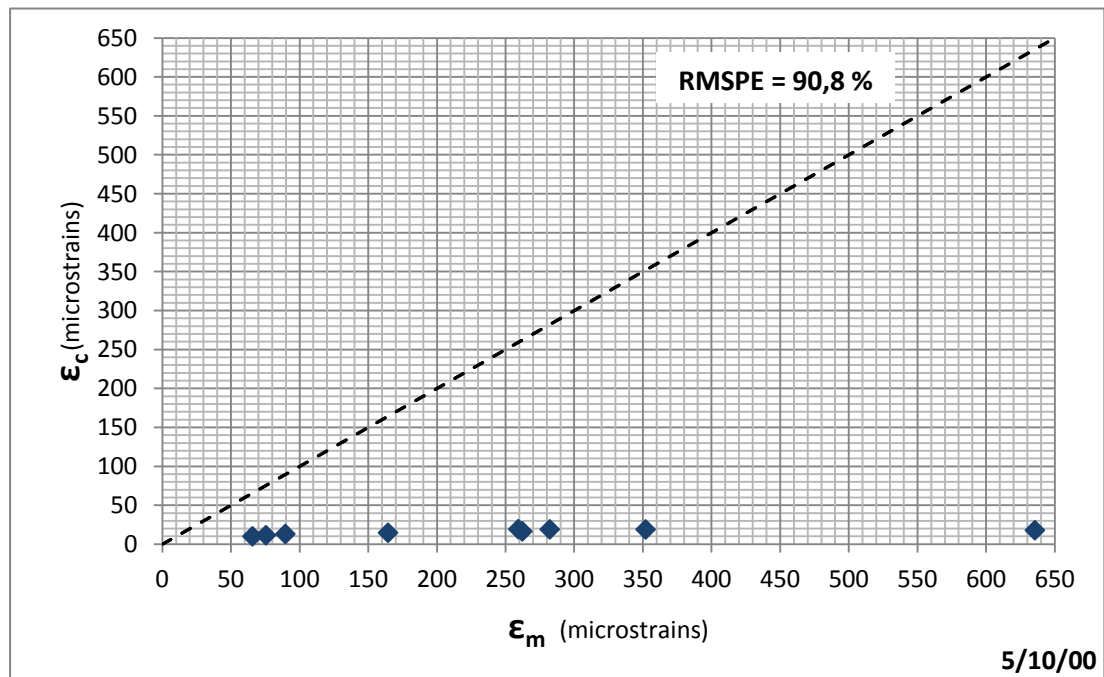
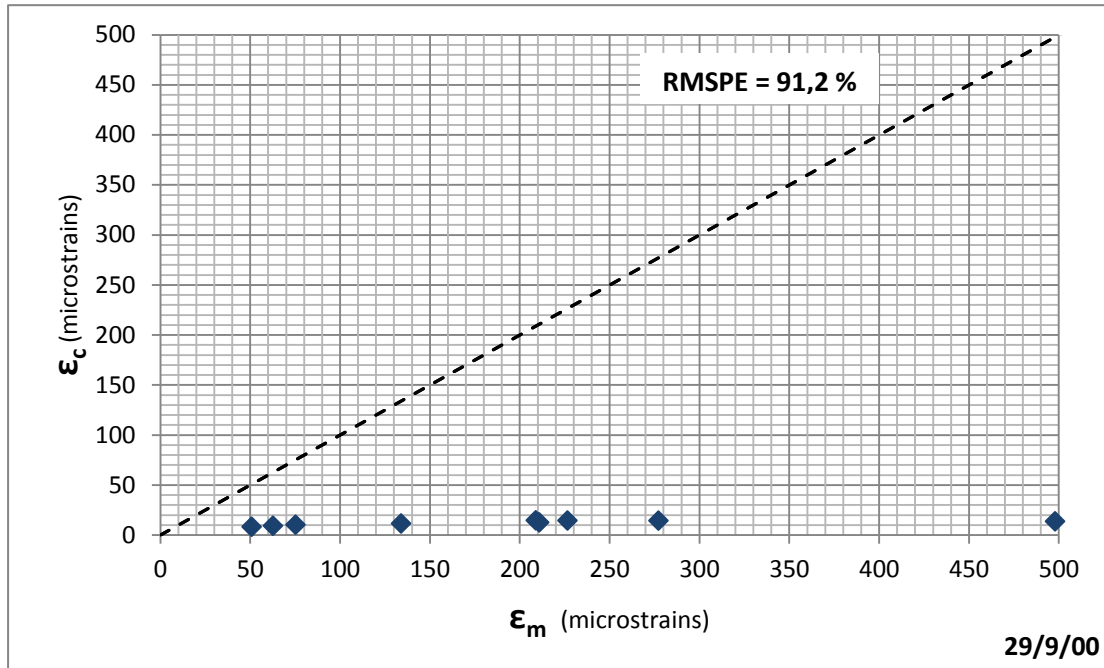


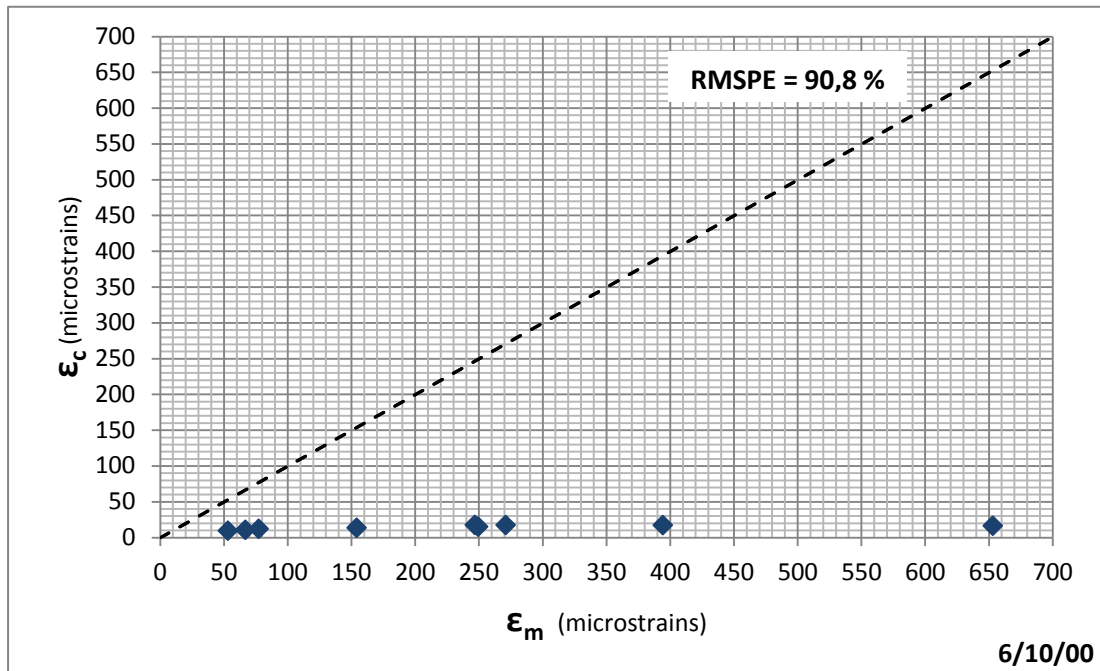


Εικόνα Δ.8.2 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα (B-747) – Διαγράμματα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος



