

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΝΟΣ
ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΑΚΑΜΨΙΑΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ**

ΤΟΥ

ΠΟΛΥΜΙΛΗ ΙΩΑΝΝΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Α.ΛΟΪΖΟΣ

ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ ΙΟΥΛΙΟΣ 1998

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΝΟΣ
ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΑΚΑΜΨΙΑΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ**

ΤΟΥ

ΠΟΛΥΜΙΛΗ ΙΩΑΝΝΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Α.ΛΟΪΖΟΣ

ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ ΙΟΥΛΙΟΣ 1998

Σ' αυτούς που μ'αγαπάνε

Ευχαριστίες

Ένας στόχος της ζωής μου είναι πια πραγματικότητα. Γνωρίζοντας πως κλείνει μία πολύ σημαντική περίοδος με την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας, νοιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν να πραγματοποιηθεί και πρώτο απ' όλους τον Καθηγητή Απ.Γιώτη για τις πολύτιμες συμβουλές του και για τη ζεστή του συμπεριφορά.

Πόλο έλξης για μένα, ώστε να επιλέξω το αντικείμενο στο οποίο εμβάθυνα στην τελευταία φάση των σπουδών μου αποτέλεσε η διδασκαλία του Α.Λοϊζου. Με τις σωστές κατευθύνσεις που μου έδωσε και τις πολύ χρήσιμες παρατηρήσεις του, με στήριξε επιστημονικά.

Η παρουσία του επιστημονικού συνεργάτη Γιώργου Χαρωνίτη δίπλα μου ήταν καθοριστική γιατί όχι μόνο με προφύλαξε από πολλές “κακοτοπιές” αλλά μου παρείχε και ηθική συμπαράσταση.

Πρέπει να ευχαριστήσω επίσης το Βασίλη Παπαβασιλείου για τη βοήθεια που μου έδωσε όποτε του ζητήθηκε.

Για τους ανθρώπους της οικογένειάς μου νοιώθω ότι όσα έχουν κάνει για μένα είναι ανεκτίμητα. Τους έχω στεναχωρήσει πολλές φορές - κυρίως τον πατέρα μου - αλλά πιστεύω πως τώρα τους δίνω αρκετή χαρά. Τους ευχαριστώ ιδιαίτερα.

Τέλος δε θα μπορούσα να ξεχάσω τόσο τους παιδικούς όσο και τους αληθινούς φίλους που γνώρισα στα χρόνια που ήμουν φοιτητής, που πάντα συμμερίζονταν τις αγωνίες και τις ανησυχίες μου.

Ιούλιος '98

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελ.
1. Εισαγωγή - Παρουσίαση.....	4
2. Δυναμικό Μέτρο Ακαμψίας οδοστρώματος	8
2.1 Γενικά	8
2.2 Τι είναι το Δυναμικό Μέτρο Ακαμψίας (DMA) και πως υπολογίζεται	8
2.3 Σχόλια πάνω στη μορφή της σχέσης 2.1.....	11
2.4 Διερεύνηση για τη φύση του DMA και τις δυνατότητες αξιοποίησής του	12
3. Πορεία / Μεθοδολογία εργασιών.....	15
3.1 Γενικά	15
3.2 Συγκρότηση στατιστικού δείγματος ιδεατών διατομών.....	16
3.3 Χρήση του προγράμματος BISAR: Δεδομένα που εισάγονται ..	16
3.4 Κατάρτιση προγραμμάτων H/Y	18
3.5 Μεγέθη που υπολογίστηκαν.....	19
3.6 Στατιστική διερεύνηση	20
3.7 Εφαρμογές βασισμένες στη στατιστική διερεύνηση	21
3.8 Απαραίτητα σχόλια - διευκρινήσεις.....	21
4. Δυναμικό Μέτρο Ακαμψίας (DMA) και παράμετροι διατομών του οδοστρώματος	24
4.1 Γενικά	24
4.2 Στατιστική διερεύνηση συσχέτισης του E_{dyn} με τις παραμέτρους διατομών οδοστρώματος.....	24
5. Δυναμικό Μέτρο Ακαμψίας και ανάστροφος υπολογισμός παραμέτρων οδοστρώματος.....	39
5.1 Γενικά	39
5.2 Αποτελέσματα στατιστικής επεξεργασίας.....	40
5.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων για τη στατιστική προσέγγιση του	

E_3 μέσω E_{dyn} από τη σχέση 5.1.....	42
5.4 Εφαρμογή της σχέσης 5.1 για την εκτίμηση του E_3 σε πραγματικές συνθήκες.....	45
6. Δυναμικό Μέτρο Ακαμψίας και συμπεριφορά οδοστρώματος..	50
6.1 Γενικά	50
6.2 Διερεύνηση βαθμού εξάρτησης των σ_{Ras} , σ_R , σ_Z , ϵ_{Ras} , ϵ_Z από το E_{dyn}	51
6.3 Αναζήτηση σχέσεων προσέγγισης των σ_{Ras} , ϵ_{Ras} , ϵ_Z μέσω E_{dyn} (με τη βοήθεια των h_1 , h_2).....	56
6.4 Διαδικασία ελέγχου εφαρμοσιμότητας των στατιστικών εκτιμήσεων των ϵ_{Ras} , ϵ_Z	62
6.5 Παρατηρήσεις για τη χρησιμότητα των στατιστικών εκτιμήσεων των ϵ_{Ras} , ϵ_Z στην πράξη	66
7. Συμπληρωματικά στοιχεία για το Δυναμικό Μέτρο Ακαμψίας και την αξιολόγηση των οδοστρωμάτων	74
7.1 Γενικά	74
7.2 Παράδειγμα μεθόδου αξιολόγησης υφισταμένων οδοστρωμάτων που μπορεί να σχετιστεί με δυναμική ανάλυση (συνοπτική περιγραφή)	74
7.3 Διερεύνηση της χρησιμοποίησης του DMA στην πιο πάνω μεθοδολογία και γενικές παρατηρήσεις.....	77
8. Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις	83
8.1 Ανακεφαλαίωση - συμπεράσματα	83
8.2 Προοπτική περαιτέρω αξιοποίησης του Δυναμικού Μέρους Ακαμψίας	87
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	90
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	93

ΚΕΦΑΛΑΙΟ



1. Εισαγωγή - Παρουσίαση

Ένα σημαντικό πεδίο της σύγχρονης έρευνας με πλήθος σχετικών εφαρμογών είναι η περιγραφή της συμπεριφοράς ενός οδοστρώματος σε επιβαλλόμενη φόρτιση. Επειδή η συνήθης καταπόνηση των οδοστρωμάτων στην πραγματικότητα είναι δυναμική, ιδιαίτερη συμβολή στην αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος έχουν οι δοκιμές που επιβάλλουν στις υφιστάμενες κατασκευές δυναμική φόρτιση.

Μια τέτοια δοκιμή - η πιο διαδεδομένη και ευρέως χρησιμοποιούμενη - είναι αυτή του Παρμορφωσιμόμετρου Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer, FWD) [1]. Στη συγκεκριμένη δοκιμή μετρούνται οι υποχωρήσεις, που προκαλούνται από την πτώση ενός βάρους, σε διάφορες θέσεις της επιφάνειας του οδοστρώματος. Οι μετρήσεις χρησιμοποιούνται σε υπολογισμούς με κατάλληλα λογισμικά (όπως αυτά του αναστρέφου υπολογισμού ελαστικών παραμέτρων του οδοστρώματος) τα αποτελέσματα των οποίων μας παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες - κυρίως για λόγους αξιολόγησης. Στους υπολογισμούς όμως δε λαμβάνεται υπόψη η χρονική μεταβολή των υποχωρήσεων αν και υπάρχει η δυνατότητα καταγραφής της. Η δυναμική φόρτιση προσομοιώνεται με στατική και χρησιμοποιούνται μόνο οι μέγιστες τιμές των ελαστικών υποχωρήσεων.

Η στατική ανάλυση αποτελεί την πλέον διαδεδομένη πρακτική σήμερα. Μέχρι τώρα η χρήση δυναμικής ανάλυσης πάνω σε προβλήματα οδοστρωμάτων περιοριζόταν σε ελάχιστες εξαιρέσεις [2]. Μια τέτοια εξαίρεση αποτελεί και η εισαγωγή της έννοιας του Δυναμικού Μέτρου Ακαμψίας (DMA) οδοστρώματος. Το DMA είναι ένα νέο μέγεθος, προϊόν δυναμικής προσομοίωσης της δοκιμής του FWD, όπου αξιοποιείται η καταγραφή της χρονικής μεταβολής των μετρήσεων.

Επιδίωξη της παρούσης εργασίας είναι να διερευνήσει τόσο τη φυσική σημασία του νέου αυτού δυναμικού μεγέθους όσο και τη δυνατότητα να αξιοποιηθεί με κατάλληλες εφαρμογές σε διάφορα προβλήματα οδοστρωμάτων όπως ο ανάστροφος υπολογισμός και η

δομική αξιολόγηση. Γίνεται δηλαδή μια προσπάθεια να αποτελέσει, αυτή, την αφετηρία ευρείας χρησιμοποίησης της δυναμικής ανάλυσης σε ένα μεγάλο πεδίο εφαρμογών.

Στο πλαίσιο τούτης της προσπάθειας αναζητήθηκαν μέσω στατιστικής επεξεργασίας ενός κατάλληλου τυχαίου δείγματος (στο οποίο περιέχεται μεγάλο πλήθος παραμέτρων), συσχετίσεις μεταξύ του DMA και άλλων χαρακτηριστικών μεγεθών του οδοστρώματος. Σε μία δεύτερη φάση στατιστικής διερεύνησης μορφώθηκαν υπολογιστικά μοντέλα προσέγγισης - των μεγεθών που παρουσιάζουν συσχέτιση - τα οποία περιέχουν το DMA. Στη συνέχεια εξετάστηκε η ισχύς των εκφράσεων αυτών στην πραγματικότητα και προέκυψαν διάφορα συμπεράσματα ως προς την εφαρμοσιμότητά τους.

Η παρουσίαση της έννοιας του Δυναμικού Μέτρου Ακαμψίας οδοστρώματος αποτελεί το αντικείμενο του Κεφαλαίου 2. Εκεί περιγράφεται πολύ συνοπτικά το σκεπτικό με το οποίο προσδιορίστηκε (δυναμική ανάλυση), οι εκτιμήσεις για το τι μπορεί να εκφράζει και η κατεύθυνση στην οποία στράφηκε η έρευνα γύρω από αυτό.

Στο Κεφάλαιο 3 αναπτύσσεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για να επιτευχθεί ο στόχος της έρευνας που είναι η αξιοποίηση του DMA σε προβλήματα οδοστρωμάτων. Περιγράφονται όλες οι εργασίες που έλαβαν χώρα (και οι σχετικές παραδοχές που έγιναν) για να καταλήξουμε στα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας.

Η στατιστική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε παρουσιάζεται σε τέσσερις ενότητες με ξεχωριστό περιεχόμενο. Η πρώτη ενότητα (Κεφάλαιο 4) διαπραγματεύεται τη σχέση του DMA με τις παραμέτρους του οδοστρώματος. Η δεύτερη (Κεφάλαιο 5) αναλύει τη χρησιμότητά του ως προς τον εναλλακτικό προσδιορισμό των ελαστικών παραμέτρων. Στην τρίτη ενότητα (Κεφάλαιο 6) εξετάζεται αν μπορούν να περιγραφούν μέσω του DMA τα εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη που αναπτύσσονται κατά τη φόρτιση του οδοστρώματος. Τέλος, στην τέταρτη ενότητα (Κεφάλαιο 7) γίνεται προσπάθεια να εισαχθεί το DMA σε μεθόδους αξιολόγησης των υφιστάμενων κατασκευών.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το όλο εγχείρημα αποτελούν το περιεχόμενο του Κεφαλαίου 8. Επίσης γίνεται αναφορά στις προοπτικές που ανοίγονται με την αξιοποίηση του ΔΜΑ σε μεθόδους αξιολόγησης των υφισταμένων οδοστρωμάτων και σχετικές εφαρμογές.

Τέλος στο Παράρτημα που ακολουθεί παρέχονται πληροφορίες για τις επιμέρους εργασίες που πραγματοποιήθηκαν (στατιστικό δείγμα, προγράμματα Η/Υ, κ.λ.π.).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

2

2. Δυναμικό Μέτρο Ακαμψίας οδοστρώματος

2.1 Γενικά

Όταν θέλουμε να περιγράψουμε τη συμπεριφορά μιας κατασκευής απέναντι σε μια μορφή καταπόνησης, αναζητούμε κάποια φυσικά μεγέθη που είναι χαρακτηριστικά για τη συγκεκριμένη κατασκευή και που καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο “αντιδρά”. Τα μεγέθη που επιτελούν αυτό το σκοπό ποικίλουν ανάλογα με το είδος της καταπόνησης. Η επιβολή της φόρτισης γενικά γίνεται με δύο τρόπους: στατικά ή δυναμικά.

Το μεγαλύτερο ποσοστό των οδοστρωμάτων καταπονείται δυναμικά σε όλη σχεδόν τη διάρκεια της ζωής τους. Συνεπώς η γνώση της συμπεριφοράς τους σε δυναμική φόρτιση είναι απαραίτητη - κυρίως για την αναγκαιότητα της δομικής αξιολόγησης. Όμως, μέχρι πρόσφατα, ο καθορισμός των εντατικών μεγεθών και των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στα διάφορα σημεία της διατομής ενός οδοστρώματος γινόταν σχεδόν αποκλειστικά με χρησιμοποίηση στατικών θεωριών. Ακόμα και δοκιμές που πραγματοποιούνται επιβάλλοντας δυναμική φόρτιση (η δοκιμή του FWD για παράδειγμα) αξιοποιούνται μέσω στατικής ανάλυσης. Αυτή λαμβάνει υπόψη χαρακτηριστικές παραμέτρους των υλικών που αποτελούν το οδόστρωμα (μέτρα δυσκαμψίας, αριθμός Poisson κ.λ.π.) και προσομοιώνοντας τη δυναμική φόρτιση με στατική, εξάγει κάποια αποτελέσματα.

Σε αντίθεση με τη στατική, η δυναμική ανάλυση συνυπολογίζει τη χρονική εξέλιξη εντάσεων και παραμορφώσεων. Η εισαγωγή αυτής της θεώρησης στο αντικείμενο των οδοστρωμάτων πραγματοποιείται με το Δυναμικό Μέτρο Ακαμψίας (DMA).

2.2 Τι είναι το Δυναμικό Μέτρο Ακαμψίας (DMA) και πως υπολογίζεται

Το DMA εμφανίζεται ουσιαστικά για πρώτη φορά σε μια ερευνητική εργασία που ήταν προϊόν συνεργασίας των τομέων “Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής” και “Γεωτεχνικής” του Τμήματος Πολιτικών

Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου [3]. Στη εργασία αυτή, το οδόστρωμα θεωρείται σαν ένας ημίχωρος που χαρακτηρίζεται από ένα ενιαίο μέτρο ελαστικότητας. Ο προσδιορισμός του έγινε με δυναμική επεξεργασία μετρήσεων από δοκιμές του Παραμορφωσιμόμετρου Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer, FWD) σε υφιστάμενες κατασκευές οδοστρωμάτων.

Η δοκιμή του FWD είναι η πιο διαδεδομένη μη καταστρεπτική δοκιμή. Η φόρτιση που επιβάλλει στο οδόστρωμα είναι δυναμική καθώς προέρχεται από την πτώση μιας μάζας κατανεμημένης σε μια κυκλική επιφάνεια από διάφορα ύψη. Η φόρτιση θεωρείται ότι πλησιάζει τον τρόπο που καταπονείται ένα οδόστρωμα κυκλοφορίας από τους τροχούς των οχημάτων. Η συσκευή με την οποία πραγματοποιείται η δοκιμή παρέχει τη δυνατότητα μέτρησης των ελαστικών υποχωρήσεων της επιφάνειας του οδοστρώματος (με γεώφωνα που τοποθετούνται σε κατάλληλα σημεία) σε διάφορες χρονικές στιγμές. Δηλαδή μπορούμε να παρατηρήσουμε την εικόνα της χρονικής μεταβολής των ελαστικών υποχωρήσεων. Για το μηχάνημα FWD που διαθέτει το ΚΕΔΕ / ΥΠΕΧΩΔΕ (KUAB 50), [1] μετρούνται οι υποχωρήσεις σε απόσταση 0, 0.3, 0.45, 0.6, 0.9, 1.5 και 2.5 μέτρων από το κέντρο της φόρτισης. (Οι μέγιστες υποχωρήσεις στα αντίστοιχα σημεία συμβολίζονται συνήθως με D_0 , D_1 , D_2 , D_3 , D_4 , D_5 και D_6).

Η δυνατότητα καταγραφής της χρονικής μεταβολής των υποχωρήσεων της δοκιμής του FWD δεν είχε ουσιαστικά αξιοποιηθεί μέχρι πρόσφατα. Αυτό έγινε στην περίπτωση του ΔΜΑ όπου λαμβάνονται υπόψη τα συνολικά αποτελέσματα μετρήσεων από δοκιμές στις οποίες μια μάζα βάρους 50 KN πέφτει από ύψος 0.50 m και φορτίζει ομοιόμορφα κυκλική επιφάνεια διαμέτρου 0,30 m. Επίσης προσδιορίζεται η χρονική μεταβολή των αναπτυσσόμενων δυνάμεων μέσω προσομοίωσης του οδοστρώματος με σύστημα ελατηρίου - μάζας - αποσβεστήρα (Σχήμα 2.1) [4]. Συνδυάζοντας τα δεδομένα αυτά σε κατάλληλα διαγράμματα [3] προέκυψε ο καθορισμός ενός μέτρου ελαστικότητας που αναφέρεται στην υποκείμενη της φόρτισης κατασκευή σαν να συνοψίζει και τις διαφοροποιήσεις των υλικών που το αποτελούν. Τελικά, αυτό το μέτρο “ελαστικότητας” το οποίο χαρακτηρίζεται

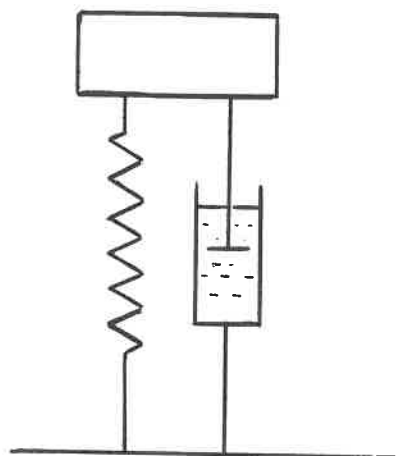
ως “δυναμικό” βάσει της ανάλυσης που προηγήθηκε της εξαγωγής του, υπολογίζεται από τον τύπο [3] που φαίνεται παρακάτω:

$$E_{dyn} = \frac{222}{D_0^2}$$

(Σχέση 2.1)

Στη σχέση 2.1 ο όρος D_0 είναι η μετρημένη μέγιστη κεντρική υποχώρηση της δοκιμής FWD σε mm και το E_{dyn} η τιμή του ΔΜΑ εκφρασμένη σε MPa.

Αν ισχύουν τα παραπάνω, δηλαδή αν η δυναμική προσομοίωση από την οποία εξάγεται η σχέση 2.1 είναι σωστή, το E_{dyn} είναι ένα ενιαίο μέτρο ακαμψίας του οδοστρώματος προερχόμενο από δυναμική ανάλυση.



Σχήμα 2.1

Η διαφορά του E_{dyn} από ένα αντίστοιχο ενιαίο μέτρο Ακαμψίας E_{stat} για το οδόστρωμα υπολογισμένο με στατική ανάλυση είναι ότι το E_{dyn} λαμβάνει υπόψη του και την αδράνεια της μάζας του οδοστρώματος,

πράγμα πολύ σημαντικό γιατί αναφερόμαστε σε δυναμική καταπόνηση όπου η αδράνεια (αλλά και οι αποσβέσεις) παίζουν σημαντικό ρόλο. Ας παρομοιάσουμε το οδόστρωμα με το σύστημα ελατηρίου - μάζας - αποσβεστήρα του σχήματος 2.1 το οποίο διεγείρεται από ένα εξωτερικό αίτιο. Προφανώς η σταθερά k του ελατηρίου, όταν είναι γνωστή ή παραμόρφωσή του x , δεν επαρκεί για να περιγράψει τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στο σύστημα. Όμως όταν το σύστημα ισορροπεί, γνωρίζουμε ότι $F = -k \cdot x$. Το k παρομοιάζεται εδώ με το E_{stat} . Το E_{dyn} προσδιορίστηκε σαν ένα “ενιαίο” k με το οποίο το σύστημα “αντιδρά” στην επιβαλλόμενη διέγερση. Δεν μπορούμε όμως στην παρούσα φάση να εκτιμήσουμε την ισχύ της προηγούμενης θεώρησης. Αυτό που γνωρίζουμε σίγουρα είναι ότι στη διαμόρφωση της τιμής του E_{dyn} που υπολογίζεται απ’ τη σχέση 2.1 εμπεριέχεται το είδος της καταπόνησης.

Από το σχετικό στο σχήμα 2.1 παράδειγμα μπορούμε να εκτιμήσουμε ότι το ΔMA δεν είναι διαφορετικό μέγεθος από τα γνωστά μας μέτρα ακαμψίας αλλά πρόκειται για το ίδιο μέγεθος καθορισμένο σε διαφορετικές συνθήκες. Είναι κάτι ανάλογο με το μέτρο δυσκαμψίας ενός υλικού που για κάθε θερμοκρασία λαμβάνει και διαφορετική τιμή. Η διαφοροποίηση στην προκειμένη περίπτωση έγκειται στην ταχύτητα επιβολής της φόρτισης. Θεωρητικά, δηλαδή, για μηδενική ταχύτητα επιβολής το ΔMA πρέπει να εξομειώνεται με τα στατικά μεγέθη.

2.3 Σχόλια πάνω στη μορφή της σχέσης 2.1

Εκ πρώτης όψεως, παρατηρώντας τη σχέση 2.1 φαίνεται σαν να εξαρτάται το E_{dyn} μόνο από τη μετρημένη μέγιστη κεντρική υποχώρηση της δοκιμής του FWD. Δηλαδή για δύο διαφορετικά φορτία - και συνεπώς διαφορετική υποχώρηση - θα προέκυπταν για το ίδιο οδόστρωμα δύο τιμές του E_{dyn} , που σημαίνει ότι το ΔMA δεν είναι χαρακτηριστικό μιας κατασκευής. Όμως είναι λάθος να ενεργοποιείται η σχέση 2.1 για φορτίο διαφορετικό από τα 50 KN γιατί η δυναμική ανάλυση που έγινε αφορούσε συγκεκριμένο φορτίο. Άρα στη σχέση 2.1 χρησιμοποιείται μόνο η υποχώρηση που προέρχεται από φορτίο 50 KN.

Στην ουσία ο συντελεστής στον αριθμητή της σχέσης (ίσος με 222) προσδιορίζεται από τα δεδομένα της δοκιμής FWD (ύψος πτώσης, πλάκα φόρτισης κ.λ.π.) και έχει διαστάσεις φορτίου. Αν ο τύπος εξαγωγής του E_{dyn} μορφωθεί για το ίδιο ύψος πτώσης αλλά για διαφορετικά τα υπόλοιπα δεδομένα, είναι πολύ πιθανό να μεταβληθεί ο συντελεστής έτσι ώστε για την υποχώρηση που αντιστοιχεί στο νέο φορτίο, να προκύπτει η ίδια τιμή του E_{dyn} . Δηλαδή, υπάρχει το ενδεχόμενο το E_{dyn} να είναι ανεξάρτητο του φορτίου.

Παρατηρούμε επίσης ότι η σχέση 2.1 είναι πάρα πολύ απλή και χρειάζεται ένα και μοναδικό δεδομένο το οποίο μετριέται σχετικά εύκολα. Αυτό αποτελεί μεγάλο πλεονέκτημα για το DMA γιατί καθίσταται “γνωστό” μέγεθος και συνεπώς δημιουργούνται θετικές προοπτικές για τη χρησιμοποίησή του σε πρακτικές εφαρμογές.

2.4 Διερεύνηση για τη φύση του DMA και τις δυνατότητες αξιοποίησής του

Επειδή το DMA είναι ένα νέο μέγεθος, που δεν έχει αναφερθεί σε καμία πρακτική εφαρμογή μέχρι σήμερα, είναι απαραίτητη η αναζήτηση πληροφοριών γύρω από το φυσικό του περιεχόμενο. Είναι επίσης πολύ ενδιαφέρουσα η προοπτική χρησιμοποίησής του στη δημιουργία ή τη βελτίωση μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί για να αντιμετωπιστούν προβλήματα σχετικά με το αντικείμενο των οδοστρωμάτων. Ύστερα από ευρεία έρευνα που πραγματοποιήθηκε με βάσει το παραπάνω σκεπτικό, επιλέχθηκαν να αναφερθούν τα πιο αξιόλογα αποτελέσματα που προκύπτουν, τα οποία αναλύονται σε τέσσερις ξεχωριστές ενότητες.

Το πρώτο θέμα που εξετάζεται είναι η επιρροή των παραμέτρων των διατομών των ευκάμπτων οδοστρωμάτων στη διαμόρφωση της τιμής του E_{dyn} . Έτσι βγάζουμε συμπεράσματα για τη φύση του DMA και για το πως αυτό σχετίζεται με κάθε παράμετρο. Στη συνέχεια επεξεργάζονται οι ιδιαίτερες συσχετίσεις του με κάποια μεγέθη για τον ανάστροφο υπολογισμό τους. Επίσης γίνεται προσπάθεια καθορισμού της συμπεριφοράς μιας κατασκευής (ευκάμπτου οδοστρώματος πάντα) μέσω

του E_{dyn} . Τέλος, επιχειρείται η εισαγωγή του ΔΜΑ σε μεθόδους αξιολόγησης και προκύπτουν διάφορα χρήσιμα συμπεράσματα.

Από τα παραπάνω διαφαίνεται η επιδίωξη της χρήσης του ΔΜΑ σε εφαρμογές σχετικές με το βασικό πρόβλημα της δομικής αξιολόγησης των οδοστρωμάτων. Η διερεύνηση στρέφεται προς αυτή την κατεύθυνση γιατί πιστεύεται ότι ο τρόπος που υπολογίζεται το ΔΜΑ, η δυναμική ανάλυση που προσεγγίζει τα πραγματικά δεδομένα και η αναφορά του ΔΜΑ σε συνολικό χαρακτηριστικό του οδοστρώματος δημιουργούν την αναγκαιότητα της συγκεκριμένης αντιμετώπισης.

