



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

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Α. ΛΟΪΖΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Αξιολόγηση Συμπεριφοράς Οδοστρωμάτων με τη μέθοδο
Φασματικής Ανάλυσης Επιφανειακών Κυμάτων**



ΜΑΡΙΑ Ε. ΖΑΓΓΙΛΗ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2009

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μέθοδος της Φασματικής Ανάλυσης Επιφανειακών Κυμάτων είναι μία μη καταστροφική μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της δυσκαμψίας των υπό εξέταση υλικών και για τον καθορισμό των παχών των στρώσεων που τα αποτελούν. Η υπόψη μέθοδος βασίζεται στη θεωρία της διάδοσης κυμάτων σε ένα στρωματογενές μέσο. Η μέθοδος ΦΑΕΚ έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για το γεωτεχνικό χαρακτηρισμό των εδαφών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται η εφαρμοσιμότητα της μεθόδου στην αξιολόγηση της συμπεριφοράς των οδοστρώματων. Στην υπόψη εργασία περιλαμβάνεται ο σχεδιασμός και η διεξαγωγή μη καταστροφικών μετρήσεων με χρήση της μεθόδου ΦΑΕΚ σε διατομές υφιστάμενου οδοστρώματος. Ακολούθως, πραγματοποιείται ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων που προκύπτουν από τις πειραματικές μετρήσεις. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην εκτίμηση της επίδρασης που σημειώνει στα τελικά αποτελέσματα των παχών και της δυσκαμψίας των επιμέρους στρώσεων του υπό εξέταση οδοστρώματος, η επιλογή των αρχικών παραμέτρων του θεωρητικού προσομοιώματος που χρησιμοποιείται κατά την αναλυτική διαδικασία. Στο στάδιο της ανάλυσης χρησιμοποιούνται ως αναφορά στοιχεία που προέκυψαν από συστηματική ανάλυση και επεξεργασία μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με το σύστημα Παραμορφωσιμόμετρου Πίπτοντος Βάρους (FWD) στο ίδιο οδόστρωμα. Αποδεικνύεται ότι η μέθοδος ΦΑΕΚ καταφέρνει να προσεγγίσει επιτυχώς τη διαστρωμάτωση της διατομής του υφιστάμενου οδοστρώματος εφόσον υπάρχουν αρχικές εκτιμήσεις για τα πάχη των στρωμάτων. Επιπλέον, μέσω της εφαρμογής της μεθόδου ΦΑΕΚ προσδιορίζεται το προφίλ της δυσκαμψίας των επιμέρους στρώσεων και ως εκ τούτου παρέχει πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο της δομικής αξιολόγησης του οδοστρώματος.

ABSTRACT

The Spectral Analysis of Surface Waves (SASW) is a nondestructive method that can be used to determine the layers thicknesses and stiffnesses of the pavement under investigation. This method is based upon the theory of wave propagation in layered media and it has been successfully used for the evaluation of geotechnical sites. This diploma thesis examines the applicability of the SASW method to the pavements characterization. In this thesis, the design and execution of nondestructive SASW tests at an existing pavement site are included. The field data are then analyzed. Emphasis is placed on the influence of the theoretical profile's parameters to the analysis results. The backcalculated moduli derived from the Falling Weight Deflectometer (FWD) measurements, which were conducted at the same test locations, are used as reference during the analysis. It is indicated that the SASW method determines successfully the layering of the pavement system if there are available estimations of the layer thicknesses. As far as the determination of the stiffness profile is concerned the SASW method results in a rough evaluation of the pavement under investigation.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2	ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ	3
2.1	ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ	4
2.1.1	Πειραματική διαδικασία	6
2.1.2	Κατασκευή της πειραματικής καμπύλης διασποράς.....	7
2.1.3	Θεωρητική καμπύλη διασποράς.....	10
2.1.4	Διαδικασία εμπρόσθιας ανάλυσης.....	13
3	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ	14
3.1	ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΕΔΑΦΩΝ ΚΑΙ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ...	14
3.2	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	15
3.2.1	Εξέλιξη της μεθόδου ΦΑΕΚ στα οδοστρώματα.....	15
3.2.2	Εναισθησία της μεθόδου στις παραμέτρους του αρχικού μοντέλου.....	16
3.2.3	Σύγκριση με Άλλες Μεθόδους	17
4	ΣΚΟΠΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	19
4.1	ΣΚΟΠΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	19
4.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	19
4.2.1	Αρχή λειτουργίας Παραμορφωσιμόμετρον Πίπτοντος Βάρους (FWD).....	21
4.2.2	Διαδικασία ανάστροφον υπολογισμού.....	23
5	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΦΑΕΚ	25
5.1	ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	25
5.2	ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ	27
5.2.1	Διάταξη της Δοκιμής.....	27
5.2.2	Ρυθμίσεις λογισμικού.....	29
5.2.3	Παραγωγή επιφανειακών κομάτων.....	29
5.2.4	Έλεγχος δεδομένων.....	30
6	ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	32
6.1	ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ POSTPRO	32
6.2	ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ WINSASW	35
6.2.1	Επεξεργασία των στοιχείων μετρήσεων με το λογισμικό PreCSW	35
6.2.2	Καμπύλη διασποράς.....	36
6.2.3	Ανάλυση αντιστροφής	38
6.2.4	Εμπρόσθια Ανάλυση	43
6.3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.....	44
6.3.1	Πρότυπο 1.....	45
6.3.2	Πρότυπο 2.....	51
6.3.3	Πρότυπο 3.....	55
6.3.4	Πρότυπο 4.....	59
6.3.5	Πρότυπο 5.....	63
6.3.6	Πρότυπο 6.....	75
6.4	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΣΤΡΟΦΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ	86
7	ΣΧΟΛΙΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	87
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΕΣ	89

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Φασματική Ανάλυση Επιφανειακών Κυμάτων (ΦΑΕΚ) χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της δυσκαμψίας των υπό εξέταση υλικών καθώς και για τον καθορισμό των παχών των στρωμάτων που τα αποτελούν. Μεταξύ άλλων εφαρμογών, αυτή η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό θεμελιωδών ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών όπως επίσης και για τον προσδιορισμό των προφίλ των οδοστρωμάτων (συμπεριλαμβανομένων των υλικών της επιφανειακής στρώσης, της βάσης και της στρώσης έδρασης) .

Η μέθοδος ΦΑΕΚ βασίζεται στην ιδιότητα διασποράς των σεισμικών επιφανειακών κυμάτων τύπου Rayleigh σε ένα στρωματογενές μέσο. Εφαρμόζεται στην επιφάνεια των υλικών στο πεδίο και αποτελεί μία επί τόπου μη καταστροφική μέθοδο (non destructive testing).

Η υπόψη μέθοδος αναπτύχθηκε με σκοπό να αποτελέσει μια εναλλακτική έναντι των σεισμικών μεθόδων οι οποίες απαιτούν τη χρήση γεωτρήσεων και χρησιμοποιούνται κατά κόρον για τον επί τόπου γεωτεχνικό χαρακτηρισμό των εδαφών. Σε αντίθεση με την εγκατάσταση γεωτρήσεων η οποία είναι χρονοβόρα και δαπανηρή η μέθοδος ΦΑΕΚ είναι ένα ταχύ και χαμηλού κόστους εργαλείο για τον προσδιορισμό γεωτεχνικών παραμέτρων (Stokoe, 1994).

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να εξεταστεί κατά πόσο η μέθοδος της Φασματικής Ανάλυσης Επιφανειακών Κυμάτων, εκτός της επιτυχούς εφαρμογής της στο γεωτεχνικό τομέα, μπορεί να αποτελέσει μία ακριβή και αποτελεσματική μέθοδο και για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν επί τόπου δοκιμές με χρήση της μεθόδου ΦΑΕΚ σε διατομές ενός υφιστάμενου οδοστρώματος. Παράλληλα στις υπό εξέταση διατομές πραγματοποιήθηκαν μη καταστροφικές μετρήσεις και με τη συσκευή Παραμορφωσιμόμετρου Πίπτοντος Βάρους (FWD). Τα στοιχεία των υπόψη μετρήσεων μετά από συστηματική ανάλυση και επεξεργασία θα αποτελέσουν αναφορά για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης.

Η παρούσα εργασία ακολουθεί τη δομή που περιγράφεται στη συνέχεια. Στο κεφάλαιο 2 μελετώνται οι αρχές και οι παραδοχές της μεθόδου ώστε να διαπιστωθεί με ποιο τρόπο οδηγούμαστε από τη μέτρηση των ταχυτήτων των κυμάτων στην επιφάνεια του εδάφους στην εξαγωγή συμπεράσματος για τις ιδιότητες και τα βάθη των υποκείμενων στρωμάτων. Στο κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά σε μελέτες που πραγματοποιήθηκαν με εφαρμογή της μεθόδου Φασματικής Ανάλυσης Επιφανειακών Κυμάτων στα οδοστρώματα ενώ επισημαίνονται και οι διαφορές που υπάρχουν μεταξύ της εφαρμογής της μεθόδου σε θέματα γεωτεχνικής υποδομής και στον τομέα των οδοστρωμάτων. Στο κεφάλαιο 4 περιλαμβάνεται ο σκοπός καθώς και μία γενική περιγραφή του πειράματος που πραγματοποιήθηκε. Στο

πλαίσιο αυτής της περιγραφής γίνεται και αναφορά στην αρχή λειτουργίας του Παραμορφωσιμόμετρου Πίπτοντος Βάρους και τη διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού. Στο κεφάλαιο 5 ακολουθεί μια αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας των μετρήσεων και της συλλογής των δεδομένων με τη μέθοδο ΦΑΕΚ. Στο κεφάλαιο 6 ακολουθεί ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων πεδίου που προέκυψαν από τη μέθοδο ΦΑΕΚ. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από ανάστροφο υπολογισμό των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με τη συσκευή FWD. Επιμέρους αντικείμενο διερεύνησης αποτέλεσε η επίδραση που έχουν οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία ανάλυσης και επεξεργασίας των πειραματικών μετρήσεων που προέκυψαν από τη μέθοδο ΦΑΕΚ στα τελικά προφίλ δυσκαμψίας και πάχους των στρώσεων του οδοστρώματος. Τέλος στο κεφάλαιο 6 αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία.

2 ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Οι θεμελιώδεις ιδιότητες των εδαφικών υλικών είναι το μέτρο διάτμησης και ο βαθμός απόσβεσης ενώ στον τομέα των οδοστρωμάτων οι ιδιότητες που κυρίως μας ενδιαφέρουν είναι το μέτρο ελαστικότητας Young και το πάχος των στρώσεων της οδοστρωματικής δομής. Οι ιδιότητες αυτές μπορούν να προσδιοριστούν από αρκετές διαφορετικού τύπου δοκιμές, καθεμία από τις οποίες προσφέρει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Μία κατηγοριοποίηση των δοκιμών αυτών είναι σε εργαστηριακές και σε επί τόπου δοκιμές. Οι εργαστηριακές δοκιμές παρουσιάζουν το μειονέκτημα της διατάραξης των υλικών κατά τη δειγματοληψία και τη μεταφορά τους στο εργαστήριο. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό ειδικά στην περίπτωση των εδαφικών υλικών, τα οποία είναι μη-γραμμικά, ανελαστικά και η απόκρισή τους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες.

Οι επί τόπου δοκιμές στηρίζονται σε αρκετές διαφορετικές μεθοδολογίες για την αξιολόγηση των παραμέτρων που μας ενδιαφέρουν. Οι δοκιμές που περιλαμβάνουν γεωτρήσεις (όπως οι δοκιμές Crosshole, Downhole και Σεισμοκώννου) οδηγούν στον υπολογισμό της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων V_s μέσω της παραγωγής και στη συνέχεια του εντοπισμού κυμάτων S (διατμητικά κύματα) (Γκαζέτας, 2007). Από την ταχύτητα V_s μπορούμε να οδηγηθούμε στον υπολογισμό του μέτρου δυσκαμψίας και του μέτρου ελαστικότητας Young. Οι δοκιμές αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως στο γεωτεχνικό τομέα και λόγω της ανάγκης γεωτρήσεων για την πραγματοποίησή τους δε δίνουν λύση στο πρόβλημα της διατάραξης των υλικών.

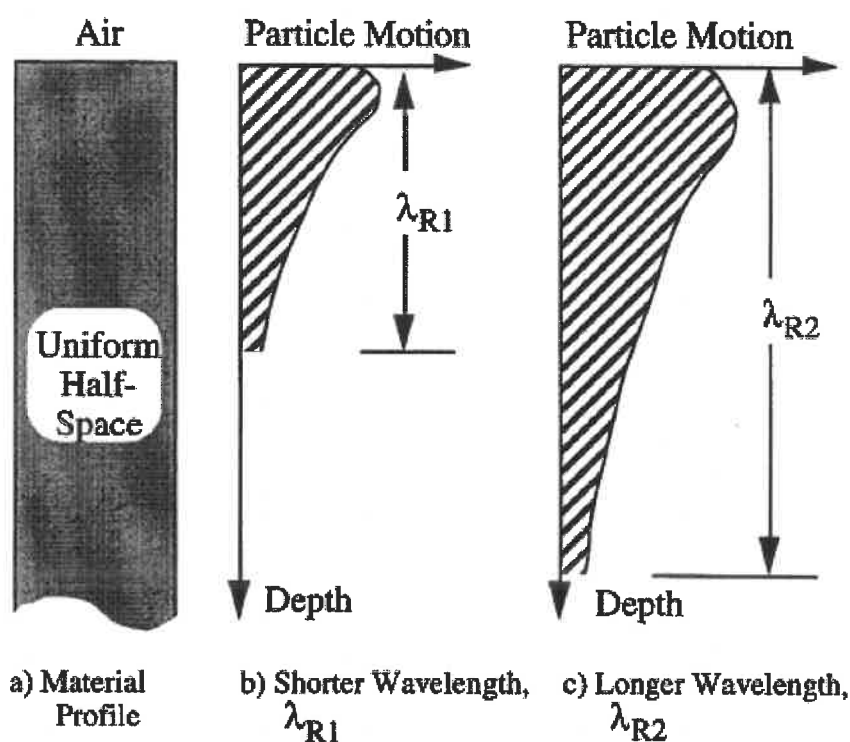
Μία άλλη κατηγορία επί τόπου δοκιμών είναι αυτές που οδηγούν στον υπολογισμό της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων V_s μέσω της παραγωγής και του εντοπισμού επιφανειακών κυμάτων τύπου Rayleigh και δεν απαιτούν γεωτρήσεις για την πραγματοποίησή τους (Μέθοδος Αρμονικής Επιφανειακής Ταλάντωσης, Φασματική Ανάλυση Επιφανειακών Κυμάτων). Η Μέθοδος Αρμονικής Επιφανειακής Ταλάντωσης εφαρμόζεται κυρίως στο γεωτεχνικό τομέα, ενώ η Φασματική Ανάλυση Επιφανειακών Κυμάτων βρίσκει εφαρμογή τόσο στο γεωτεχνικό όσο και στον τομέα των οδοστρωμάτων.