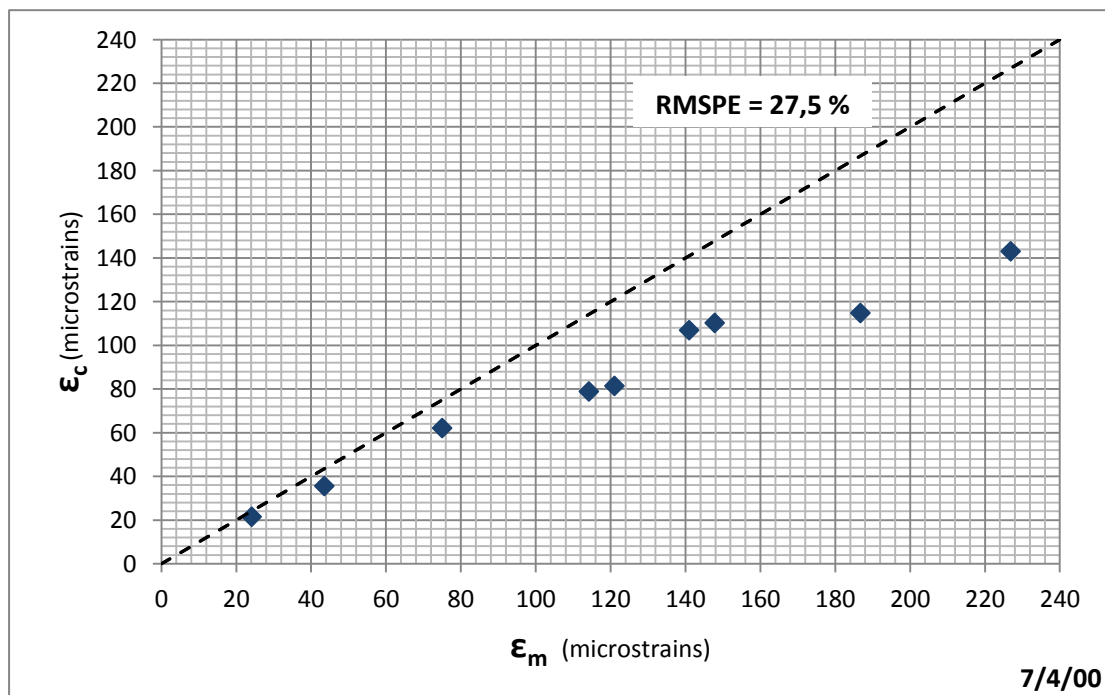


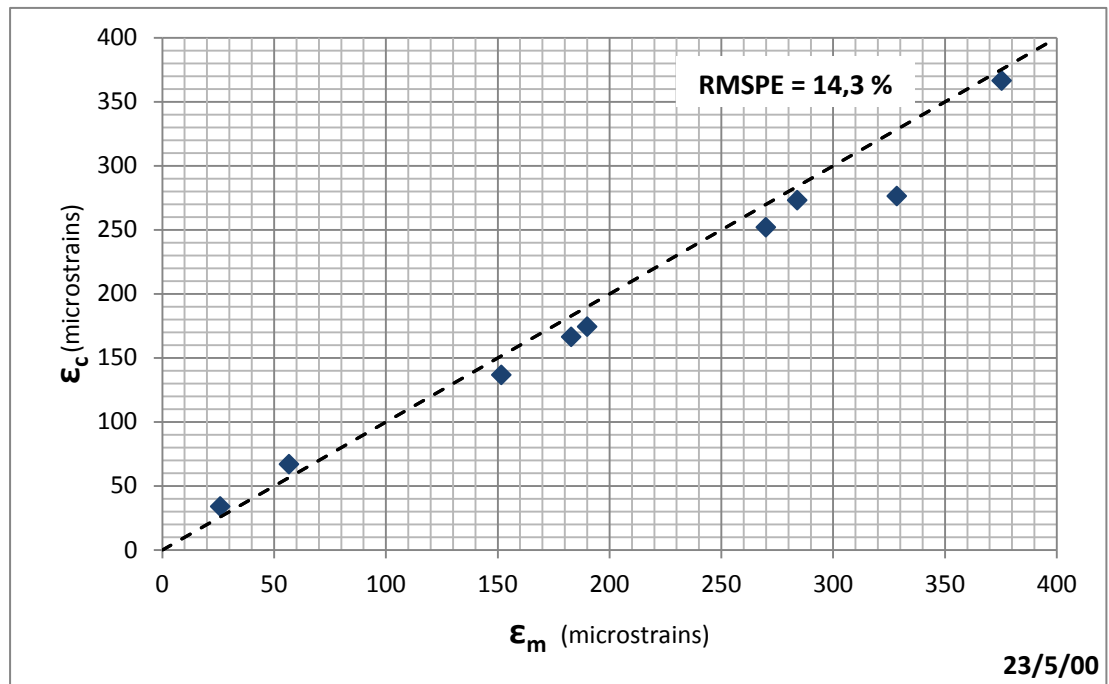
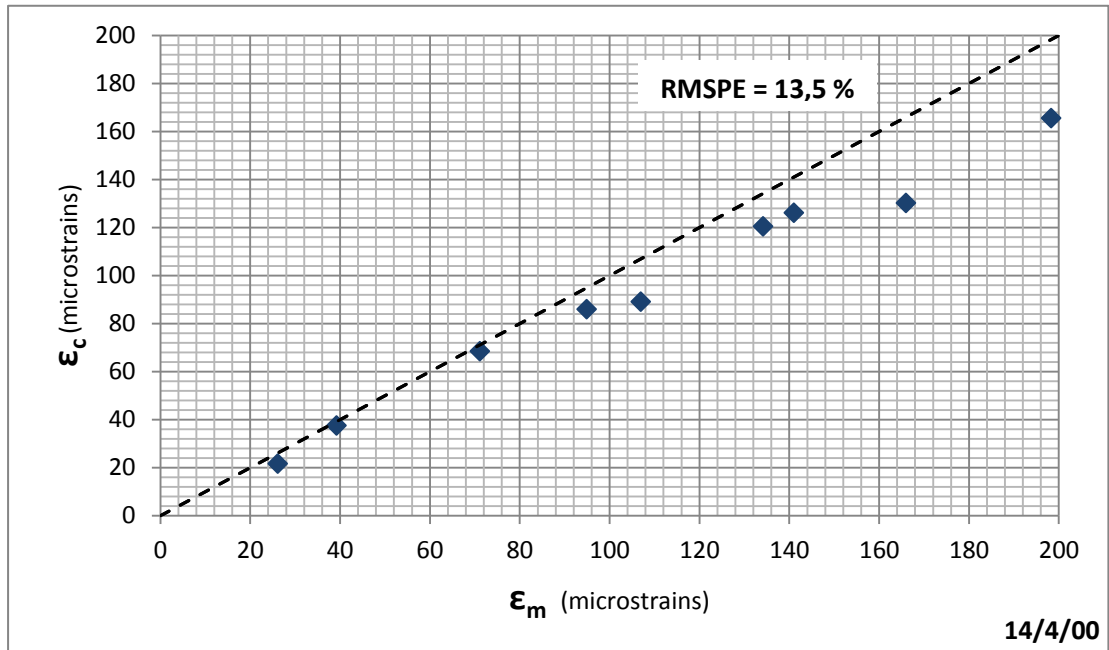