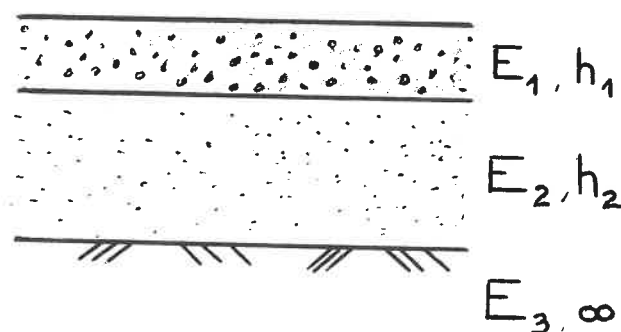
ΚΕΦΑΛΑΙΟ



3. Πορεία / Μεθοδολογία εργασιών

3.1 Γενικά

Η όλη διερεύνηση γύρω από το Δυναμικό Μέτρο Ακαμψίας αφορά τα εύκαμπτα οδοστρώματα. Το συγκεκριμένο μοντέλο ευκάμπτου οδοστρώματος το οποίο επεξεργάστηκε η παρούσα εργασία, έχει τη διατομή του σχήματος 3.1 [5]. Αποτελείται από τρεις κύριες στρώσεις: μια ενοποιημένη ασφαλτική στρώση μέτρου ελαστικότητας E_1 και πάχους h_1 , μια ασύνδετου υλικού (ενοποιημένη βάση - υπόβαση) μέτρου ελαστικότητας E_2 και πάχους h_2 και τη στρώση έδρασης με μέτρο ελαστικότητας E_3 και άπειρο πάχος.



Σχήμα 3.1

Η ανεύρεση σχέσεων με τις οποίες το ΔΜΕ εμπλέκεται στην περιγραφή της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων ή καθορίζεται το φυσικό του νόημα, επιχειρήθηκε μέσω της Στατιστικής. Για τις ανάγκες της στατιστικής επεξεργασίας συγκροτήθηκε ένα τυχαίο στατιστικό δείγμα από ιδεατές διατομές (βλ. Παράρτημα, 1). Με την θεωρητική επιβολή κατάλληλης φόρτισης σ' αυτές υπολογίστηκε το E_{dyn} και άλλα μεγέθη μεταξύ των οποίων αναζητήθηκαν ποικίλες συσχετίσεις.

3.2 Συγκρότηση στατιστικού δείγματος ιδεατών διατομών

Οι ιδεατές διατομές που συγκροτήθηκαν διαφοροποιούνται μεταξύ τους στα μεγέθη E_1 , E_2 , E_3 , h_1 και h_2 . Το διάστημα μέσα στο οποίο λαμβάνουν τιμές τα E_i , h_i καθορίστηκε με εμπειρικά κριτήρια ώστε να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Συγκεκριμένα η τιμή κάθε παραμέτρου κυμαίνεται:

E_1 : από 3000 ως 7000 MPa

E_2 : από 100 ως 600 MPa

E_3 : από 50 ως 200 MPa

h_1 : από 100 ως 250 mm

h_2 : από 200 ως 600 mm

Οι διατομές του στατιστικού μας δείγματος προέκυψαν από τον τυχαίο συνδυασμό των μεγεθών E_1 , E_2 , E_3 , h_1 , h_2 . Αυτό κρίθηκε σκόπιμο επειδή τα υφιστάμενα οδοστρώματα (στα οποία θέλουμε να μοιάζουν οι ιδεατές διατομές) μπορεί να απέχουν κατά πολύ από τη βέλτιστη κατασκευή. Συνολικά έγιναν εκατό (100) τυχαίοι συνδυασμοί.

Όπως βλέπουμε από το εύρος τιμών των μεγεθών E_1 , E_2 , E_3 , h_1 , h_2 υπάρχει πιθανότητα να συνδυαστούν μεταξύ τους έτσι ώστε σε μια διατομή να έχουμε $E_2 \leq E_3$ ή $h_1 \geq h_2$. Τέτοιες διατομές (υπήρξαν επτά στο αρχικό δείγμα) απορρίφθηκαν - ως απίθανες - και δεν αποτελούν μέρος του συνόλου με το οποίο έγιναν οι απαραίτητες εργασίες. Το τελικό στατιστικό δείγμα περιλαμβάνει ενενήντα-τρεις (93) διατομές.

3.3 Χρήση του προγράμματος BISAR: Δεδομένα που εισάγονται

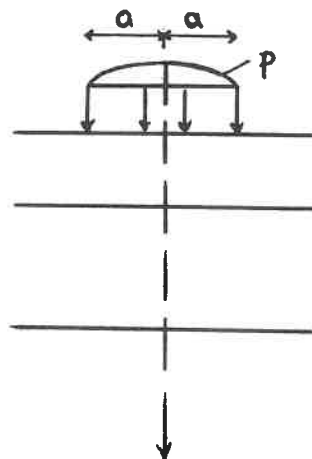
Τα μεγέθη με τα οποία πραγματοποιήθηκε η στατιστική επεξεργασία υπολογίστηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος BISAR [6] (αλγόριθμος ο οποίος βασίζεται στη θεωρία των πολλαπλών στρώσεων). Τα στοιχεία που εισήχθησαν ως δεδομένα του προγράμματος είναι:

- Ο αριθμός των στρώσεων : 3

- Μέτρα Ελαστικότητας (σε MPa) και πάχη των στρώσεων (σε mm): τα αντίστοιχα για κάθε διατομή.
- Αριθμός Poisson για κάθε στρώση : 0,35 για όλες τις στρώσεις
- Ο συντελεστής που εκφράζει το ποσοστό της “συνεργασίας” των στρώσεων στις επιφάνειες επαφής : 0 (πλήρης συνεργασία)
- Πλήθος φορτίων : 1
- Ακτίνα επιφάνειας φόρτισης (σε mm) : 150
- Πίεση επιφάνειας φόρτισης (σε MPa) : 0,707
- Συντεταγμένες φόρτισης (σε mm) : (0,0,0)
- Πλήθος σημείων ελέγχου (θέσεις στις οποίες ζητάμε την ένταση, παραμόρφωση ή υποχώρηση) : 1
- Συντεταγμένες σημείων ελέγχου (σε mm) : ανάλογα με την περίπτωση

Σημειώνεται ότι η φόρτιση [5] που εισάγουμε στο πρόγραμμα έχει τη μορφή του σχήματος 3.2. Τα δεδομένα που αναφέρονται σ’ αυτή είναι τέτοια ώστε να υπάρχει αντιστοιχία με την καταπόνηση του βάρους των 50 KN της δοκιμής του FWD.

Λόγω του πλήθους των διατομών, η εξαγωγή κάθε μεγέθους έγινε με τη βοήθεια προγραμμάτων Η/Υ που καταρτίστηκαν.(βλ.Παράρτημα, 2)



Σχήμα 3.2

3.4 Κατάρτιση προγραμμάτων H/Y

Για την αντιμετώπιση του μεγάλου όγκου υπολογισμών για την εξαγωγή των μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν στη στατιστική επεξεργασία, μορφώθηκαν προγράμματα H/Y σε FORTRAN 90. Η μορφή των προγραμμάτων με τα οποία πραγματοποιήθηκε επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού των μεγεθών από το BISAR περιγράφεται παρακάτω.

Το BISAR περιλαμβάνει ένα εκτελέσιμο πρόγραμμα (το lode.exe) που “διαβάζει” δεδομένα μέσα από ένα αρχείο εισόδου (tape 5) και στη συνέχεια αφού υπολογίσει κάθε απαραίτητο στοιχείο (ένταση, παραμόρφωση, υποχώρηση) για τις θέσεις της διατομής που μας ενδιαφέρουν, καταγράφει τα αποτελέσματα σε ένα αρχείο εξόδου (tape 6). Για τις ανάγκες της εργασίας καταρτίστηκαν για κάθε μέγεθος δύο εκτελέσιμα προγράμματα (.for και έπειτα .exe) και ένα batch file (παρόμοιας μορφής για όλες τις περιπτώσεις μεγεθών). (βλ. Παράρτημα, 2)

Το πρώτο πρόγραμμα αλλάζει μία φορά τα στοιχεία του tape 5 με άλλα στοιχεία που “διαβάζει” από ένα αρχείο δεδομένων (παράμετροι διατομών). Κάθε ενότητα δεδομένων περιέχει και τον αύξοντα αριθμό n της αντίστοιχης διατομής. Σε ένα άλλο αρχείο δεδομένων (co.dat) το πρόγραμμα διαβάζει τον αριθμό της διατομής που πρέπει να “εισάγει” στο tape 5.

Το δεύτερο πρόγραμμα εντοπίζει από το tape 6 την τιμή του μεγέθους που χρειαζόμαστε και την καταγράφει σε συγκεκριμένο αρχείο δεδομένων. Παράλληλα αυξάνει κατά μία μονάδα τον αριθμό n του co.dat (που αντιστοιχεί στην επόμενη διατομή). Όταν το n φτάσει μία ορισμένη τιμή - τελευταία διατομή - το πρόγραμμα κάνει παύση (pause).

Η επαναληπτική διαδικασία επιτυγχάνεται μέσα στο batch file όπου συνδυάζονται τα δύο παραπάνω προγράμματα και το lode.exe. Εδώ εκτελείται το πρώτο πρόγραμμα (εισαγωγή στοιχείων στο tape 5) και έπειτα το lode.exe κάνει τους υπολογισμούς. Τρίτο κατά σειρά εκτελείται το δεύτερο πρόγραμμα που καταρτίστηκε (καταγραφή τιμής μεγέθους από το tape 6 σε αρχείο δεδομένων και καθορισμός επόμενης διατομής) και αμέσως μετά υπάρχει κατάλληλη εντολή για batch file με την οποία

ξεναρχίζει το πρώτο πρόγραμμα. Η εκτέλεση ολοκληρώνεται για όλες τις εξεταζόμενες διατομές και σταματά με την εντολή παύσης (το n φτάνει τον αύξοντα αριθμό της τελευταίας διατομής).

Επίσης, μορφώθηκαν και άλλα απλά προγράμματα (σε FORTRAN 90 πάντα) που υπολογίζουν με επανάληψη ορισμένα μεγέθη που προκύπτουν από συνήθεις μαθηματικές εκφράσεις. Η συγκεκριμένη εργασία μπορούσε να γίνει και με χρήση του EXCEL (όπως και έγινε σε λίγες περιπτώσεις).

3.5 Μεγέθη που υπολογίστηκαν

Τα μεγέθη που εξήχθησαν από τα προγράμματα - εκτός από την κεντρική υποχώρηση του BISAR και το αντίστοιχο E_{dyn} - για να συμμετάσχουν στη στατιστική διερεύνηση είναι:

- Για το κεφάλαιο 5 :

E_{dyn} από μετρημένες κεντρικές υποχωρήσεις δοκιμής FWD σε πραγματικές διατομές.

Μέτρο ελαστικότητας E_3 από στατιστικές σχέσεις.

- Για το κεφάλαιο 6 :

Ανηγμένη οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση ϵ_{Ras} και οριζόντια εφελκυστική ένταση σ_{Ras} στο κατώτερο σημείο της ασφατικής στρώσης (για τις ιδεατές διατομές).

Ανηγμένη κατακόρυφη θλιπτική παραμόρφωση ϵ_z , κατακόρυφη θλιπτική τάση σ_z και οριζόντια ένταση σ_R στο ανώτερο σημείο της στρώσης έδρασης (για τις ιδεατές διατομές).

Παραμορφώσεις ϵ_{Ras} και ϵ_z για διατομές που προκύπτουν με ανάστροφο υπολογισμό από τρία προγράμματα. Για τις ίδιες διατομές υπολογίστηκαν το E_{dyn} από μετρημένη κεντρική υποχώρηση και οι ϵ_z , ϵ_{Ras} από στατιστικές σχέσεις.

- Για το κεφάλαιο 7 :

Ενοποιημένο μέτρο ελαστικότητας υπερκείμενης κατασκευής οδοστρώματος E_p (για τις ιδεατές διατομές).

Κεντρική υποχώρηση D_0 και υποχώρηση D_1 σε απόσταση 0,30 m από το κέντρο της φόρτισης για βάρος 75 KN (για τις ιδεατές διατομές).

Οι παραπάνω παραμορφώσεις και εντάσεις αναφέρονται στον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας της φόρτισης (εξαίρεση αποτελεί μόνο η D_1).

3.6 Στατιστική διερεύνηση

Οι εργασίες που αναφέρονται παραπάνω πραγματοποιήθηκαν για να καταστεί δυνατή η στατιστική επεξεργασία κατάλληλου δείγματος έτσι ώστε να προκύψουν χρήσιμες πληροφορίες για το ρόλο του ΔΜΕ. Η διερεύνηση έγινε με τη βοήθεια του στατιστικού λογισμικού “πακέτου” ‘STATGRAPHICS Plus (Version 2.1)’. Χρησιμοποιήθηκαν κυρίως τα υποπρογράμματα Canonical Correlations και Multiple Regression με τα οποία αναζητήθηκαν συσχετίσεις μεταξύ E_{dyn} και διαφόρων παραμέτρων και μορφώθηκαν προσεγγιστικές σχέσεις για κάποια μεγέθη. Παρακάτω περιγράφεται η γενική πορεία που ακολουθήθηκε για τη διερεύνηση.

Το πρώτο πράγμα που εξετάστηκε ήταν η συσχέτιση κάθε μιας από τις παραμέτρους του οδοστρώματος (πάχη, μέτρα ελαστικότητας στρώσεων) με το E_{dyn} . Παρατηρήθηκε η μορφή των βέλτιστων διαγραμμάτων των κανονικοποιημένων τιμών αφού πρώτα δοκιμάστηκαν διάφοροι μετασχηματισμοί των μεγεθών (λογάριθμος, δύναμη κ.λ.π.). Μετά από την ανάλυση της εικόνας που παρουσιάστηκε, έγινε προσπάθεια να προσεγγιστούν κάποιες παράμετροι με στατιστικές σχέσεις που περιέχουν το E_{dyn} . Εκτός του E_{dyn} οι σχέσεις αυτές περιέχουν τα πάχη των στρώσεων (που μετρούνται σχετικά εύκολα) για να αυξηθεί ο συντελεστής συσχέτισης.

Με την ίδια λογική αντιμετωπίζεται και η ανεύρεση προσεγγιστικών σχέσεων για τα εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη που αναπτύσσονται σε “κρίσιμες” θέσεις αστοχίας της διατομής [5] ενός οδοστρώματος. Αξιοποιώντας τις ενδείξεις από τα βέλτιστα διαγράμματα κανονικοποιημένων τιμών μορφώνονται σχέσεις για τη στατιστική εκτίμηση ορισμένων χαρακτηριστικών μεγεθών (μέσω E_{dyn} , h_1 , h_2).

3.7 Εφαρμογές βασισμένες στη στατιστική διερεύνηση

Για να εξεταστεί η ισχύς των παραγόμενων σχέσεων στην πράξη, ελήφθησαν στοιχεία από δεκαοκτώ (18) διατομές υφιστάμενων οδοστρωμάτων στις οποίες πραγματοποιήθηκε δοκιμή FWD [7] και οι ελαστικές παράμετροί τους προσδιορίστηκαν με προγράμματα αναστρόφου υπολογισμού. (βλ. Παράρτημα, 2). Έπειτα ενεργοποιήθηκαν οι στατιστικές σχέσεις που προσεγγίζουν συγκεκριμένα μεγέθη με τη βοήθεια του ΔΜΕ. Οι τιμές που προέκυψαν συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές που υπολογίζονται μέσω του BISAR (με δεδομένα εισαγωγής τις τιμές του αναστρόφου υπολογισμού).

Με τη διαδικασία ελέγχου της εφαρμοσιμότητας των σχέσεων που περιέχουν το E_{dyn} εξάγουμε ορισμένα χρήσιμα και σαφή συμπεράσματα για τις δυνατότητές του.

3.8 Απαραίτητα σχόλια - διευκρινήσεις

Το στατιστικό δείγμα που επεξεργαζόμαστε αποτελείται από ιδεατές διατομές και όχι από πραγματικές στις οποίες θα μπορούσαμε να έχουμε και μετρήσεις της δοκιμής FWD. Η επιλογή κρίθηκε σκόπιμη γιατί στην πρώτη περίπτωση τα στοιχεία των παραμέτρων είναι επακριβώς γνωστά ενώ στη δεύτερη θα είχαν προκύψει από υπολογισμούς με πιθανές (και κατά περίπτωση μεγάλες) αποκλίσεις από την πραγματικότητα.

Με αυτό τον τρόπο το E_{dyn} πρέπει αναγκαστικά να υπολογιστεί με σχετική ανακρίβεια, βασισμένο στην τιμή της υποχώρησης που προκαλεί ένα στατικό φορτίο. Η προσομοίωση της φόρτισης που εισάγεται στο BISAR με τη δυναμική, δεν είναι απόλυτα ικανοποιητική. Παρόλ' αυτά και εφόσον για τις σχέσεις που εξάγονται γίνεται έλεγχος στην πράξη, δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στη σαφήνεια που επιβάλλεται να χαρακτηρίζει ένα στατιστικό δείγμα.

Ακόμη, για να "αποκρυπτογραφηθεί" ο τρόπος με τον οποίο αξιολογούνται τα διαγράμματα, αναφέρεται ότι:

- Για τα διαγράμματα των κανονικοποιημένων τιμών έχουμε τόσο καλύτερη ένδειξη συσχέτισης των μεγεθών όσο η συγκέντρωση των σημείων στο διάγραμμα είναι μεγαλύτερη (και τείνει σε μια γραμμή). Αν και το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε περιέχει και ανάλυση με στατιστικά μεγέθη που περιγράφουν τη συσχέτιση, προτιμήθηκε η παρουσίαση των διαγραμμάτων για πιο παραστατικά συμπεράσματα.

- Για τα διαγράμματα που απεικονίζουν τις τιμές των μεγεθών και τη στατιστική τους προσέγγιση μέσω πολλαπλής παλινδρόμησης [8] η εικόνα είναι πιο θετική όσο πιο κοντά βρίσκονται τα σημεία στην ευθεία " $y=x$ ".

ΚΕΦΑΛΑΙΟ



4. Δυναμικό Μέτρο Ακαμψίας (DMA) και παράμετροι διατομών του οδοστρώματος

4.1 Γενικά

Το DMA (E_{dyn}) εκτιμάται σαν μία συνολική παράμετρος του οδοστρώματος. Επειδή είναι ένα νέο μέγεθος για το οποίο δεν έχουμε επαρκείς πληροφορίες, πρέπει να διαπιστωθεί η ισχύ της παραπάνω εκτίμησης. Είναι δηλαδή απαραίτητο να διερευνηθεί αν το DMA έχει ιδιαίτερη σχέση με κάποια από τις παραμέτρους των διατομών. Αυτές είναι στην προκειμένη περίπτωση τα μέτρα ελαστικότητας και τα πάχη των στρώσεων.

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η επιρροή κάθε παραμέτρου της διατομής ενός οδοστρώματος στη διαμόρφωση της τιμής του E_{dyn} μέσα από την αναζήτηση στατιστικών συσχετίσεων. Ουσιαστικά εξετάζεται ποια μεγέθη “περιέχονται” στο DMA. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε προς αυτή την κατεύθυνση.

4.2 Στατιστική διερεύνηση συσχέτισης του E_{dyn} με τις παραμέτρους διατομών οδοστρώματος

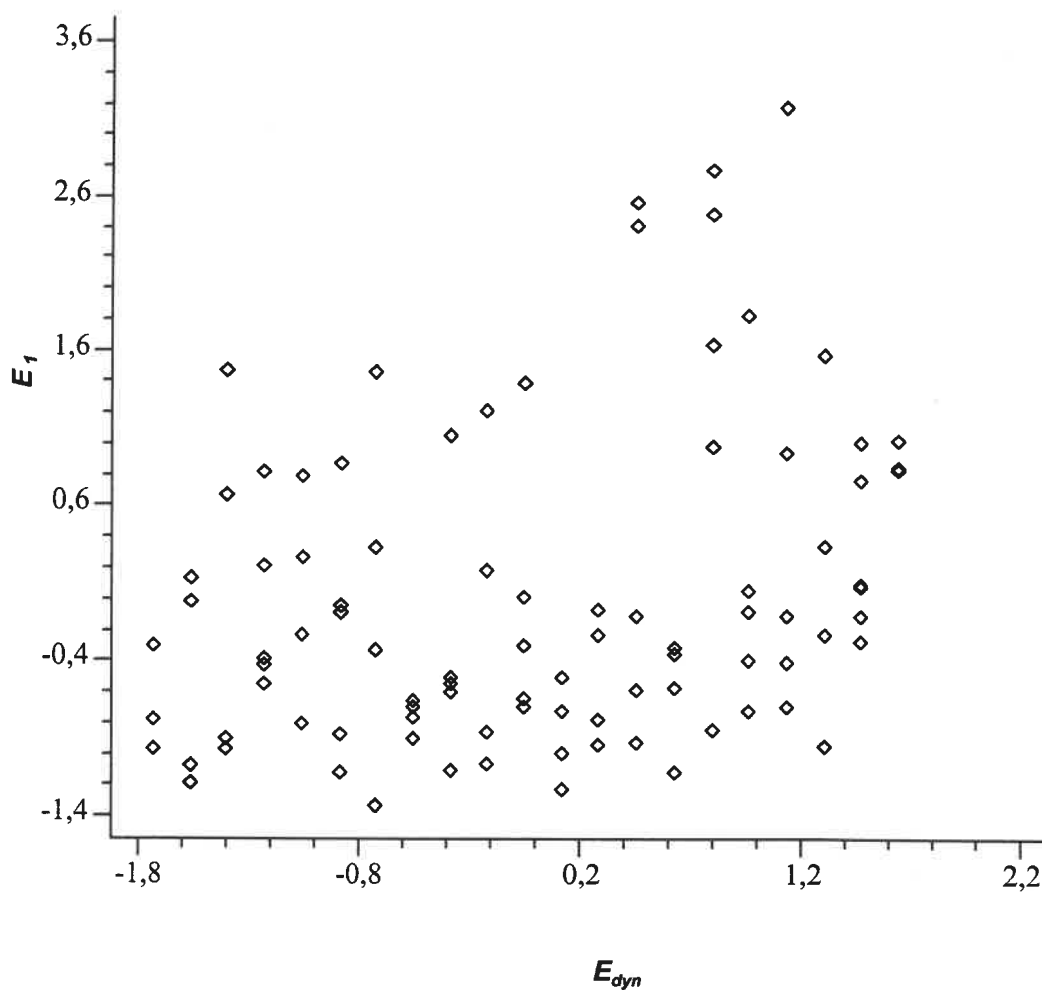
Αρχικά θα εξεταστεί η στατιστική συσχέτιση του E_{dyn} με κάθε μία παράμετρο ξεχωριστά. Τα διαγράμματα κανονικοποιημένων τιμών που παρουσιάζονται σε όλες τις περιπτώσεις είναι τα βέλτιστα. Αναλυτικά, έγιναν διάφοροι μετασχηματισμοί των μεγεθών (λογαρίθμηση, ύψωση σε δύναμη κ.λ.π.) και μορφώθηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα. Εδώ εξετάζονται μόνο αυτά που έδειξαν την πιο θετική εικόνα.

Το μέτρο ελαστικότητας της ενοποιημένης στρώσης ασφαλτομίγματος E_1 δείχνει να μην επηρεάζει την τιμή του DMA. Στο διάγραμμα 4.1 φαίνεται ότι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των κανονικοποιημένων τιμών των E_1 και DMA. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την εκτίμηση που έχει διατυπωθεί σε προηγούμενες μελέτες ότι το DMA μπορεί να

χρησιμοποιηθεί σαν μία πρώτη προσέγγιση του μέτρου ελαστικότητας της ασφαλικής στρώσης.[3]

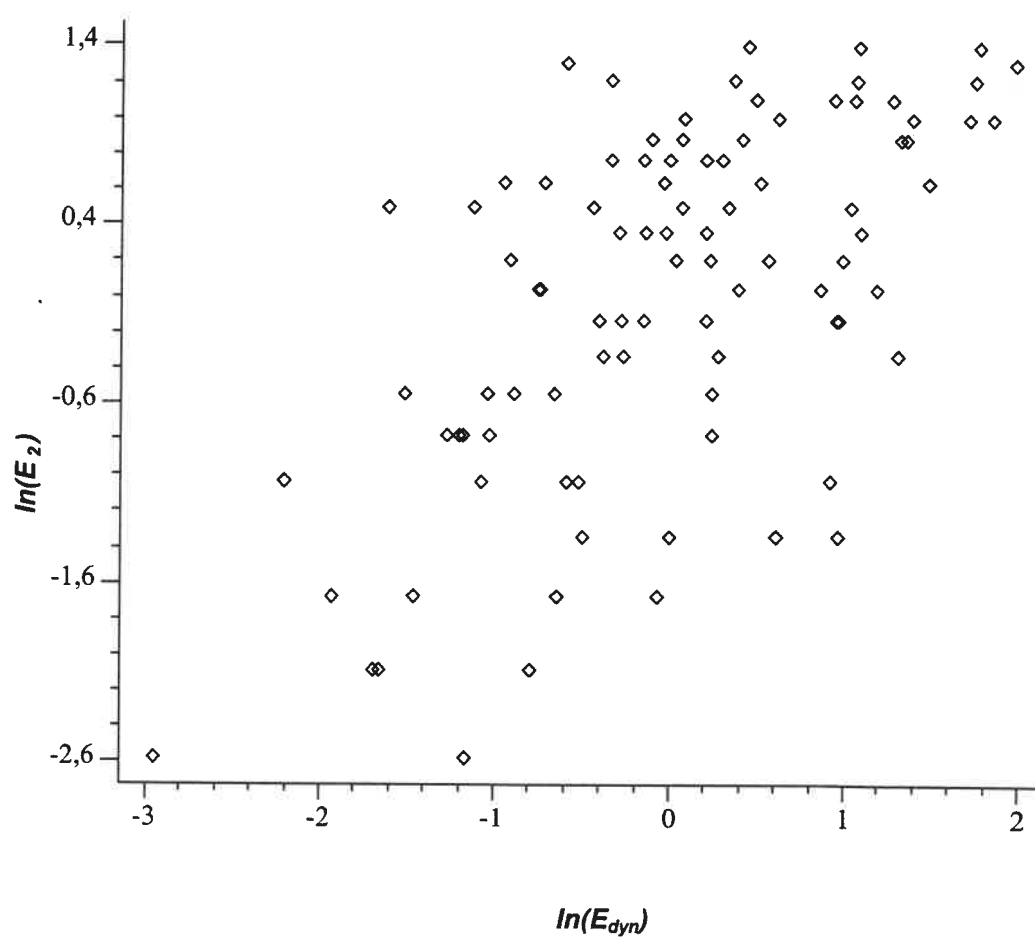
Διαφορετική είναι η εικόνα που προκύπτει για το μέτρο ελαστικότητας της ενοποιημένης στρώσεως ασύνδετου υλικού E_2 . Οι κανονικοποιημένες μεταβλητές του διαγράμματος 4.2 (E_2 και ΔMA) δε δείχνουν τελείως ασυσχέτιστες. Είναι όμως σαφές ότι δε γίνεται να προσεγγιστεί το ΔMA (E_{dyn}) μέσω του E_2 μόνο.