Στον τομέα των οδοστρωμάτων εκτός από τις μεθόδους που βασίζονται στη διάδοση κυμάτων (ΦΑΕΚ) είναι διαδεδομένες και οι μέθοδοι που βασίζονται στη μέτρηση παραμορφώσεων (Παραμορφωσιμόμετρο Πίπτοντος Βάρους, (FWD)). Η μέθοδος ΦΑΕΚ οδηγεί στον προσδιορισμό ενός μέτρου δυσκαμψίας και του πάχους των στρωμάτων του οδοστρώματος ενώ μέσω της μεθόδου FWD καθορίζεται το μέτρο ελαστικότητας Young. Τόσο η μεν όσο και η δε αποτελούν μη καταστροφικές μεθόδους και καθεμία από αυτές έχει διαφορετικά πλεονεκτήματα και αδυναμίες.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ανάλογα με τη μέθοδο προσδιορισμού οι ιδιότητες προσδιορίζονται σε διαφορετική κλίμακα παραμορφώσεων με αποτέλεσμα να υπάρχουν διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα των διαφόρων μεθόδων (Κρητικάκης, Βαφειάδης και Λούης, 2004).

2.1 Φασματική Ανάλυση Επιφανειακών Κυμάτων

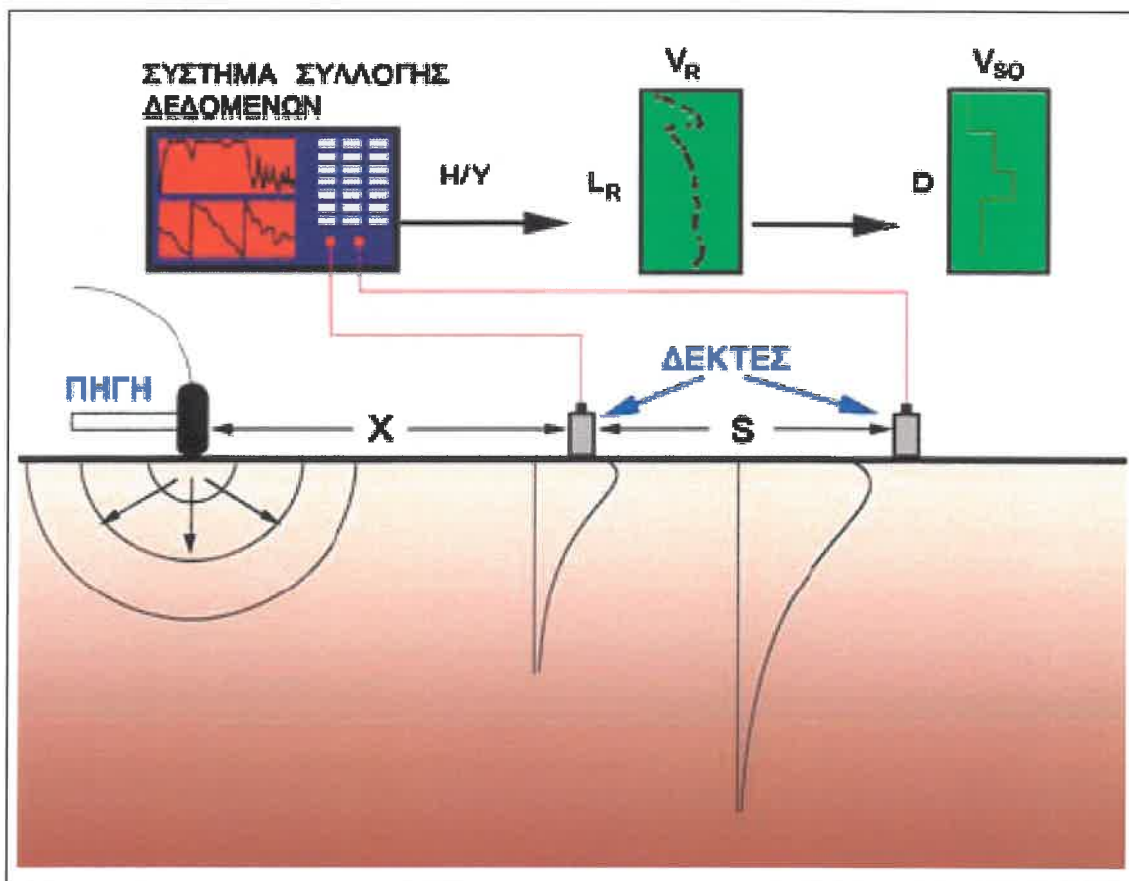
Η μέθοδος ΦΑΕΚ εκμεταλεύεται τη διάδοση και τη διαφορά (dispersion) των επιφανειακών κυμάτων. Σε έναν ομογενή, ισότροπο, ελαστικό, ημίχωρο, η ταχύτητα των επιφανειακών κυμάτων δε μεταβάλλεται με τη συχνότητα (ή το μήκος κύματος). Καθώς όμως στις περισσότερες περιπτώσεις οι ιδιότητες των στρώσεων των υλικών μεταβάλλονται με το βάθος, η ταχύτητα των επιφανειακών κυμάτων μεταβάλλεται με τη συχνότητα (ή το μήκος κύματος). Αυτή η μεταβολή της ταχύτητας με τη συχνότητα ονομάζεται διασπορά. Τα υψηλής συχνότητας (μικρού μήκους κύματος) κύματα διαδίδονται μόνο στα υλικά που είναι κοντά στην επιφάνεια. Τα χαμηλότερης συχνότητας (μεγαλύτερου μήκους κύματος) κύματα διαδίδονται τόσο στα υλικά που είναι κοντά στην επιφάνεια όσο και στα υλικά που βρίσκονται σε μεγαλύτερα βάθη. Η προσεγγιστική κατανομή της κίνησης των μορίων ενός υλικού για δύο κύματα Rayleigh με διαφορετικά μήκη κύματος παριστάνεται γραφικά στο σχήμα 2.1. Το μήκος κύματος λ_{R1} είναι μικρότερο από το αντίστοιχο λ_{R2} και για αυτό το λόγο η μοριακή κίνηση περιορίζεται σε μικρότερο βάθος.



Σχήμα 2.1 Προσεγγιστική κατανομή μοριακής κίνησης για δύο διαφορετικά μήκη κύματος (Stokoe et al., 1994)

Με χρήση κυμάτων Rayleigh με ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων μπορεί κανείς να εντοπίσει αποτελεσματικά τα διαφορετικά υλικά του εξεταζόμενου προφίλ (Stokoe et al., 1994).

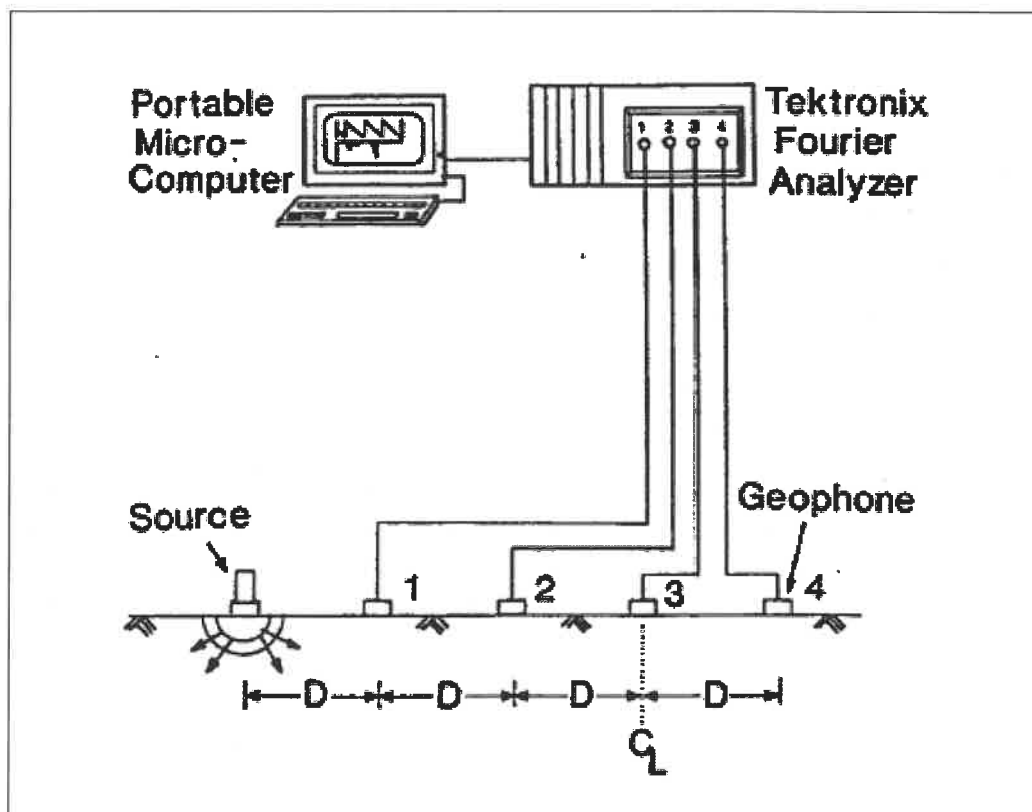
Η αρχή της μεθόδου ΦΑΕΚ φαίνεται στο σχήμα 2.2. Τα επιφανειακά κύματα παράγονται σε σημείο της επιφάνειας του εδάφους ή του οδοστρώματος με χρήση τεχνητών πηγών διέγερσης (π.χ. πτώση βάρους από συγκεκριμένο ύψος στο έδαφος). Οι κατακόρυφες συνιστώσες των επιφανειακών ταλαντώσεων καταγράφονται με χρήση κατάλληλων δεκτών και μετασχηματίζονται στο πεδίο των συχνοτήτων. Το πρώτο στάδιο επεξεργασίας περιλαμβάνει τον υπολογισμό της πειραματικής καμπύλης διασποράς (experimental dispersion curve), η οποία συνδέει την ταχύτητα φάσης (phase velocity), V_R , με το μήκος κύματος, L_R , των επιφανειακών κυμάτων. Η τελική φάση επεξεργασίας συνίσταται στην αντιστροφή της καμπύλης διασποράς, για τον προσδιορισμό της καμπύλης μεταβολής της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων V_{SO} με το βάθος (Τσίτος και Αθανασόπουλος, 2006). Περαιτέρω ανάλυση των σταδίων της μεθόδου ΦΑΕΚ ακολουθεί στη συνέχεια.



Σχήμα 2.2 Αρχή της μεθόδου ΦΑΕΚ (Τσίτος και Αθανασόπουλος, 2006)

2.1.1 Πειραματική διαδικασία

Το σχήμα 2.3 είναι μία σχηματική απεικόνιση της διάταξης της δοκιμής ΦΑΕΚ. Σε σημείο της επιφάνειας του οδοστρώματος δημιουργούνται επιφανειακά κύματα με τη βοήθεια μίας πηγής. Ως πηγή μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε κάποιος μηχανισμός παραγωγής μόνιμων κυμάτων ή κάποια κρουστική πηγή. Η πηγή παίζει σημαντικό ρόλο για τη λήψη των δεδομένων, καθώς όσο πιο πλούσιο συχνοτικό περιεχόμενο παρέχει, τόσα περισσότερα μήκη κύματος παράγονται. Η ταλάντωση της επιφάνειας του οδοστρώματος (και συνηθέστερα η κατακόρυφη συνιστώσα της κίνησης) καταγράφεται με τη βοήθεια δύο ή περισσότερων δεκτών (γεωφώνων ή επιταχυνσιογράφων) σε αυξανόμενες αποστάσεις από την πηγή.



Σχήμα 2.3 Γενική διαμόρφωση της δοκιμής ΦΑΕΚ(Nazarian et al., 1995)

Οι καταγραφές αυτές αναλύονται στο πεδίο των συχνοτήτων και αποθηκεύονται για περαιτέρω επεξεργασία. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για διαφορετικές αποστάσεις των δεκτών (Βλαχάκης και Αθανασόπουλος, 2006, Nazarian et al,1989, Κρητικάκης, Βαφειάδης και Λούης, 2004). Στις περισσότερες περιπτώσεις μετά την περάτωση μίας δοκιμής για μία συγκεκριμένη διάταξη δεκτών, οι δέκτες διατηρούνται στις αρχικές τους θέσεις, αλλά η πηγή μετακινείται στην αντίθετη πλευρά της διάταξης και η δοκιμή

επαναλαμβάνεται. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται αντιστροφή του προφίλ (Nazarian et al, 1995).

2.1.2 Κατασκευή της πειραματικής καμπύλης διασποράς

Οι δύο φασματικές συναρτήσεις που μετρώνται στο πεδίο για όλες τις διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των δεκτών ονομάζονται φάσμα διαφοράς φάσης (cross power spectrum) και συνάρτηση συσχέτιση (coherence function). Τα δεδομένα που μας παρέχει το φάσμα διαφοράς φάσης αντιπροσωπεύουν τη διαφορά φάσης μεταξύ των σημάτων που λαμβάνονται από τους δέκτες. Η διαφορά φάσης οφείλεται στο γεγονός ότι το σήμα πρέπει να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση για να φτάσει στο δέκτη που βρίσκεται πιο μακριά από την πηγή. Μια διαφορά φάσης 360° αντιστοιχεί σε χρονική διαφορά ίση με την περίοδο του κύματος. Η περίοδος του κύματος (T) είναι το αντίστροφο της συχνότητας (f).