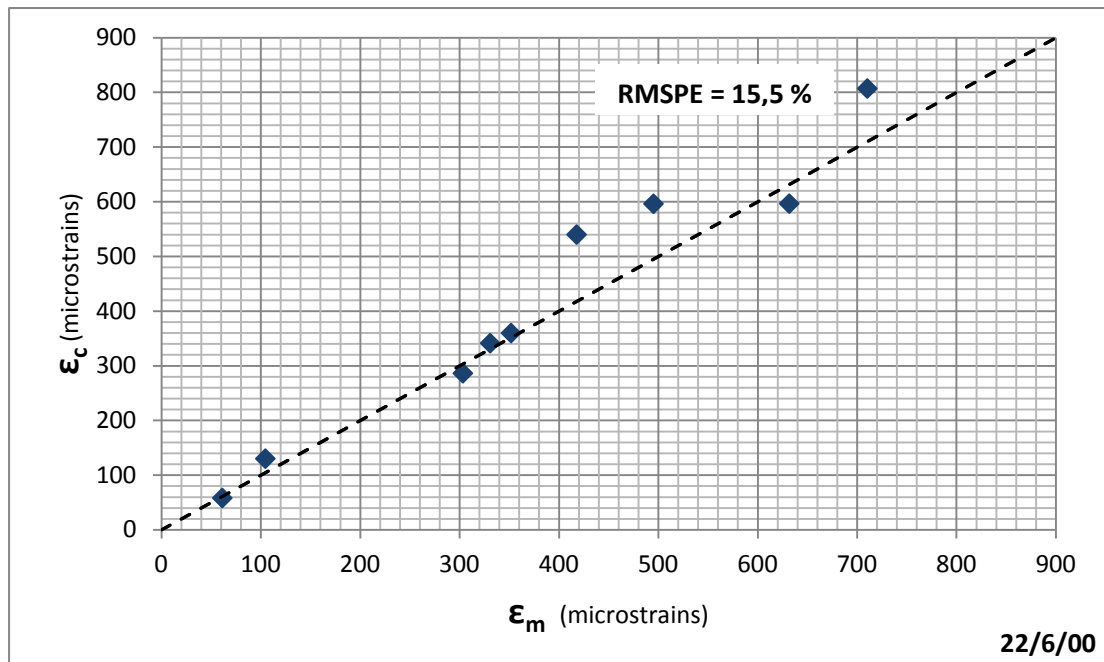


Εικόνα Δ.8.3 Δάπεδο LFS, νότιο τμήμα (B-747) – Διαγράμματα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων στο μέσον του ασφαλτικού σκυροδέματος

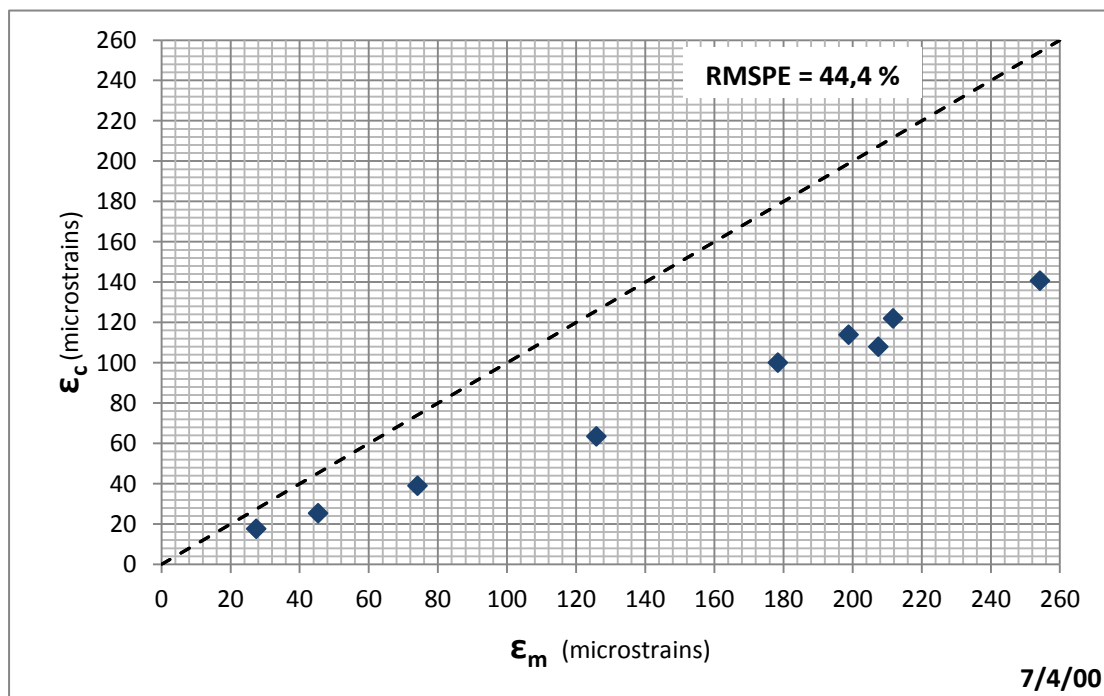
8.3.2 Διαγράμματα διασποράς παραμορφώσεων δαπέδου MFS