Μια μικρή τάση συσχέτισης (σχετικό πύκνωμα σημείων στο αντίστοιχο διάγραμμα) παρατηρούμε και μεταξύ του ΔMA και του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης E_3 (διάγραμμα 4.3). Αυτή η τάση παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον γιατί η προσέγγιση της τιμής του E_3 σε υφιστάμενα οδοστρώματα είναι αναγκαία και συχνά όχι εύκολη (πολύπλοκος και ανακριβής πολλές φορές ο υπολογισμός του). Η προσπάθεια να προσεγγιστεί με τη βοήθεια του ΔMA και άλλων σχετικά εύκολα υπολογίσιμων μεγεθών αναλύεται σε ξεχωριστή ενότητα.



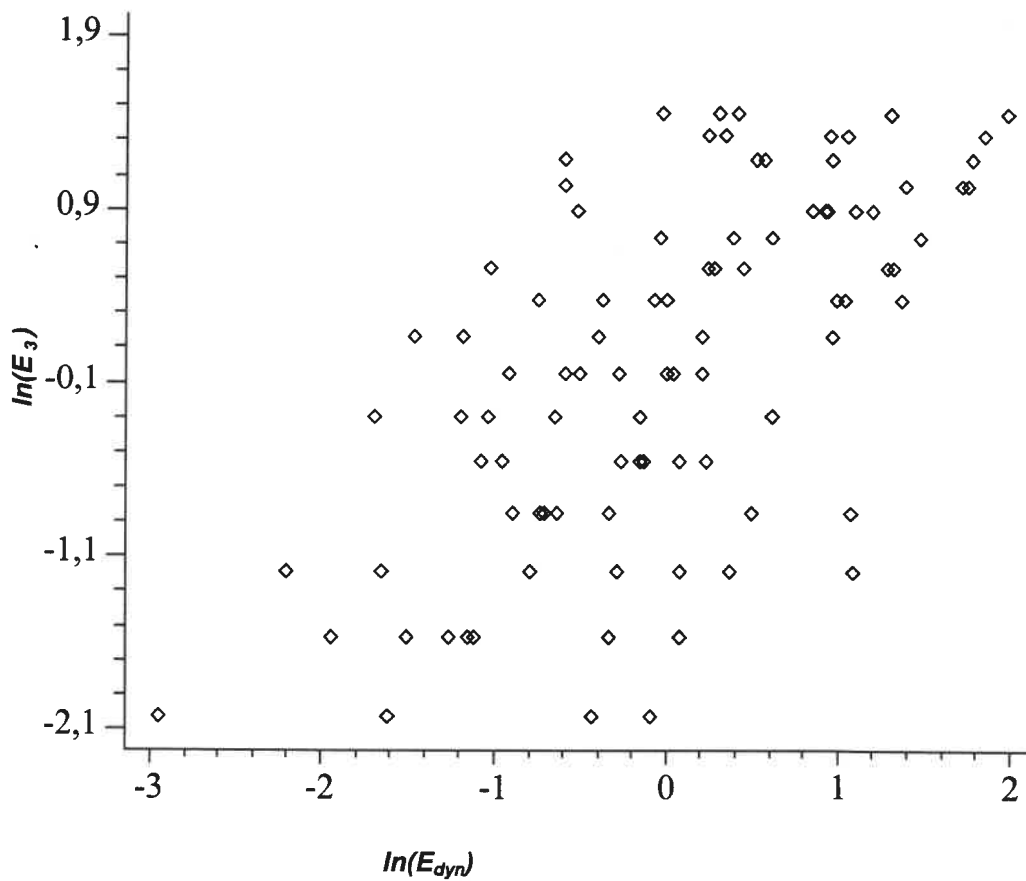
Διάγραμμα 4.1 Συσχέτιση κανονικοποιημένων τιμών μεταξύ E_{dyn} και E_1 .

Η διασπορά των σημείων στο διάγραμμα είναι πολύ μεγάλη. Τα δύο μεγέθη δείχνουν να είναι μεταξύ τους τελείως ανεξάρτητα.



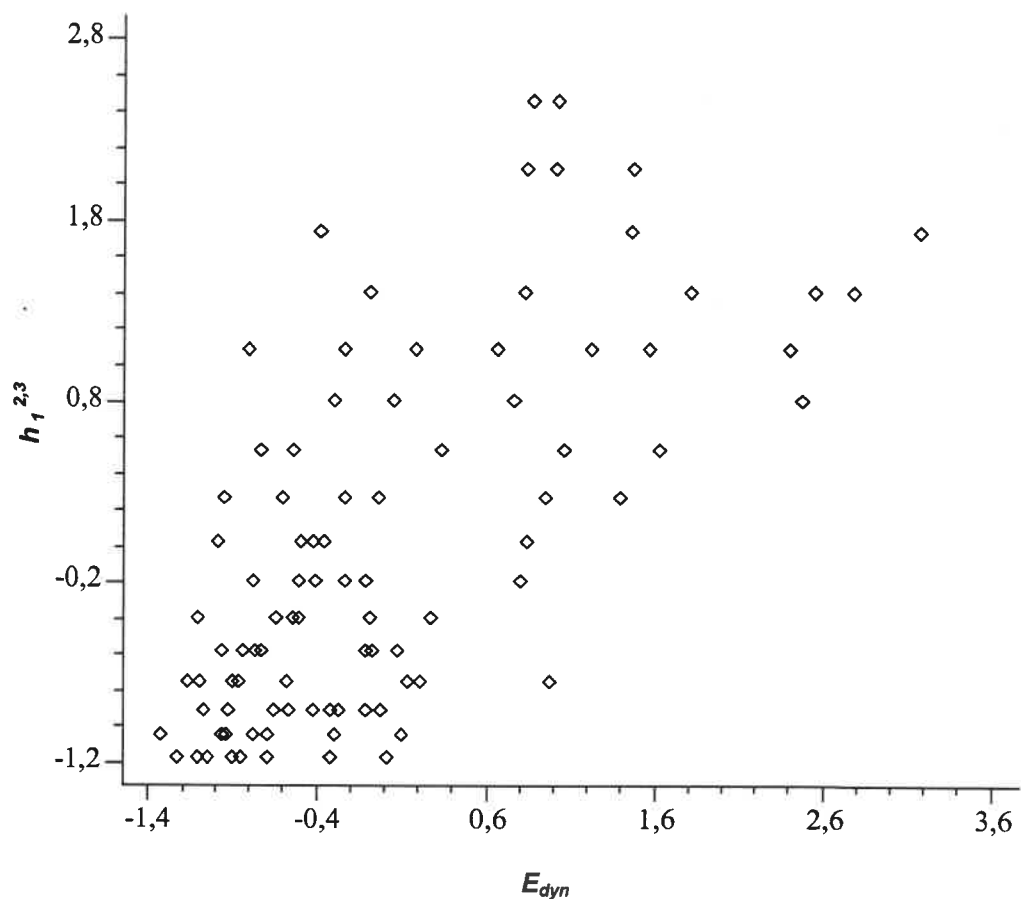
Διάγραμμα 4.2 Συσχέτιση κανονικοποιημένων τιμών μεταξύ E_{dyn} και E_2

Το διάγραμμα που προκύπτει δεν απεικονίζει ανεξάρτητες μεταβλητές. Η συγκέντρωση των σημείων είναι οριακά αισθητή. Συσχέτιση σε χαμηλά επίπεδα.



Διάγραμμα 4.3 Συσχέτιση κανονικοποιημένων τιμών μεταξύ E_{dyn} και E_3

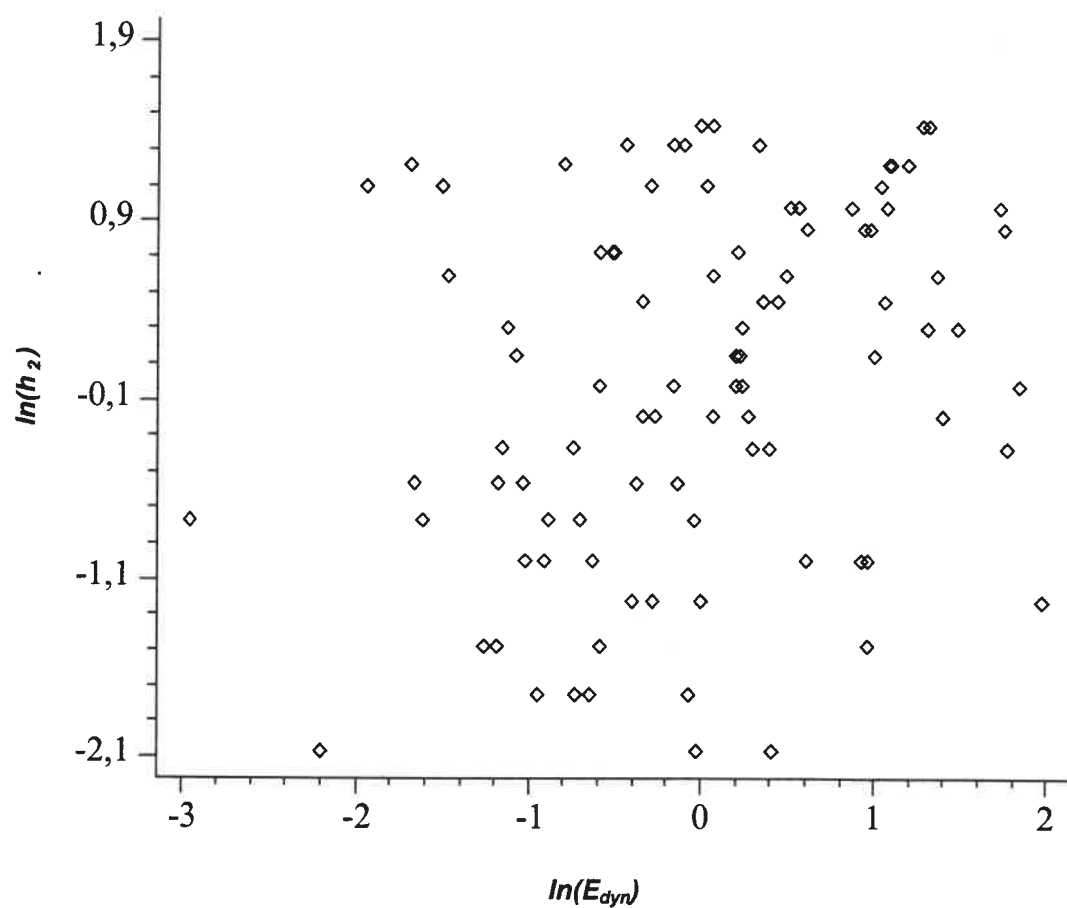
Από το διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι η συσχέτιση των δύο μεγεθών είναι μικρή. Η σαφής τάση συγκέντρωσης των σημείων δεν είναι αρκετή για να θεωρήσουμε εφικτή την προσέγγιση της τιμής του ενός από το άλλο.



Διάγραμμα 4.4 Συσχέτιση κανονικοποιημένων τιμών μεταξύ E_{dyn} και h_1 :

Αισθητή η σχετική πύκνωση των σημείων του διαγράμματος. Το E_{dyn} δείχνει να επηρεάζεται σε μικρό βαθμό από το πάχος της ασφαλικής στρώσης.

Ανάλογη είναι και η κατάσταση στα διαγράμματα που αφορούν τα πάχη των στρώσεων. Για το πάχος της ασφαλικής στρώσης h_1 παρατηρούμε ότι η εξάρτηση του ΔΜΑ απ' αυτήν κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα (διάγραμμα 4.4). Σημειώνεται ότι αυτή η - μικρή έστω - εξάρτηση έρχεται σε αντίθεση με την αρνητική εικόνα που παρουσίασε η αντίστοιχη διερεύνηση για το E_1 .



Διάγραμμα 4.5 Συσχέτιση κανονικοποιημένων τιμών των E_{dyn} και h_2 .

Τα μεγέθη -βάσει του διαγράμματος - είναι τελείως ανεξάρτητα. Τα σημεία έχουν θέσεις ακανόνιστες και μακρινές.

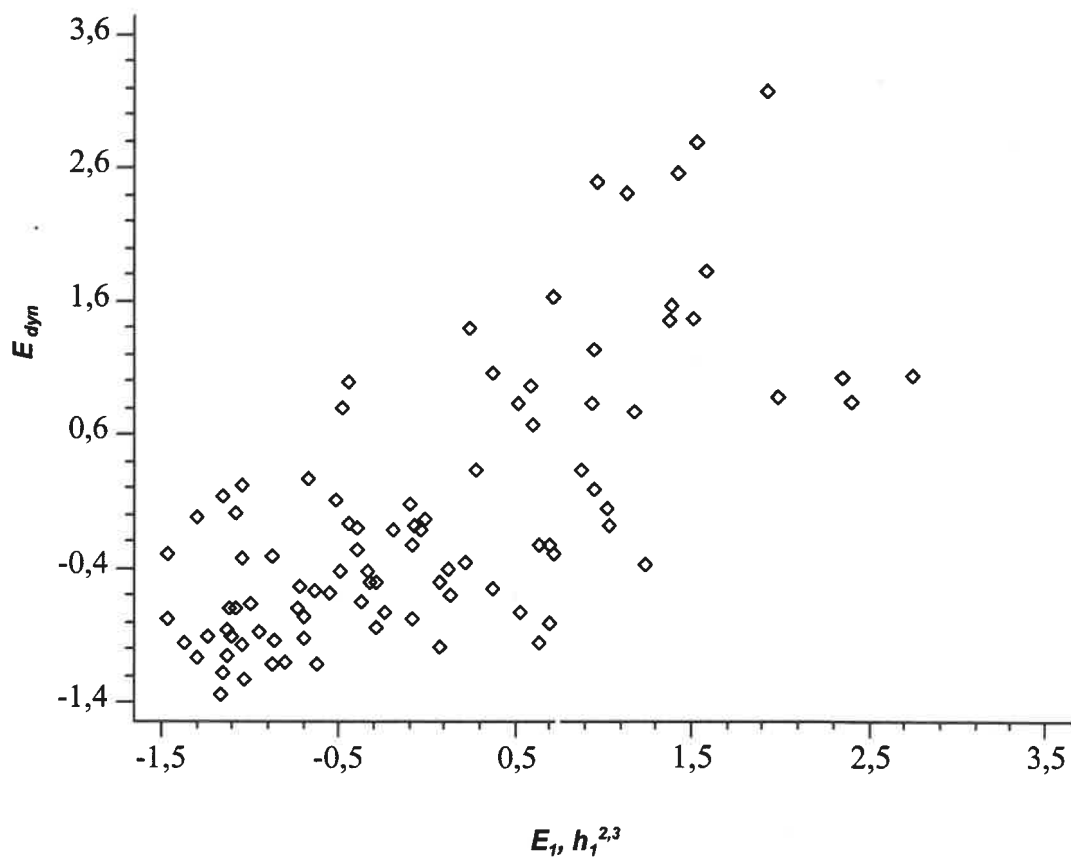
Το πάχος της ενιαίας στρώσης ασύνδετου υλικού h_2 δείχνει να μην επιδρά καθόλου στη διαμόρφωση της τιμής του ΔMA (διάγραμμα 4.5). Δηλαδή το ΔMA δεν εξαρτάται από το h_2 παρά το γεγονός ότι το E_2 παρουσιάζει κάποια συσχέτιση μ' αυτό

Συμπερασματικά το Δυναμικό Μέτρο Ακαμψίας δεν επηρεάζεται με ιδιαίτερη βαρύτητα από μία ή δύο μεμονωμένες παραμέτρους του οδοστρώματος. Πρέπει όμως να δούμε αν κάτι τέτοιο συμβαίνει με κάποια από τις στρώσεις που αποτελούν το οδόστρωμα. Δηλαδή χρειάζεται να ελεγχθεί η στατιστική του εξάρτησης από τους συνδυασμούς των $E_1 - h_1$ και $E_2 - h_2$.

Για την πρώτη στρώση δοκιμάστηκαν διάφοροι συνδυασμοί των μεγεθών $E_1 - h_1$ για να βρεθεί αυτός με την υψηλότερη συσχέτιση ως προς το ΔΜΑ και προέκυψε ο συνδυασμός του διαγράμματος 4.6. Όμως η συνολική εικόνα του δε μας οδηγεί σε θετικά συμπεράσματα για ιδιαίτερη εξάρτηση του ΔΜΑ απ' την πρώτη κύρια στρώση της διατομής του οδοστρώματος (μέτρια τάση συσχέτισεως).

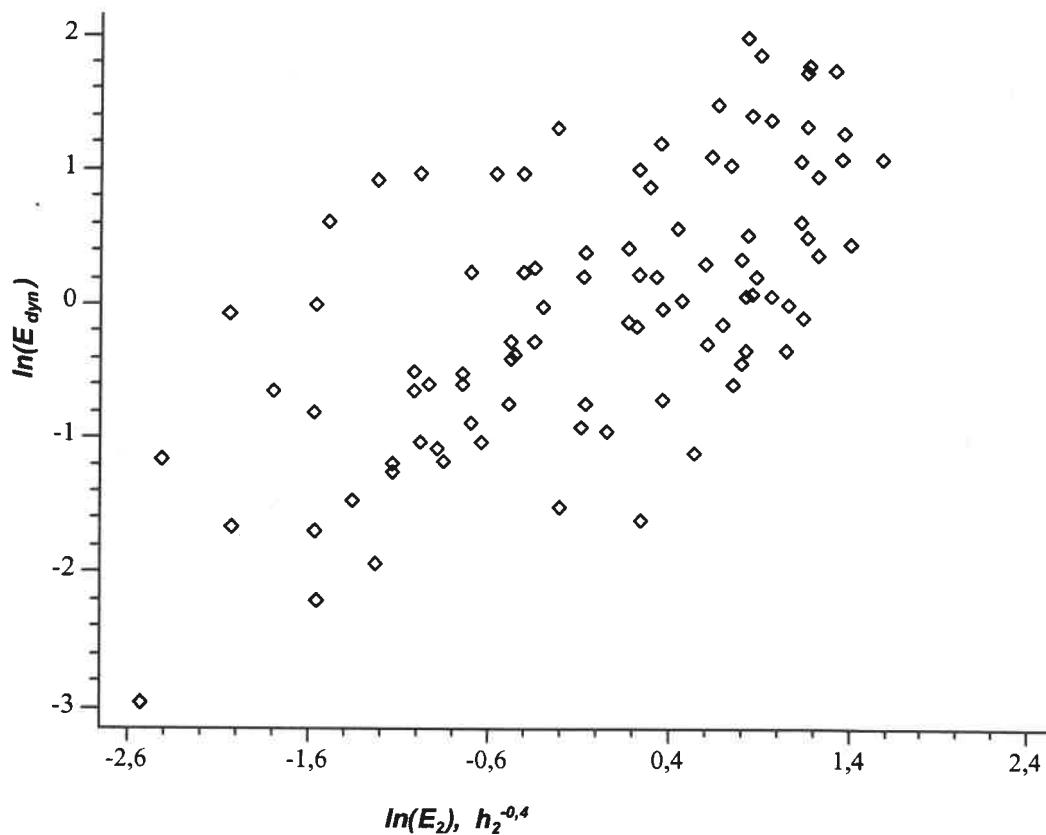
Τα αποτελέσματα της αντίστοιχης διερεύνησης για τη δεύτερη κύρια στρώση (ασύνδετο υλικό) είναι παρόμοια όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.7 (λίγο μικρότερη εξάρτηση).

Λαμβάνοντας υπόψη και την εικόνα που έδειξε το διάγραμμα 4.3 για το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης διαπιστώνουμε ότι καμία στρώση δεν είναι αποκλειστικά υπεύθυνη για την διαμόρφωση της τιμής του ΔΜΑ.



Διάγραμμα 4.6 Συσχέτιση κανονικοποιημένων τιμών μεταξύ του E_{dyn} και των παραμέτρων της ασφαλικής στρώσης:

Η τάση συγκέντρωσης των σημείων στο διάγραμμα δεν είναι η απαιτούμενη ώστε να δικαιολογείται εξάρτηση του E_{dyn} μόνο απ' την πρώτη κύρια στρώση του οδοστρώματος.



Διάγραμμα 4.7 Συσχέτιση κανονικοποιημένων τιμών μεταξύ του E_{dyn} και των παραμέτρων της ενιαίας στρώσης ασύνδετου υλικού:

Τα συμπεράσματα είναι αντίστοιχα με αυτά του διαγράμματος για την ασφαλική στρώση δηλαδή το ασύνδετο υλικό δεν επηρεάζει με ιδιαίτερη βαρύτητα το E_{dyn} .

Προσπαθώντας να εξάγουμε το ΔΜΑ από τα χαρακτηριστικά της διατομής ενός οδοστρώματος διαπιστώνουμε ότι οι παράμετροι E_2 , E_3 , και h_1 - που έδειξαν υποτυπώδη “ένα προς ένα” συσχέτιση με αυτό - μπορούν (και οι τρεις μαζί) να δώσουν μια πολύ καλή προσέγγισή του (διάγραμμα 4.8) με την παρακάτω έκφραση:

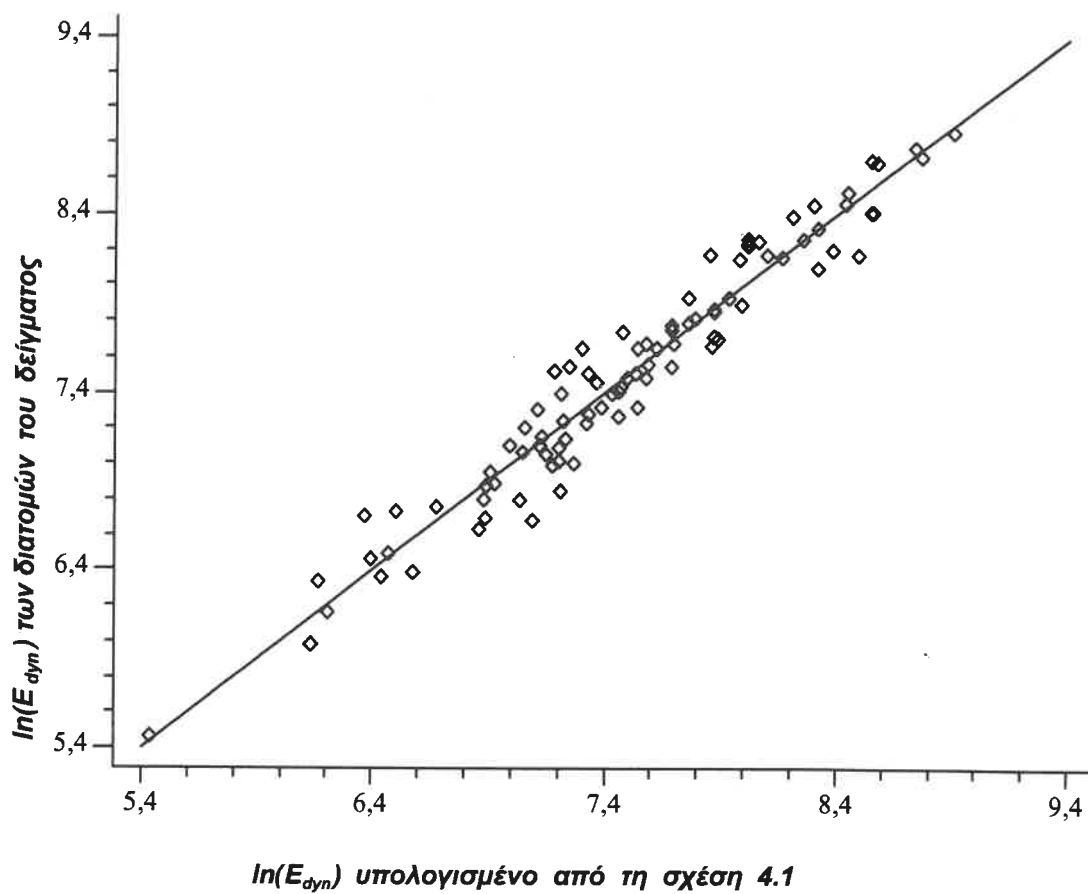
$$\ln(E_{dyn}) = 23,3811 - 12,9972 \cdot E_2^{-0,4} - 15,5336 \cdot E_3^{-0,1} - 22,0219 \cdot h_1^{-0,3}$$

(Σχέση 4.1)

Αυτό μας δείχνει ότι και οι τρεις στρώσεις “περιέχονται” στην τιμή του ΔΜΑ - και μάλιστα ισότιμα αν παρατηρήσουμε τα αποτελέσματα της διερεύνησης για την επιρροή των στρώσεων στην τιμή του E_{dyn} . Έτσι πιστοποιείται η θεώρηση του ΔΜΑ σαν συνολική παράμετρος του οδοστρώματος. Επίσης παρά την πολύ υψηλή συσχέτιση του με την ομάδα $h_1 - E_2 - E_3$ ($r^2 = 94.52$), η προσθήκη των $E_1 - h_2$ στο στατιστικό μοντέλο (διάγραμμα 4.9) δίνει αισθητή βελτίωση στην προσέγγιση μας ($r^2 = 98.84$!!). Ισχυροποιείται δηλαδή η πιο πάνω θεώρηση (σχέση 4.2).

$$\ln(E_{dyn}) = 21,87 + 10,38 \cdot 10^{-5} \cdot E_1 - 12,16 \cdot E_2^{-0,4} - 15,37 \cdot E_3^{-0,1} - 20,03 \cdot h_1^{-0,3} + 88,05 \cdot 10^{-5} \cdot h_2$$

(Σχέση 4.2)

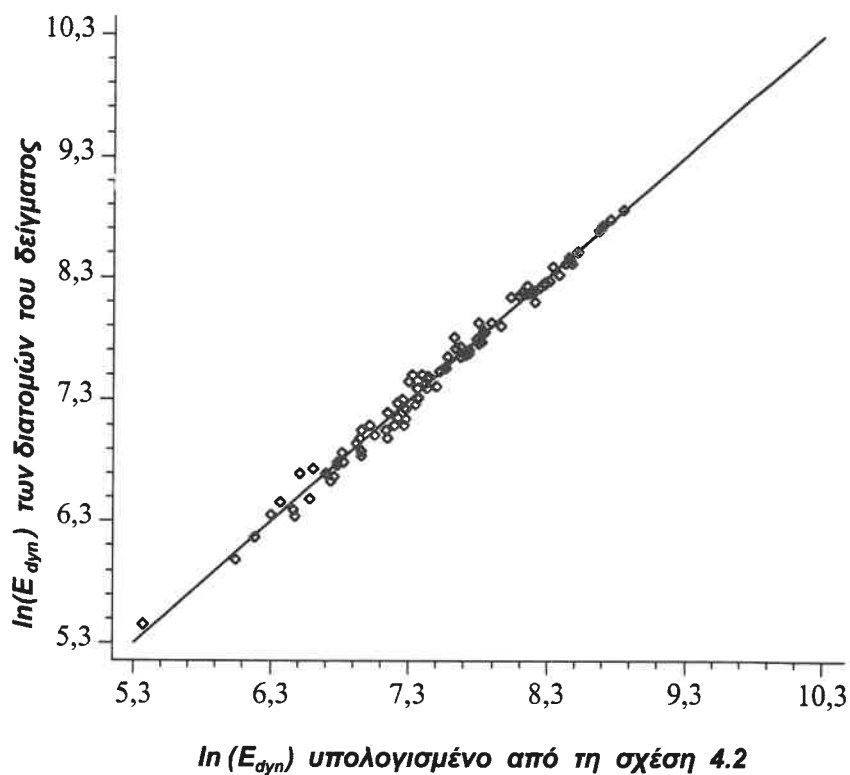


Διάγραμμα 4.8 Διάγραμμα συσχέτισης για τη στατιστική προσέγγιση του E_{dyn} από τις παραμέτρους E_2 , E_3 , h_1 μέσω πολλαπλής παλινδρόμησης:

Σχέση προσέγγισης

$$\ln(E_{dyn}) = 23,3811 - 12,9972 \cdot E_2^{-0,4} - 15,5336 \cdot E_3^{-0,1} - 22,0219 \cdot h_1^{-0,3}$$

Συντελεστής συσχέτισης $r^2 = 94,5167$



Διάγραμμα 4.9 Διάγραμμα συσχέτισης για τη στατιστική προσέγγιση του E_{dyn} από τις παραμέτρους E_1, E_2, E_3, h_1, h_2 μέσω πολλαπλής παλινδρόμησης :

Σχέση προσέγγισης

$$\ln(E_{dyn}) = 21,87 + 10,38 \cdot 10^{-5} \cdot E_1 - 12,16 \cdot E_2^{-0,4} - 15,37 \cdot E_3^{-0,1} - 20,03 \cdot h_1^{-0,3} + 88,05 \cdot 10^{-5} \cdot h_2$$

Συντελεστής συσχέτισης $r^2 = 98,8415$

Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα πως το Δυναμικό Μέτρο Ακαμψίας είναι ένα μέγεθος που καθορίζεται από το σύνολο της κατασκευής του οδοστρώματος. Έχοντας υπόψη ότι προκύπτει από δυναμική ανάλυση και κυρίως μπορεί να υπολογιστεί άμεσα εκτιμάται πως το ενδεχόμενο της αξιοποίησης του συγκεντρώνει αρκετές πιθανότητες. Μένει επομένως να εξετάσουμε αν αυτό το μέγεθος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προκύψουν απαραίτητες πληροφορίες για υφιστάμενες κατασκευές και αν μπορεί να χαρακτηρίσει τη συμπεριφορά τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

5

5. Δυναμικό Μέτρο Ακαμψίας και ανάστροφος υπολογισμός παραμέτρων οδοστρώματος

5.1 Γενικά

Τα πάχη των στρώσεων μιας υφιστάμενης κατασκευής οδοστρώματος μετρούνται με σχετικά απλή και γρήγορη διαδικασία. Αντίθετα, δε συμβαίνει το ίδιο για τις ελαστικές παραμέτρους των υλικών της κατασκευής. Η γνώση τους, όμως, είναι πολύ χρήσιμη. Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η δυνατότητα υπολογισμού τους με τη βοήθεια του DMA (E_{dyn}).