Γνωρίζοντας τη φάση (μέσω του φάσματος διαφοράς φάσης), ο χρόνος διαδρομής μεταξύ των δύο δεκτών μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$t = (\varphi/360)/f \quad (2.1)$$

και η ταχύτητα φάσης (V_R) μπορεί να αποκτηθεί από τη σχέση:

$$V_R = D/t = D \cdot f / (\varphi/360) \quad (2.2)$$

όπου D είναι η απόσταση μεταξύ των δεκτών. Το μήκος κύματος (L_R) μπορεί να συσχετισθεί με την ταχύτητα φάσης και τη συχνότητα μέσω της σχέσης:

$$L_R = V_R / f = D \cdot (\varphi/360) \quad (2.3)$$

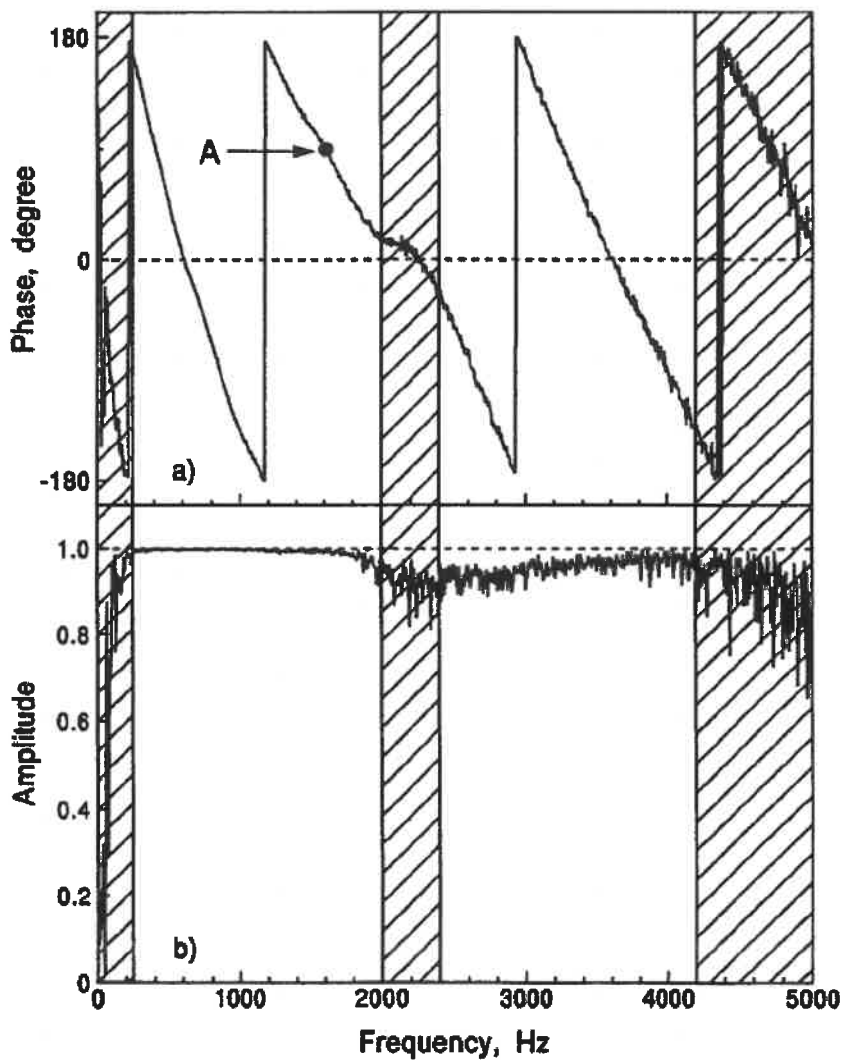
Είναι εμφανές ότι αν η φάση και συχνότητα είναι γνωστές, η ταχύτητα φάσης και το μήκος κύματος μπορούν να υπολογιστούν με τη χρήση των εξισώσεων 2.1 έως 2.3.

Η συνάρτηση συσχέτισης χρησιμοποιείται για να καθορίσει το εύρος των συχνοτήτων για το οποίο το σήμα που εντοπίστηκε από τους δύο δέκτες δεν είναι συναφές και να αποκλείσει από τον υπολογισμό της πειραματικής καμπύλης διασποράς συχνοτήτες που περικλείουν «θόρυβο».

Η συνάρτηση συσχέτισης λαμβάνει μία τιμή μεταξύ μηδέν και ένα για το εύρος των μετρημένων συχνοτήτων. Η τιμή ένα δείχνει τέλεια συσχέτιση μεταξύ των σημάτων που εντοπίζονται από τους δέκτες (η οποία είναι αντίστοιχη με άπειρο λόγο σήματος προς θόρυβο). Αντιστοίχως, μία μηδενική τιμή της συνάρτησης συσχέτισης σε μία συχνότητα αντιπροσωπεύει μη συσχέτιση μεταξύ των σημάτων που εντοπίζονται από τους δέκτες. Τα

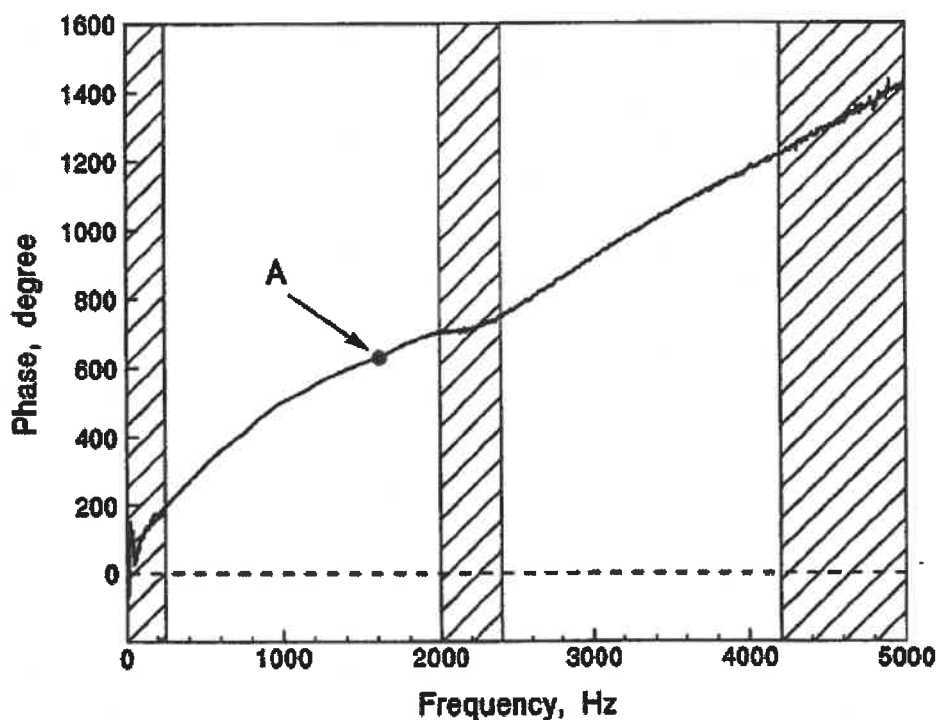
δεδομένα φάσης με χαμηλή τιμή συσχέτισης απορρίπτονται από την κατασκευή της καμπύλης διασποράς (Nazarian et al., 1989, Nazarian et al., 1995).

Τυπικές πληροφορίες φάσης από ένα φάσμα διαφοράς φάσης και της συσχετιζόμενης συνάρτησης συσχέτισης απεικονίζονται στο σχήμα 2.4. Η απόσταση μεταξύ των δεκτών είναι 600 mm. Το διάγραμμα φάσης του σχήματος 2.4a κυμαίνεται μεταξύ -180 και 180 μοιρών και αποτελεί την τυπική μέθοδο επίδειξης της φάσης. Η συνάρτηση συσχέτισης (σχήμα 2.4b) κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1. Παρατηρούμε ότι υπάρχουν αρκετές περιοχές χαμηλών τιμών συσχέτισης σε αυτό το σχήμα. Οι περιοχές αυτές σημειώνονται με λοξή διαγράμμιση και στα δύο σχήματα.



Σχήμα 2.4 Τυπικές φασματικές συναρτήσεις: a) διαφοράς φάσης, b) συσχέτισης (Nazarian et al., 1995)

Το πρώτο βήμα κατά την κατασκευή της καμπύλης διασποράς είναι η εύρεση της πραγματικής φάσης για κάθε συχνότητα. Προς αυτή την κατεύθυνση αριθμούνται οι κύκλοι 360 μοιρών που προηγούνται κάθε συχνότητας και στη συνέχεια προσθέτονται στο κλάσμα του εναπομείναντος κύκλου για την απόκτηση της πραγματικής φάσης. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται «ξετύλιγμα» (unfolding) της φάσης. Το διάγραμμα της φάσης του σχήματος 2.4 παρουσιάζεται ξανά στο σχήμα 2.5 μετά την πρόσθεση του κατάλληλου αριθμού κύκλων σε κάθε τιμή της φάσης. Για να γίνει κατανοητή η υπόψη διαδικασία φέρεται ως παράδειγμα το σημείο A το οποίο απεικονίζεται και στα δύο διαγράμματα. Στο διάγραμμα του σχήματος 2.4 η φάση που αντιστοιχεί σε αυτό το σημείο διαβάζεται ως 90 μοίρες ενώ η πραγματική φάση είναι 630 μοίρες και απεικονίζεται στο διάγραμμα του σχήματος 2.5.



Σχήμα 2.5 Πραγματική φάση του φάσματος διαφοράς φάσης (Nazarian et al, 1995)

Τα δεδομένα φάσης που χαρακτηρίζονται από χαμηλή συσχέτιση απορρίπτονται από την κατασκευή των καμπυλών διασποράς. Οι περιοχές που περικλείουν τα δεδομένα χαμηλής συσχέτισης επισημαίνονται με λοξή διαγράμμιση στα σχήματα 2.4 και 2.5 και τελικώς αποκλείονται από τους υπολογισμούς.

Για κάθε συχνότητα που δε διαγράφεται, υπολογίζονται οι ταχύτητες φάσης και τα μήκη κύματος με χρήση των εξισώσεων 2.1 έως 2.3. Η υπόψη διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις συχνότητες και τις αποστάσεις των δεκτών.

Τέλος, είναι αναγκαίος ο συνδυασμός των σημείων δεδομένων διασποράς των καταγραφών που συλλέγονται από όλες τις αποστάσεις των δεκτών. Συνήθως ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων δεδομένων ανέρχεται σε μερικές χιλιάδες. Αυτά τα δεδομένα πρέπει να συνδυαστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να αποκτηθεί μία αντιπροσωπευτική τελική καμπύλη διασποράς με λιγότερα σημεία δεδομένων (μερικές εκατοντάδες). Για τη χρήση μιας αυτοματοποιημένης ρουτίνας αντιστροφής, ο αριθμός των σημείων δεδομένων πρέπει να μειωθεί περαιτέρω σε μία τάξη των πενήντα με είκοσι σημείων. Η χρήση περισσότερων δεδομένων που προέρχονται από την ίδια καμπύλη διασποράς δεν παρέχει σημαντικά περισσότερες πληροφορίες για τη δομή της υποκείμενης επιφάνειας, μπορεί όμως να αυξήσει υπερβολικά το χρόνο υπολογισμού (Nazarian et al, 1995).

2.1.3 Θεωρητική καμπύλη διασποράς

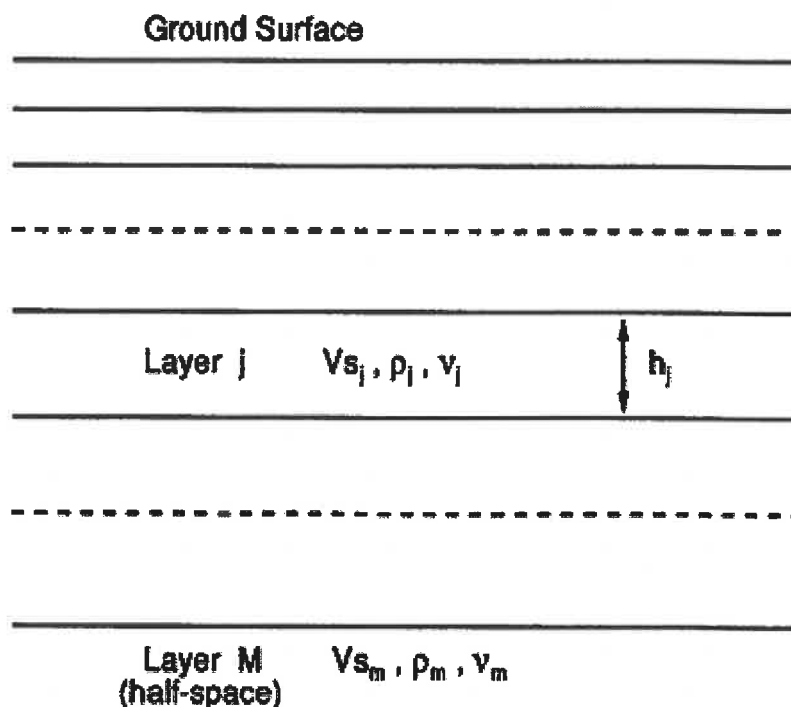
Κάθε τεχνική που στοχεύει στον καθορισμό του προφίλ της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων μιας περιοχής από μια πειραματική καμπύλη διασποράς περιλαμβάνει μία διαδικασία που ελαχιστοποιεί τη διαφορά μεταξύ της πειραματικής καμπύλης διασποράς και της αντίστοιχης θεωρητικής (theoretical dispersion curve) που υπολογίζεται για ένα δοκιμαστικό προφίλ (Nazarian et al, 1995).

Η διαδικασία αυτή ονομάζεται διαδικασία αντιστροφής γιατί τα σεισμικά δεδομένα (πειραματικές καμπύλες διασποράς) χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των παραμέτρων των υλικών σε αντίθεση με το ευθύ πρόβλημα όπου οι ιδιότητες των υλικών χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της απόκρισης του προσομοιώματος (Κρητικάκης, Βαφειάδης και Λούης, 2004).

Ο υπολογισμός της θεωρητικής καμπύλης διασποράς έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας, καθώς είναι ένα σημαντικό στάδιο της μεθόδου ΦΑΕΚ, και έχουν προταθεί αρκετές εναλλακτικές λύσεις για την πραγματοποίησή του.