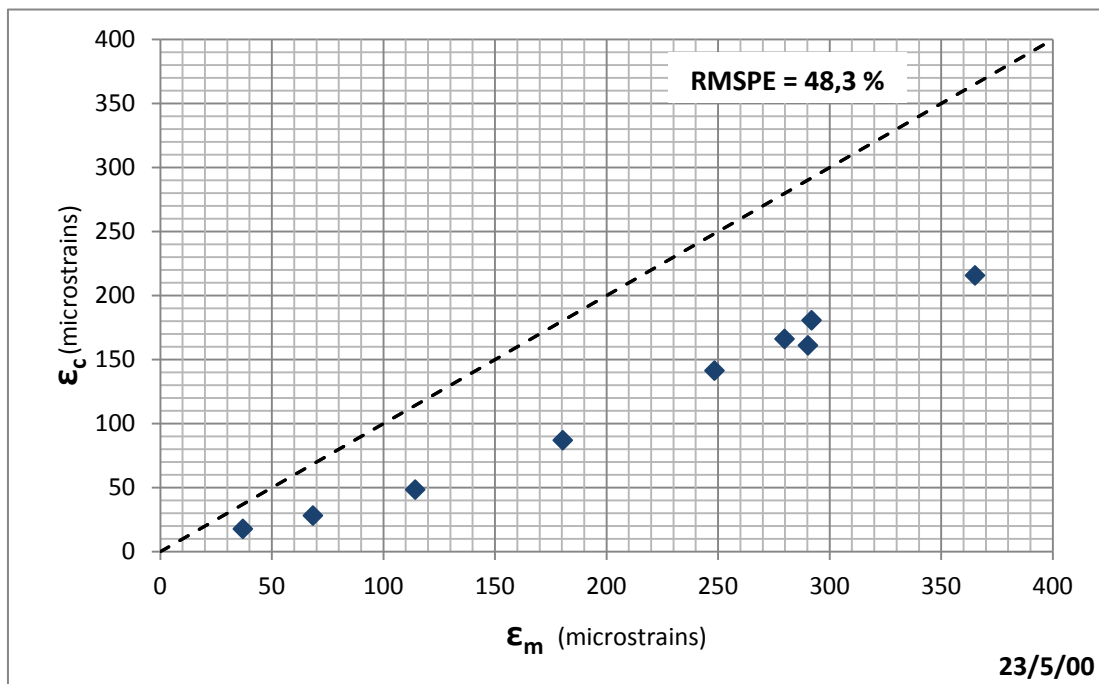
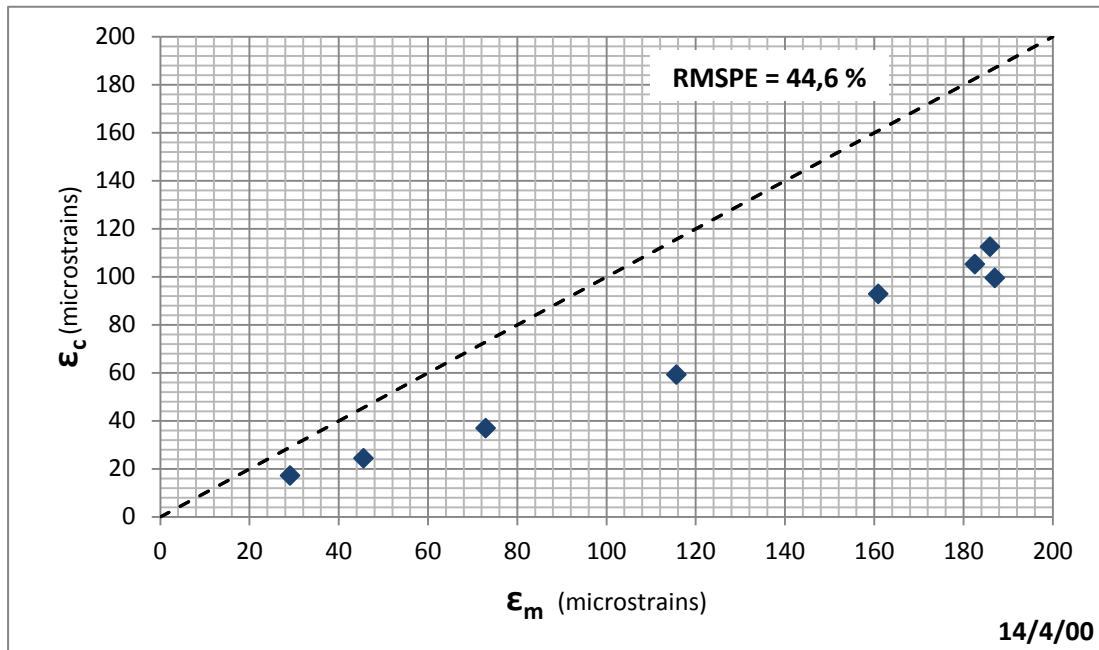