Ο προσδιορισμός των μέτρων ελαστικότητας E_i των διαφόρων στρώσεων ενός οδοστρώματος αποτελεί σημαντικό αντικείμενο έρευνας κυρίως γιατί η αξιολόγηση υφιστάμενων κατασκευών βασίζεται (σε μεγάλο μέρος) σ' αυτόν. Στο πλαίσιο αυτό, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο ανάστροφος υπολογισμός των E_i με τη βοήθεια μετρήσεων μη καταστρεπτικών δοκιμών όπως αυτή του Falling Weight Deflectometer (FWD). Σήμερα υπάρχουν πολλές μέθοδοι οι οποίες αξιοποιούν τις μετρήσεις του FWD (μέγιστη υποχώρηση εφτά σημείων που απέχουν μεταξύ τους καθορισμένη απόσταση σε κοινή ευθεία) μέσω κατάλληλων λογισμικών για να εκτιμήσουν τις τιμές των E_i (ανάστροφος υπολογισμός). Το σκεπτικό της διαδικασίας αυτών των προγραμμάτων σχετίζεται με τη θεώρηση μιας διατομής η οποία θα έδινε τις ίδιες υποχωρήσεις με τις μετρημένες (με στατική όμως προσομοίωση φόρτισης). Η διατομή αυτή μορφώνεται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας όπου τα E_i παίρνουν τιμές μέχρι να προσεγγιστούν ικανοποιητικά οι υποχωρήσεις.

Αν ο υπολογισμός ορισμένων έστω ελαστικών παραμέτρων γινόταν μέσω του E_{dyn} , ο ανάστροφος υπολογισμός θα αποκτούσε μερικά σημαντικά πλεονεκτήματα. Εκτός της δυναμικής θεώρησης ενός ενιαίου μέτρου ακαμψίας (που έρχεται σε συμφωνία με τη βασική μορφή καταπόνησης ενός οδοστρώματος) τα πλεονεκτήματα αφορούν τον τρόπο εξαγωγής του E_{dyn} . Η σχέση 2.1 από την οποία υπολογίζεται, λαμβάνει ως μοναδικό δεδομένο την μετρημένη κεντρική υποχώρηση της δοκιμής FWD. Αυτό έχει σα συνέπεια τη διευκόλυνση και ενδεχομένως την επιτάχυνση

της δοκιμής διότι δεν είναι απαραίτητη η εγκατάσταση και των εφτά γεωφώνων της συσκευής FWD. Επίσης το συνολικό μήκος που καταλαμβάνουν τα γεώφωνα (συνήθως γύρω στα 1,80 m) επιτρέπει την παρουσία σημαντικών σφαλμάτων στις μετρήσεις των μεγίστων υποχωρήσεων. Μέσα σε αυτή την απόσταση είναι πιθανή η ύπαρξη ανομοιομορφίας στη διατομή του οδοστρώματος (τόσο στα πάχη όσο και στα μέτρα ελαστικότητας) που μπορεί να προκαλέσει μεγάλες αποκλίσεις στο τελικό αποτέλεσμα του ανάστροφου υπολογισμού. Χρησιμοποιώντας λοιπόν μόνο τη μετρημένη κεντρική υποχώρηση, περιορίζεται η επιφάνεια επιρροής με αποτέλεσμα τα σφάλματα αυτά μειώνονται σημαντικά.

Η ενότητα αυτή αναφέρεται στη διερεύνηση στατιστικών σχέσεων για τον προσδιορισμό των ελαστικών παραμέτρων διατομής οδοστρώματος μέσω του υπολογισμένου E_{dyn} . Επειδή είδαμε ότι τα μέτρα ελαστικότητας των διαφόρων στρώσεων εμφανίζουν μερική μόνο συσχέτιση με το E_{dyn} , χρησιμοποιούνται στις στατιστικές σχέσεις τα πάχη των στρώσεων ως δεδομένα, σα συμπλήρωμα του E_{dyn} , για την αναζήτηση ικανοποιητικών συσχετίσεων. Τα αποτελέσματα του εγχειρήματος περιγράφονται παρακάτω.

5.2 Αποτελέσματα στατιστικής επεξεργασίας

Για τα μέτρα ελαστικότητας των τριών κύριων στρώσεων του οδοστρώματος γνωρίζουμε ότι το E_1 (της ασφαλτικής στρώσης) είναι σχεδόν ασυσχέτιστο με το E_{dyn} ενώ τα E_2 και E_3 (της στρώσης ασύνδετου υλικού και έδρασης αντίστοιχα) εξαρτώνται σε αξιόλογο βαθμό από το E_{dyn} . Συνεπώς το E_1 μάλλον δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον ως προς την πιθανή προσέγγισή του από τα μεγέθη E_{dyn} , h_1 και h_2 . Έτσι η προσπάθεια εύρεσης ικανοποιητικής προσέγγισης επικεντρώθηκε στα E_2 , E_3 . Για τις δύο ελαστικές παραμέτρους έγινε προσθήκη των παχών των στρώσεων στα μοντέλα συσχετίσεώς τους με το E_{dyn} με την επιδίωξη να αυξηθεί αρκετά ο συντελεστής συσχέτισης.

Οι μαθηματικές εκφράσεις που αφορούν το E_2 δεν ήταν εφικτό να δώσουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Οι μορφές συναρτήσεων που δοκιμάστηκαν με συνδυασμούς των E_{dyn} , h_1 και h_2 έδωσαν συντελεστή

συσχέτισης μικρότερο από 0,50 που εκτιμήθηκε μη αποδεκτή τιμή για τη στατιστική εκτίμηση ενός μεγέθους.

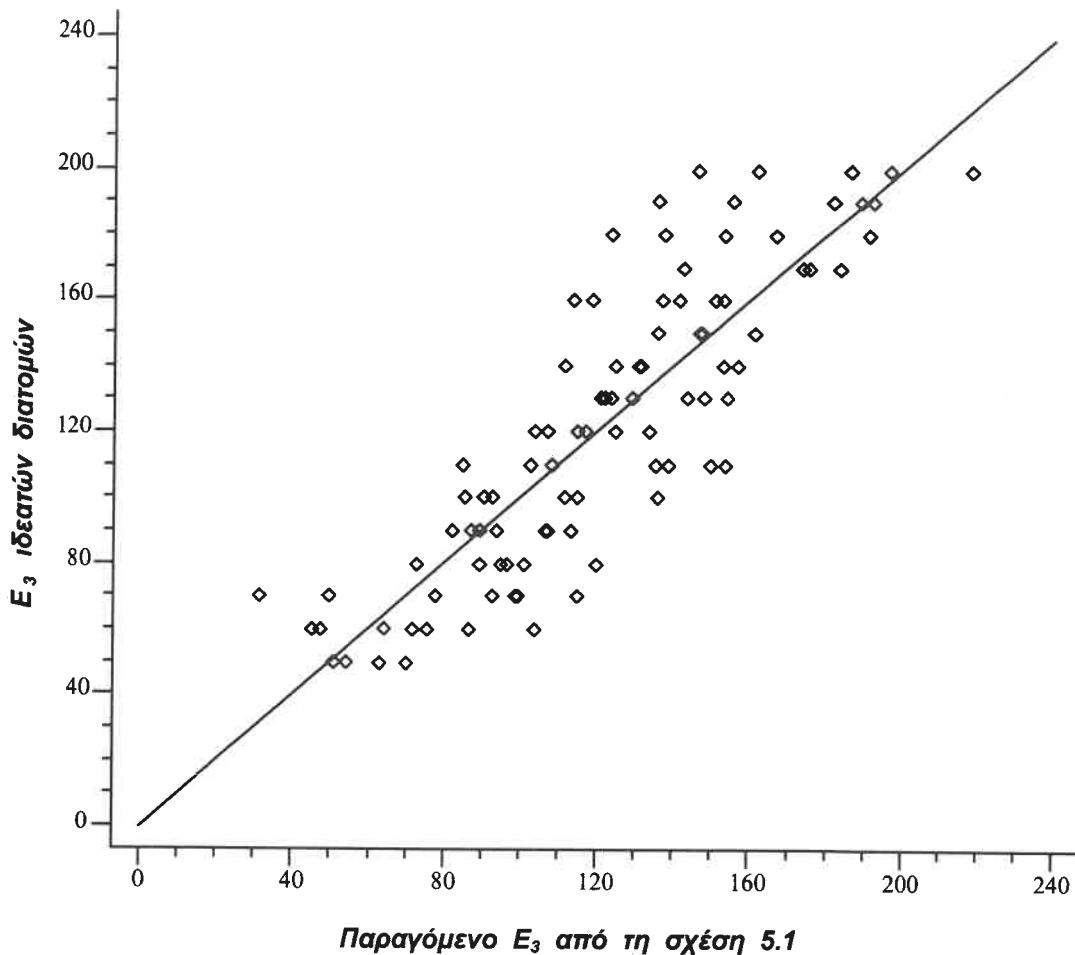
Αντίθετα για το E_3 φαίνεται να είναι δυνατή η προοπτική της προσέγγισής του μέσω σχέσεων που περιέχουν τα E_{dyn} , h_1 και h_2 . Μετά από πολλές δοκιμές προσεγγιστικών μοντέλων παρατηρήθηκε ότι η έκφραση που δίνει το βέλτιστο συνδυασμό συσχέτισης - απλής μορφής είναι μια πολυωνυμική σχέση (5.1). Ο συντελεστής r^2 είναι γι' αυτή ίσος με 0,7459 :

$$E_3 = - 438,749 + 23,0409 \cdot E_{dyn}^{0.31} + 3546,4 \cdot h_1^{-0.5} + 71,6749 \cdot (h_1/h_2) \quad \text{(Σχέση 5.1)}$$

Από τη διερεύνηση που έγινε προέκυψαν και σχέσεις με υψηλότερο συντελεστή συσχέτισης όπως η 5.2 με $r^2=0,7511$ αλλά θεωρήθηκαν αρκετά πολύπλοκες για να προταθούν λαμβάνοντας υπόψη ότι η διαφορά των συντελεστών είναι πάρα πολύ μικρή:

$$\ln(E_3) = - 3,02724 + 0,651821 \cdot \ln(E_{dyn}) + 31,7067 \cdot h_1^{-0.5} + 0,66452 \cdot (h_1/h_2) \quad \text{(Σχέση 5.2)}$$

Στο διάγραμμα 5.1 απεικονίζονται τα παραγόμενα από τη σχέση 5.1 E_3 και τα αντίστοιχα των ιδεατών διατομών.



Διάγραμμα 5.1 Προσαρμογή υπολογιστικού μοντέλου της στατιστικής προσέγγισης του E_3 από τα μεγέθη E_{dyn} , h_1 και h_2 μέσω πολλαπλής παλινδρόμησης

Τα συμπεράσματα που εξάγονται από την εικόνα του διαγράμματος είναι θετικά για την αξία της στατιστικής εκτίμησης του E_3 αν και βλέπουμε ότι η προσαρμογή των προσεγγίσεων δεν είναι ιδιαίτερα καλή.

5.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων για τη στατιστική προσέγγιση του E_3 μέσω E_{dyn} από τη σχέση 5.1

Η συσχέτιση που παρουσιάζει η στατιστική σχέση 5.1 με αυστηρά μαθηματικά κριτήρια δεν εκτιμάται πολύ καλή. Στην πραγματικότητα όμως μπορεί να αποδειχτεί πολύ χρήσιμη γιατί το φυσικό μέγεθος το οποίο προσεγγίζει συνοδεύεται από κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά.

Το E_3 είναι η ελαστική παράμετρος που αναφέρεται στη στρώση έδρασης δηλαδή στη στρώση του περισσότερο ίσως ανομοιομορφου και

ανισότροπου υλικού μιας διατομής οδοστρώματος. Οποιαδήποτε τιμή προσδιορίζουμε για το E_3 είναι η εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας για μια ευρύτερη περιοχή -γύρω από το σημείο που γίνονται οι απαραίτητες μετρήσεις- την οποία θεωρούμε ισότροπη και ομογενή. Δηλαδή κάνουμε -αναγκαίες βέβαια- παραδοχές που οδηγούν σε αποκλίσεις από την πραγματικότητα (κατά περίπτωση σημαντικές).

Ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης υφιστάμενου οδοστρώματος γίνεται με δύο βασικές κατηγορίες μεθόδων : καταστρεπτικές και μη καταστρεπτικές. Στην πρώτη περίπτωση γίνεται επιτόπου προσδιορισμός του CBR ή του E_3 με άνοιγμα τομών στο οδόστρωμα. Η μέθοδος αυτή μειονεκτεί κυρίως στο ότι απαιτεί σημαντικό χρόνο για την εκτέλεσή της. Τούτο, σε συνδυασμό με το σχετικά υψηλό κόστος και την ανάγκη ύπαρξης ειδικού εξοπλισμού δυσχεραίνουν την ευρεία εφαρμογή της μεθόδου με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται σχετικά σπάνια. Εναλλακτική δυνατότητα αποτελεί η δεικμή "αδιατάρακτου" δείγματος του υλικού στο εργαστήριο. Όμως η λήψη του συγκεκριμένου δείγματος δεν είναι καθόλου απλή και επιπλέον η διεθνής εμπειρία δεν έχει — τουλάχιστον μέχρι σήμερα - προσδιορίσει επακριβώς το βαθμό αξιοπιστίας της όλης διαδικασίας. Προς τούτο η παραπάνω διαδικασία έχει μειωμένη εφαρμογή σε σύγκριση με τις μη καταστρεπτικές μεθόδους.

Η δοκιμή του Falling Weight Deflectometer (η πιο διαδεδομένη από τις μη καταστρεπτικές μεθόδους) πλεονεκτεί σ' αυτά τα αρνητικά σημεία έναντι των καταστρεπτικών μεθόδων. Όμως και εδώ πιστεύεται ότι ο υπολογισμός του E_3 εμπεριέχει σημαντικά σφάλματα. Έχει βρεθεί ότι η τιμή του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης αντανακλάται περισσότερο στα αποτελέσματα των μετρήσεων των πιο απομακρυσμένων - από το σημείο καταπόνησης - γεωφώνων.[9] Συνεπώς το αποτέλεσμα που εξάγεται καθορίζεται κυρίως από τις δικές τους μετρήσεις. Δεδομένης της ανομοιομορφίας που πιθανώς αναπτύσσεται σε απόσταση 1,50 έως 1,80 με 2,40 m από το πείπτον βάρος υπάρχει ακόμα ένα αίτιο που μπορεί να προκαλέσει σφάλματα στην εκτίμηση του E_3 . Οι μέγιστες υποχωρήσεις D_5 και D_6 (σε απόσταση μεγαλύτερη των 1,50 μέτρων από το σημείο της κεντρικής υποχώρησης) λαμβάνουν πολύ μικρότερες τιμές από αυτές των

εγγύτερων στην περιοχή φόρτισης σημείων. Την μεγαλύτερη διαφορά έχουν φυσικά με την τιμή της D_0 (κεντρική υποχώρηση). Η ευαισθησία των γεωφώνων επομένως όπως και η ποιότητα της εγκατάστασής τους επηρεάζει πολύ περισσότερο τις D_5 και D_6 παρά την D_0 .

Οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται ανάμεσα στα αποτελέσματα των διαφόρων προγραμμάτων αναστροφής υπολογισμού [10] για τον προσδιορισμό του E_3 πιστοποιούν τις παραπάνω επισημάνσεις. Όπως θα δούμε παρακάτω σε ορισμένες περιπτώσεις οι τιμές που προκύπτουν εμφανίζουν πάρα πολύ μεγάλες διαφορές μεταξύ τους.

Η σχέση 5.1 με την οποία προσεγγίζεται το E_3 μάλλον υπερτερεί σαν τρόπος υπολογισμού από τις αναφερόμενες μεθόδους. Καταρχήν έχει την μικρότερη απαίτηση μετρήσεων δηλαδή είναι σα μέθοδος πολύ πιο γρήγορη και οικονομική. Όσον αφορά το σφάλμα υπολογισμού, εμφανίζει το πλεονέκτημα ότι βασίζεται μόνο στην κεντρική υποχώρηση D_0 του FWD δηλαδή στην υποχώρηση ακριβώς πάνω στον κατακόρυφο άξονα του σημείου γύρω από το οποίο προσδιορίζουμε το E_3 . Επίσης η μέτρηση της D_0 εμπεριέχει τα μικρότερα (κατ' απόλυτη τιμή σφάλματα από τις υπόλοιπες μετρήσεις των D_i λόγω τάξης μεγέθους.

Η ενεργοποίηση της σχέσης 5.1 σύμφωνα με τα παραπάνω μπορεί να δώσει μια ικανοποιητική προσέγγιση της τιμής του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης μιας υφιστάμενης κατασκευής με τρόπο απλό, γρήγορο και οικονομικό. Απομένει να εξεταστεί η αξιοπιστία της σχέσης με πραγματικά δεδομένα.

5.4 Εφαρμογή της σχέσης 5.1 για την εκτίμηση του E_3 σε πραγματικές συνθήκες

Η εξαγωγή της σχέσης 5.1 πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας τις τιμές της κεντρικής υποχώρησης από το πρόγραμμα BISAR και υπολογίζοντας με αυτήν το E_{dyn} . Στην πράξη η κεντρική υποχώρηση (D_0) λαμβάνεται από τις μετρήσεις της δοκιμής FWD. Για να εφαρμοστεί λοιπόν η σχέση σε πραγματικές συνθήκες αρκεί να υπολογιστεί το E_{dyn} από τον τύπο 2.1 με τη μετρημένη D_0 . Στη συνέχεια η τιμή που προκύπτει χρησιμοποιείται στον προσδιορισμό του E_3 από τη σχέση 5.1.

Με την παραπάνω διαδικασία υπολογίστηκε το E_{dyn} σε δεκαοκτώ υφιστάμενες διατομές οδοστρωμάτων στις οποίες έγιναν μετρήσεις με συσκευή FWD. Σ' αυτές τις διατομές γνωρίζουμε τα πάχη των διαφόρων στρώσεων τα οποία μετρήθηκαν επιτόπου. Επίσης, γνωρίζουμε και τις ελαστικές παραμέτρους των διατομών που εξήχθησαν από τρία διαφορετικά προγράμματα αναστροφής υπολογισμού (back-analysis) τα MODULUS, PADAL και MODCOMP2. Έτσι μπορούν να γίνουν και οι απαραίτητες συγκρίσεις ανάμεσα στα αποτελέσματα του αναστροφής και του εναλλακτικού υπολογισμού του E_3 .

Ο πίνακας 5.1 αναφέρεται στην εξαγωγή του E_3 μέσω του E_{dyn} και της σχέσης 5.1 ενώ ο πίνακας 5.2 συνοψίζει τα αποτελέσματα των δύο τρόπων προσδιορισμού του E_3 (για τα τρία προγράμματα "back-analysis" και για τη σχέση 5.1).

Πίνακας 5.1

Υπολογισμός του E_3 μέσω του E_{dyn} (σχέση 5.1)

Αριθμός διατομής	Εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης E_3 σε υφιστάμενες κατασκευές				
	D_0 (μm)	E_{dyn} (Mpa)	h_1 (mm)	h_2 (mm)	E_3 (Mpa)
1	266	3138	188	443	124
2	243	3760	188	540	138
3	242	3791	188	600	155
4	381	1529	160	670	66
5	289	2658	188	610	109
6	225	4385	188	560	146
7	144	10706	210	500	254
8	221	4545	195	475	187
9	357	1742	150	480	106
10	212	4939	150	490	202
11	340	1920	140	526	114
12	297	2517	145	562	126
13	325	2102	155	600	102
14	304	2402	170	565	113
15	345	1865	170	542	72
16	265	3161	215	505	116
17	289	2658	210	500	111
18	205	5283	190	500	174

D_0 : Μετρημένη κεντρική υποχώρηση του FWD
 E_{dyn} : ΔΜΕ υπολογισμένο από τον τύπο ##
 h_1, h_2 : Μετρημένα πάχη στρώσεων διατομής οδοστρώματος
 E_3 : Στατιστική προσέγγιση του μέτρου ελαστικότητας της
στρώσης έδρασης με τη σχέση
 $E_3 = 23,0409 \cdot E_{dyn}^{0,31} + 3546,4 \cdot h_1^{-0,5} + 71,6749 \cdot (h_1/h_2) - 438,749$

Πίνακας 5.2

Αποτελέσματα υπολογισμού του E_3 από τρία προγράμματα αναστρόφου υπολογισμού και από τη σχέση 5.1

 Αριθμός διατομής	Μέτρο Ελαστικότητας της στρώσης έδρασης E_3 (Mpa)				
	modcomp2	dyn	modulus	dyn	padal
1	172	124	162	124	237
2	179	138	181	138	255
3	150	155	278	155	192
4	23	66	23	66	340
5	90	109	199	109	507
6	87	146	92	146	785
7	213	254	225	254	639
8	186	187	397	187	529
9	108	106	118	106	215
10	141	202	240	202	757
11	130	114	156	114	270
12	172	126	230	126	424
13	122	102	134	102	296
14	179	113	249	113	320
15	186	72	200	72	280
16	191	116	159	116	188
17	91	111	97	111	338
18	132	174	168	174	477
modulus, padal, modcomp2: Μέτρο Ελαστικότητας της στρώσης έδρασης όπως προκύπτει από τα αντίστοιχα προγράμματα αναστρόφου υπολογισμού dyn: Μέτρο Ελαστικότητας της στρώσης έδρασης υπολογισμένο μέσω E_{dyn} (από πίν. 5.1)					

Με μια πρώτη παρατήρηση των στοιχείων του πίνακα 5.2 εξάγεται το άμεσο συμπέρασμα της ύπαρξης μεγάλων διαφοροποιήσεων ανάμεσα στα αποτελέσματα των προγραμμάτων αναστρόφου υπολογισμού. Σε καμμία σχεδόν διατομή οι τιμές του E_3 δε συμπίπτουν μέσα σε ένα “λογικό” κοινό διάστημα. Με δεδομένη την εικόνα που παρουσιάζεται είναι προφανές ότι δεν μπορεί να αξιολογηθεί σαφώς η “ποιότητα” της στατιστικής προσέγγισης του προκειμένου μεγέθους. Παρά την αδυναμία αυτή μπορούν να προκύψουν πολύ θετικά συμπεράσματα.

Από τα τρία προγράμματα, το PADAL εξάγει τιμές πολύ μεγάλες για να μπορούν να περιγράψουν τις πραγματικές συνθήκες. Οι τιμές που λαμβάνει συνήθως το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης στην πραγματικότητα (από την κατασκευαστική πείρα και γνώση που υπάρχει σήμερα) είναι μεταξύ 50 και 200 MPa. Βλέπουμε ότι μετά το PADAL, το πρόγραμμα που εμφανίζει τα περισσότερα αποτελέσματα (επτά) εκτός του προαναφερόμενου διαστήματος είναι το MODULUS. Το πρόγραμμα MODCOMP2 εξάγει τις λιγότερες “ασυνήθιστες” τιμές (μόνο δύο) ακριβώς όσες και η σχέση 5.1. Επίσης στις μισές περίπου διατομές η στατιστική εκτίμηση του E_3 μέσω του E_{dyn} δίνει - αρκετά έως πάρα πολύ - κοντινά αποτελέσματα με το MODCOMP2.

Δηλαδή από τη σχέση 5.1 προκύπτουν τιμές που βρίσκονται μέσα στη γενική πραγματικότητα. Επιπλέον η προσέγγιση που λαμβάνουμε συμφωνεί περισσότερο με το φαινομενικά πιο αξιόπιστο - τουλάχιστον όσον αφορά το E_3 - πρόγραμμα αναστρόφου υπολογισμού. Η διαπιστώσεις αυτές είναι πολύ ενδιαφέρουσες γιατί έχουμε τη δυνατότητα μιας σχετικά γρήγορης και απλής εκτίμησης του E_3 ενώ παράλληλα μπορούμε να τη χρησιμοποιήσουμε σαν τιμή εκκίνησης (starting modulus) σε λογισμικά αναστρόφου υπολογισμού. Σχολιάζοντας την τελευταία ιδέα επισημαίνεται ότι η “back-analysis” όταν δίνει αποτελέσματα για τις τιμές εκκίνησης (starting modulus) που εισάγουμε, αυτά διαφέρουν μεταξύ τους (αρκετές φορές σημαντικά). Ενδεχομένως, λοιπόν, να αποκτά η ενεργοποίηση της σχέσης 5.1 μεγάλη αξία, κυρίως για προγράμματα που εξάγουν πιο συχνά “παράξενα” αποτελέσματα για το E_3 .