Για να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός της θεωρητικής καμπύλης διασποράς απαιτείται η θεώρηση ενός προσομοιώματος σαν αυτό του σχήματος 2.6. Στο σχήμα αυτό απεικονίζεται μία εξιδανικευμένη διατομή ενός πολυστρωματικού συστήματος (όπως είναι και ένα οδόστρωμα). Για να εφαρμοστεί η θεωρία της διάδοσης κυμάτων σε αυτό το προφίλ, γίνονται δύο βασικές θεωρήσεις. Πρώτον, θεωρείται ότι στο πρόβλημα περιλαμβάνονται μόνο τα εντός επιπέδου κύματα έτσι ώστε αυτό να μπορεί να προσεγγιστεί σαν ένα πρόβλημα επίπεδης έντασης. Δεύτερον, θεωρείται ότι το πολυστρωματικό σύστημα αποτελείται από μία δέσμη από διαφορετικά επίπεδα με ομοιογενείς και ισοτροπικές ιδιότητες, καθώς και ότι κάθε στρώμα εκτείνεται οριζόντια στο άπειρο (σε σύγκριση με τη διάσταση της διάταξης πηγής-δέκτη). Οι επιπτώσεις αυτών των δύο θεωρήσεων είναι ασήμαντες στο εύρος της

δυσκαμψίας που μας ενδιαφέρει στη μηχανική των οδοστρωμάτων (από σκυρόδεμα έως μαλακά εδάφη στρώσης έδρασης). Με αυτές τις θεωρήσεις, η λύση της κυματικής εξίσωσης ανάγεται σε ένα απλό διδιάστατο πρόβλημα στο Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.



Σχήμα 2.6 Εξιδανικευμένη διατομή ενός πολυστρωματικού συστήματος (Nazarian et al., 1995)

Εκτός του αριθμού των στρωμάτων που αποτελούν το πολυστρωματικό σύστημα είναι απαραίτητος και ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων καθενός από αυτά. Οι παράμετροι που είναι απαραίτητες για τον καθορισμό αυτών των ιδιοτήτων είναι το πάχος(h), η ταχύτητα των διατμητικών (S-wave) κυμάτων (V_s), η ταχύτητα των διαμήκων (P-wave) κυμάτων (V_p) ή ο λόγος του Poisson (ν), και η πυκνότητα (ρ). Από όλες αυτές τις παραμέτρους η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων έχει την κυρίαρχη επίδραση στη διασπορά των επιφανειακών κυμάτων, ενώ οι επιπτώσεις της πυκνότητας και του λόγου του Poisson είναι μάλλον μικρές. Συνεπώς, για να απλοποιηθεί η διαδικασία αντιστροφής, μπορεί κάποιος να θεωρήσει ότι η πυκνότητα και ο λόγος του Poisson κάθε στρώματος είναι γνωστά. Η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων κάθε στρώματος είναι η μόνη ενεργή παράμετρος που πρέπει να καθορισθεί (Nazarian et al., 1989, Nazarian et al., 1995).

Μετά τον καθορισμό της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων είναι ευχερής ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας Young (E) και του μέτρου διάτμησης (G), καθώς τα τρία αυτά μεγέθη συνδέονται με την παρακάτω σχέση:

$$E=2G(1+\nu)=2\rho V_s^2(1+\nu) \quad (2.4)$$

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η θεωρητική λύση προσεγγίζει τα κύματα που παράγονται κατά τις μετρήσεις ΦΑΕΚ με μία διδιάστατη λύση για κύματα που διαδίδονται κατά μήκος της επιφάνειας ενός ελαστικού μέσου. Οι εξισώσεις οι οποίες πρέπει να επιλυθούν αποτελούν τις εξισώσεις κίνησης για τα Rayleigh κύματα (στο x-z επίπεδο) σε όρους μετακινήσεων, ισχύουν σε οποιοδήποτε σημείο ενός ελαστικού στρωματογενούς συστήματος και είναι οι εξής:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = M \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + (M - G) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} + G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.5)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = M \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + (M - G) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} + G \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (2.6)$$

όπου u = η οριζόντια μετακίνηση, w = η κάθετη μετακίνηση, t = ο χρόνος, M = το μέτρο πλευρικά περιορισμένης συμπίεσης, G = το μέτρο διάτμησης, και ρ = η πυκνότητα.

Τα παραπάνω μέτρα G και M συνδέονται με τις ταχύτητες των διατμητικών κυμάτων (V_s) και την ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων (V_p) με τις παρακάτω σχέσεις:

$$G = \rho(V_s)^2 \quad (2.7)$$

$$M = \rho(V_p)^2 \quad (2.8)$$

Το μέτρο πλευρικά περιορισμένης συμπίεσης συνδέεται με το μέτρο ελαστικότητας Young με τη σχέση:

$$E = \frac{(1 - \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} M \quad (2.9)$$

όπου ν ο λόγος του Poisson (Stokoe et al., 1994).

Η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων 2.5 και 2.6 είναι περίπλοκη και έχουν εφαρμοστεί πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις για την επίτευξή της. Η πρώτη θεωρητική λύση του προβλήματος αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας το '50 από τους Haskell και Thomson και είχε τη δυνατότητα εφαρμογής σε έναν αλγόριθμο υπολογιστή (Nazarian et al., 1989). Η τεχνική Haskell-Thomson στηρίζεται στη δημιουργία μητρώων για τα στρώματα του μοντέλου μας. Αυτά τα μητρώα συσχετίζουν τις συνιστώσες της μετακίνησης καθώς και τις συνιστώσες της τάσης που δρουν σε μία επιφάνεια με αυτές που συνδέονται με μία γειτονική διεπιφάνεια. Στη συνέχεια συσχετίζονται οι μετακινήσεις και οι τάσεις της ελεύθερης επιφάνειας με αυτές που δρουν στη βαθύτερη επιφάνεια του μοντέλου μας και τελικά κατασκευάζεται η θεωρητική καμπύλη διασποράς. Όπως αναφέρθηκε όμως και παραπάνω αυτός ο αλγόριθμος δεν αποτελεί τη μοναδική λύση για την κατασκευή της θεωρητικής καμπύλης.

2.1.4 Διαδικασία εμπρόσθιας ανάλυσης

Η διαδικασία εμπρόσθιας ανάλυσης (forward modeling) είναι μία μέθοδος απόκτησης του προφίλ της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων μιας περιοχής από τη μετρηθείσα καμπύλη διασποράς. Η διαδικασία εμπρόσθιας ανάλυσης περιλαμβάνει την υπόθεση ενός προφίλ ταχύτητας για την υπό μελέτη περιοχή και κατόπιν τον καθορισμό της θεωρητικής καμπύλης διασποράς όπως περιγράφηκε παραπάνω. Η θεωρητική καμπύλη διασποράς στη συνέχεια συγκρίνεται με την πειραματική καμπύλη διασποράς. Με βάση τη σύγκριση, το υποτιθέν προφίλ τροποποιείται από τον αναλυτή κατά τρόπο ώστε να βελτιώνεται η προσέγγιση των δύο καμπυλών και μία νέα θεωρητική καμπύλη διασποράς υπολογίζεται. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου η θεωρητική και η πειραματική καμπύλη διασποράς να προσεγγίζουν η μία την άλλη σε ικανοποιητικό βαθμό. Σε αυτό το σημείο, το υποτιθέν προφίλ αντιπροσωπεύει σε μεγάλο βαθμό το προφίλ της υπό μελέτη περιοχής (Stokoe et al., 1994).

3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι αρχικά η επισήμανση των διαφορών μεταξύ της εφαρμογής της μεθόδου ΦΑΕΚ στον τομέα των οδοστρωμάτων και σε θέματα γεωτεχνικής υποδομής και εν συνεχεία η αναφορά στις εφαρμογές και την εξέλιξη της μεθόδου στον εν λόγω τομέα.

3.1 Διαφοροποίηση της θεωρίας επιφανειακών κυμάτων μεταξύ εδαφών και οδοστρωμάτων

Η μέθοδος ΦΑΕΚ εφαρμόστηκε αρχικά στο γεωτεχνικό τομέα για την εκτίμηση εδαφικών παραμέτρων και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων. Κατά την ανάπτυξη της θεωρίας και των μεθόδων των επιφανειακών κυμάτων, έχει δοθεί μεγάλη προσοχή στην κατάσταση όπου η ακαμψία αυξάνει με το βάθος. Αυτή η κατάσταση καλύπτει τα περισσότερα γεωλογικά και γεωτεχνικά συστήματα. Σε αυτή την περίπτωση η διασπορά των επιφανειακών κυμάτων είναι γνωστή σαν κανονική διασπορά, στην οποία ισχύει ότι η ταχύτητα φάσης γενικά αυξάνει συνεχώς με το μήκος κύματος. Για την κανονική διασπορά, η ταχύτητα φάσης μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια σε κάθε συχνότητα ενδιαφέροντος χωρίς δυσκολία.

Σε σύγκριση με την παραπάνω κατάσταση, η διασπορά των κυμάτων Rayleigh σε ένα στρωματογενές σύστημα οδοστρωματικού τύπου, όπου η ακαμψία ή η ταχύτητα διατμητικών κυμάτων μειώνεται με το βάθος (τουλάχιστον στο εύρος του βάθους που μας ενδιαφέρει), είναι πιο περίπλοκη. Αυτή αναφέρεται ως αντίστροφη ή αντικανονική διασπορά σε αντιδιαστολή με την κανονική διασπορά. Για την αντικανονική διασπορά, η εξίσωση της διασποράς είναι γενικά πολύπλοκη. Σε αυτή την περίπτωση, το πεδίο διασποράς δεν είναι πλέον συνεχής συνάρτηση της συχνότητας ή του μήκους κύματος. Αυτό το χαρακτηριστικό έχει δείχθει στα αποτελέσματα από διαφορετικές προσεγγίσεις ανάλυσης. Η καμπύλη διασποράς αποτελείται από κλάδους και δεν είναι συνεχής. Οι κλάδοι μιας καμπύλης διασποράς περιέχουν σαφείς πληροφορίες για τη διαστρωμάτωση, και τις χαρακτηριστικές ταχύτητες διατμητικών και διαμήκων κυμάτων ενός στρωματογενούς συστήματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο αριθμός αυτών των κλάδων είναι ίσος με τον αριθμό των διακριτών στρωμάτων του συστήματος. Είναι αναμενόμενο ότι αν οι κλάδοι σε μία πειραματική καμπύλη διασποράς είναι καλά ορισμένοι, οι ιδιότητες των στρωμάτων μπορούν να καθοριστούν καλά.

Ο τελικός στόχος της δοκιμής ΦΑΕΚ είναι να παρέχει ένα προφίλ ταχύτητας ή μέτρου ελαστικότητας μέσω μιας διαδικασίας που ελαχιστοποιεί (με βάση ορισμένα κριτήρια) τη διαφορά μεταξύ της πειραματικής καμπύλης διασποράς και της θεωρητικής καμπύλης που υπολογίζεται από ένα δοκιμαστικό προφίλ. Σε πολλές περιπτώσεις, όμως, οι κλάδοι μιας πειραματικής καμπύλης διασποράς δεν είναι εύκολα αναγνωρίσιμοι και δεν είναι εύκολο να καταλήξει κανείς σε μια ομαλοποιημένη πειραματική καμπύλη διασποράς που να είναι καλώς ορισμένη. Αυτό συμβαίνει κυρίως για τρεις λόγους: 1) λόγω της ετερογένειας των στρωμάτων σε ένα οδόστρωμα, 2) λόγω των επιπτώσεων της ανάκλασης των κυμάτων και 3) λόγω της χρήσης των διαδικασιών φιλτραρίσματος κατά την ελάττωση των δεδομένων. Συνεπώς, μία δυσκολία που κάποιος πρέπει να αντιμετωπίσει είναι με ποιο τρόπο θα ταιριάσει μία θεωρητική καμπύλη διασποράς με κλάδους ή ασυνέχειες με μία ομαλή πειραματική καμπύλη διασποράς. Η κατάσταση γίνεται πιο κρίσιμη όταν η αντιστροφή διεξάγεται μέσω μιας αυτοματοποιημένης επαναληπτικής διαδικασίας. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, είναι επιθυμητή η γνώση των χαρακτηριστικών της θεωρητικής καμπύλης διασποράς για τις τυπικές οδοστρωματικές δομές (Nazarian et al, 1995).

3.2 Βιβλιογραφική αναδρομή

Από τη στιγμή που εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στον τομέα των οδοστρωμάτων η μέθοδος ΦΑΕΚ έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτενούς έρευνας η οποία, παρά το γεγονός ότι ασχολήθηκε και με τη διαδικασία συλλογής των δεδομένων πεδίου, εστιάστηκε κυρίως στο στάδιο της επεξεργασίας των μετρήσεων. Ένα ζήτημα που απασχόλησε σε μεγάλο βαθμό τους ερευνητές ήταν η ανάλυση αντιστροφής καθώς αποτελεί ένα σημαντικό και απαιτητικό βήμα κατά την επεξεργασία των μετρήσεων. Για αυτό το λόγο έχουν προταθεί πολλές και διαφορετικές μέθοδοι για την πραγματοποίησή της.

3.2.1 Εξέλιξη της μεθόδου ΦΑΕΚ στα οδοστρώματα

Το 1989 αποδείχθηκε ότι η θεωρητική καμπύλη ενός στρωματογενούς ημίχωρου μπορεί να καθοριστεί με μία διαφορετική μέθοδο από την τεχνική Haskell-Thomson, η οποία κυρίως χρησιμοποιούταν μέχρι τότε, ενώ για τον ανάστροφο υπολογισμό των παχών και των μέτρων ελαστικότητας του οδοστρωματικού συστήματος προτάθηκε η τεχνική ενός αλγόριθμου που έχει το σημαντικό πλεονέκτημα της εξάλειψης της ανάγκης του καθορισμού των παχών του οδοστρώματος εκ των προτέρων (Hossain and Drnevich, 1989).

Αργότερα, παρουσιάστηκε ένας επιπλέον νέος αλγόριθμος αντιστροφής που επιτρέπει την πιο ευχερή εκτίμηση του μέτρου της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων και του πάχους των στρωμάτων ενός οδοστρώματος αλλά δεν έχει τη δυνατότητα να αναλύσει σύνθετα οδοστρώματα (Nazarian et al., 1995).