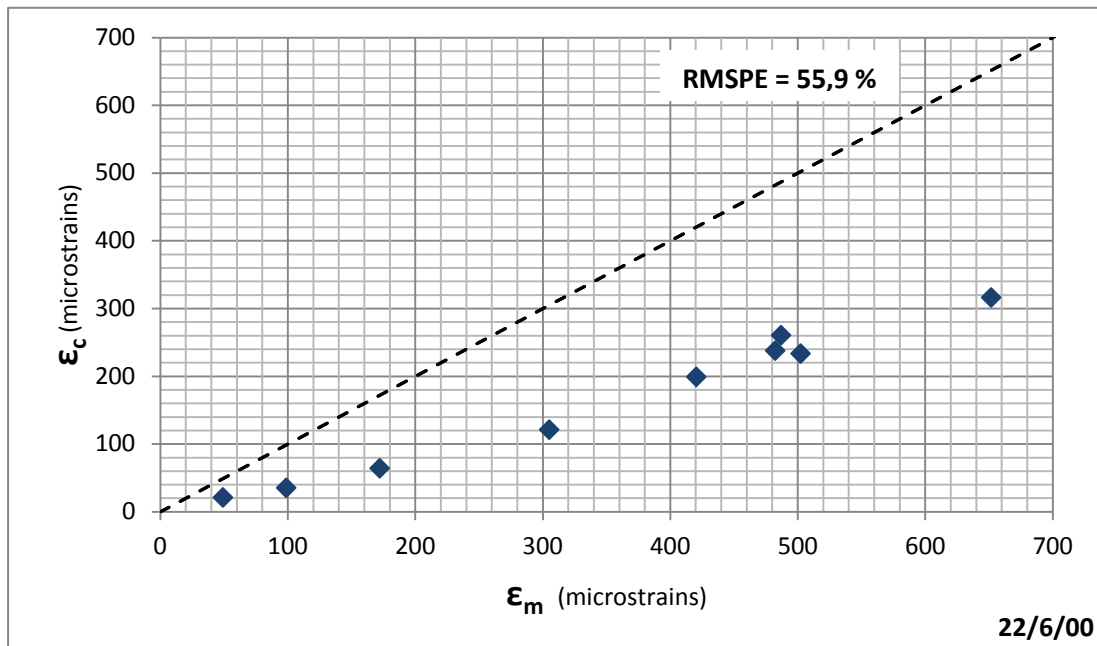




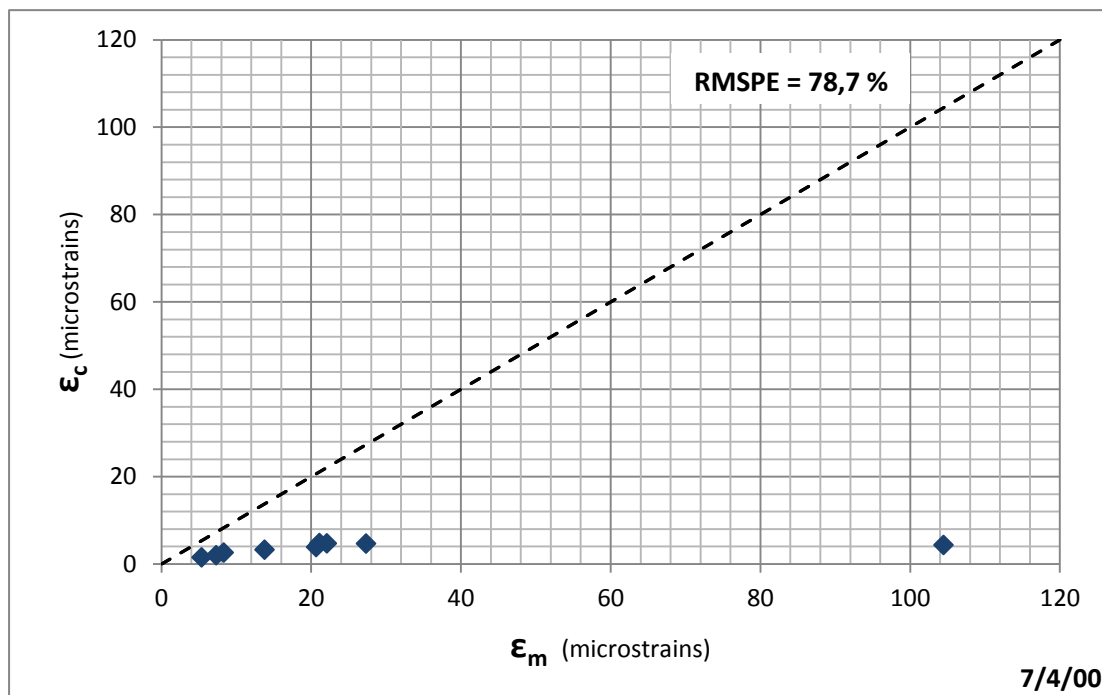
Εικόνα Δ.8.4 Δάπεδο MFS, βόρειο τμήμα (B-777) – Διαγράμματα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος

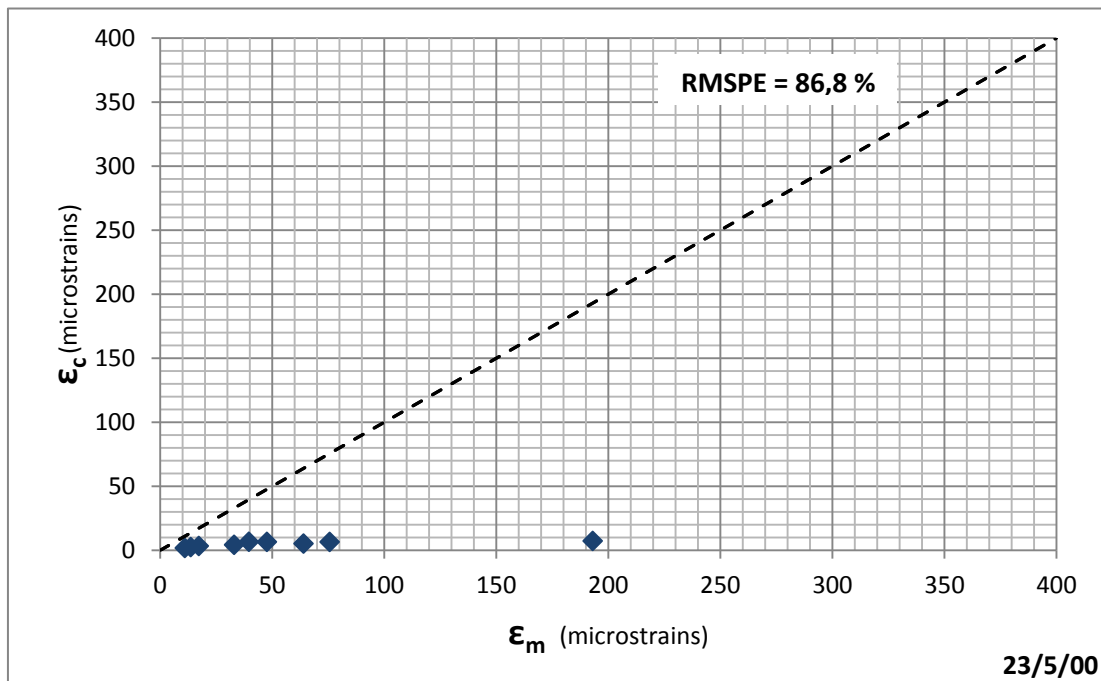
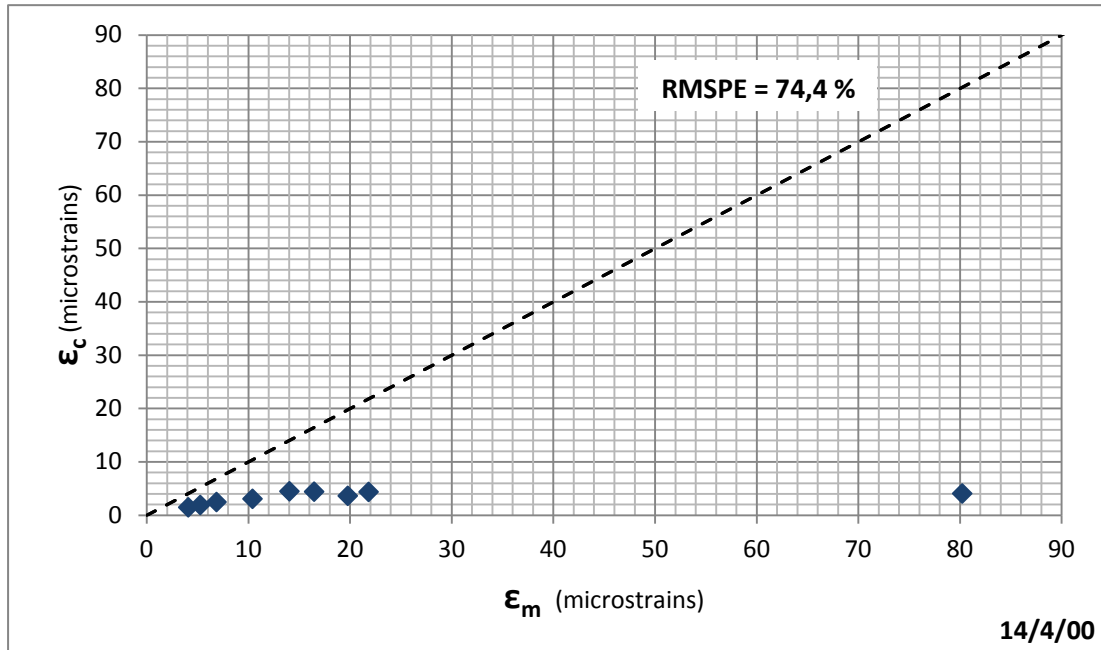