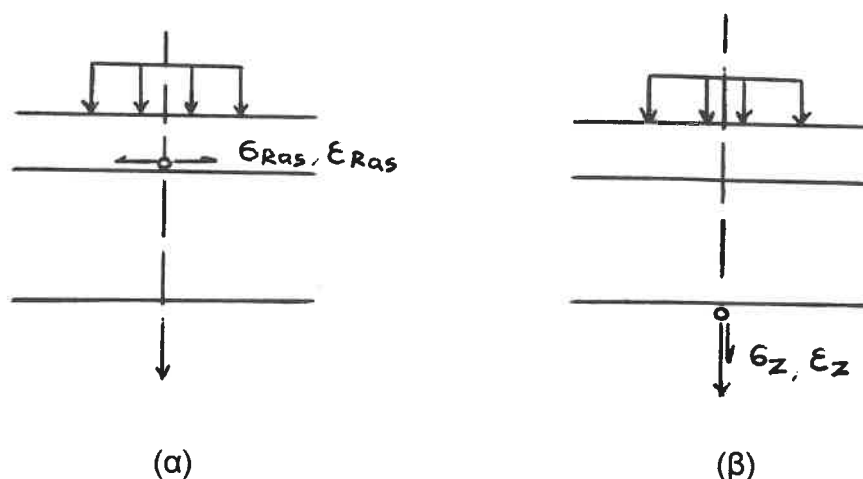
ΚΕΦΑΛΑΙΟ

6

6. Δυναμικό Μέτρο Ακαμψίας και συμπεριφορά οδοστρώματος

6.1 Γενικά

Σύμφωνα με τη διεθνή πρακτική η συμπεριφορά του οδοστρώματος απέναντι σε επιβαλλόμενη φόρτιση χαρακτηρίζεται από ορισμένα μεγέθη. Σε περίπτωση που θεωρούμε φόρτιση από ένα μοναδικό κυκλικό φορτίο στην επιφάνεια ομοιόμορφα κατανεμημένο, αυτά είναι τα εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη που αναπτύσσονται σε συγκεκριμένες, “κρίσιμες” θέσεις επί του κατακόρυφο άξονα συμμετρίας της φόρτισης. Οι “κρίσιμες” θέσεις μιας κατασκευής εύκαμπτου οδοστρώματος είναι ουσιαστικά δύο: το κατώτερο σημείο της ασφατικής στρώσης και το ανώτερο σημείο της στρώσης έδρασης [5].



Σχήμα 6.1

Στην πρώτη θέση (σχήμα 6.1α) τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν είναι η οριζόντια εφελκυστική ανηγμένη παραμόρφωση (ϵ_{Ras}) και η οριζόντια εφελκυστική τάση (σ_{Ras}). Στη δεύτερη θέση (σχήμα 6.1β) τα χαρακτηριστικά μεγέθη είναι η κατακόρυφη θλιπτική ανηγμένη παραμόρφωση (ϵ_z) και η κατακόρυφη θλιπτική ένταση (σ_z).

Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται η συσχέτιση του Δυναμικού Μέτρου Ακαμψίας (E_{dyn}) με τα παραπάνω μεγέθη και η δυνατότητα προσέγγισής τους μέσω αυτού. Η “ένα προς ένα” συσχέτιση του με κάθε μια από τις αναφερόμενες παραμέτρους (λογαριθμική, γραμμική κ.λ.π.) εκτιμήθηκε από διαγράμματα κανονικοποιημένων τιμών. Παρακάτω εμφανίζεται για κάθε μέγεθος ένα μόνο διάγραμμα, εκείνο που έχει την πιο καλή εικόνα. Στη συνέχεια για τις περιπτώσεις που παρατηρήθηκε η σαφέστερη θετική ένδειξη έγινε προσπάθεια να προσεγγιστεί το αντίστοιχο μέγεθος χρησιμοποιώντας ως δεδομένα εκτός απ’ το ΔΜΑ και τα πάχη των στρώσεων.

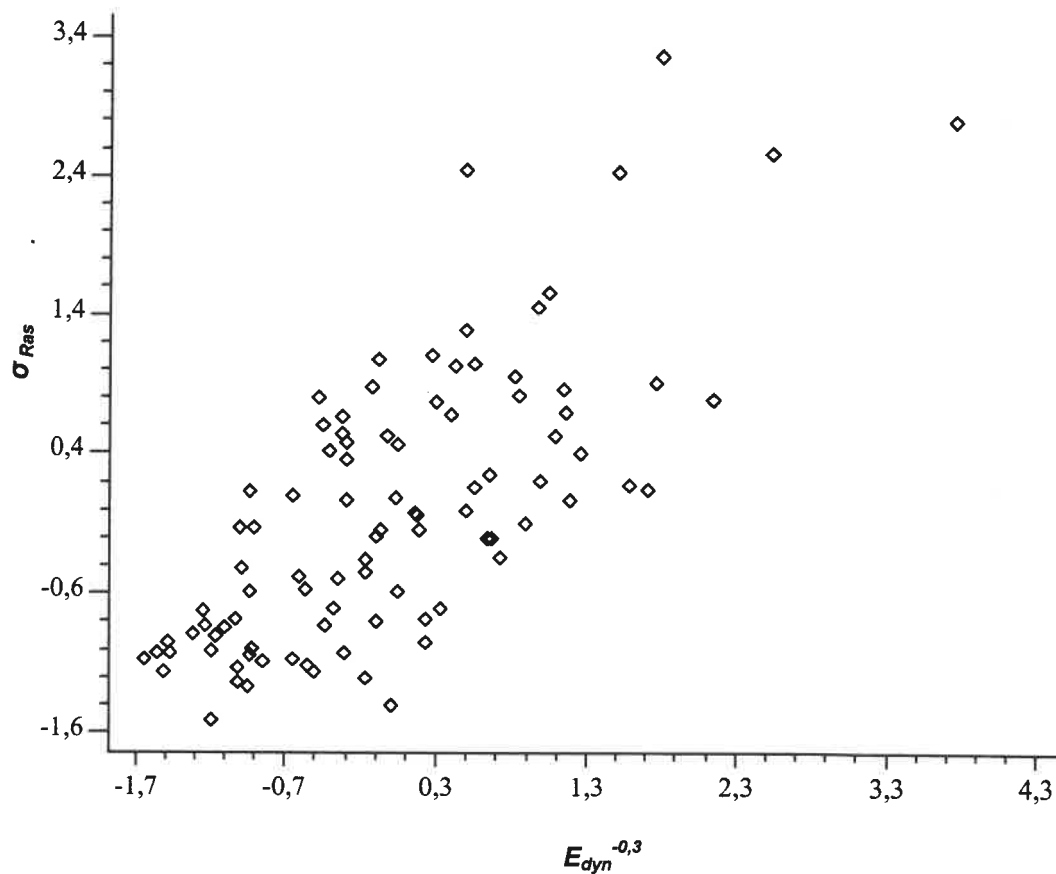
6.2 Διερεύνηση βαθμού εξάρτησης των σ_{Ras} , σ_{R_L} , σ_{Z_L} , ε_{Ras} , ε_Z από το E_{dyn}

Αναλυτικά, για την οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση σ_{Ras} στην πρώτη θέση “ελέγχου” παρατηρούμε ότι σχετίζεται με το ΔΜΑ όπως φαίνεται στο διάγραμμα 6.1. Η συσχέτιση φαίνεται ότι δεν κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα.

Πιο θετικές είναι οι εκτιμήσεις που αφορούν την ανηγμένη εφελκυστική παραμόρφωση ε_{Ras} στο ίδιο σημείο της κατασκευής. Από το διάγραμμα 6.2 εκτιμούμε ότι το ΔΜΑ παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της τιμής του ε_{Ras} .

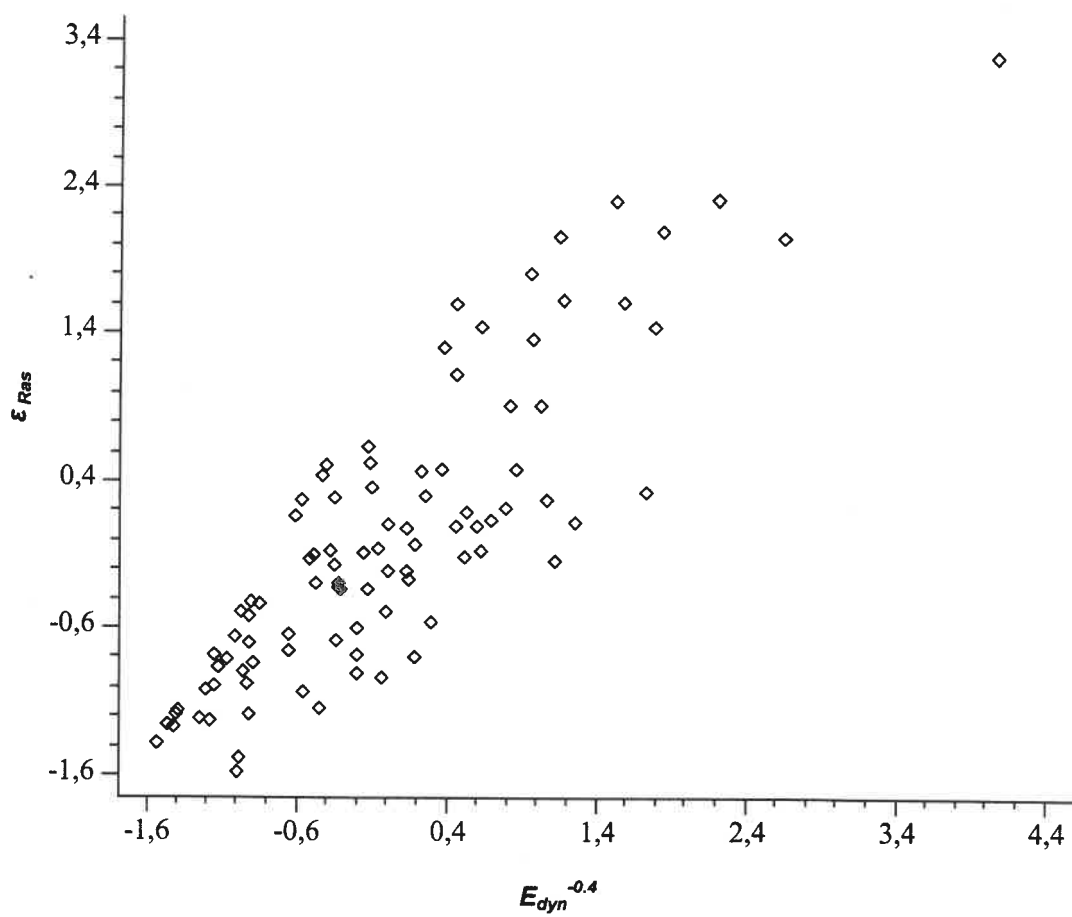
Το πρώτο μέγεθος που εξετάζεται στη δεύτερη “κρίσιμη” θέση (ανώτερο σημείο στρώσης έδρασης) είναι η κατακόρυφη θλιπτική τάση (σ_Z) στην ίδια θέση. Δοκιμάστηκαν πολλές μορφές μετασχηματισμών (εκθετικοί, λογαριθμικοί, κ.λ.π.) για να συσχετιστούν τα σ_Z και E_{dyn} . Μετά τις προσπάθειες που έγιναν εκτιμάται ασήμαντη η εξάρτηση του σ_Z από το ΔΜΑ (διάγραμμα 6.3).

Αντίθετα οι εκτιμήσεις είναι πολύ ενθαρρυντικές για την εξάρτηση της ανηγμένης θλιπτικής παραμόρφωσης (ε_Z) στο επίπεδο επαφής ασύνδετου υλικού - στρώσης έδρασης. Το σχετικό διάγραμμα (6.4) δείχνει ότι η τιμή του ε_Z σαφώς επηρεάζεται από το E_{dyn} .



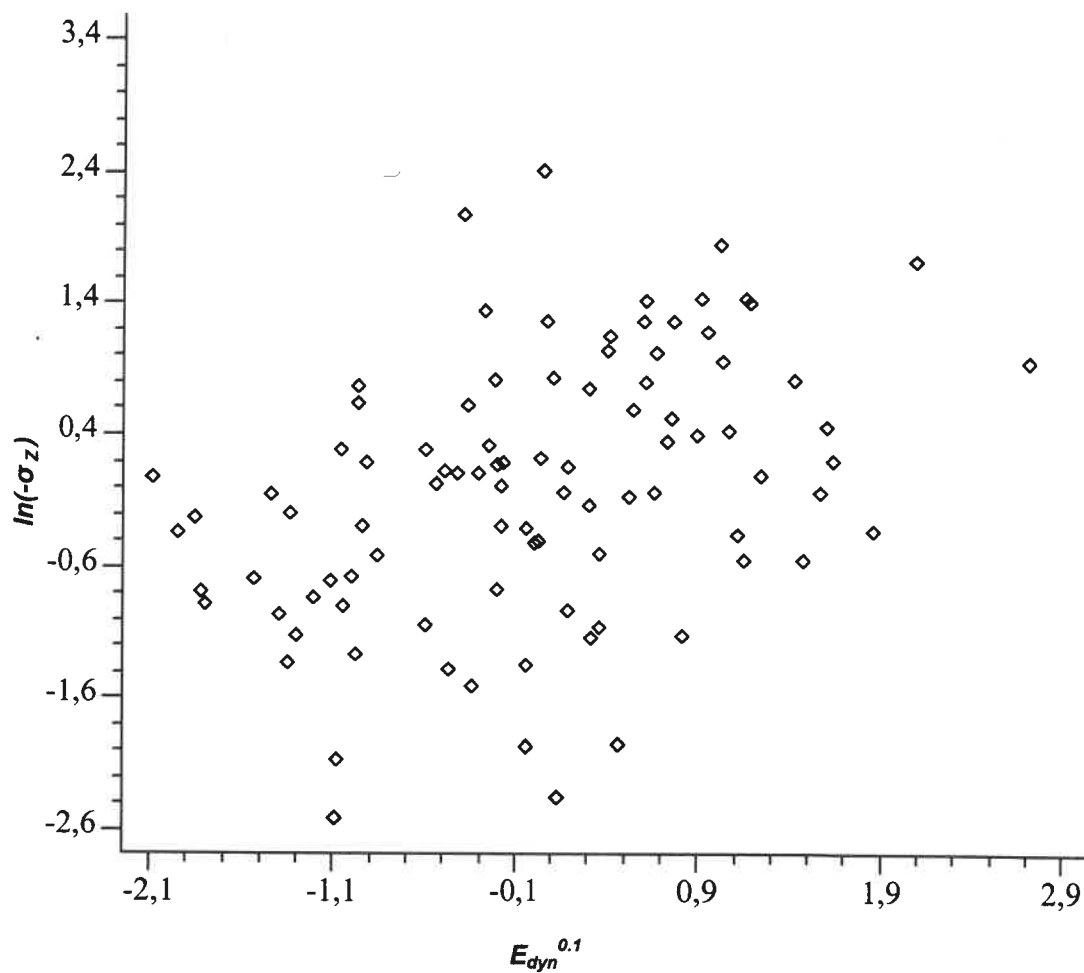
Διάγραμμα 6.1 Συσχέτιση κανονικοποιημένων τιμών των μεγεθών E_{dyn} και σ_{Ras} :

Η βέλτιστη εικόνα παρουσιάζεται μεταξύ σ_{Ras} και $E_{dyn}^{-0.3}$. Το σ_{Ras} δείχνει εξαρτημένο από το E_{dyn} αλλά όχι σε μεγάλο βαθμό.



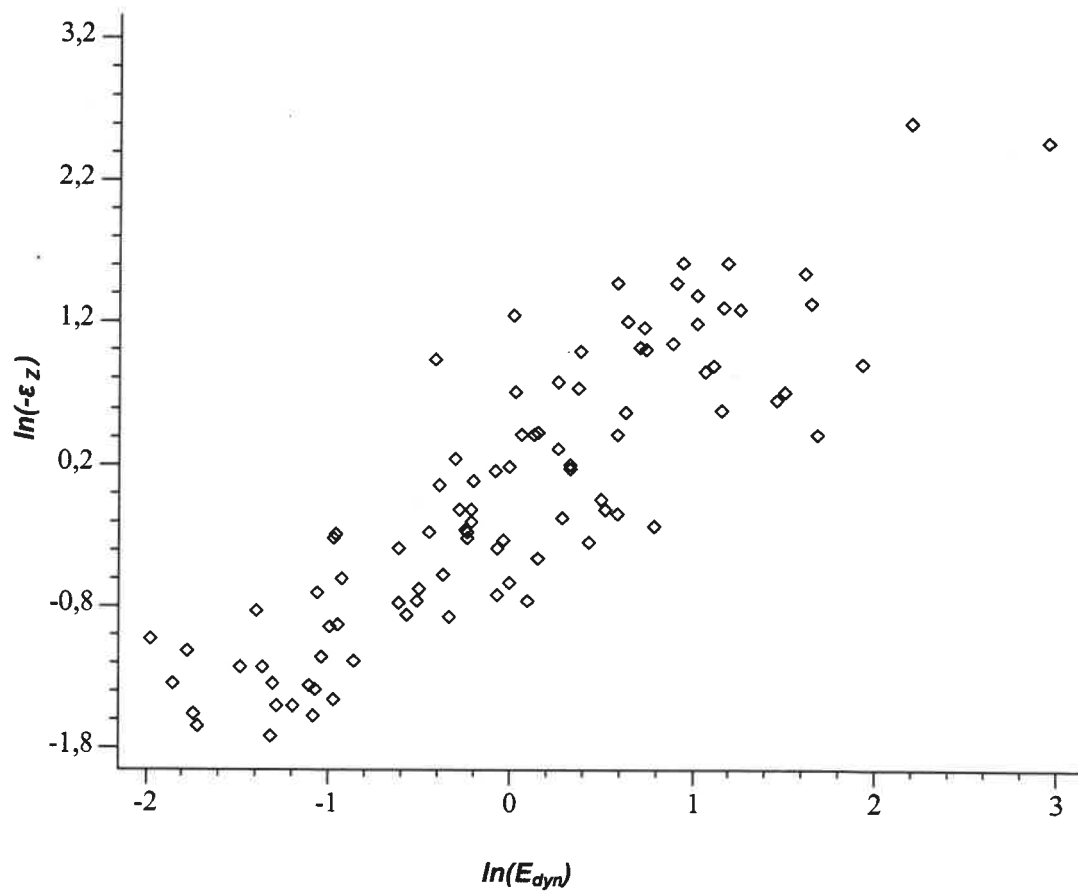
Διάγραμμα 6.2 Συσχέτιση κανονικοποιημένων τιμών των E_{dyn} και ϵ_{Ras} .

Οι θέσεις των σημείων στο διάγραμμα αποτελούν σαφή ένδειξη εξάρτισης του ϵ_{Ras} από το E_{dyn} .



Διάγραμμα 6.3 Συσχέτιση κανονικοποιημένων τιμών των E_{dyn} και σ_z .

Το διάγραμμα παρουσιάζει αρνητική εικόνα. Δεν παρουσιάζεται συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών.



Διάγραμμα 6.4 Συσχέτιση κανονικοποιημένων τιμών των E_{dyn} και ε_z :

Οι δύο μεταβλητές φαίνεται να συσχετίζονται σε σημαντικό βαθμό. Τα σημεία του διαγράμματος εμφανίζουν ομοιομορφία στη σχετική τοποθέτησή τους.

Έχοντας συνολική εικόνα της συσχέτισης των επιλεγμένων μεγεθών με το E_{dyn} παρατηρούμε ότι τα εντατικά μεγέθη δε δίνουν καλές ενδείξεις για το ενδεχόμενο ικανοποιητικής προσέγγισής τους αν και η τάση σ_{Ras} παρουσιάζει λιγότερο αρνητική εικόνα. Όμως οι παραμορφώσεις ε_z και ε_{Ras} συσχετίζονται με το E_{dyn} και κατά συνέπεια έχει νόημα να εμβαθύνουμε σε μια δεύτερη φάση στατιστικής διερεύνησης (αναζήτηση υπολογιστικών σχέσεων). Σε αυτή τη φάση τα πάχη των στρώσεων θεωρούνται δεδομένα γιατί όπως και το E_{dyn} μπορούν να μετρηθούν σχετικά εύκολα. Έτσι η στατιστική προσέγγιση των τάσεων και παραμορφώσεων αποκτά μεγάλη πρακτική σημασία.

6.3 Αναζήτηση σχέσεων προσέγγισης των σ_{Ras} , ε_{Ras} , ε_z μέσω E_{dyn} (με τη βοήθεια των h_1 , h_2).

Για την τάση σ_{Ras} διερευνήθηκε η δυνατότητα στατιστικής προσέγγισης με μια σχέση που να περιέχει το E_{dyn} και τα h_1 , h_2 . Ύστερα από διάφορες δοκιμές για τη μορφή των σχέσεων προέκυψε ότι το πάχος h_2 της ενοποιημένης στρώσεως ασύνδετου υλικού δε συνεισφέρει στην προσαρμογή των υπολογιστικών μοντέλων στις δεδομένες τιμές της σ_{Ras} . Η σχέση που δίνει τα πιο κοντινά αποτελέσματα αποτελεί συνάρτηση των E_{dyn} και h_2 είναι η παρακάτω:

$$\sigma_{Ras} = -0,199568 + 9,36777 \cdot E_{dyn}^{-0.3} + 52392,2 \cdot h_1^{-2.4} \quad \text{————— (Σχέση 6.1)}$$

Ο συντελεστής συσχέτισης για τη συγκεκριμένη έκφραση του σ_{Ras} είναι $r^2 = 68.80 \%$ δηλαδή η συγκεκριμένη προσέγγιση δεν κρίνεται ικανοποιητική (εκτιμάται ότι απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια για το συγκεκριμένο μέγεθος) πράγμα που απεικονίζεται και στο αντίστοιχο διάγραμμα (Διάγραμμα 6.5).

Η ανηγμένη εφελκυστική παραμόρφωση ε_{Ras} της ασφατικής στρώσης παρουσιάζει ομοιότητες με τη σ_{Ras} όσον αφορά τη συμπεριφορά του πάχους h_2 στα μοντέλα εξισώσεων που δοκιμάστηκαν για να προσεγγιστεί. Όμως η προσθήκη του h_1 σ' αυτά αρκεί για να δώσουν στην περίπτωση

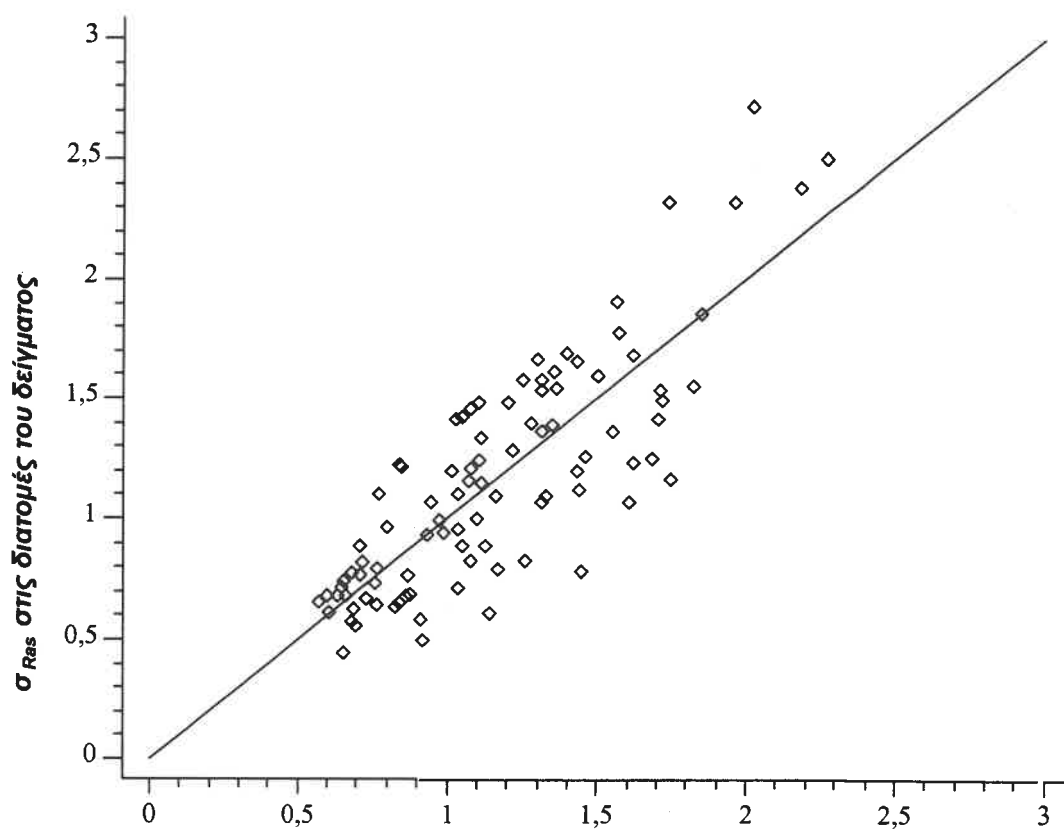
του ε_{Ras} μία πολύ καλή προσέγγισή του (διάγραμμα 6.6). Η τελική σχέση (6.2) μορφώθηκε ως εξής :

$$\ln(\varepsilon_{Ras}) = -9,29327 + 6,63526 \cdot E_{dyn}^{-0.2} - 0,0168117 \cdot h_1^{0.8} \quad \text{--- (Σχέση 6.2)}$$

Ο συντελεστής συσχέτισης εδώ είναι $r^2 = 86,41 \%$ που σημαίνει ότι η παραγόμενη ε_{Ras} από την παραπάνω σχέση εμφανίζει μικρές αποκλίσεις από την τιμή που αναπτύσσεται για την συγκεκριμένη φόρτιση που υποβάλλουμε στις ιδεατές διατομές.