Τα Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Network: ANN) αποτελούν επίσης μία εναλλακτική λύση για τη διαδικασία αντιστροφής. Η μέθοδος αυτή ενσωματώθηκε σε έναν αλγόριθμο πρόβλεψης ο οποίος για να καταλήξει στην πρόβλεψη του μέτρου ελαστικότητας των στρωμάτων χρησιμοποιεί μετρήσεις από αμφότερες τις δοκιμές FWD και επιφανειακών κυμάτων και στη συνέχεια εφαρμόζει αριθμητικές λύσεις ενός πολυστρωματικού ημίχωρου, οι οποίες βασίζονται στα Νευρωνικά Δίκτυα για τη διαδικασία αντιστροφής (Kim and Kim, 2000). Τα Νευρωνικά Δίκτυα χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία αντιστροφής και μεταγενέστερα στην ανάπτυξη κάποιων μοντέλων για την προβλέψη του πάχους και της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων κάθε στρώσης ενός οδοστρώματος. Τα προφίλ που προέκυψαν από την ανάλυση ταυτίζονταν σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό με τα επιθυμητά (Wu et al., 2002). Με τα ANN επετεύχθη σημαντική πρόοδος ώστε να καταστεί δυνατή η αυτοματοποίηση αντιστροφής των δεδομένων που προέρχονται από τη μέθοδο ΦΑΕΚ.

Στην προσπάθεια καλύτερης προσέγγισης της θεωρητικής καμπύλης εξετάστηκε και η προσέγγιση κυμάτων Lamb, η οποία αποτελεί μία εναλλακτική έναντι της παραδοχής ότι τα κύματα Rayleigh είναι ο επικρατών τύπος κυμάτων που παράγονται. Ερευνήθηκε το ακριβές σφάλμα που περιλαμβάνεται στην εν λόγω προσέγγιση και αποδείχθηκε ότι είναι απόλυτα σωστή μόνο στην περίπτωση που η ακαμψία αυξάνει ομαλά με το βάθος (Ryden, 2004).

Στην προσπάθεια να ξεπεραστούν τα προβλήματα και τα μειονεκτήματα της μεθόδου ΦΑΕΚ πραγματοποιήθηκε και συνδυασμός της με άλλες μεθόδους. Η τεχνική Enhanced Resonance Search (ERS) συνδυάζει τη μέθοδο ΦΑΕΚ και της μέθοδο αντήχησης (resonance) και επιτυγχάνει μεγαλύτερη ακρίβεια στον καθορισμό του πάχους των στρωμάτων του οδοστρώματος (Joh et al., 2008).

Παρουσιάστηκε επίσης και η μέθοδος ασαφούς λογικής η οποία για να καταλήξει σε ένα πιο ακριβές και ορθό αποτέλεσμα ως προς το προκύπτον προφίλ του οδοστρώματος, συνδυάζει τα αποτελέσματα που προκύπτουν από διαφορετικές συσκευές διεξαγωγής μετρήσεων, συμπεριλαμβανομένου και του Seismic Pavement Analyzer (SPA) του οποίου η λειτουργία βασίζεται στη μέθοδο ΦΑΕΚ (Abdallah et al., 2009).

3.2.2 Ευαισθησία της μεθόδου στις παραμέτρους του αρχικού μοντέλου

Το 1999 πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις σε ένα εύρος υψηλών συχνοτήτων (5-30Hz) από τις οποίες και αποδείχθηκε ότι ο λόγος της επί τοις εκατό μεταβολής στις ταχύτητες φάσης των επιφανειακών κυμάτων ως προς την επί τοις εκατό μεταβολή στην ταχύτητα των S κυμάτων, το πάχος των στρωμάτων, την πυκνότητα, ή την ταχύτητα των P κυμάτων είναι 1.56, 0.64, 0.4, ή 0.13, αντίστοιχα. Συνεπώς, η ταχύτητα των S κυμάτων είναι η κυρίαρχη παράμετρος

που επηρεάζει τις μεταβολές στην ταχύτητα φάσης των κυμάτων Rayleigh στο εύρος υψηλών συχνοτήτων (>5 Hz) (Xia et al., 1999).

3.2.3 Σύγκριση με Άλλες Μεθόδους

Στα πλαίσια της έρευνας πραγματικές μετρήσεις που έγιναν με τη μέθοδο ΦΑΕΚ συγκρίθηκαν με άλλες αξιόπιστες μεθόδους.

3.2.3.1 Σύγκριση με Δοκιμή Crosshole

Το 1982 έπειτα από σύγκριση της μεθόδου ΦΑΕΚ με τη δοκιμή Crosshole και διαπιστώθηκε ότι οι ταχύτητες από τις (επιφανειακές) μετρήσεις φάσματος διαφοράς φάσης δε διέφεραν από τις Crosshole ταχύτητες περισσότερο από 20% κατά μέγιστο και ότι ήταν τυπικά εντός του 10% (Stokoe et al., 1982).

Το 1989 μετά την διεξαγωγή μετρήσεων με τις μεθόδους ΦΑΕΚ και Crosshole στην ίδια διατομή ενός οδοστρώματος ακολούθησε ανάλυση των δεδομένων πεδίου και σύγκριση των προφίλ των μέτρων ελαστικότητας που προέκυψαν από τις δύο μεθόδους. Διαπιστώθηκε ότι η απόκλιση των υπόψη προφίλ ήταν τυπικά εντός του 25% (Nazarian et al., 1989).

3.2.3.2 Σύγκριση με FWD

Το 1989 συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα από δοκιμές ΦΑΕΚ και FWD που πραγματοποιήθηκαν στο ίδιο οδόστρωμα περίπου την ίδια χρονική περίοδο. Για τα μέτρα ελαστικότητας που υπολογίστηκαν μέσω ανάστροφου υπολογισμού ακολουθήθηκαν δύο διαφορετικές στρατηγικές. Κατά την πρώτη στρατηγική η παρουσία του υποκείμενου βράχου αγνοήθηκε ενώ στη δεύτερη ένα άκαμπτο στρώμα τοποθετήθηκε σε βάθος 1.7 m. Αποδείχθηκε ότι όταν ο υποκείμενος βράχος αγνοείται τα μέτρα ελαστικότητας που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους είναι περίπου ίσα ενώ στην αντίθετη περίπτωση υπάρχουν αποκλίσεις ιδιαίτερες στο στρώμα της βάσης (Nazarian et al., 1989).

Το 1995 πραγματοποιήθηκε επίσης σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάλυσης μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με τις μεθόδους ΦΑΕΚ και FWD στο ίδιο οδόστρωμα και στην ίδια χρονική περίοδο. Κατά την ανάλυση με τη μέθοδο ΦΑΕΚ ως δεδομένα για τη διαστρωμάτωση χρησιμοποιήθηκαν τα πάχη των κατασκευαστικών σχεδίων του οδοστρώματος ενώ κατά τον ανάστροφο υπολογισμό των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά προφίλ διαστρωμάτωσης. Στο πρώτο προφίλ χρησιμοποιήθηκαν τα πάχη από τα κατασκευαστικά σχέδια, στο δεύτερο τα πάχη που προέκυψαν ως αποτέλεσμα της ανάλυσης των μετρήσεων της δοκιμής ΦΑΕΚ και στο τρίτο τα πάχη που προέκυψαν από γεώτρηση του οδοστρώματος. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης των μέτρων ελαστικότητας

που προέκυψαν από τις δύο μεθόδους διαφέρουν για καθένα από τα τρία προφίλ ενώ μεταβολές υπάρχουν και για τα επιμέρους στρώματα κάθε προφίλ (Nazarian et al., 1995).

Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις η έρευνα περιορίστηκε στην απλή σύγκριση των μέτρων ελαστικότητας, τα οποία προέκυψαν από ανάλυση των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με τις μεθόδους ΦΑΕΚ και FWD, και δεν κατέληξε σε κάποια μεταξύ τους αριθμητική συσχέτιση.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί πως ενώ η μέθοδος ΦΑΕΚ τυγχάνει ευρείας αποδοχής ως εργαλείο για τον ταχύ και χαμηλού κόστους γεωτεχνικό χαρακτηρισμό των εδαφών, η εφαρμοσιμότητά της στην αξιολόγηση όλων των τύπων των οδοστρωμάτων (εύκαμπτων, δύσκαμπτων και σύνθετων) είναι ασαφής και αποτελεί ακόμα αντικείμενο έρευνας.

4 ΣΚΟΠΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή του σκοπού και του σχεδιασμού του πειράματος στα πλαίσια της οποίας γίνεται και μία αναφορά στην αρχή λειτουργίας του FWD και στη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού.

4.1 Σκοπός πειράματος

Το πείραμα είχε ως στόχο την αξιολόγηση της μεθόδου ΦΑΕΚ ως μη καταστροφική μέθοδο προσδιορισμού της ακαμψίας και του πάχους των στρωμάτων ενός πραγματικού οδοστρώματος. Μέσω του πειράματος εντοπίστηκαν οι δυσκολίες και τα μειονεκτήματα της μεθόδου κατά τις διαδικασίες των μετρήσεων, της επεξεργασίας και ανάλυσης των δεδομένων και της ερμηνείας των αποτελεσμάτων. Για την περαιτέρω διερεύνηση των δυνατοτήτων της μεθόδου ΦΑΕΚ αναπτύχθηκαν διαφορετικά θεωρητικά πρότυπα ανάλυσης και ακολούθησε σύγκριση των αποτελεσμάτων τους. Επίσης χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των αναλύσεων που προέκυψαν από τις επιτόπου μη καταστροφικές μετρήσεις με τη μέθοδο FWD ως αναφορά, ήταν δυνατή η σύγκριση τη μεθόδου ΦΑΕΚ με μία άλλη αξιόπιστη μέθοδο. Κατά συνέπεια, μελετήθηκε κατά πόσο η μέθοδος ΦΑΕΚ μπορεί να αποτελέσει μία ακριβή και αποτελεσματική μέθοδο για την αξιολόγηση των οδοστρωμάτων.

4.2 Περιγραφή Πειράματος

Στις 20/11/2008 πραγματοποιήθηκαν επιτόπου μη καταστροφικές μετρήσεις σε πιλοτικό τμήμα της εθνικής οδού Αθηνών-Λαμίας, στην περιοχή του Αγ.Στεφάνου με χρήση της μεθόδου ΦΑΕΚ και της μεθόδου FWD. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε υφιστάμενες διατομές σύνθετου οδοστρώματος που έχει ανακατασκευασθεί με τη μέθοδο της ψυχρής ανακύκλωσης και αποτελείται από τις εξής στρώσεις: 1) ενοποιημένες στρώσεις ασφαλτικού σκυροδέματος (AC), 2) ενοποιημένες ανακυκλωμένες στρώσεις με χρήση αφρώδους ασφάλτου (foamed asphalt) και 3) ενοποιημένη στρώση ασύνδετων αμμοχάλικων όπως απεικονίζεται και στο στατικό πρότυπο σχήματος 4.1.



Σχήμα 4.1 Στατικό πρότυπο του υπό εξέταση οδοστρώματος

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τη μέθοδο ΦΑΕΚ. Για την πρώτη διατομή πραγματοποιήθηκαν 4 μετρήσεις για αποστάσεις πηγής – πρώτου δέκτη ίσες με 5 m, 2 m, 1 m και 6 m αντίστοιχα. Για τις υπόλοιπες 12 κάθε δοκιμή αποτελείτο από δύο μετρήσεις: μία για απόσταση πηγής – πρώτου δέκτη ίση με 5 m και μία για απόσταση ίση με 6 m καθώς παρατηρήθηκε ότι τα δεδομένα που προέκυψαν χρησιμοποιώντας αυτή τη διάταξη πηγής-δέκτη ήταν καλύτερα.

Οι διατάξεις πηγής-δεκτών που συνήθως χρησιμοποιούνται στα οδοστρώματα κατά τη δοκιμή ΦΑΕΚ είναι οι ακόλουθες δύο: η Διάταξη Δέκτη με Κοινό Σημείο στο Μέσο (Common Receiver Midpoint Array: CRMA) και η Διάταξη Κοινής Πηγής (Common Source Array: CSA). Στην πρώτη διάταξη επιλέγεται μία φανταστική κεντρική γραμμή μεταξύ των δύο δεκτών και στη συνέχεια οι δέκτες μετακινούνται μακριά από αυτή τη γραμμή με ίσο βήμα, ενώ η πηγή μετακινείται με τέτοιο τρόπο ώστε η απόστασή της από τον κοντινότερο δέκτη να είναι ίση με την απόσταση των δύο δεκτών. Η δεύτερη διάταξη χρησιμοποιεί ίδιο διαστηματικό διαχωρισμό μεταξύ της πηγής και του πρώτου δέκτη και μεταξύ των δύο δεκτών (Nazarian et al., 1989). Έχει βρεθεί πειραματικά ότι οι καμπύλες διασποράς που προκύπτουν από τις δύο αυτές διατάξεις είναι παρεμφερείς (Hiltunen and Woods, 1989).

Σε όλες τις μετρήσεις η απόσταση μεταξύ των γεώφωνων ήταν 0.25 m. Συνήθως σε ένα οδοστρώμα πραγματοποιούνται δοκιμές για αποστάσεις των δεκτών που κυμαίνονται από 0.15 m (0.5 ft) μέχρι 2.5 m - 5 m (8 με 16 ft), (Nazarian et al., 1989).

Με την ολοκλήρωση των δοκιμών της μεθόδου ΦΑΕΚ ακολούθησαν μη καταστροφικές μετρήσεις με το σύστημα FWD στις ίδιες διατομές. Στη συνέχεια ακολούθησε ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων που προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις της δοκιμής ΦΑΕΚ με χρήση κατάλληλου λογισμικού. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον ανάστροφο υπολογισμό των δεδομένων που αποκτήθηκαν με το σύστημα FWD. Σε αυτό το σημείο κρίνεται χρήσιμη μία συνοπτική περιγραφή της αρχής λειτουργίας του FWD .