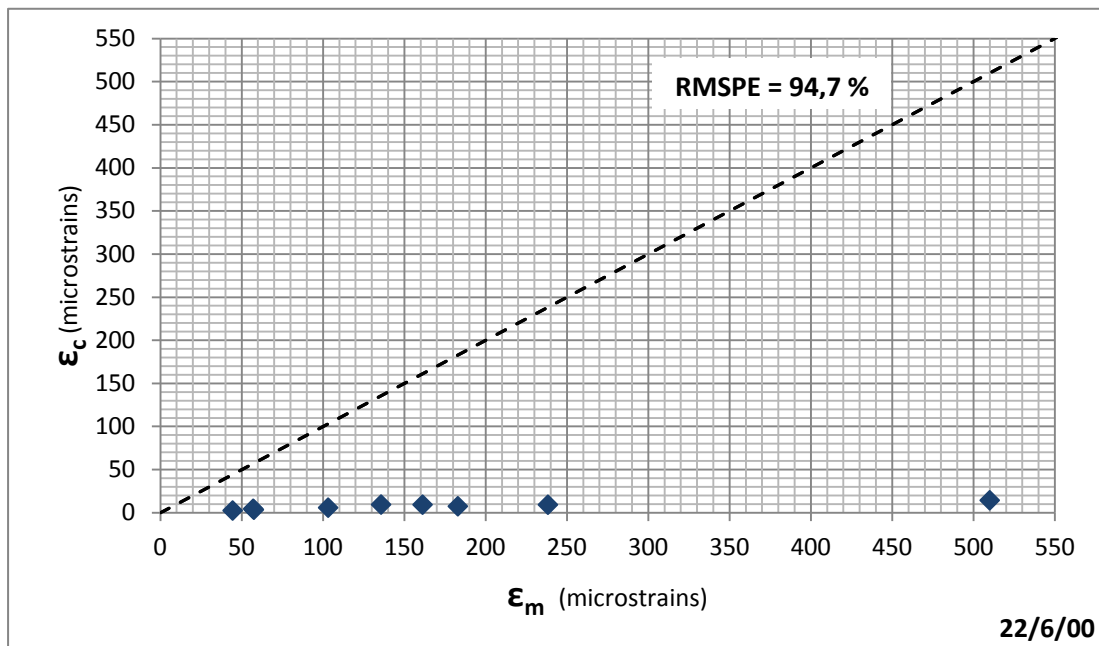




Εικόνα Δ.8.5 Δάπεδο MFS, νότιο τμήμα (B-747) – Διαγράμματα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος

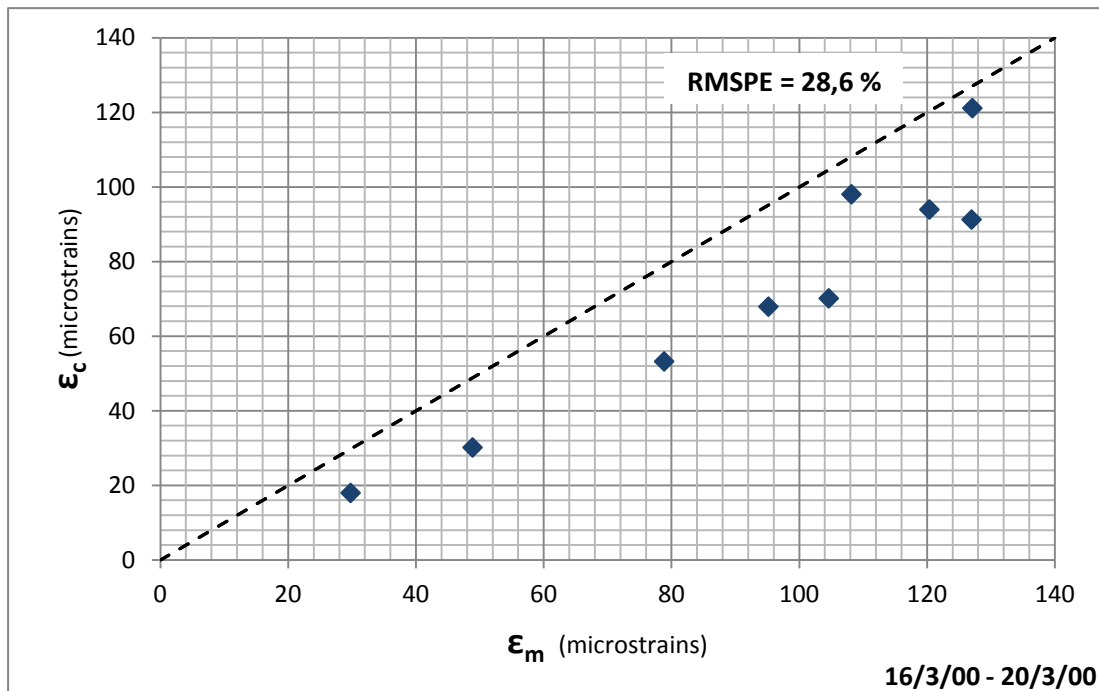


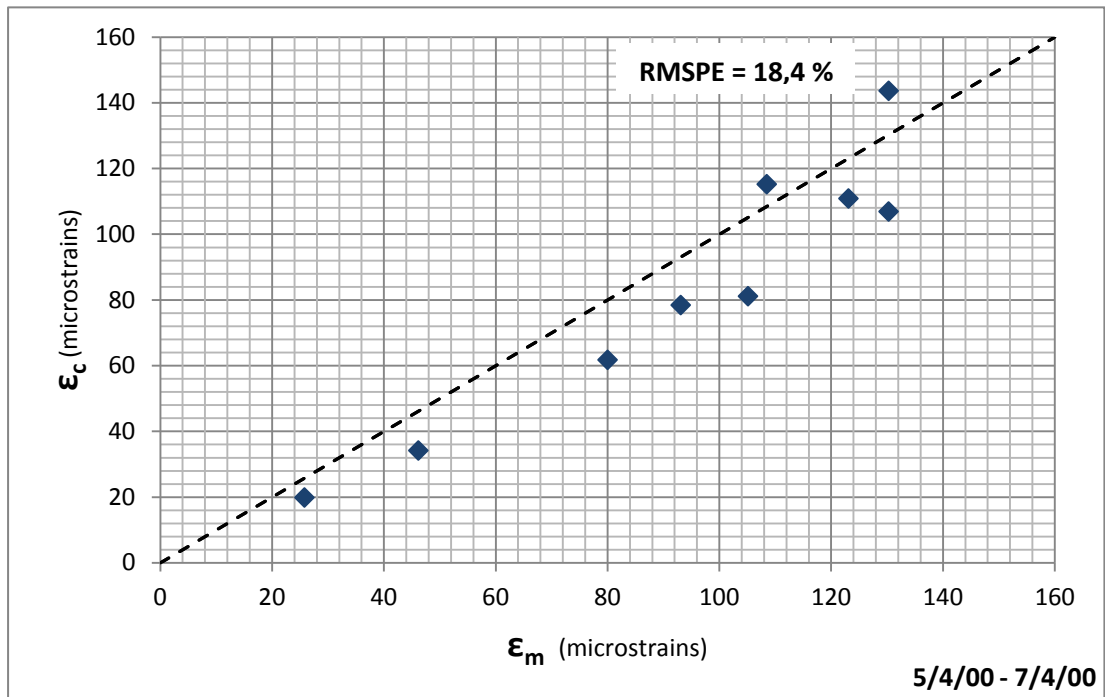




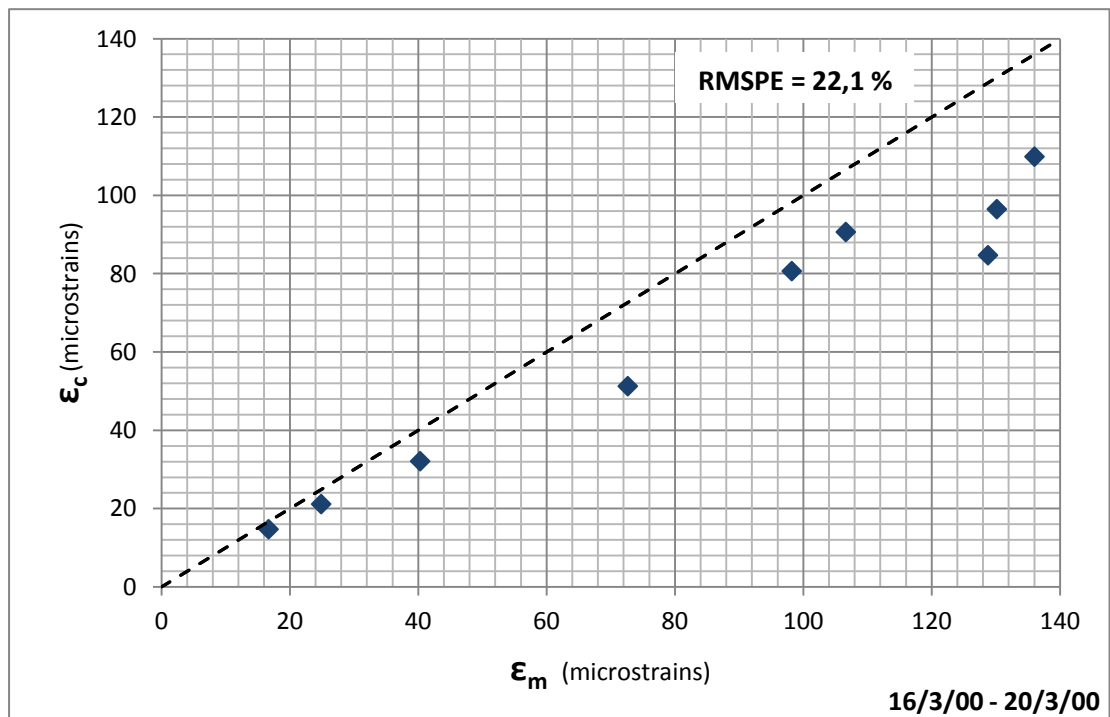
Εικόνα Δ.8.6 Δάπεδο MFS, νότιο τμήμα (B-747) – Διαγράμματα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων στο μέσον του ασφαλτικού σκυροδέματος

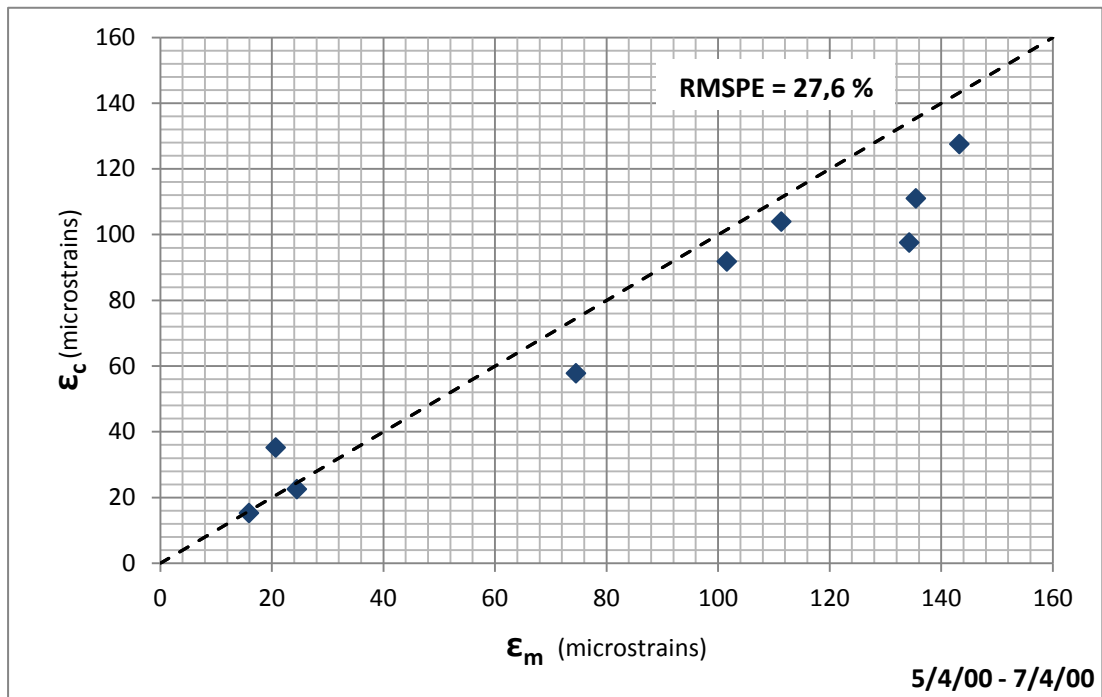
8.3.3 Διαγράμματα διασποράς παραμορφώσεων δαπέδου HFS