Η στατιστική διερεύνηση αποδίδει τα καλύτερα αποτελέσματα για την ανηγμένη θλιπτική παραμόρφωση στην επιφάνεια επαφής ασύνδετου υλικού - στρώσης έδρασης (ε_z). Εδώ, το πάχος h_2 της ενοποιημένης στρώσης αμμοχάλικου επηρεάζει σημαντικά τις τιμές που λαμβάνει η ε_z . Το υπολογιστικό μοντέλο που προκύπτει δίνει εξαιρετικά ικανοποιητική προσέγγιση (διάγραμμα 6.7) με πολύ υψηλό συντελεστή συσχέτισης ($r^2 = 98,05 \%$). Η σχέση στην οποία καταλήγουμε για να εκτιμούμε την ε_z είναι :

$$\ln(-\varepsilon_z) = -1,77687 - 0,47107 \cdot \ln(E_{dyn}) - 0,0072252 \cdot h_1^{0.8} - 0,420771 \cdot h_2^{0.3} \quad \text{--- (Σχέση 6.3)}$$



Παραγόμενη σ_{Ras} από τη σχέση (6.1)

Διάγραμμα 6.5 Διάγραμμα συσχέτισης για τη στατιστική προσέγγιση του σ_{Ras} από τα μεγέθη E_{dyn} και h_1 μέσω πολλαπλής παλινδρόμησης:

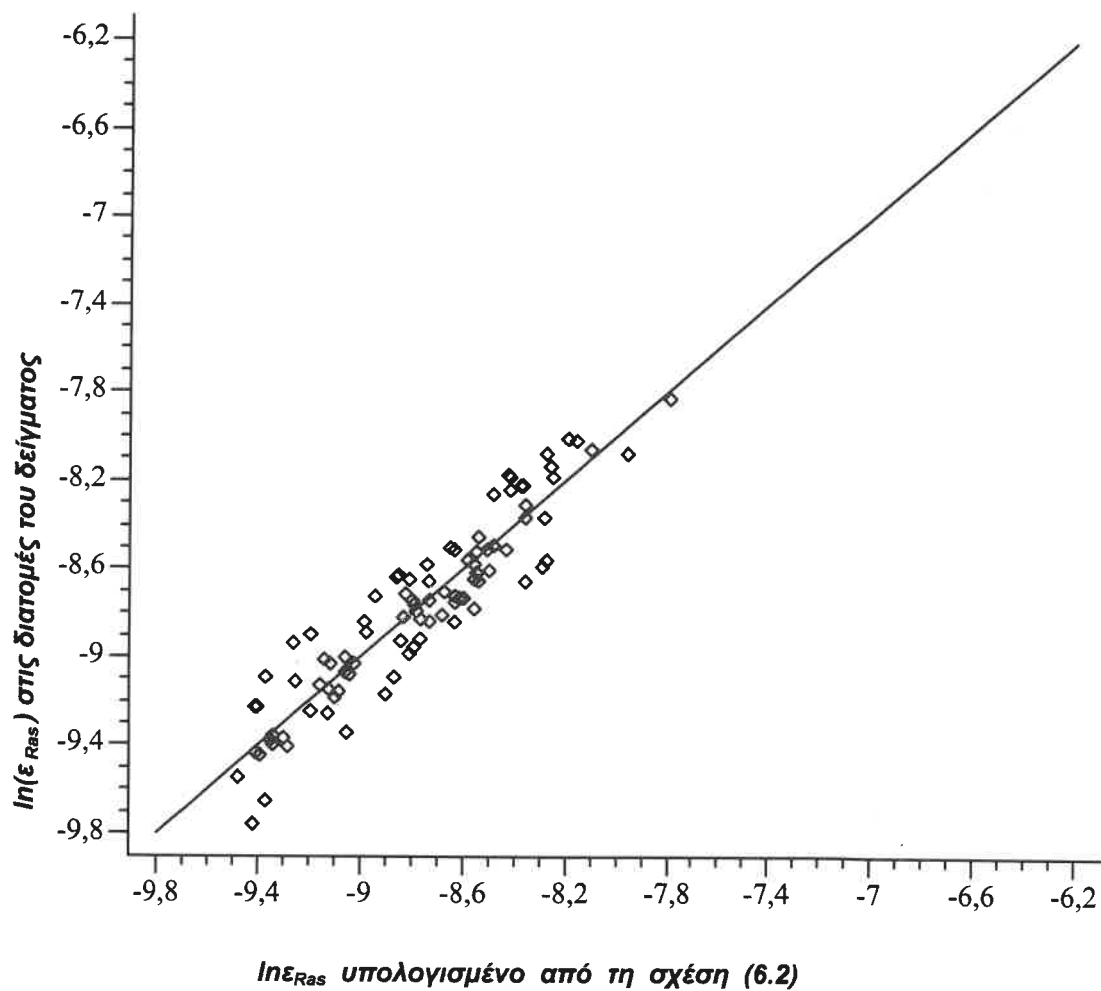
Οι αποκλίσεις του συγκεκριμένου μοντέλου είναι σημαντικές.

Σχέση προσέγγισης

$$\sigma_{Ras} = -0,199568 + 9,36777 \cdot E_{dyn}^{-0.3} + 52392,2 \cdot h_1^{-2.4}$$

Συντελεστής συσχέτισης

$$r^2 = 0,6880$$



Διάγραμμα 6.6 Διάγραμμα συσχέτισης για τη στατιστική προσέγγιση του ε_{Ras} από τα μεγέθη E_{dyn} και h_1 μέσω πολλαπλής παλινδρόμησης:

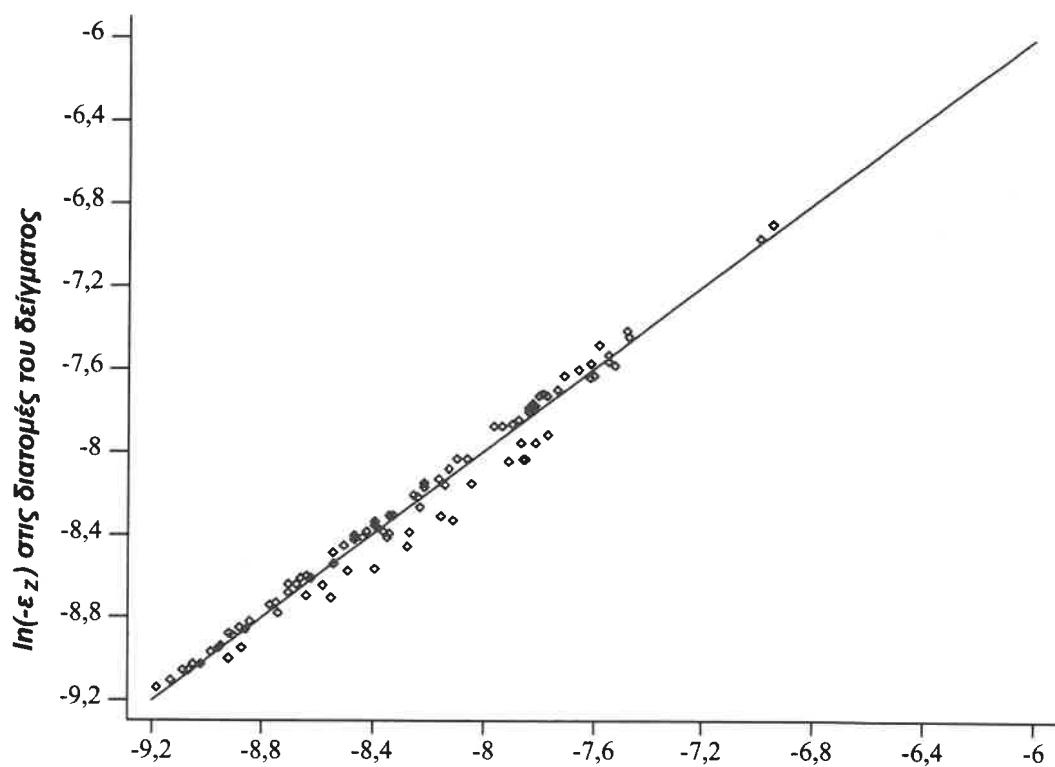
Το διάγραμμα δείχνει ότι οι αποκλίσεις μεταξύ των υφισταμένων τιμών και των παραγόμενων από τη σχέση (6.2) έχουν ικανοποιητική τάξη μεγέθους.

Σχέση προσέγγισης

$$\ln(\varepsilon_{Ras}) = -9,29327 + 6,63526 \cdot E_{dyn}^{-0,2} - 0,0168117 \cdot h_1^{0,8}$$

Συντελεστής συσχέτισης

$$r^2 = 0,8641$$



$\ln(-\varepsilon_z)$ υπολογισμένο από τη σχέση (6.3)

Διάγραμμα 6.7 Διάγραμμα συσχέτισης για τη στατιστική προσέγγιση του ε_z από τα μεγέθη E_{dyn} , h_1 και h_2 μέσω πολλαπλής παλινδρόμησης :

Η εικόνα που παρουσιάζεται αποδεικνύει την πολύ καλή προσαρμογή του υπολογιστικού μοντέλου (6.3) στις πραγματικές τιμές της παραμόρφωσης ε_z .

Σχέση προσέγγισης

$$\ln(-\varepsilon_z) = -1,77687 - 0,47107 \cdot \ln(E_{dyn}) - 0,0072252 \cdot h_1^{0.8} - 0,420771 \cdot h_2^{0.3}$$

Συντελεστής συσχέτισης

$$r^2 = 0,9805$$

Παρατηρούμε ότι έχουμε τελικά τη δυνατότητα να υπολογίσουμε δύο πολύ χαρακτηριστικά παραμορφωσιακά μεγέθη του οδοστρώματος μέσω του DMA - και με τη βοήθεια των παχών των στρώσεων - με πολύ καλή προσέγγιση. Πρέπει όμως να δούμε αν η εκτίμηση της τιμής των ε_z και ε_{Ras} από τις στατιστικές σχέσεις βρίσκει εφαρμογή σε πραγματικές διατομές.

6.4 Διαδικασία ελέγχου εφαρμοσιμότητας των στατιστικών εκτιμήσεων των ε_{Ras} , ε_z

Σ' αυτή την περίπτωση το E_{dyn} δεν υπολογίζεται από την υποχώρηση που δίνει το BISAR (εφόσον δε γνωρίζουμε τις παραμέτρους των διατομών) αλλά βάσει του τύπου 2.1 από τη μετρημένη κεντρική υποχώρηση της συσκευής FWD. Όπως προαναφέρθηκε τα πάχη των στρώσεων h_1 και h_2 υπολογίζονται με σχετικά εύκολη διαδικασία στις υφιστάμενες κατασκευές και θεωρούνται δεδομένα στις στατιστικές σχέσεις.

Η αξιοπιστία των σχέσεων 6.2 και 6.3 ελέγχθηκε ακολουθώντας την εξής διαδικασία :

α) Ελήφθησαν τα αποτελέσματα των μετρήσεων από δοκιμές FWD σε δεκαοκτώ διατομές υφιστάμενων οδοστρωμάτων - δηλαδή οι τιμές των μεγίστων υποχωρήσεων $D_0, D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6$ στα επτά εγκατεστημένα γεώφωνα της συσκευής. (Μετρήσεις δοκιμών FWD βλ. Παράρτημα)

β) Από τρία διαφορετικά προγράμματα ανάστροφου υπολογισμού (Modulus, Padal, Modcomp2) με δεδομένα τις μετρημένες υποχωρήσεις προέκυψαν οι τιμές των παραμέτρων των διατομών. Τα πάχη h_1, h_2 είναι ίδια για τα τρία προγράμματα ενώ διαφέρουν τα μέτρα ελαστικότητας. (Αποτελέσματα ανάστροφου υπολογισμού βλ. Παράρτημα)

γ) Από το πρόγραμμα BISAR και χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της "back - analysis" υπολογίστηκαν οι τιμές ε_{Ras} και ε_z των ανηγμένων παραμορφώσεων στις χαρακτηριστικές θέσεις που μας ενδιαφέρουν. Εξήχθησαν τρία διαφορετικά αποτελέσματα για κάθε διατομή δηλαδή ένα για κάθε πρόγραμμα.

δ) Υπολογίστηκε το Δυναμικό Μέτρο Ακαμψίας (E_{dyn}) μέσω του τύπου 2.1 λαμβάνοντας ως δεδομένη την κεντρική υποχώρηση από τις μετρήσεις FWD. (Υπολογισμός E_{dyn} από μετρήσεις βλ. Παράρτημα)

ε) Ενεργοποιήθηκαν οι σχέσεις 6.2 και 6.3 για την εκτίμηση των ϵ_{Ras} και ϵ_z αντίστοιχα θεωρώντας γνωστά τα πάχη των στρώσεων των διατομών.

στ) Συγκρίθηκαν οι εξαγόμενες από το BISAR τιμές με τις στατιστικές εκτιμήσεις.

Στους πίνακες 6.1 και 6.2 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τους δύο τρόπους υπολογισμού των ανηγμένων παραμορφώσεων.

Πίνακας 6.1

Ανηγμένη παραμόρφωση ϵ_{Ras} διατομών αναστρόφου υπολογισμού και στατιστική εκτίμησή της

Αριθμός διατομής	Ανηγμένη παραμόρφωση στο κατώτερο σημείο της ασφαλικής στρώσης ϵ_{ras} ($\times 10^4$)				
	modulus	dyn	padal	dyn	modcomp2
1	1,549	1,141	1,622	1,141	1,488
2	1,596	1,088	1,664	1,088	1,623
3	1,796	1,086	1,841	1,086	1,741
4	3,166	1,601	3,297	1,601	3,203
5	2,296	1,193	2,418	1,193	2,238
6	1,667	1,047	1,749	1,047	1,659
7	0,9076	0,772	0,9061	0,772	0,9268
8	1,635	1,004	1,515	1,004	1,642
9	2,568	1,617	2,703	1,617	2,663
10	1,897	1,222	2,003	1,222	1,753
11	2,747	1,651	2,97	1,651	2,779
12	2,558	1,491	2,679	1,491	2,545
13	2,435	1,493	2,571	1,493	2,508
14	2,419	1,336	2,602	1,336	2,417
15	2,864	1,437	2,978	1,437	2,846
16	1,4	1,004	1,47	1,004	1,274
17	1,982	1,076	2,122	1,076	2,074
18	1,484	0,991	1,533	0,991	1,477
modulus, padal, modcomp2: Ανηγμένη παραμόρφωση στις διατομές που προκύπτουν από τα αντίστοιχα προγράμματα, υπολογισμένη μέσω BISAR dyn: Ανηγμένη παραμόρφωση υπολογισμένη απ' τη σχέση 6.2					

Πίνακας 6.2

Ανηγγμένη παραμόρφωση ϵ_z διατομών αναστρόφου υπολογισμού και στατιστική εκτίμησή της

Αριθμός διατομής	Ανηγγμένη παραμόρφωση στο κατώτερο σημείο της ενοποιημένης στρώσης ασύνδετου υλικού ϵ_z ($\times 10^4$)				
	modulus	dyn	padal	dyn	modcomp2
1	-1,734	-1,727	-1,298	-1,727	-1,575
2	-1,389	-1,351	-1,124	-1,351	-1,405
3	-0,934	-1,231	-1,269	-1,231	-1,440
4	-4,026	-1,816	-0,876	-1,816	-3,952
5	-1,234	-1,434	-0,590	-1,434	-2,135
6	-2,057	-1,219	-0,370	-1,219	-2,118
7	-0,906	-0,841	-0,386	-0,841	-0,966
8	-0,721	-1,353	-0,592	-1,353	-1,529
9	-2,730	-2,313	-1,792	-2,313	-2,927
10	-1,531	-1,392	-0,621	-1,392	-2,005
11	-2,176	-2,094	-1,490	-2,094	-2,452
12	-1,475	-1,726	-0,922	-1,726	-1,810
13	-1,895	-1,740	-1,066	-1,740	-2,030
14	-1,238	-1,666	-1,072	-1,666	-1,615
15	-1,676	-1,944	-1,321	-1,944	-1,761
16	-1,366	-1,468	-1,229	-1,468	-1,025
17	-2,271	-1,622	-0,852	-1,622	-2,429
18	-1,447	-1,221	-0,609	-1,221	-1,737
modulus, padal, modcomp2: Ανηγγμένη παραμόρφωση στις διατομές που προκύπτουν από τα αντίστοιχα προγράμματα, υπολογισμένη μέσω BISAR dyn: Ανηγγμένη παραμόρφωση υπολογισμένη απ' τη σχέση 6.3					

6.5 Παρατηρήσεις για τη χρησιμότητα των στατιστικών εκτιμήσεων των ε_{Ras} , ε_Z στην πράξη

Εκ πρώτης όψεως τα συμπεράσματα για την πρακτική σημασία των στατιστικών εκτιμήσεων των ε_{Ras} , ε_Z μέσω των σχέσεων 6.2 και 6.3 είναι αρνητικά. Αυτό αποτελεί λανθασμένη εκτίμηση, τουλάχιστον στην περίπτωση της ε_{Ras} .

Αν συγκρίνουμε τα αποτελέσματα του πίνακα 6.1 για την ανηγμένη παραμόρφωση ε_{Ras} διαπιστώνουμε ότι διαφέρουν σε σημαντικό βαθμό. Όμως οι τιμές που προκύπτουν από τα προγράμματα παρουσιάζουν μεγάλη λογαριθμική (και γραμμική) συσχέτιση με την τιμή της στατιστικής προσέγγισης (συντελεστής συσχέτισης πάνω από 86 % και για τα τρία προγράμματα). Μπορούμε λοιπόν να προσεγγίσουμε ικανοποιητικά την τιμή του ε_{Ras} παρακάμπτοντας τη διαδικασία αναστρόφου υπολογισμού, χρησιμοποιώντας μόνο τη μετρημένη κεντρική υποχώρηση της δοκιμής FWD.

Στα διαγράμματα 6.9, 6.10 και 6.11 απεικονίζεται η ε_{Ras} που αναπτύσσεται στις διατομές που εξάγονται απ' τις τρεις περιπτώσεις back-analysis και η προσέγγισή της με την $\varepsilon_{Ras-dyn}$ (ε_{Ras} μέσω E_{dyn}). Η προσέγγιση αυτή γίνεται ως εξής:

- Για το πρόγραμμα "MODULUS":

$$\ln(\varepsilon_{Ras}) = 4,12832 + 1,40426 \cdot \ln(\varepsilon_{Ras-dyn}) \quad (\text{Σχέση 6.4})$$

$$r^2 = 88,54 \% \quad (\text{Διάγραμμα 6.8})$$

- Για το πρόγραμμα "PADAL":

$$\ln(\varepsilon_{Ras}) = 4,88445 + 1,48374 \cdot \ln(\varepsilon_{Ras-dyn}) \quad (\text{Σχέση 6.5})$$

$$r^2 = 89,28 \% \quad (\text{Διάγραμμα 6.9})$$

- Για το πρόγραμμα "MODCOMP2":

$$\ln(\varepsilon_{Ras}) = 4,46280 + 1,44206 \cdot \ln(\varepsilon_{Ras-dyn}) \quad (\text{Σχέση 6.6})$$

$$r^2 = 87,35 \% \quad (\text{Διάγραμμα 6.10})$$

Σημειώνεται ότι η ϵ_{Ras} της back-analysis μπορεί να εκτιμηθεί σχεδόν εξίσου καλά και με πιο απλές γραμμικές σχέσεις:

- Για το πρόγραμμα "MODULUS" :

$$\epsilon_{Ras} = -6,37267 \cdot 10^{-5} + 2,17403 \cdot (\epsilon_{Ras-dyn}) \quad (\text{Σχέση 6.7})$$

$$r^2 = 87,01 \%$$

- Για το πρόγραμμα "PADAL" :

$$\epsilon_{Ras} = -7,97938 \cdot 10^{-5} + 2,37801 \cdot (\epsilon_{Ras-dyn}) \quad (\text{Σχέση 6.8})$$

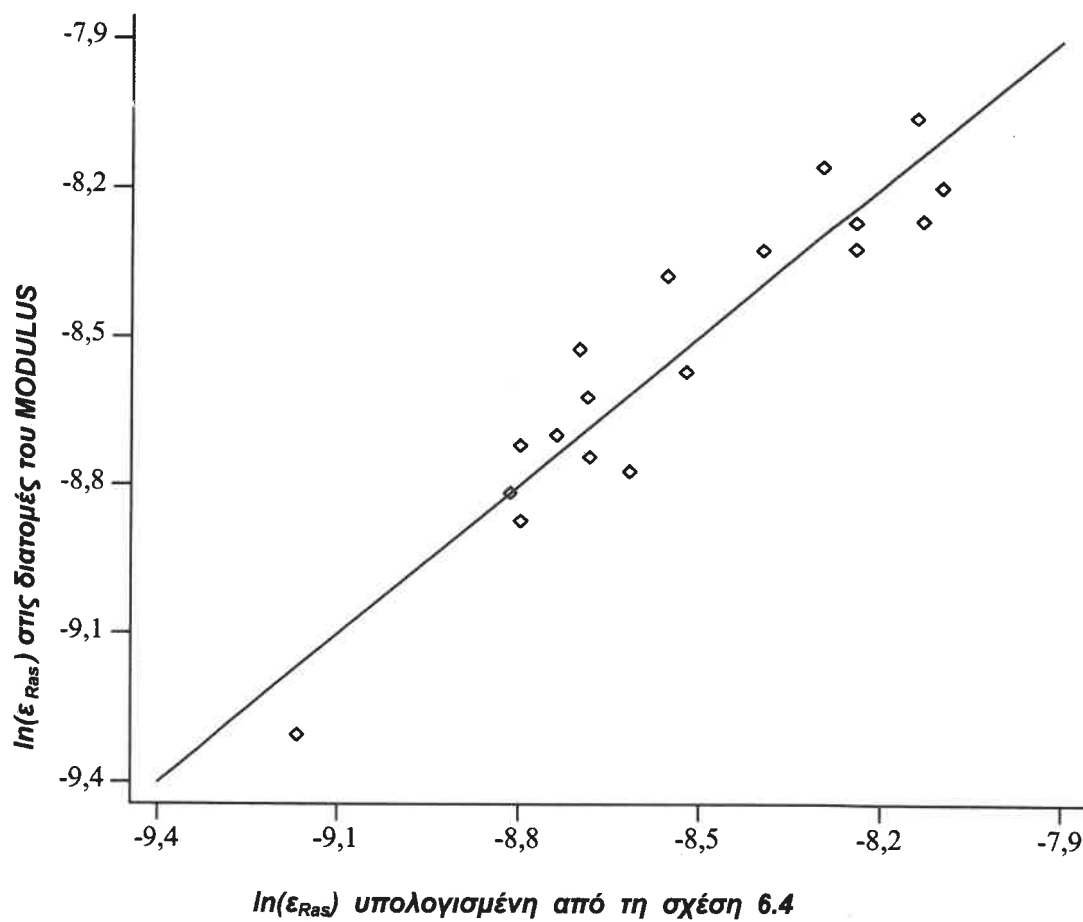
$$r^2 = 88,12 \%$$

- Για το πρόγραμμα "MODCOMP2" :

$$\epsilon_{Ras} = -7,48812 \cdot 10^{-5} + 2,25921 \cdot (\epsilon_{Ras-dyn}) \quad (\text{Σχέση 6.7})$$

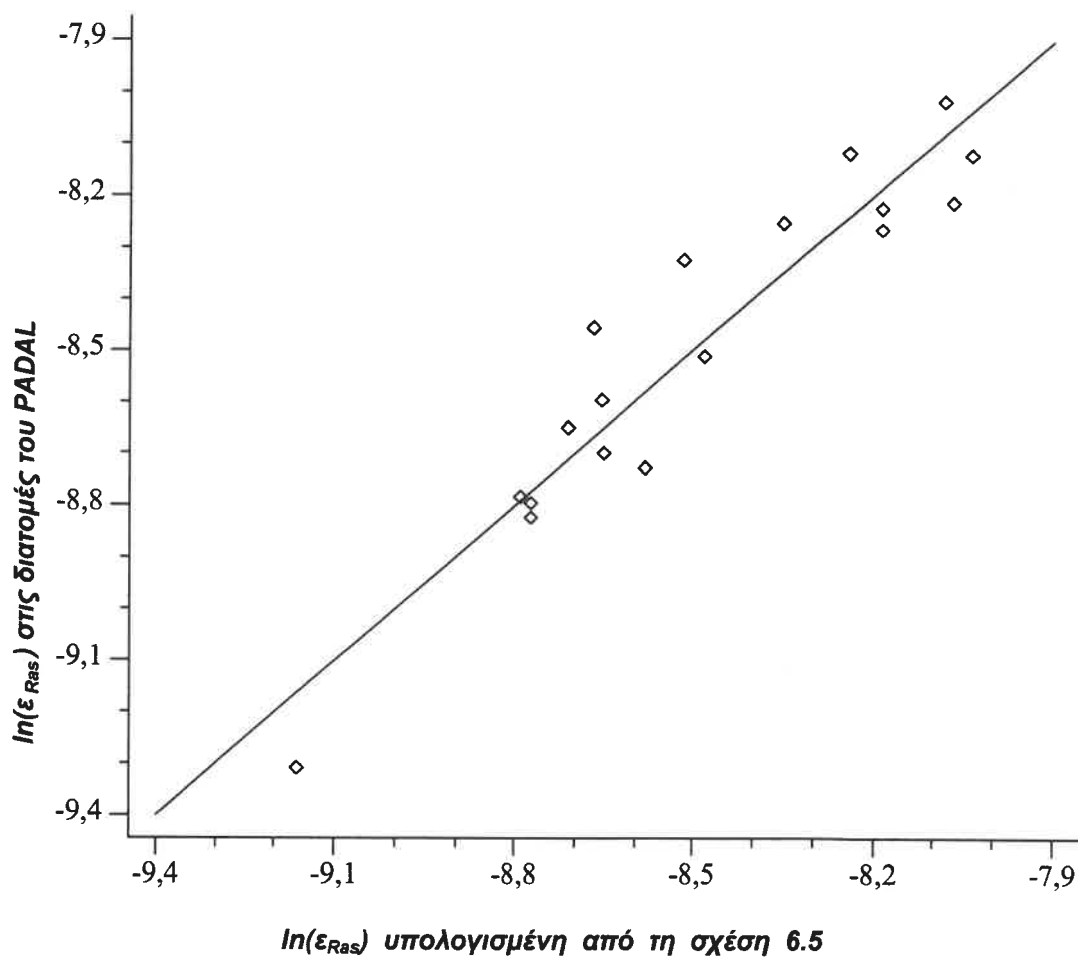
$$r^2 = 86,81 \%$$

Υπενθυμίζεται ότι οι παραπάνω σχέσεις (όπως και όλες οι υπόλοιπες που αντιστοιχούν σε εντατικά ή παραμορφωσιακά μεγέθη) αναφέρονται στον υπολογισμό της ϵ_{Ras} που προκύπτει για συγκεκριμένη φόρτιση. Για να επιτευχθεί προσέγγιση για διαφορετική φόρτιση πρέπει να επαναληφθεί συνολικά η προηγούμενη διαδικασία για την εξαγωγή κατάλληλης σχέσης.