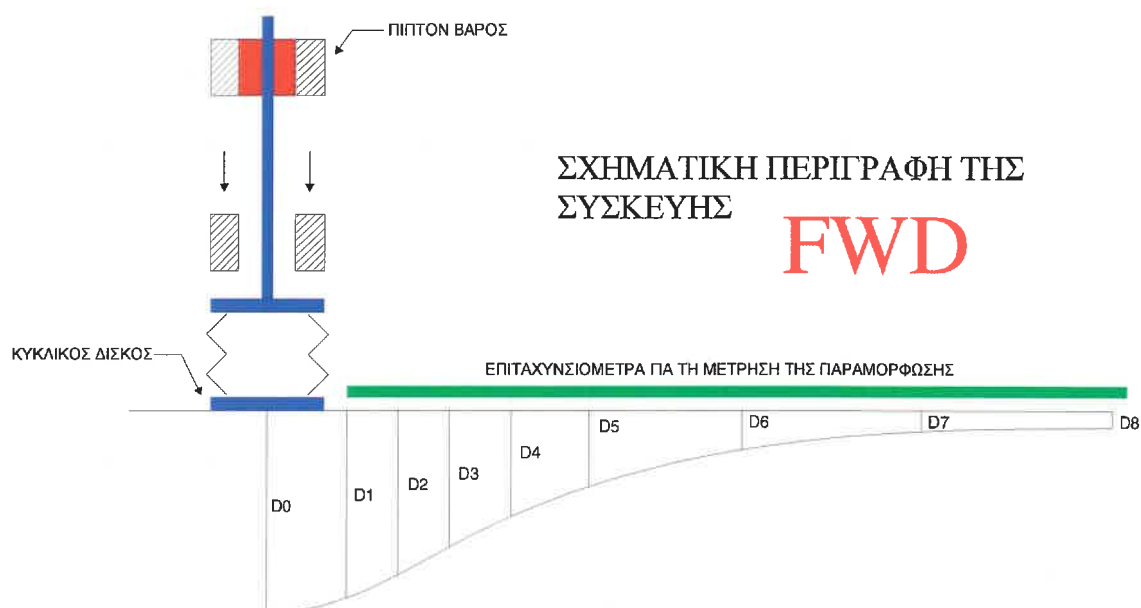
4.2.1 Αρχή λειτουργίας Παραμορφωσιμόμετρου Πίπτοντος Βάρους (FWD)

Τα συστήματα συλλογής στοιχείων με σκοπό την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο επιβολής του φορτίου επί του οδοστρώματος και τη μεθοδολογία καταγραφής των μετρήσεων. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα συστήματα που επιβάλλουν στατικό φορτίο στην επιφάνεια του οδοστρώματος και καταγράφουν τη μέγιστη τυπική υποχώρηση, που επέρχεται στο οδόστρωμα. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα συστήματα που επιβάλλουν δυναμικό (κρουστικό) φορτίο στην επιφάνεια του οδοστρώματος και καταγράφουν σε διάφορες αποστάσεις από το φορτίο τις ελαστικές υποχωρήσεις που επέρχονται στο οδόστρωμα. Χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό διαφόρων παραμέτρων όπως το μέτρο ελαστικότητας των στρώσεων, πιθανές ρηγματώσεις σε δύσκαμπτα κυρίως οδοστρώματα κλπ. Οι μετρήσεις των ελαστικών υποχωρήσεων πραγματοποιούνται με ειδικά μικρόμετρα, που απέχουν μεταξύ τους συνήθως 20-40 cm. Το πλέον αντιπροσωπευτικό και ευρέως χρησιμοποιούμενο και αποδεκτό διεθνώς σύστημα αυτής της κατηγορίας είναι το Παραμορφωσιμόμετρο Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer: FWD).

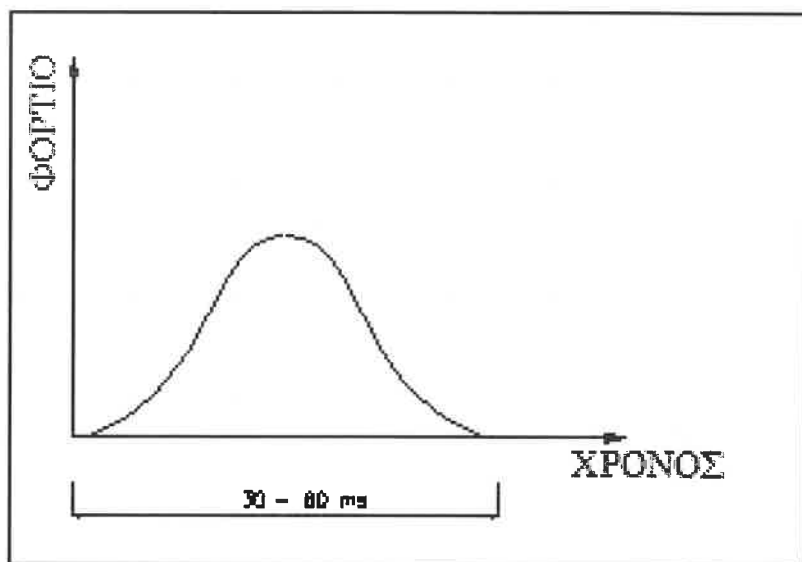
Το σύστημα FWD του ΕΜΠ (Dynatest 2001) (σχήμα 4.2) χρησιμοποιείται για την καταγραφή στοιχείων του οδοστρώματος, με σκοπό την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του. Αναλυτικότερα, η βασική λειτουργία του Συστήματος FWD περιγράφεται από το βάρος που πέπτει κάθετα (falling weight) υπό την επίδραση της βαρύτητας (σχήμα 4.3). Το βάρος αυτό πέφτοντας προσκρούει σε μια ειδικά σχεδιασμένη επιφάνεια και δημιουργεί μια παλμική φόρτιση που μεταβιβάζεται σε ένα κυκλικό δίσκο, ο οποίος βρίσκεται σε επαφή με το οδόστρωμα. Με αυτό τον τρόπο η συσκευή επιβάλλει στο οδόστρωμα τη φόρτιση που παρουσιάζεται στο διάγραμμα του σχήματος. Η φόρτιση αυτή του οδοστρώματος, η οποία διαρκεί συνήθως 25 – 30 msec ή 45 – 60 msec (ανάλογα με τη συσκευή και το υλικό που επιβάλλεται η φόρτιση), προσομοιάζει σε μεγάλο βαθμό την πραγματική φόρτιση του οδοστρώματος, λόγω της διέλευσης ενός άξονα οχήματος (σχήμα 4.4). Για παράδειγμα, η φόρτιση λόγω της διέλευσης φορτηγού με ταχύτητα 50 km/h διαρκεί περίπου 20 ms.



Σχήμα 4.2 Το σύστημα FWD του ΕΜΠ



Σχήμα 4.3 Σκαρίφημα εκτέλεσης μέτρησης με το FWD (Λοΐζος και Σαριδάκης, 1994)



Σχήμα 4.4 Περιγραφή φόρτισης (Λοΐζος και Σαριδάκης, 1994)

Η προσομοίωση της πραγματικής φόρτισης του οδοστρώματος είναι και το μεγαλύτερο πλεονέκτημα εφαρμογής επιτόπου δοκιμών με το FWD (Λοΐζος και Σαριδάκης, 1994). Κατά τη διάρκεια της φόρτισης που προκαλεί το FWD στο οδόστρωμα, καταγράφονται οι μέγιστες ελαστικές υποχωρήσεις κάτω από το φορτίο και σε ορισμένες αποστάσεις από αυτό. Οι ελαστικές υποχωρήσεις ως δεδομένο, σε συνδυασμό και με άλλα στοιχεία (π.χ. πάχη στρώσεων, αποτελέσματα εξειδικευμένων εργαστηριακών δοκιμών κλπ.) είναι δυνατό να δώσουν πολύ ικανοποιητική πληροφόρηση για τη δομική συμπεριφορά των οδοστρωμάτων. Παράλληλα, με τις καταγραφές των ελαστικών παραμορφώσεων, πραγματοποιούνται συστηματικές μετρήσεις θερμοκρασίας. Τα στοιχεία αυτά είναι απαραίτητα για τις σχετικές διερευνήσεις, δεδομένου ότι τα μηχανικά χαρακτηριστικά και η συμπεριφορά των ασφαλτομιγμάτων και κατ' επέκταση των οδοστρωμάτων, επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία.

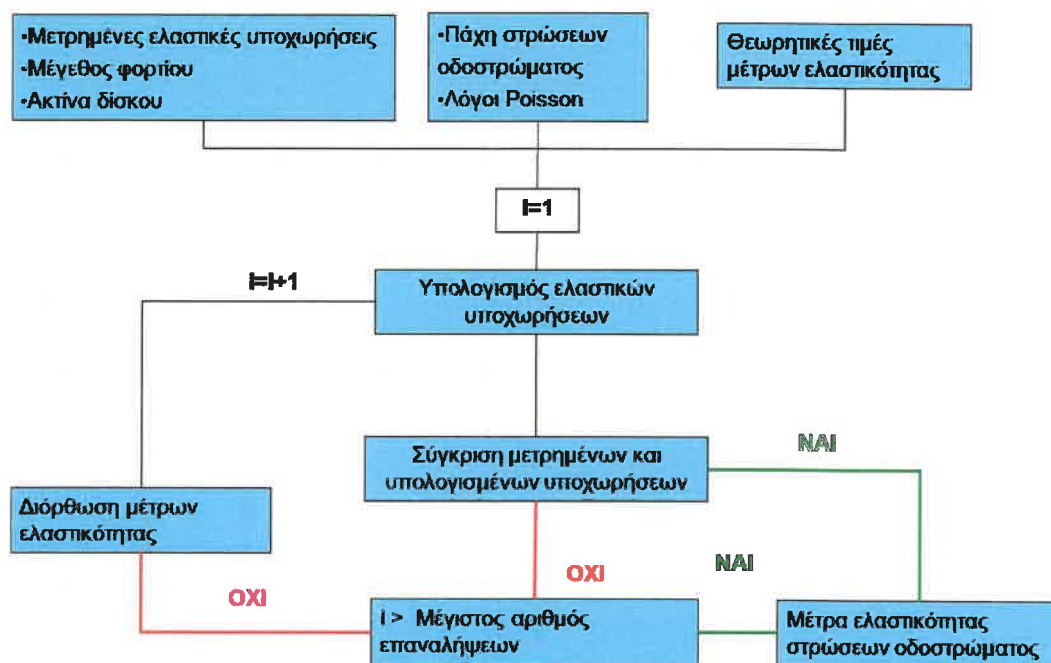
Τα δεδομένα που προκύπτουν από μετρήσεις του οδοστρώματος με το FWD μπορούν να συνδυαστούν με άλλα στοιχεία του για τον προσδιορισμό της δομικής του κατάστασης. Συγκεκριμένα, απαιτείται ο προσδιορισμός του πάχους των στρώσεων του, καθώς και άλλα στοιχεία, όπως είναι τα υλικά κατασκευής του οδοστρώματος, οι κυκλοφοριακοί φόρτοι και τα θερμοκρασιακά δεδομένα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

4.2.2 Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού

Για την αξιολόγηση της δομικής επάρκειας κάθε οδικού τμήματος απαιτείται μία πολύπλοκη διαδικασία εκτίμησης των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών των επιμέρους στρώσεων. Χρησιμοποιώντας τα στοιχεία που προέκυψαν από τις μετρήσεις με το σύστημα FWD αλλά και το σύνολο των στοιχείων που υπολογίστηκαν ή μετρήθηκαν επί τόπου (πάχη,

θερμοκρασίες κλπ.) ενεργοποιούνται οι αλγόριθμοι ανάστροφου υπολογισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών για την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών των επιμέρους στρώσεων και της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος.

Για τη λειτουργία αλγορίθμων ανάστροφου υπολογισμού χρησιμοποιούνται κατάλληλα προσομοιώματα οδοστρωμάτων. Η συνολική διαδικασία ανάλυσης χαρακτηρίζεται από ένα διάγραμμα ροής αποτελούμενο από διαδοχικούς κύκλους υπολογισμών (σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5 Διάγραμμα ροής ανάστροφων υπολογισμών (Λοΐζος και Σαριδάκης, 1994)

5 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΦΑΕΚ

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται η διαδικασία των μετρήσεων και της συλλογής των δεδομένων με τη μέθοδο ΦΑΕΚ.

5.1 Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός με τον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις αποτελείται από:

1) Μονάδα ελέγχου συστήματος επιφανειακών κυμάτων. Στη μονάδα ελέγχου μεταβιβάζονται τα δεδομένα από τα γεώφωνα και υπολογίζεται η διαφορά φάσης μεταξύ τους. Τα δεδομένα της διαφοράς φάσης στη συνέχεια μεταβιβάζονται από τη μονάδα ελέγχου στον υπολογιστή και χρησιμοποιούνται για περαιτέρω υπολογισμούς (σχήμα 5.1).



Σχήμα 5.1 Μονάδα ελέγχου συστήματος επιφανειακών κυμάτων (www.gdsinstruments.com)

2) 6 γεώφωνα 2 Hz τα οποία συνδέονται μέσω καλωδίου. Τα γεώφωνα έχουν ύψος 5 cm και διάμετρο 6 cm ενώ οι συνδέσεις μεταξύ τους μπορούν να έχουν απόσταση από 0 έως 2 m. (σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.2 Γεώφωνο

3) Σφυρί και δίσκο κρούσης. Το σφυρί αποτελεί την πηγή παραγωγής επιφανειακών κυμάτων (σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3 Σφυρί και δίσκος κρούσης

4) Λογισμικό καταγραφής δεδομένων ΦΑΕΚ. Το λογισμικό ελέγχει τη διαδικασία απόκτησης δεδομένων από τα γεώφωνα και χρησιμοποιεί μετασχηματισμούς Fast Fourier για να μετρήσει τη διαφορά φάσης μεταξύ τους. Από το σύνολο των δεδομένων από τα γεώφωνα το πρόγραμμα υπολογίζει την ταχύτητα των κυμάτων Rayleigh. Η ελαστική θεωρία χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τον υπολογισμό του μέτρου διάτμησης. Το πρόγραμμα παρέχει on line διαγράμματα του μέτρου διάτμησης συναρτήσει του βάθους (CSWS/SASW Handbook).

5.2 Πραγματοποίηση Δοκιμής

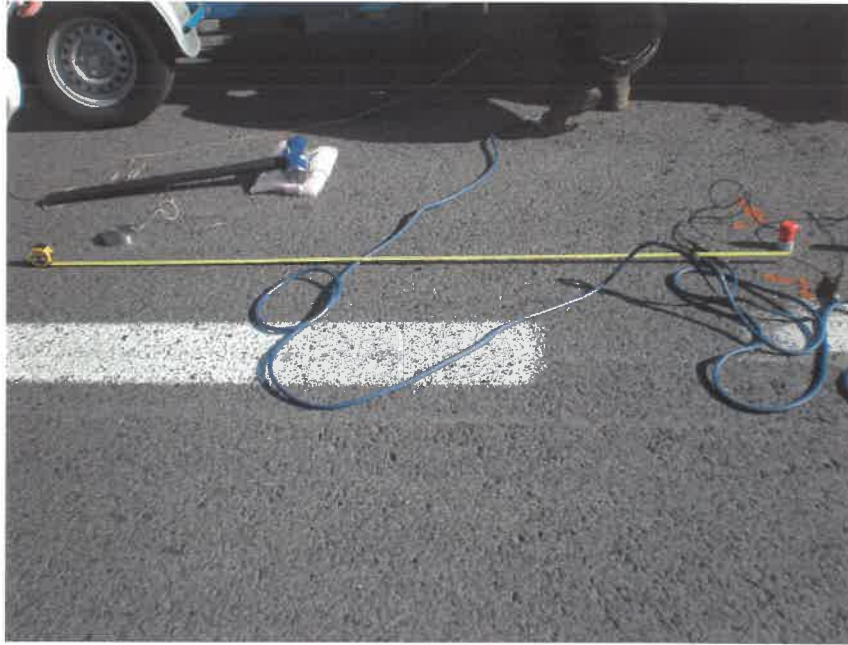
5.2.1 Διάταξη της Δοκιμής

Αφού πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες συνδέσεις μεταξύ των στοιχείων του εξοπλισμού (σύνδεση της μονάδας ελέγχου με τα γεώφωνα, την πηγή και τον υπολογιστή) όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.4, ακολούθησε η τοποθέτηση των γεωφώνων στις προκαθορισμένες τους θέσεις.