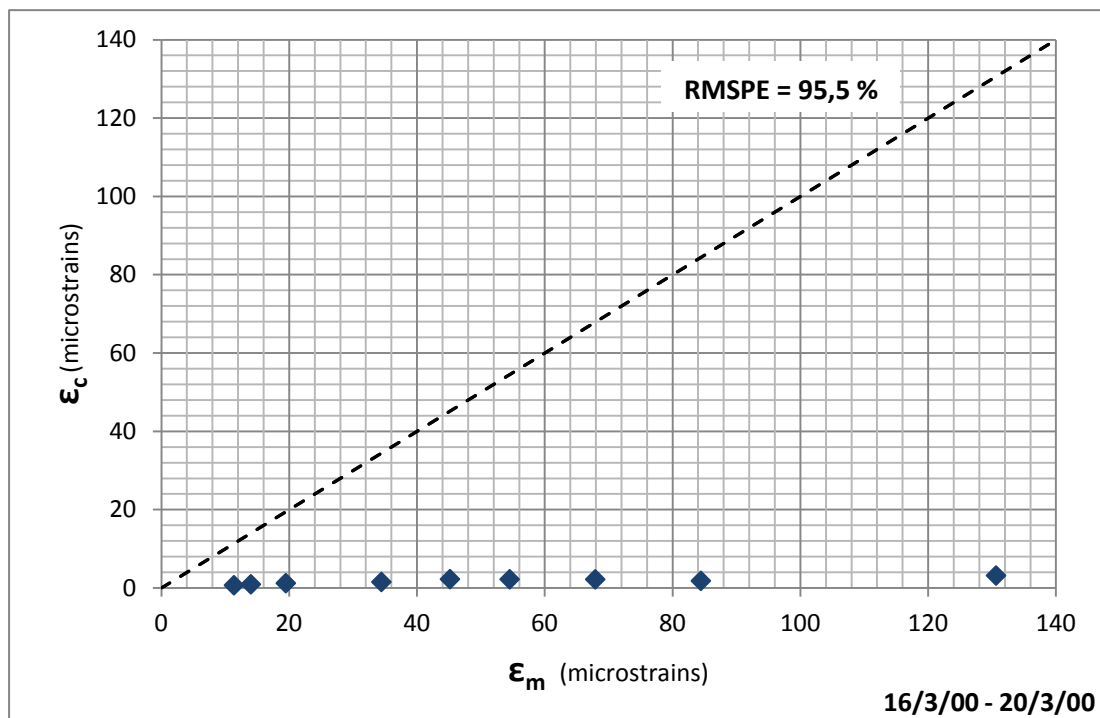


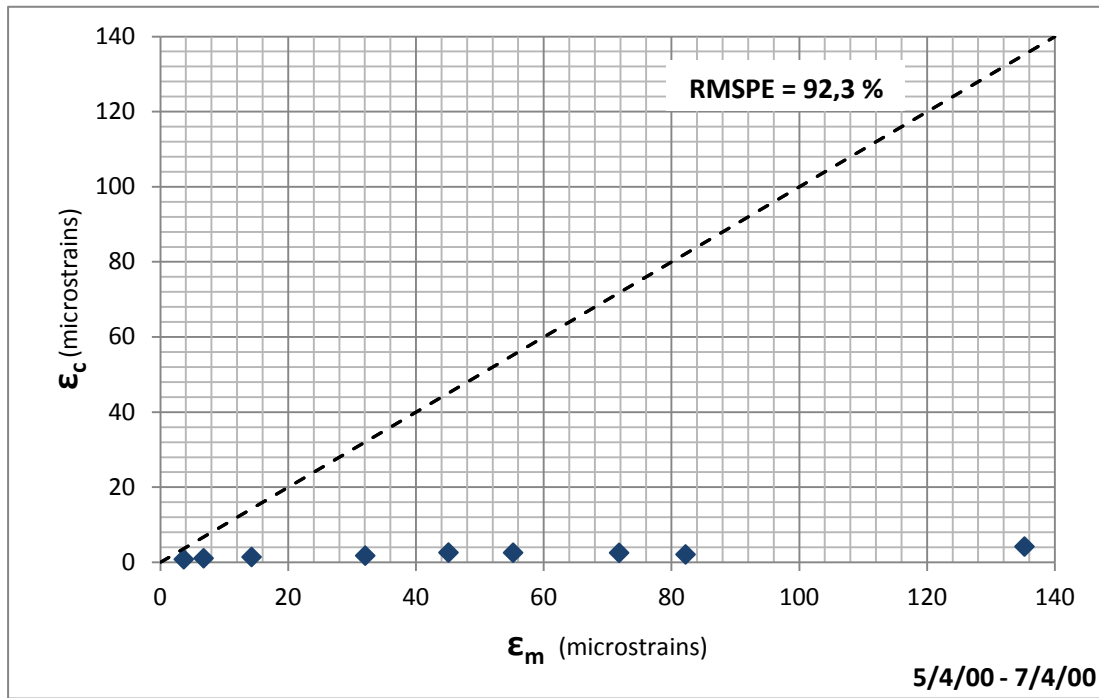
Εικόνα Δ.8.7 Δάπεδο HFS, βόρειο τμήμα (B-777) – Διαγράμματα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος





Εικόνα Δ.8.8 Δάπεδο HFS, νότιο τμήμα (B-747) – Διαγράμματα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων στον πυθμένα του ασφαλτικού σκυροδέματος





Εικόνα Δ.8.9 Δάπεδο HFS, νότιο τμήμα (B-747) – Διαγράμματα διασποράς πειραματικά μετρημένων και αναλυτικά υπολογισμένων παραμορφώσεων στο μέσον του ασφαλτικού σκυροδέματος