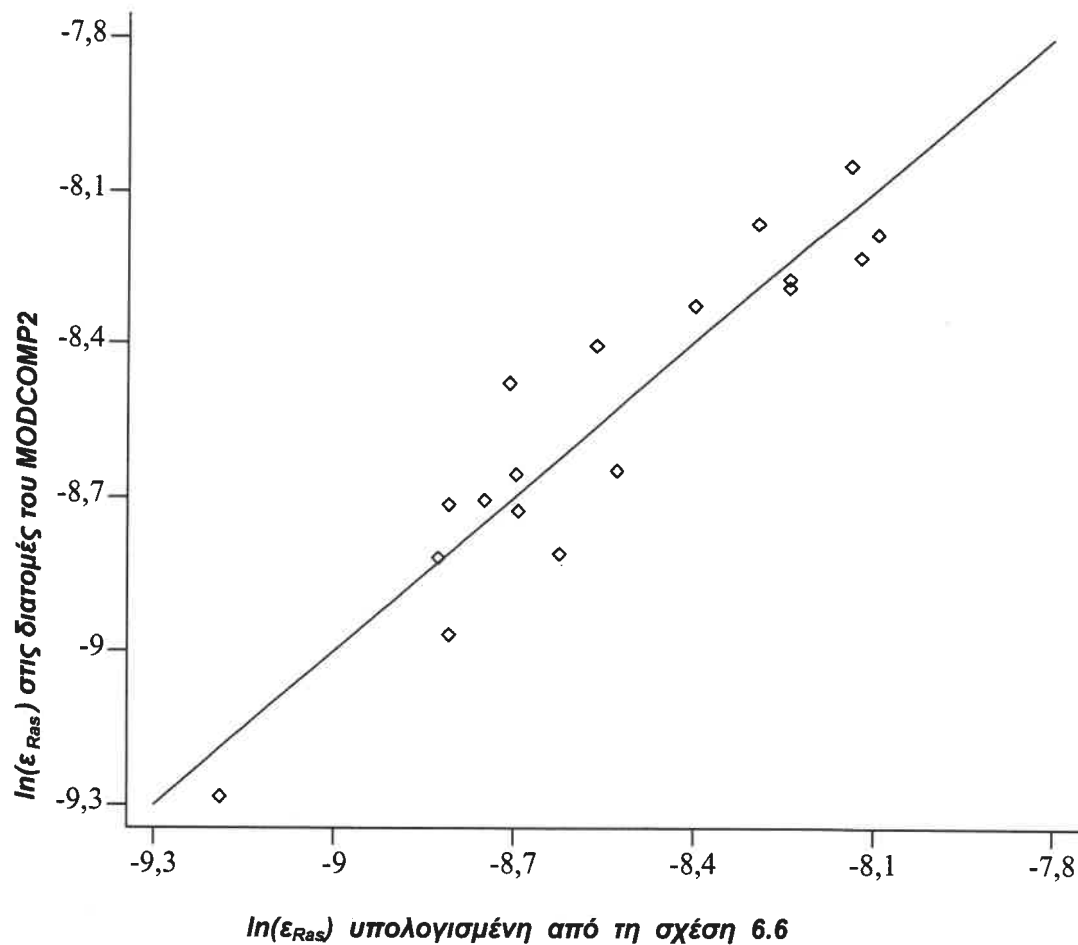
Διάγραμμα 6.8 Προσέγγιση της ε_{Ras} σε πραγματικές διατομές (υπολογισμένες με MODULUS)

Στο διάγραμμα παρατηρούνται μικρές αποκλίσεις στην εκτίμηση των πραγματικών τιμών της ε_{Ras} . Η προσέγγιση κυμαίνεται σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα. Συντελεστής συσχέτισης $r^2 = 0,8854$



Διάγραμμα 6.9 Προσέγγιση της ε_{Ras} σε πραγματικές διατομές (υπολογισμένες με PADAL)

Στο διάγραμμα παρατηρούνται μικρές αποκλίσεις στην εκτίμηση των πραγματικών τιμών της ε_{Ras} . Η προσέγγιση κυμαίνεται σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα. Συντελεστής συσχέτισης $r^2 = 0,8928$



Διάγραμμα 6.10 Προσέγγιση της ϵ_{Ras} σε πραγματικές διατομές (υπολογισμένες με MODCOMP2)

Στο διάγραμμα παρατηρούνται μικρές αποκλίσεις στην εκτίμηση των πραγματικών τιμών της ϵ_{Ras} . Η προσέγγιση κυμαίνεται σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα. Συντελεστής συσχέτισης $r^2 = 0,8735$

Όπως συμβαίνει με τη σχέση 6.2 και την ε_{Ras} , η σχέση 6.3 εξάγει τιμές της ε_z που διαφέρουν κατά πολύ από τις τιμές που αυτή λαμβάνει στις διατομές της “back-analysis”. Δε δίνει επίσης αποτελέσματα που μπορούν να μετασχηματιστούν με απλό τρόπο ώστε να πλησιάσουν αυτά των τριών προγραμμάτων. Η διαπίστωση αυτή έρχεται σε αντίφαση με την άριστη συσχέτιση που παρουσιάζει η ε_z -dyn με την ε_z που υπολογίζουμε στις διατομές του στατιστικού μας δείγματος. Για την αδυναμία της 6.3 να εφαρμοστεί στην πράξη μπορούν να βρεθούν σοβαρές αιτιολογήσεις.

Καταρχήν στις διατομές του στατιστικού δείγματος γνωρίζουμε επακριβώς τις τιμές των ελαστικών παραμέτρων ενώ στις υφιστάμενες κατασκευές προσδιορίζονται με διαδικασίες αναστροφής υπολογισμού. Εκεί υπεισέρχονται σφάλματα που οφείλονται στις μετρήσεις της συσκευής FWD (εγκατάσταση γεωφώνων, ευαισθησία καταγραφής, ανομοιομορφίες των διατομών κατά μήκος των 1,80 m που μετρούνται οι υποχωρήσεις, κ.ά.) ενδεχομένως και στη στατική προσομοίωση της φόρτισης. Οι παραπάνω εκτιμήσεις πιστοποιούνται με τη διαφορά στα αποτελέσματα που παρουσιάζουν μεταξύ τους τα διάφορα λογισμικά.

Η πιο πιθανή όμως εξήγηση για την ανακολουθία στατιστικής διερεύνησης - ελέγχου εφαρμοσιμότητας σχέσεων στην περίπτωση του ε_z προέρχεται απ’ την φόρτιση που εισάγουμε στο BISAR ως αντίστοιχη της καταπονήσεως του οδοστρώματος κατά τη δοκιμή FWD. Στο BISAR θεωρούμε φόρτιση ομοιόμορφα κατανεμημένη σε κυκλική επιφάνεια ακτίνας 150 mm, που προέρχεται από συνολικό βάρος 50 KN. Στη δοκιμή FWD οι συνθήκες φόρτισης στις δεκαοκτώ διατομές που εξετάζουμε είναι ίδιες με το BISAR όσον αφορά το βάρος, την ακτίνα και την ομοιομορφία. Εδώ όμως το βάρος πέφτει από ύψος 50 cm και προσκρούει στο έδαφος ενώ στο BISAR είναι στατικό. Η διαφορά αυτή επιδρά στον υπολογισμό του ε_{dyn} από τη σχέση 2.1. Στις ιδεατές διατομές και τη στατιστική διερεύνηση η υποχώρηση που χρησιμοποιείται στη σχέση προέρχεται απ’ τη στατική φόρτιση. Στις δεκαοκτώ διατομές που γίνεται ο έλεγχος εφαρμοσιμότητας η υποχώρηση λαμβάνεται απ’ τις μετρήσεις FWD δηλαδή προέρχεται από δυναμική φόρτιση. Επομένως η σχέση 6.3 για τον υπολογισμό του ε_z μέσω ΔΜΑ θα δώσει μη αναμενόμενα αποτελέσματα.

Οι δύο παραπάνω αιτιολογήσεις είναι αρκετές για να εξηγήσουν όχι μόνο τις μεγάλες αποκλίσεις που εμφανίζονται στην προσέγγιση του ϵ_Z αλλά και την ανάγκη μετασχηματισμού της στατιστικής εκτίμησης της ϵ_{Ras} ώστε να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Παρόλ' αυτά καταλαβαίνουμε ότι το ΔΜΑ σχετίζεται άμεσα με τη συμπεριφορά του καταπονούμενου οδοστρώματος και θα πρέπει να βρεθούν οι ποσοτικές εκφράσεις που συμπληρώνουν τη συνολικά θετική εικόνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

7

7. Συμπληρωματικά στοιχεία για το Δυναμικό Μέτρο Ακαμψίας και την αξιολόγηση των οδοστρωμάτων

7.1 Γενικά

Μέσα στη διαδικασία της διερεύνησης της φύσης του ΔΜΑ και των δυνατοτήτων χρησιμοποίησης του σε διάφορα προβλήματα βρέθηκαν ορισμένα ενδιαφέροντα στοιχεία τα οποία δεν αναφέρονται στις πιο πάνω ενότητες (κυρίως για λόγους περιεχομένου). Τα στοιχεία αυτά προέκυψαν ουσιαστικά από προσπάθειες εισαγωγής του E_{dyn} σε κάποιες ενδιαφέρουσες μεθόδους αξιολόγησης [11] των υφισταμένων οδοστρωμάτων.

Για την παρούσα διερεύνηση, το ενδιαφέρον αυτών των μεθόδων έγκειται στο ότι περιέχουν έννοιες που θα μπορούσαν να συνδυαστούν με τον υπολογισμό του ΔΜΑ. Παρακάτω γίνεται η σύντομη περιγραφή μιας τέτοιας μεθόδου [9] η οποία εισάγει έναν ορισμό του ενοποιημένου μέτρου ελαστικότητας υπερκείμενης κατασκευής οδοστρώματος E_p καθώς και το συντελεστή καμπυλότητας επιφάνειας SCI. Η απόπειρα σύνδεσης του E_{dyn} με τη συγκεκριμένη εργασία αφορά κυρίως την ανεύρεση στατιστικών συσχετίσεων του με τα μεγέθη αυτά.

Ανεξαρτήτως τελικού αποτελέσματος, από το εγχείρημα αυτό λαμβάνονται χρήσιμες πληροφορίες για τη φυσική σημασία του E_{dyn} και για τις προοπτικές χρησιμοποίησής του σε ανάλογες μεθόδους ή ακόμα και καθορισμού τρόπων αξιολόγησης που βασίζονται σ' αυτό.

7.2 Παράδειγμα μεθόδου αξιολόγησης υφισταμένων οδοστρωμάτων που μπορεί να σχετιστεί με δυναμική ανάλυση (συνοπτική περιγραφή)

Στη μεθοδολογία που περιγράφεται, η τελική κρίση γίνεται βάσει ενός συντελεστή κατασκευής SI (Structural Index) [9]. Ο συντελεστής SI είναι η απομένουσα “ζωή” (διελεύσεις) του οδοστρώματος εκφρασμένη σαν το ποσοστό της απομένουσας “ζωής” του θεωρητικά άρτιου οδοστρώματος. Η τιμή του SI υπολογίζεται μέσω του συντελεστή SCI (Surface Curvature

Index) που είναι η διαφορά των υποχωρήσεων D_0 και D_1 της δοκιμής FWD (μέγιστη υποχώρηση σε 0,00 και 0,30 μέτρα απόσταση αντίστοιχα).

Η σχέση υπολογισμού του SI που θα χρησιμοποιηθεί καθορίζεται από την κατηγορία ποιότητας που ανήκει η στρώση έδρασης και την αντίστοιχη κατηγορία ποιότητας της υπερκείμενης κατασκευής. Οι κατηγορίες αυτές είναι:

-Για τη στρώση έδρασης:

Ασθενές έδαφος $D_6 \geq 105$ (μm)

Μέσο έδαφος $55 < D_6 < 105$

Ισχυρό έδαφος $D_6 \leq 55$

-Για την υπερκείμενη κατασκευή:

Ασθενής κατασκευή $SCI \geq 750$ (μm)

Μέση κατασκευή $350 < SCI < 750$

Ισχυρή κατασκευή $SCI \leq 350$

Ο καθορισμός των παραπάνω κατηγοριών έγινε με τα εξής βήματα:

-Μετρήσεις FWD με διάφορα φορτία γύρω στα 75 KN (και θερμοκρασία περιβάλλοντος) σε υφιστάμενες κατασκευές οδοστρωμάτων.

-Αναγωγή των αποτελεσμάτων των μετρήσεων σε φορτίο 75 KN και σε θερμοκρασία 30 °C.

-Ανάστροφος υπολογισμός των ελαστικών παραμέτρων των διατομών.

-Υπολογισμός του ενοποιημένου μέτρου ελαστικότητας E_p για θερμοκρασία ασφάλτου 30°C. Χρησιμοποιήθηκε ο τύπος

$$E_p = \left(\frac{\sqrt[3]{E_1 \cdot h_1} + \sqrt[3]{E_2 \cdot h_2}}{h_1 + h_2} \right)^3 \quad (\text{Σχέση 7.1})$$

όπου E_1 , E_2 , h_1 , h_2 τα μέτρα ελαστικότητας και τα πάχη των δύο ανώτερων στρώσεων (ασφαλτόμιγμα και ασύνδετο υλικό, ενοποιημένα)

-Εμπειρική κατάταξη ποιότητας στρώσης έδρασης βάσει E_3 . Τρεις κατηγορίες ποιότητας:

Ασθενής $E_3 \leq 65$ (Mpa)

Μέση $65 < E_3 < 120$

Ισχυρή $E_3 \geq 120$

-Συσχέτιση του E_3 με το D_6 ($D_6 = 8,588 \cdot 10^3 \cdot E_3^{-1,055}$, $r^2 = 0,961$). Καθορισμός τριων κατηγοριών ποιότητας της στρώσης έδρασης βάσει D_6 (υπολογισμός οριακών τιμών D_6 από αντικατάσταση στη σχέση των οριακών E_3).

-Εμπειρική κατάταξη ποιότητας υπερκείμενης κατασκευής οδοστρώματος βάσει E_p . Τρεις κατηγορίες ποιότητας:

Ασθενής $E_p \leq 200$ (Mpa)

Μέση $200 < E_p < 400$

Ισχυρή $E_p \geq 400$

-Συσχέτιση του E_p με το δείκτη SCI για 3 διαφορετικές περιπτώσεις :

Ισχυρό έδαφος $SCI = 1,974 \cdot 10^5 \cdot E_p^{-1,052}$, ($r^2 = 0,890$)

Μέσο έδαφος $SCI = 3,425 \cdot 10^5 \cdot E_p^{-1,152}$, ($r^2 = 0,902$) (Σχέσεις 7.2)

Ασθενές έδαφος $SCI = 2,533 \cdot 10^5 \cdot E_p^{-1,055}$, ($r^2 = 0,936$)

Καθορισμός κατηγοριών ποιότητας οδοστρώματος βάσει των τιμών του SCI που προκύπτουν απ' την αντικατάσταση των οριακών τιμών του E_p στους σχετικούς τύπους.

Οι σχέσεις υπολογισμού του SI που τελικά χρησιμοποιούνται είναι:

Ασθενής στρώση έδρασης

$$SI_w = \begin{matrix} 0,2 & SCI \geq 750 \\ 2,361 \cdot 10^5 \cdot SCI^{-2,112}, & (r^2 = 0,987) & 350 < SCI < 750 \\ 1,0 & SCI \leq 350 \end{matrix} \quad (\text{Σχέση 7.3})$$

Μέση στρώση έδρασης

$$SI_M = \begin{matrix} 0,25 & SCI \geq 750 \\ 4,243 \cdot 10^4 \cdot SCI^{-1,819}, & (r^2 = 0,975) & 350 < SCI < 750 \\ 1,0 & SCI \leq 350 \end{matrix} \quad (\text{Σχέση 7.4})$$

Ισχυρή στρώση έδρασης

$$SI_M = \begin{matrix} 0,3 & SCI \geq 750 \\ 1,046 \cdot 10^4 \cdot SCI^{-1,819}, & (r^2 = 0,988) & 350 < SCI < 750 \\ 1,0 & SCI \leq 350 \end{matrix} \quad (\text{Σχέση 7.5})$$

7.3 Διερεύνηση της χρησιμοποίησης του ΔΜΑ στην πιο πάνω μεθοδολογία και γενικές παρατηρήσεις

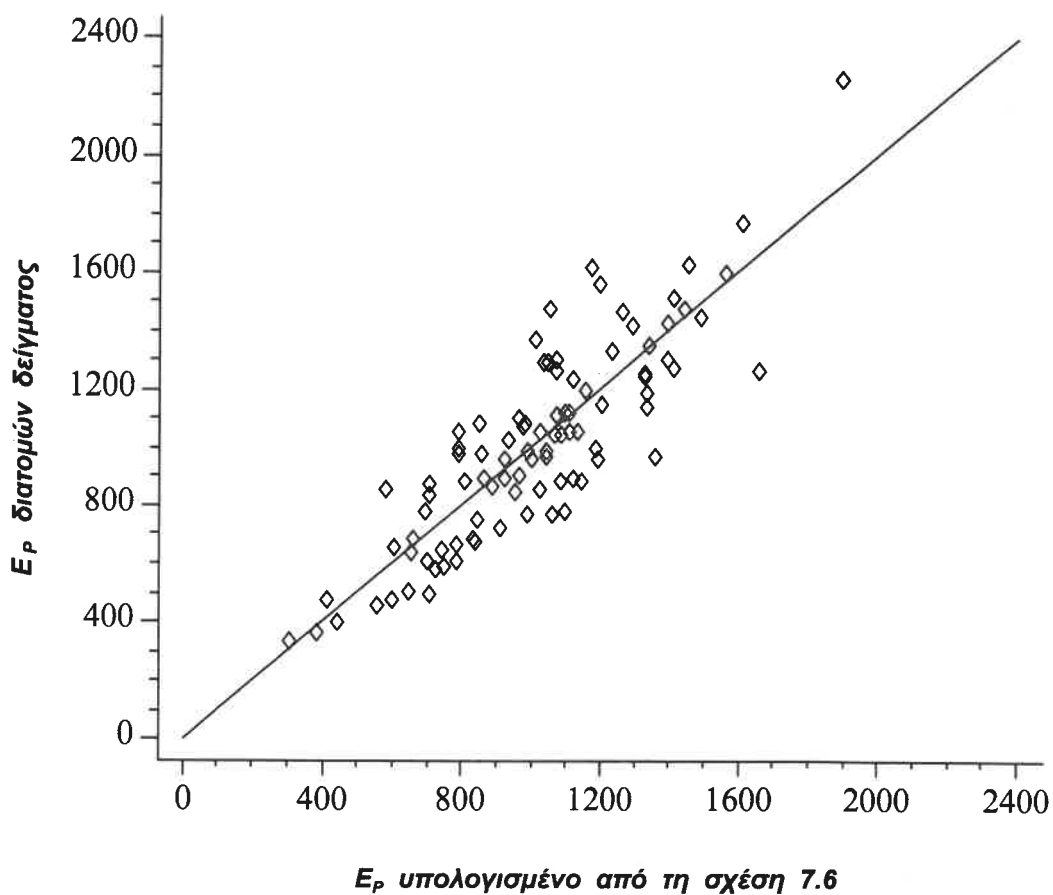
Σύμφωνα με τα όσα περιγράφηκαν αρκεί να πραγματοποιηθεί η δοκιμή FWD σε ένα υφιστάμενο οδόστρωμα έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν οι μετρήσεις των υποχωρήσεων D_0 , D_1 και D_6 και να αξιολογηθεί το οδόστρωμα. Ενδεχόμενη χρήση του E_{dyn} θα έδινε στη μέθοδο τα πλεονέκτηματά της χρησιμοποίησης μόνο της κεντρικής υποχώρησης και της αποφυγής των πολλαπλών συσχετίσεων (που ενδεχομένως οδηγούν σε αποκλίσεις).

Η πιο προφανής εμπλοκή του ΔΜΑ σ' αυτή τη διαδικασία είναι η χρησιμοποίηση της σχέσης 5.1 για τον υπολογισμό του E_3 . Μ' αυτό τον τρόπο η κατάταξη της στρώσης έδρασης γίνεται κατευθείαν από τις εμπειρικές κατηγορίες ποιότητας. Έτσι παρακάμπτεται η συσχέτιση του D_6 με το προσδιορισμένο απ' την back-analysis E_3 , πράγμα πολύ θετικό, για τους λόγους που αναπτύχθηκαν σε προηγούμενη ενότητα.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η εμπειρική κατάταξη ποιότητας οδοστρώματος βάσει της τιμής που λαμβάνει το E_P . Το E_P είναι ένα μέγεθος που αναφέρεται στο σύνολο της κατασκευής αλλά η γνώση του προϋποθέτει τον ανάστροφο υπολογισμό των ελαστικών παραμέτρων. Η εκτίμηση της ποιότητας ενός οδοστρώματος μέσω αυτού θα γινόταν πολύ εύκολα αν μπορούσε να προσεγγιστεί με τη βοήθεια του E_{dyn} . Για το συγκεκριμένο σκοπό το E_P υπολογίστηκε με τη βοήθεια προγραμμάτων Η/Υ στις ιδεατές διατομές και συσχετίστηκε με τα μεγέθη E_{dyn} , h_1 και h_2 . Το αποτέλεσμα της στατιστικής επεξεργασίας (διάγραμμα 7.1) περιέχεται στη σχέση 7.6. Ο αντίστοιχος συντελεστής συσχέτισης είναι ίσος με $r^2 = 74,46\%$.

$$E_P = 106,301 \cdot E_{dyn}^{0,3} - 5755,76 \cdot h_1^{-0,1} + 58020,2 \cdot h_2^{-0,7} + 2535,5$$

(Σχέση 7.6)



Διάγραμμα 7.1 Προσαρμογή υπολογιστικού μοντέλου της στατιστικής προσέγγισης του E_p από τα μεγέθη E_{dyn} , h_1 και h_2 μέσω πολλαπλής παλινδρόμησης

Η εικόνα του διαγράμματος είναι γενικά θετική. Σχετικά καλή προσαρμογή στα πραγματικά δεδομένα του υπολογιστικού μοντέλου προσέγγισης του E_p .

Παρατηρώντας το διάγραμμα 7.1 και τη σχέση 7.6 συμπεραίνουμε ότι είναι εφικτή μια γενική εκτίμηση του E_P και στη συνέχεια η κατάταξη ποιότητας του οδοστρώματος. Όμως οι εμπειρικές κατηγορίες ποιότητας που καθορίζονται στην μεθοδολογία που περιγράφηκε, αναφέρονται σε τιμές εμφανώς μικρότερες απ' αυτές των ιδεατών διατομών. Σχεδόν όλες οι διατομές του στατιστικού μας δείγματος κατατάσσονται στην υψηλότερη κατηγορία ποιότητας ($E_P > 400 \text{ Mpa}$) πράγμα φυσικά αναληθές γιατί συγκροτήθηκαν τυχαία. Η πιθανότερη εξήγηση της κατάστασης που παρουσιάζεται είναι η αναγωγή στη θερμοκρασία των 30°C που προηγείται του υπολογισμού του E_P στην αναφερόμενη μέθοδο. Παρόλ' αυτά η εμπειρική διάκριση των οδοστρωμάτων με κριτήριο το E_P δίνει την εντύπωση ότι παρόμοια προσπάθεια για αξιολόγηση των υφιστάμενων κατασκευών μέσω E_{dyn} μπορεί να δώσει αποτελέσματα. Η άποψη αυτή ενισχύεται από το γεγονός ότι το E_{dyn} "περιέχει" και το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης ενώ το E_P όχι.

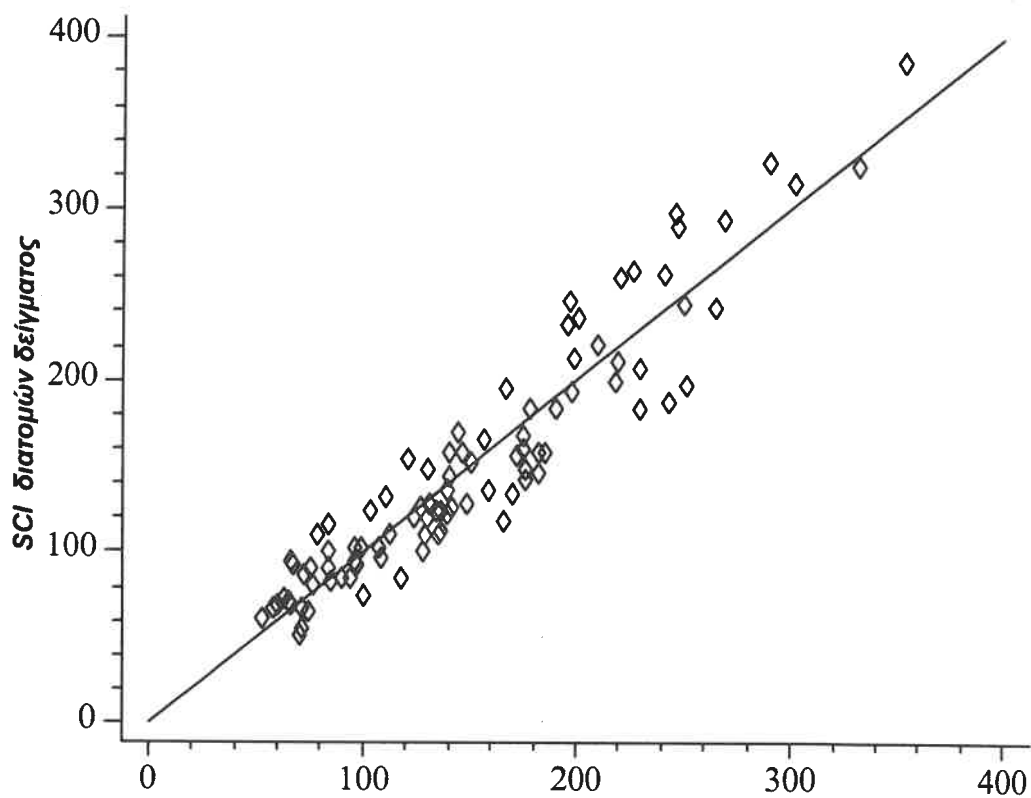
Κατά την επεξεργασία της μεθόδου αξιολόγησης που παρουσιάστηκε, ένα ακόμα θέμα που διερευνήθηκε ήταν η συσχέτιση του SCI με το E_{dyn} . Εδώ το ενδιαφέρον εντοπίζεται όπως και στην περίπτωση του E_P στον καθορισμό του επιπέδου ποιότητας των οδοστρωμάτων (και συγκεκριμένα του συνόλου της κατασκευής εκτός της στρώσης έδρασης) βάσει SCI.

Ο συντελεστής SCI της μεθόδου αντιστοιχεί σε φόρτιση 75 kN. Για να υπολογιστεί στις διατομές του στατιστικού μας δείγματος εισάχθηκε η κατάλληλη φόρτιση στο πρόγραμμα BISAR και πραγματοποιήθηκε επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού με πρόγραμμα H/Y. Η στατιστική επεξεργασία έδωσε την παρακάτω σχέση:

$$SCI = 2467,85 \cdot E_{\text{dyn}}^{-0.4} + 1,4207 \cdot 10^7 \cdot h_1^{-2.5} - 35,5168$$

(Σχέση 7.7)

Ο συντελεστής συσχέτισης για το άνω υπολογιστικό μοντέλο είναι υψηλός ($r^2 = 89,20 \%$). Τα θετικά αποτελέσματα της διερεύνησης είναι εμφανή στο αντίστοιχο διάγραμμα (Διάγραμμα 7.2).



Παραγόμενο SCI από τη σχέση 7.2

Διάγραμμα 7.2 Προσαρμογή υπολογιστικού μοντέλου της στατιστικής προσέγγισης του SCI από τα μεγέθη E_{dyn} και h_1 μέσω πολλαπλής παλινδρόμησης

Ο παραγόμενος SCI εμφανίζει αρκετά υψηλή συσχέτιση με τον SCI που παρατηρείται στις ιδεατές διατομές. Οι αποκλίσεις των σημείων του διαγράμματος από τη γραμμή αναφοράς είναι γενικά πολύ μικρές.