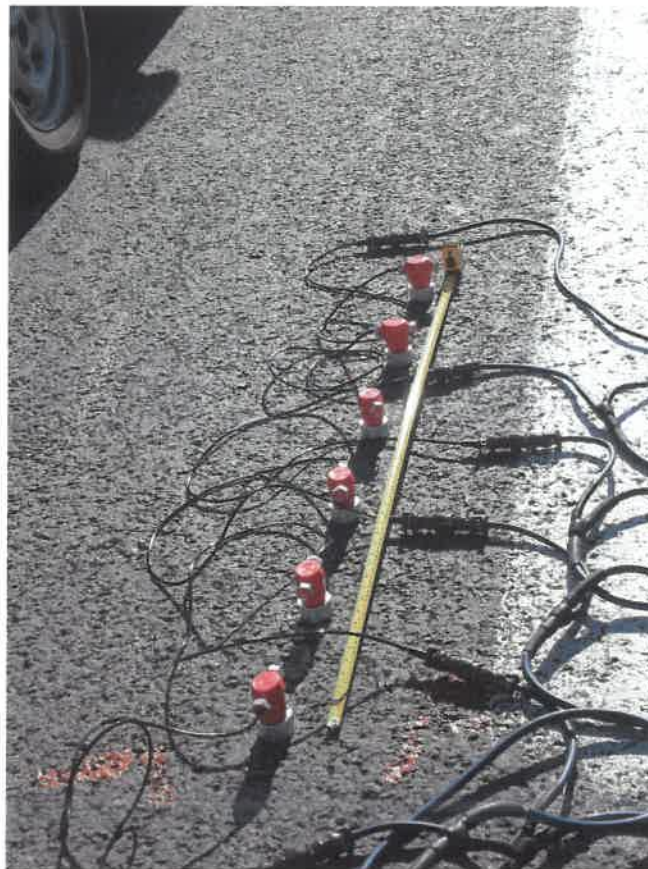


Σχήμα 5.4 Σύνδεση της μονάδας ελέγχου με τον υπολογιστή

Η απόσταση πηγής – πρώτου δέκτη για την πρώτη δοκιμή ορίστηκε ίση με 5 m (σχήμα 5.5). Η απόσταση μεταξύ των γεωφώνων ήταν ίση με 0.25m (σχήμα 5.6).



Σχήμα 5.5 Διάταξη πηγής – πρώτου δέκτη



Σχήμα 5.6 Διάταξη γεωφώνων

Επειδή το σύστημα χρησιμοποιεί μία διάταξη από 6 γεώφωνα η επιλογή της απόστασης μεταξύ των γεωφώνων δεν είναι κρίσιμη σε αντιδιαστολή με την περίπτωση που γίνεται χρήση μόνο 2 δεκτών. Το λογισμικό εκτελεί αυτόματα μία προσαρμογή βάσει της καμπύλης

ελαχίστων τετραγώνων στα αποτελέσματα από τα 6 γεώφωνα για να υπολογίσει τη μέση διαφορά φάσης ως προς την απόσταση (μοίρες/μέτρα) (CSWS/SASW Handbook).

5.2.2 Ρυθμίσεις λογισμικού

Πριν την έναρξη κάθε δοκιμής ρυθμίζονται επιλογές που αφορούν τη διαταραχή, τα γεώφωνα, τη συσσώρευση και την αποθήκευση των δεδομένων. Όσο αφορά στη διαταραχή, επελέγη η διαταραχή εξ αποστάσεως καθώς έχουμε έλεγχο της κρουστικής πηγής. Για τα γεώφωνα ορίζεται η απόσταση του καθενός από την πηγή και το ότι όλα θα είναι όλα ενεργά. Ως προς τη συσσώρευση των δεδομένων επελέγη αυτή να μη γίνεται αυτόματα ώστε υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μετά από κάθε εφαρμογή αν τα δεδομένα θα ληφθούν υπόψη ή όχι. Επίσης επελέγη τα αποκτώμενα δεδομένα να συσσωρεύονται με βάση τη συχνότητα και όχι το χρόνο. Η χειρονακτική επιλογή των φασματικών συχνοτήτων που θα λαμβάνονται τελικά υπόψη κρίθηκε προτιμότερη. Ως προς την αποθήκευση των δεδομένων επελέγη εκείνη η εναλλακτική που περιελάμβανε ως πληροφορίες τις ξεχωριστές γωνίες φάσης για κάθε γεώφωνο και ένα υπολογισθέν επίπεδο συσχέτισης.

5.2.3 Παραγωγή επιφανειακών κυμάτων

Ως πηγή κατά τη δοκιμή ΦΑΕΚ μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιος μηχανισμός παραγωγής είτε μόνιμων επιφανειακών κυμάτων είτε κυμάτων μεταβατικής φύσεως (π.χ. πτώση βάρους από συγκεκριμένο ύψος στο έδαφος). Στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε για την παραγωγή επιφανειακών κυμάτων χρησιμοποιήθηκε κρουστική πηγή όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7 Διαδικασία παραγωγής επιφανειακών κυμάτων

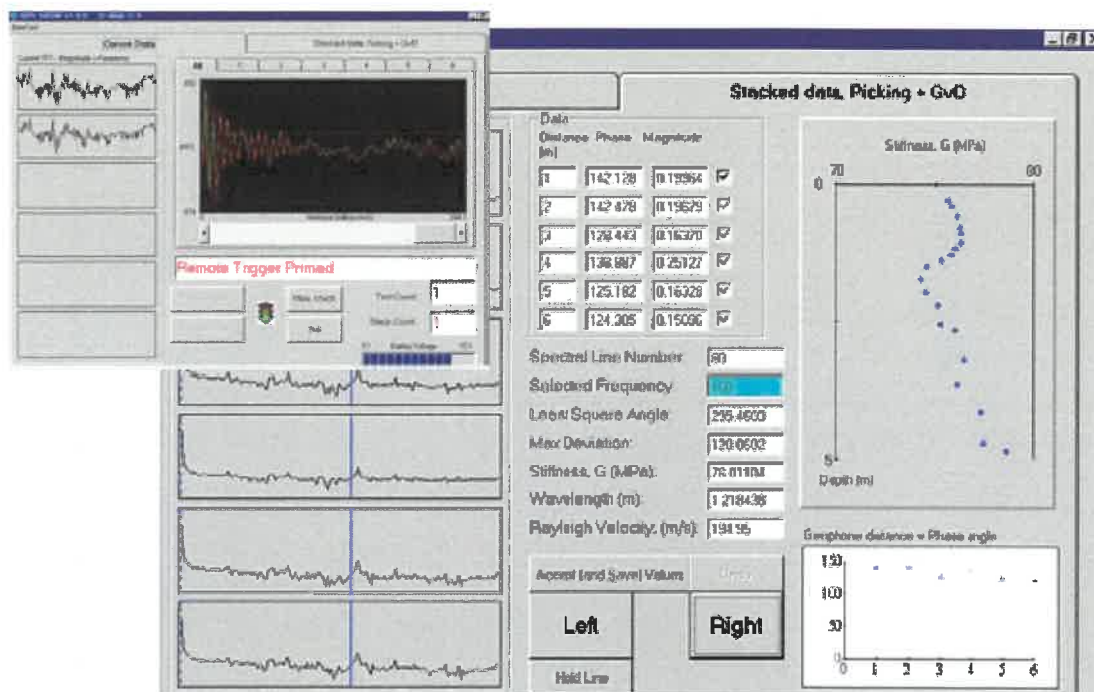
5.2.4 Έλεγχος δεδομένων

Μετά από κάθε χτύπημα τα δεδομένα ελέγχονται μέσω του λογισμικού στον υπολογιστή και επιλέγεται κατά πόσο αυτά θα λαμβάνονται υπόψη ή όχι (σχήμα 5.8). Θεωρείται ότι μία δοκιμή είχε λάβει τέλος όταν έχουν πραγματοποιηθεί 3 περίπου επιτυχημένα χτυπήματα.



Σχήμα 5.8 Έλεγχος των δεδομένων κατά τη διάρκεια των μετρήσεων

Με την ολοκλήρωση της δοκιμής τα αποτελέσματα ελέγχονται και επιλέγεται αν κάποιες από τις συχνότητες πρέπει να αποκλειστούν, με βασικό κριτήριο την τιμή της συνάρτησης συσχέτισης. Τέλος τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε μορφή ASCII για περαιτέρω επεξεργασία. Ένα παράδειγμα της τελικής μορφής των δεδομένων καταγραφής απεικονίζεται στο σχήμα 5.9.



Σχήμα 5.9 Παράδειγμα τελικής μορφής δεδομένων καταγραφής (CSWS/SASW Handbook)

6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

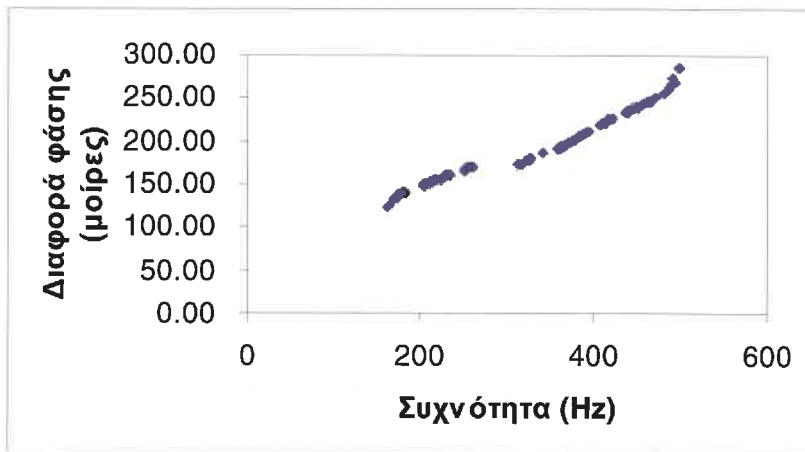
Μετά τις μετρήσεις και τη συλλογή των δεδομένων ακολούθησε το στάδιο της επεξεργασίας και ανάλυσής τους το οποίο αποτελεί και το πιο απαιτητικό και χρονοβόρο βήμα της μεθόδου ΦΑΕΚ.

6.1 Ανάλυση στοιχείων μετρήσεων με το λογισμικό PostPro

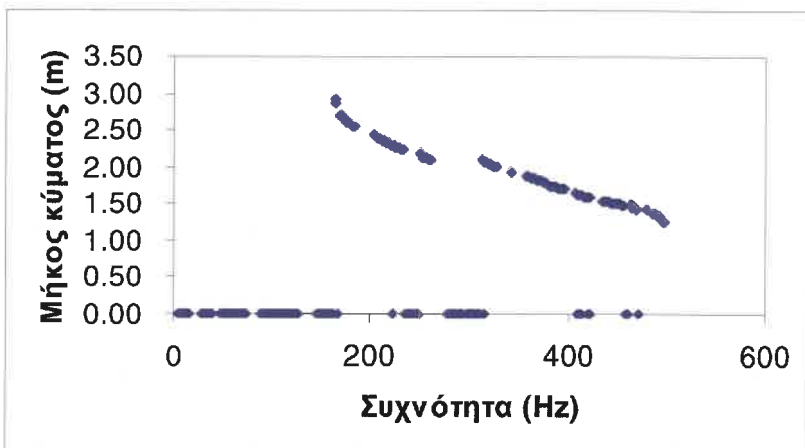
Το λογισμικό που αρχικά χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων ήταν το PostPro. Το υπόψη λογισμικό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να δει για κάθε συχνότητα τα δεδομένα (γωνίες φάσεις) από όλα τα γεώφωνα σε σχέση με την απόστασή τους από την πηγή. Στη συνέχεια για αυτά τα δεδομένα υπολογίζεται μία γραμμή προσαρμογής με βάση την αρχή των ελαχίστων τετραγώνων και επιτρέπεται η αφαίρεση δεδομένων από κάποιο γεώφωνο από τον υπολογισμό αν αυτό απαιτείται. Στην περίπτωση δηλαδή που τα αποτελέσματα φάσης από κάποιο γεώφωνο αποκλίνουν πολύ από τα υπόλοιπα, ο χρήστης μπορεί να μην τα συμπεριλάβει στους υπολογισμούς.

Το επόμενο βήμα της αναλυτικής διαδικασίας περιλαμβάνει τον υπολογισμό της δυσκαμψίας αφού επιλεγθούν τιμές για τη φαινόμενη πυκνότητα και το λόγο του Poisson. Οι τιμές που επελέγησαν στην παρούσα ανάλυση ήταν 2 Mg/m^3 και 0.35 αντίστοιχα. Το τελικό εξαγόμενο αποτέλεσμα που προκύπτει από το λογισμικό είναι το διάγραμμα του μέτρου διάτμησης συναρτήσει του βάθους. Βοηθητικά δίνονται και τα διαγράμματα της διαφοράς φάσης ως προς τη συχνότητα και του μήκους κύματος ως προς τη συχνότητα.

Μετά την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας τα διαγράμματα που προκύπτουν από το λογισμικό υπόκεινται σε περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση και κάποια από τα στοιχεία τους διαγράφονται. Βασικό κριτήριο για την αξιολόγηση των στοιχείων αποτελεί ο περιορισμός ότι τα διαγράμματα διαφοράς φάσης - συχνότητας και μήκους κύματος - συχνότητας πρέπει να είναι ομαλά όπως αυτά του σχήματος 6.1. Συνεπώς τα σημεία που αποκλίνουν σε μεγάλο βαθμό εξαλείφονται. Επίσης διαγράφονται τα δεδομένα που αντιστοιχούν σε πολύ χαμηλές συχνότητες ($<150\text{Hz}$) καθώς το ενδιαφέρον μας εστιάζεται σε μικρά βάθη.