Ο SCI δηλαδή, μπορεί να προσεγγιστεί αρκετά καλά από το E_{dyn} και το h_1 . Όμως - για τους ίδιους λόγους που συναντήσαμε και για το E_p - δεν είναι δυνατόν να προκύψει εκτίμηση της κατάστασης του οδοστρώματος. Οι ιδεατές διατομές αντιστοιχούν όλες σε ισχυρές κατασκευές (κατηγορία με $SCI < 350 \mu m$), κάτι που - όπως προαναφέρθηκε - δεν ισχύει στην πραγματικότητα. Εκτός της αναγωγής του SCI σε συγκεκριμένη θερμοκρασία (στη μελέτη που περικλείει τη μέθοδο αξιολόγησης) η ανακολουθία στις τιμές που λαμβάνονται δικαιολογείται και από το γεγονός ότι στις ιδεατές διατομές η φόρτιση ήταν στατική.

Αντίθετα, εξετάζοντας τη συνολική εικόνα των αποτελεσμάτων της τελευταίας στατιστικής επεξεργασίας κάνουμε μία πολύ θετική διαπίστωση. Το DMA υπολογίστηκε από τον τύπο 2.1. Ο τύπος αυτός αναφέρεται σε δυναμική φόρτιση 50 KN σε κυκλική επιφάνεια διαμέτρου 0,30 m με ύψος πτώσης 0,50 m. Στην προσομοίωση της φόρτισης στις ιδεατές διατομές το DMA υπολογίστηκε από την υποχώρηση που προκαλούν τα 50 KN. Η εξαγωγή όμως του SCI έγινε χρησιμοποιώντας το φορτίο των 75 KN! Άρα το Δυναμικό Μέτρο Ακαμψίας είναι μία συνολική παράμετρος που περιγράφει το οδόστρωμα ανεξάρτητα της καταπόνησης αλλά συνάρτηση της φύσεως των υλικών και ενδεχομένως της ταχύτητας επιβολής της φόρτισης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ



8. Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις

8.1 Ανακεφαλαίωση - συμπεράσματα

Από την ανάλυση που έγινε στα προηγούμενα κεφάλαια καταλήγουμε σε ποικίλα συμπεράσματα γύρω από τη φυσική σημασία του Δυναμικού Μέτρου Ακαμψίας (DMA) καθώς και για την ενδεχόμενη χρησιμότητά του σε διάφορα προβλήματα οδοστρωμάτων.

Όπως αναφέρθηκε η μεγάλη διαφοροποίηση του DMA από τα άλλα μεγέθη που μας απασχολούσαν μέχρι πρόσφατα είναι ο χαρακτηρισμός του ως δυναμικό μέγεθος. Επειδή όμως είναι συνάρτηση της φύσης των υλικών και των διαστάσεων μιας κατασκευής εμφανίζεται να συνδέεται και με τις τιμές των παραμέτρων της στατικής ανάλυσης. Στην παράγραφο κεφάλαιο 4.2 φαίνεται ξεκάθαρα ότι και οι τρεις βασικές στρώσεις της διατομής ενός οδοστρώματος συμμετέχουν ενεργά στη διαμόρφωση της τιμής του DMA και μάλιστα με το ίδιο περίπου ποσοστό. Θα περίμενε κανείς, εφόσον η διαδικασία με την οποία προσδιορίζεται λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια, η επιρροή των υλικών να φθίνει με το βάθος. Όμως το DMA δεν είναι ένα μέγεθος που αναφέρεται στην επιφάνεια, είναι συνολική παράμετρος της κατασκευής του οδοστρώματος και σαν τέτοια πρέπει να αντιμετωπίζεται.

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, από τον τύπο 2.1 με τον οποίο υπολογίζουμε την τιμή E_{dyn} φαίνεται σαν να είναι το DMA μια απλή συνάρτηση της κεντρικής υποχώρησης D_0 του FWD. Με άλλα λόγια αν χρησιμοποιηθεί διαφορετικό βάρος στη συσκευή θα προκύψει και διαφορετικό E_{dyn} . Αν συνέβαινε κάτι τέτοιο το DMA δε θα μπορούσε να αποτελεί χαρακτηριστικό του οδοστρώματος. Στην παρούσα εργασία αποσαφηνίστηκε ότι κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Ο συντελεστής που υπάρχει στον τύπο “περιέχει” τις συνθήκες φόρτισης. Η απόδειξη αυτού του γεγονότος βρίσκεται στα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας του Κεφαλαίου 6. Εκεί το E_{dyn} εμφανίζεται να σχετίζεται με το μέγεθος SCI που αποτελεί το αίτιο διαφορετικής φόρτισης από αυτήν με την οποία παράγεται η μορφή της σχέσης 7.7. Το ύψος πτώσης όμως της δοκιμής

FWD είναι ίδιο και στις δύο περιπτώσεις (0,50 m). Σε άλλη περίπτωση το πιθανότερο είναι να είχαμε αδυναμία συσχέτισης των δύο μεγεθών γιατί το ύψος πτώσης εκφράζει την ταχύτητα επιβολής φόρτισης. Το ΔΜΑ κατά πάσα πιθανότητα επηρεάζεται απ' αυτήν (με ταχύτητα μεταβολής μηδενική εξομειώνεται με τα στατικά μεγέθη). Ουσιαστικά λοιπόν το Δυναμικό Μέτρο Ακαμψίας εξαρτάται από τη φύση των υλικών του οδοστρώματος και την ταχύτητα επιβολής φόρτισης.

Το γεγονός ότι το E_{dyn} προέρχεται από δυναμική ανάλυση είναι ένα από τα βασικά θετικά χαρακτηριστικά του (άλλωστε η καταπόνηση των οδοστρωμάτων είναι κι αυτή δυναμική). Το άλλο βασικό πλεονέκτημά του έναντι άλλων μεγεθών είναι ο σχετικά εύκολος τρόπος με τον οποίο προσδιορίζεται. Η απευθείας συσχέτισή του με χαρακτηριστικές παραμέτρους, εντάσεις και ανηγμένες παραμορφώσεις σε "κρίσιμες" θέσεις του οδοστρώματος αποκτά μεγάλη σημασία ακριβώς εξαιτίας του απλού υπολογισμού του. Η γενική εικόνα της στατιστικής διερεύνησης που προηγήθηκε μας οδηγεί σε πολύ θετικά συμπεράσματα.

Ο συνδυασμός του E_{dyn} με τα πάχη των δύο ανώτερων στρώσεων δίνει τη δυνατότητα να προσεγγιστούν στατιστικά αρκετά μεγέθη - ανάμεσά τους και το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης E_3 . Στο Κεφάλαιο 4 που αναφέρεται στον προσδιορισμό του E_3 βλέπουμε ότι το υπολογιστικό μοντέλο που μορφώθηκε είναι ικανό να χρησιμοποιηθεί σε πρακτικές εφαρμογές. Η γρήγορη και οικονομική αυτή εκτίμηση της τιμής του E_3 είναι πολύ σημαντική για τους λόγους που αναλύθηκαν στο ίδιο κεφάλαιο (πολύπλοκος και αρκετές φορές ανακριβής ο υπολογισμός της συγκεκριμένης ελαστικής παραμέτρου με τις επικρατούσες μεθόδους).

Εδώ θα πρέπει να γίνει μια επισήμανση. Στην ουσία, το E_3 προσεγγίζεται μέσω του E_{dyn} παρά την παρουσία των παχών h_1 και h_2 στις στατιστικές σχέσεις. Τα μεγέθη E_3 , h_1 και h_2 είναι εντελώς ανεξάρτητα μεταξύ τους (εμφανίζουν μηδενική "ένα προς ένα" συσχέτιση) διότι οι ιδεατές διατομές συγκροτούν ένα τυχαίο στατιστικό δείγμα. Τα πάχη των στρώσεων είναι απλώς μια πρόσθετη πληροφορία που συμπληρώνει το E_{dyn} και αυξάνει τη συσχέτισή του με το E_3 . Η παρατήρηση αυτή προσδίδει

μεγαλύτερο κύρος στη θεώρηση του DMA σα χαρακτηριστικό του οδοστρώματος.

Εκτός από την εισαγωγή του E_{dyn} στις διαδικασίες αναστρόφου υπολογισμού που κρίνεται επιτυχημένη, καταλήγουμε στη διαπίστωση ότι μπορεί να συνδεθεί άμεσα με τη συμπεριφορά του οδοστρώματος απέναντι σε ενδεχόμενη καταπόνησή του. Η άποψη αυτή απορρέει από τα στοιχεία που περιέχονται στο Κεφάλαιο 5. Στην ενότητα αυτή διακρίνουμε την ιδιαίτερη συσχέτιση των “κρίσιμων” παραμορφωσιακών μεγεθών μιας υφιστάμενης κατασκευής με το DMA. Αναλυτικότερα, η οριζόντια εφελκυστική ανηγμένη παραμόρφωση στο κατώτερο σημείο της ασφατικής στρώσης ε_{Ras} και η θλιπτική ανηγμένη παραμόρφωση στο κατώτερο σημείο του ασύνδετου υλικού ε_z προσεγγίζονται πολύ ικανοποιητικά σε συναρτήσεις των E_{dyn} , h_1 και h_2 . Ειδικά για την περίπτωση της ε_{Ras} , η εκτίμησή της από τις σχέσεις αυτές δίνει πολύ καλά αποτελέσματα αν εφαρμοστεί σε πραγματικές συνθήκες. Δηλαδή μπορούμε να έχουμε ευθέως γνώση για χαρακτηριστικά μεγέθη που αναπτύσσονται κατά τη φόρτιση του οδοστρώματος παρακάμπτοντας την διαδικασία του αναστρόφου υπολογισμού.

Από την παραπάνω παρατήρηση καταλαβαίνει κανείς την ιδιαίτερη σημασία του E_{dyn} . Αν μπορεί να περιγράψει τον τρόπο με τον οποίο αντιδρά το οδόστρωμα στην καταπόνησή του τότε μπορεί και να το αξιολογήσει. Αυτό θα ήταν πολύ σημαντικό γιατί το DMA μιας υφιστάμενης κατασκευής προσδιορίζεται εύκολα.

Βλέποντας συνολικά τα αποτελέσματα της διερεύνησης γύρω από το DMA καταλήγουμε σε μια γενική διαπίστωση που αφορά τη φόρτιση που εισάγουμε στο BISAR. Σχεδόν όλα τα μεγέθη που αναφέρονται στη στατιστική επεξεργασία και στην προσπάθεια της σύνδεσης των θεωρητικών αποτελεσμάτων με την πράξη, έχουν υπολογιστεί με το πρόγραμμα αυτό. Αν η προσομοίωση των συνθηκών στατικής φόρτισης στο BISAR πλησίαζε περισσότερο τα δυναμικά πρότυπα, πιστεύεται ότι τα αποτελέσματα της εργασίας θα ήταν συνολικά καλύτερα και τα συμπεράσματα ακόμα πιο θετικά. Η άποψη αυτή βασίζεται στις δυσκολίες της εφαρμογής των εξαγόμενων σχέσεων σε πραγματικές καταστάσεις

επειδή προέκυψαν με φόρτιση διαφοροποιημένη απ' αυτήν που επιβάλλει η συσκευή FWD. Παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση της ε_z όπου η στατιστική προσέγγιση είναι άριστη για το στατιστικό δείγμα αλλά αδυνατεί να χρησιμοποιηθεί στην πράξη.

Πιστεύεται ότι, η παρούσα διερεύνηση υπέδειξε ένα σημαντικό εύρος περιοχών στις οποίες είναι δυνατό να αξιοποιηθούν σχετικά άμεσα τα προϊόντα της δυναμικής ανάλυσης και διαπραγματεύτηκε αρκετά ζητήματα γύρω από το DMA. Συγκεκριμένα συμπεραίνουμε ότι:

- Το DMA είναι ένα “ενιαίο” μέτρο ακαμψίας του οδοστρώματος προερχόμενο από δυναμική ανάλυση. Εξαρτάται από τη φύση των υλικών και την ταχύτητα επιβολής, είναι δε ανεξάρτητο του φορτίου.

- Μπορούμε μέσω του DMA να προσδιορίσουμε άμεσα το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης E_3 και να χρησιμοποιήσουμε την τιμή που προκύπτει σε πολλές εφαρμογές - σαν τιμή εκκίνησης (starting modulus) σε λογισμικά αναστρόφου υπολογισμού καθώς και στο πλαίσιο της δομικής αξιολόγησης οδοστρωμάτων οδών και αεροδρομίων και όπου απαιτείται η γνώση της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης (E_s , CBR, κ.λ.π.).

- Υπάρχει η δυνατότητα αξιόπιστου και αρκετά γρήγορου υπολογισμού της ανηγμένης παραμόρφωσης ε_{Ras} σε υφιστάμενα οδοστρώματα παρακάμπτοντας τον ανάστροφο υπολογισμό με τα όποια πλεονεκτήματα συνεπάγεται αυτό. Ανάλογα ποιοτικά συμπεράσματα προκύπτουν για το άλλο “κρίσιμο” μέγεθος (ε_z) παρά την δυσκολία εύρεσης κατάλληλης ποσοτικής έκφρασης.

- Το DMA πληρεί τις προϋποθέσεις που απαιτούνται για να εισαχθεί σε μεθόδους αξιολόγησης οδοστρωμάτων βελτιώνοντας και συμπληρώνοντάς τις. Αποτελεί χαρακτηριστική συνολική παράμετρο του

οδοστρώματος με άμεση συνέπεια να εμπλέκεται στην ποιοτική κατάταξη των υφισταμένων οδοστρωμάτων.

8.2 Προοπτική περαιτέρω αξιοποίησης του Δυναμικού Μέτρου Ακαμψίας

Εκτός από τα σαφή θετικά συμπεράσματα στα οποία καταλήγουμε με την επισκόπηση των περιεχομένων των κεφαλαίων, προκύπτουν και ορισμένες ενδείξεις για τις δυνατότητες που μπορεί να παράσχει η χρησιμοποίηση του ΔΜΑ.

Η μεγαλύτερη αδυναμία των μεθόδων που εφαρμόζονται μέχρι σήμερα για να περιγράψουν την κατάσταση ενός οδοστρώματος είναι η στατική ανάλυση. Η καταπόνηση του μεγαλύτερου ποσοστού των υφιστάμενων κατασκευών είναι δυναμική όπως και η φόρτιση της δοκιμής του FWD. Με τον προσδιορισμό του ΔΜΑ εκμεταλλευόμαστε για πρώτη φορά τις δυναμικές μετρήσεις για την εξαγωγή ενός ανάλογου μεγέθους.

Παρά το γεγονός ότι η στατιστική επεξεργασία έγινε με στατική προσομοίωση φόρτισης τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά για το ρόλο του ΔΜΑ σε διαδικασίες αναστροφού υπολογισμού και αξιολόγησης. Πιθανότατα μετά από μελλοντική εμβάθυνση στο αντικείμενο, η πρακτική αξία των εξαγόμενων σχέσεων θα είναι μεγαλύτερη. Στην παρούσα εργασία, κάποιες από τις ποσοτικές εκφράσεις που μορφώθηκαν παρουσιάζουν ανακολουθία ως προς την ισχύ τους στην πράξη. Αλλά ποιοτικά διαφαίνεται ξεκάθαρα ότι το ΔΜΑ συνδέεται άμεσα με την αξιολόγηση των οδοστρωμάτων. Με την μελλοντική έρευνα λοιπόν, και τον προσδιορισμό κατάλληλων ποσοτικών σχέσεων θα αξιοποιηθεί ευρύτερα το νέο αυτό μέγεθος.

Το Δυναμικό Μέτρο Ακαμψίας είναι συνολική παράμετρος του οδοστρώματος και εξάγεται μέσω φόρτισης που ομοιάζει με την πραγματική καταπόνησή του. Σχετίζεται επίσης με μεγάλο αριθμό σημαντικών παραμέτρων και χαρακτηριστικών μεγεθών των υφισταμένων κατασκευών. Άρα είναι πολύ πιθανό το ενδεχόμενο της αξιόπιστης διάκρισης κατηγοριών ποιότητας με κριτήριο τις τιμές που λαμβάνει το

E_{dyn} . Ο καθορισμός τέτοιων κατηγοριών αποκτά ιδιαίτερη σημασία γιατί ο τρόπος προσδιορισμού του κριτηρίου αξιολόγησης είναι ικανός να επιταχύνει κατά πολύ την αντιμετώπιση του προβλήματος της ποιοτικής κατάταξης μιας διατομής οδοστρώματος. Αν αναλογιστεί κανείς το τεράστιο μήκος των οδικών δικτύων που πρέπει να αξιολογηθούν αντιλαμβάνεται την αναγκαιότητα της στροφής μέρους της έρευνας προς αυτή την κατεύθυνση.

Οι παραπάνω εκτιμήσεις γύρω από τις δυνατότητες αξιοποίησης του DMA συντείνουν στην προώθηση - ύστερα από σχετική έρευνα - της χρησιμοποίησής του σαν:

- Πρακτικός Δείκτης για την ανάπτυξη Συστήματος Δομικής Κατάταξης Οδών και Αεροδρομίων σε επίπεδο Δικτύου (Network Pavement Management System)
- Βασικό μέγεθος ανάλυσης στις εφαρμογές της δοκιμής FWD και στα λογισμικά αναστροφής υπολογισμού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλιογραφία

- [1] KUAB Konsult & Utveckling AB, "Nondestructive Pavement Testing - FWD KUAB 50", KUAB Konsult & Utveckling AB, Sweden, 1985
- [2] Antunes M., "Dynamic Analysis of falling Weight Deflectometer Test Results", Proceedings, FEHRL - FWD Seminar, Delft. ,1991
- [3] Καρλαύτης Α., "Δυναμική Προσομοίωση της Δοκιμής του Παραμορφωσιμόμετρου Πίπτοντος Βάρους", Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., 1995
- [4] Roesset J.M., Kausel E., Cuellar V., Monte J.L., Valerio J., "Impact of Weight Falling onto the Ground", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 8, August, 1994
- [5] Κόλιας Σ., Λοίζος Α. "Σημειώσεις Οδοστρωμάτων", Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1996
- [6] D.L.Delong, M.G.F. Peutz, A.R.Korwangen, "Computer Program Bisar, Layered System under Normal and Tangential Surface Loads", Koninlijke/Shell - Labor, Amsterdam, Ext. Report AMSR, 0006.73, 1973
- [7] Λοίζος Α.Α., Σαριδάκης Δ.Σ., "Συμβολή στον Προσδιορισμό των Μέτρων Ελαστικότητας Στρώσεων Οδοστρώματος με Βάση την Τεχνική του FWD", Δελτίο ΚΕΔΕ / ΥΠΕΧΩΔΕ, 1992
- [8] Murray R. Spiegel (Μεταφρ. Περσίδης Σ.), "Πιθανότητες και Στατιστική", Schaum's Outline Series, Mc Graw - Hill, New York (ΕΣΠΙ, Αθήνα), 1975

[9]Sidess A., Bonjack H., Zoltan G. "Overlay Design Procedure for Pavement Maintenance Management Systems", Transportation Research Record 1374, 1992

[10]Lytton R.L., German F.P., Chou Y.J., Stoffels S.M., "Determining Asphalt Concrete Pavement Structural Properties by Nondestructive Testing", NCHRP Report 327, p.105, Transportation Research Board, 1990

[11]Noureldin A.S., "New Senario for Backcalculation of Layer Moduli of Flexible Pavements", Transportation Research Record 1384

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παράρτημα

1. Διατομές στατιστικού δείγματος

(E_i σε MPa , h_i σε mm)

E_1	E_2	E_3	h_1	h_2
3000	225	100	140	240
4800	350	110	100	280
6200	425	150	220	420
6400	575	200	230	260
7000	600	70	250	560
3000	325	130	110	340
3600	425	180	130	520
5400	500	90	160	360
5800	150	130	170	220
4200	100	50	110	300
4800	525	80	210	460
6000	500	190	220	380
7000	300	180	170	280
6400	375	120	140	380
5600	200	90	120	400
6800	350	110	120	540
3600	450	80	150	440
3400	475	140	240	600
4600	375	160	190	560
3400	250	100	130	320
6600	400	50	180	600
6000	550	170	200	500
4000	125	70	150	320
5600	300	120	130	260
4400	200	180	110	480
5000	400	190	100	580
5000	575	110	100	240
6600	100	60	180	340
5200	150	80	190	280
4000	350	130	250	400
3800	525	160	160	500
3200	450	200	120	340
6200	250	140	150	420
5200	275	90	170	360
3800	475	70	210	460
4200	425	150	120	300
6800	550	80	240	520
3200	600	140	130	440
5400	225	190	140	380
6200	375	90	160	320
4600	400	50	130	300
4600	550	60	190	360
3400	325	160	210	520
5600	600	180	220	340
5000	175	110	150	480
4000	275	140	180	360
6800	200	160	200	280
5600	300	120	160	400
4200	500	100	190	500

6400	450	100	120	380
3400	225	120	110	320
6800	325	150	140	340
4200	275	200	230	420
6000	500	170	190	360
6600	475	130	210	460
3600	300	90	170	580
4400	425	80	140	300
5000	525	140	180	600
5400	325	80	160	220
4000	350	90	220	400
6200	250	100	140	220
5200	225	60	170	240
5800	275	130	120	320
5200	375	70	150	540
4600	400	50	180	580
6000	525	190	130	440
6600	175	150	190	280
5000	175	110	200	260
4600	300	110	160	260
6400	200	170	100	380
5400	400	60	110	420
3600	300	190	220	240
4800	325	160	210	560
5800	375	200	100	200
6200	550	70	200	440
6800	475	200	110	200
7000	175	120	240	500
3200	250	60	120	540
3000	450	130	110	600
3800	350	180	150	520
5200	200	70	100	200
6000	250	80	140	300
4400	225	140	100	280
4000	425	90	130	220
4800	150	120	100	460
5600	500	170	210	520
5800	125	100	100	560
4400	200	160	120	480
3800	125	70	210	560
6400	400	130	180	540
6800	450	110	120	480
3600	475	50	230	580
3200	150	60	130	540

2. Προγράμματα Η/Υ (παράδειγμα: Υπολογισμός της ϵ_{Ras} στις διατομές του στατιστικού δείγματος)

Batch file για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης ϵ_{Ras} ("eras.bat")

```
:one  
eras1  
lode  
eras2  
GOTO one
```

Επιμέρους προγράμματα του Batch file:

α) Πρόγραμμα "eras1.for"

```
program eras1  
  real f  
c    "Διάβασμα" αύξοντος αριθμού διατομής  
  open(11,file='co')  
    read(11,'(1x,i3)',end=100) n  
c    Εισαγωγή στοιχείων διατομής στο tape5  
  open(2,file='tape5')  
  rewind 2  
  read(2,10) k11  
  read(2,11) k21,k22,k23  
  read(2,12) k31,h32,k33,k34  
  read(2,13) k41,h42,k43,k44  
  read(2,14) k51,h52,k53,k54  
  read(2,10) k61  
  read(2,15) h71,k72,k73,k74,k75,k76  
  read(2,10) k81  
  read(2,16) k91,k92,k93,k94,k95  
  open(8,file='diato')  
1  read(8,19,end=100) i1,i2,i3,i4,i5,i6  
  if(i6.ne.n) goto 1  
  k31=i1  
  k41=i2  
  k51=i3  
  k33=i4  
  k43=i5  
  k94=k33
```

```

rewind 2
write(2,10) k11
write(2,11) k21,k22,k23
write(2,12) k31,h32,k33,k34
write(2,13) k41,h42,k43,k44
write(2,14) k51,h52,k53,k54
write(2,10) k61
write(2,15) h71,k72,k73,k74,k75,k76
write(2,10) k81
write(2,16) k91,k92,k93,k94,k95
10 format(i1)
11 format(i1,2(1x,i1))
12 format(i5,1x,f4.2,1x,i3,1x,i1)
13 format(i3,1x,f4.2,1x,i3,1x,i1)
14 format(i3,1x,f4.2,1x,i1,1x,i1)
15 format(f5.3,1x,i3,1x,4(i1,1x))
16 format(i1,1x,i3,1x,i3,1x,i4,1x,i1)
19 format(\,2x,i4,2x,i3,2x,i3,2x,i3,2x,i3,2x,i3)
100 stop
end

```

β)Πρόγραμμα "lode"

Πρόγραμμα του BISAR

γ)Πρόγραμμα "eras2.for"

```

program eras2
  real f
c    Καταγραφή αποτελέσματος από το tape6 σε αρχείο δεδομένων
  open(10,file='eras.dat')
  rewind 10
1  if (.not.eof(10)) then
    read(10,18,end=100) f
    go to 1
  endif
  open(3,file='tape6')
  rewind 3
  read(3,'(46(/),2x,f12.8)',end=100) f
  write(10,18) f
c    Μεταβολή του αύξοντος αριθμού διατομής

```

```

open(11,file='co')
read(11,'(1x,i3)',end=100) n
c      Παύση του προγράμματος όταν φτάσουμε στην τελευταία διατομή
if(n.eq.94) then
  pause
endif
n=n+1
backspace 11
write(11,'(1x,i3)') n
18 format(2x,f12.8)
100 stop
end

```

Μορφή του αρχείου δεδομένων “diato”:

Το αρχείο αυτό αποτελείται από γραμμές με τη δομή του παρακάτω τμήματος

```

.....
4600 375 160 190 560 19
3400 250 100 130 320 20
6600 400 60 180 600 21
.....

```

Οι στήλες κατά σειρά αναφέρονται στα E_1 , E_2 , E_3 , h_1 , h_2 , αύξων αριθμός διατομής (E_i σε MPa, h_i σε mm)

3. Ελαστικές παράμετροι διατομών υφιστάμενων οδοστρωμάτων προσδιορισμένες με λογισμικά αναστρόφου υπολογισμού

α) Πρόγραμμα MODCOMP2

E_1	E_2	E_3
5183	163	172
3904	233	179
2702	334	150
1360	252	23
2517	208	90
4202	201	87
7438	203	213
3662	222	186
2786	215	108
2807	478	141
2595	241	130
2702	258	172
2933	210	122
2576	215	179
1800	230	186
5564	107	191
2492	185	91
4842	199	132

β) Πρόγραμμα MODCOMP2

E_1	E_2	E_3
4578	197	162
3934	241	181
3549	201	278
1575	233	23
2933	141	199
4200	197	92
7770	190	225
4473	124	397
3164	196	118
3472	341	240
2898	217	156
3031	221	230
3164	202	134
2898	176	249
1792	228	200
4396	162	159
2856	162	97
5061	168	168

γ) Πρόγραμμα PADAL

E_1	E_2	E_3
4490	164	237
3464	262	255
2657	300	192
2051	162	340
2488	162	507
4120	147	785
7426	189	639
4511	161	529
3198	161	215
3559	284	757
2684	197	270
2798	218	424
3103	176	296
2263	212	320
1702	221	280
4122	156	188
2792	117	338
4857	146	477