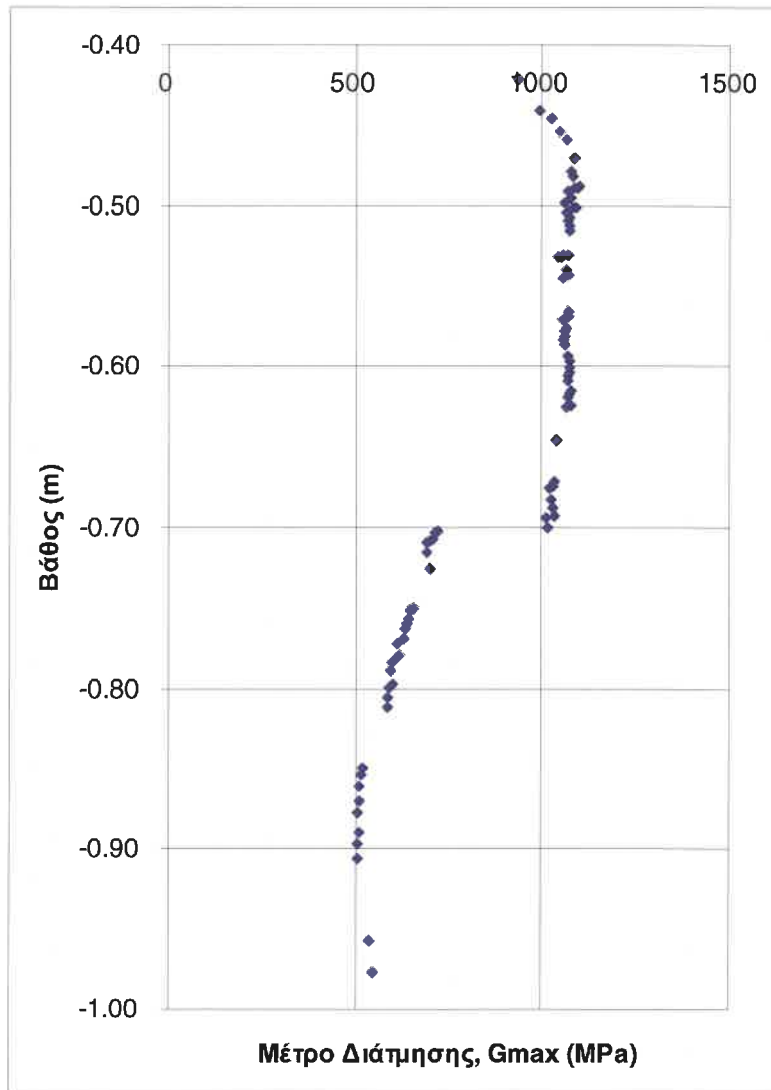
α) Διάγραμμα διαφοράς φάσης – συχνότητας



β) Διάγραμμα μήκους κύματος – συχνότητας

Σχήμα 6.1 Βοηθητικά διαγράμματα ανάλυσης μίας εκ των υπό εξέταση διατομών

Στο σχήμα 6.2 απεικονίζεται το προφίλ του μέτρου διάτμησης με το βάθος το οποίο αποτελεί το τελικό εξαγόμενο αποτέλεσμα του λογισμικού και αντιστοιχεί στα βοηθητικά διαγράμματα του σχήματος 6.1, τα οποία προέκυψαν μετά την ανάλυση και επεξεργασία των στοιχείων μετρήσεων μίας εκ των υπό εξέταση διατομών. Οι απότομες αλλαγές στο διάγραμμα μέτρου διάτμησης-βάθους υποδεικνύουν μετάβαση σε στρώση διαφορετικού υλικού.



Σχήμα 6.2 Αποτέλεσμα ανάλυσης μίας εκ των υπό εξέταση διατομών

Με χρήση του λογισμικού PostPro πραγματοποιήθηκε η ανάλυση δεδομένων από αρκετές διαφορετικές διατομές και παρατηρήθηκε ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης όσον αφορά στη δυσκαμψία παρουσιάζουν μεγαλύτερη αξιοπιστία σε μεγαλύτερα βάθη (μεγαλύτερα των 0.30 m στις περισσότερες περιπτώσεις). Συνεπώς το συγκεκριμένο λογισμικό, το οποίο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό γεωτεχνικών κυρίως παραμέτρων, δε θα ήταν κατάλληλο για την αξιολόγηση οδοστρωμάτων όπου το ενδιαφέρον μας περιορίζεται σε μικρότερα βάθη. Επίσης ένα σημαντικό μειονέκτημα του προγράμματος είναι ότι στα αποτελέσματα που προκύπτουν δεν περιλαμβάνονται πληροφορίες για τα πάχη των στρωμάτων. Για αυτούς τους λόγους στη συνέχεια έγινε χρήση άλλου λογισμικού για την επεξεργασία και την ανάλυση των στοιχείων των μετρήσεων.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το WinSASW. Το λογισμικό αυτό παρέχει μεγαλύτερη αξιοπιστία όσον αφορά στα αποτελέσματα της δυσκαμψίας σε μικρά βάθη ενώ δίνει τη δυνατότητα αξιολόγησης εκτός του προφίλ της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων,

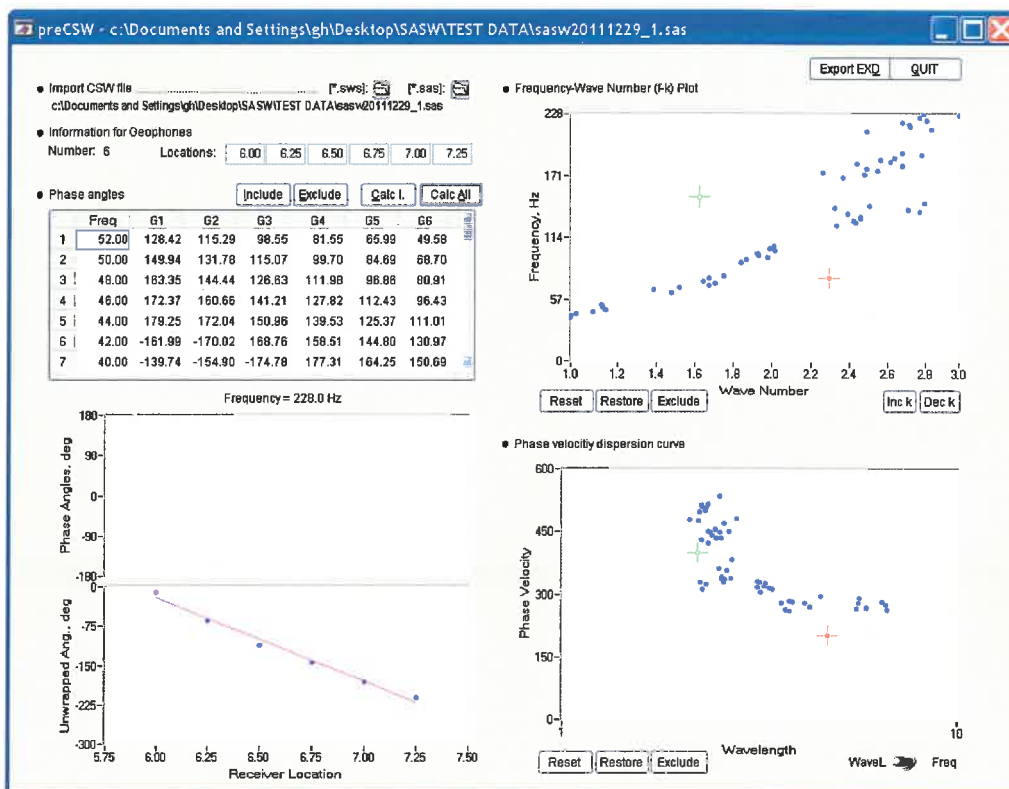
και του προφίλ των παχών των στρωμάτων του οδοστρώματος. Επίσης το λογισμικό αυτό, σε αντίθεση με το PostPro, δίνει τη δυνατότητα διεξαγωγής εμπρόσθιας ανάλυσης ώστε να καταλήξουμε σε ένα πιο αντιπροσωπευτικό προφίλ του οδοστρώματος στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

6.2 Ανάλυση στοιχείων μετρήσεων με το λογισμικό WinSASW

Το λογισμικό WinSASW χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των πειραματικών καμπυλών διασποράς, για την ανάλυση αντιστροφής και την εμπρόσθια ανάλυση. Για τη μετατροπή των δεδομένων των μετρήσεων στην κατάλληλη μορφή για να χρησιμοποιηθούν από το λογισμικό WinSASW καθώς και για την ελάττωσή τους χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PreCSW.

6.2.1 Επεξεργασία των στοιχείων μετρήσεων με το λογισμικό PreCSW

Σε αυτό το λογισμικό μετά την εισαγωγή των δεδομένων από τις μετρήσεις υπολογίζονται τα διαγράμματα συχνότητας-αριθμού κύματος και ταχύτητας φάσης- μήκους κύματος. Επίσης για κάθε συχνότητα φαίνονται οι γωνίες φάσης και η απόστασή τους από την πηγή, τόσο σε μορφή πίνακα όσο και σε μορφή διαγράμματος. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3 Δεδομένα μετρήσεων μίας διατομής στο PreCSW

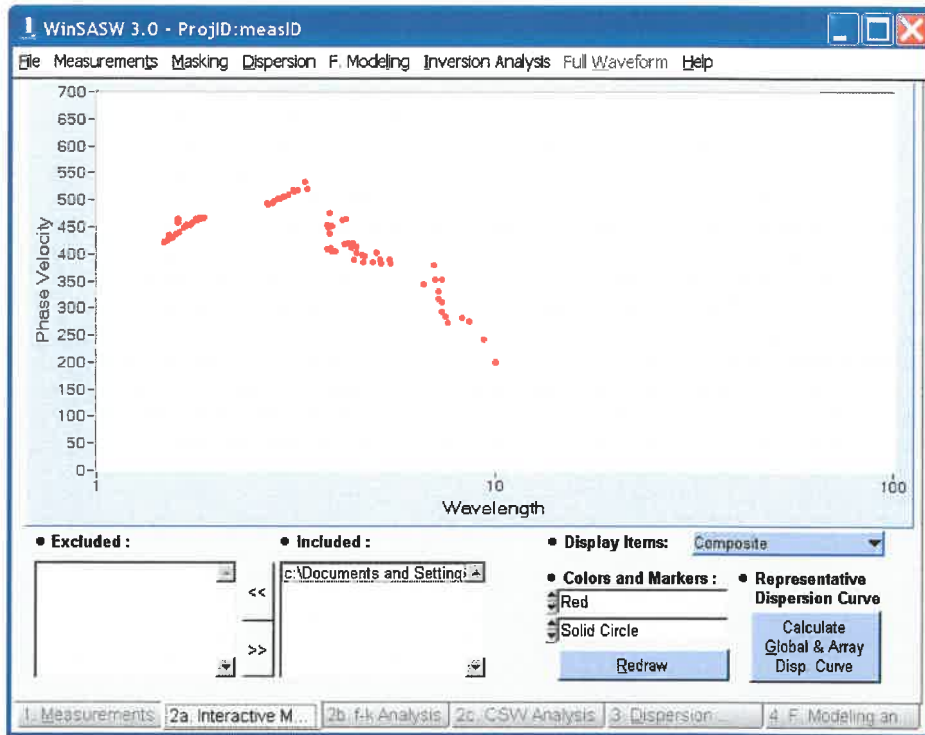
Στο δεξί τμήμα του σχήματος φαίνονται τα διαγράμματα συχνότητας-αριθμού κύματος και ταχύτητας φάσης- μήκους κύματος ενώ στο αριστερό τμήμα βρίσκονται ο πίνακας και τα διαγράμματα που αφορούν τις γωνίες φάσης.

Η ελάττωση των δεδομένων γίνεται με βάση τα διαγράμματα συχνότητας-αριθμού κύματος και ταχύτητας φάσης- μήκους κύματος. Αρχικά εντοπίζονται στο διάγραμμα συχνότητας-αριθμού κύματος τα αποκλίνοντα σημεία που πρέπει να διορθωθούν. Για τη διόρθωση αυτών των σημείων ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία. Αρχικά εντοπίζονται οι συχνότητες στις οποίες αντιστοιχούν αυτά τα σημεία. Από τον πίνακα βρίσκουμε αυτές τις συχνότητες και για κάθε μία ξεχωριστά εξετάζουμε τα διαγράμματα των γωνιών φάσης. Τα δεδομένα φάσης από τα 6 γεώφωνα για μία συγκεκριμένη συχνότητα πρέπει να σχηματίζουν μία γραμμή. Αν η γωνία φάσης για κάποιο γεώφωνο βρίσκεται εκτός αυτής της γραμμής τότε η τιμή αυτής της γωνίας φάσης διορθώνεται μέσω ανάλυσης παλινδρόμησης. Τελικά, μετά τις διορθώσεις των γωνιών φάσης ο αριθμός κύματος για τη συγκεκριμένη συχνότητα μεταβάλλεται και το αποκλίνον σημείο στο διάγραμμα μετακινείται. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όλα τα αποκλίνοντα σημεία.

Στη συνέχεια ακολουθούν και άλλοι τρόποι φιλτραρίσματος των δεδομένων. Ένας έλεγχος αφορά την ύπαρξη συχνοτήτων για τις οποίες τα δεδομένα παρουσιάζουν χαμηλή ποιότητα. Σε αυτή την περίπτωση μπορούμε να αποκλίσουμε τελείως από τους υπολογισμούς τις γωνίες φάσεις που προκύπτουν από κάποια γεώφωνα και όχι απλά να τις διορθώσουμε. Αποκλεισμός σημείων από τους υπολογισμούς μπορεί να γίνει και μέσω του διαγράμματος ταχύτητας φάσης- μήκους κύματος από όπου μπορούμε να διαγράψουμε τις ανεπιθύμητες ταχύτητες φάσης. Οι τελικές ταχύτητες φάσης αποθηκεύονται σε κατάλληλη μορφή για περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση μέσω του λογισμικού WinSASW.

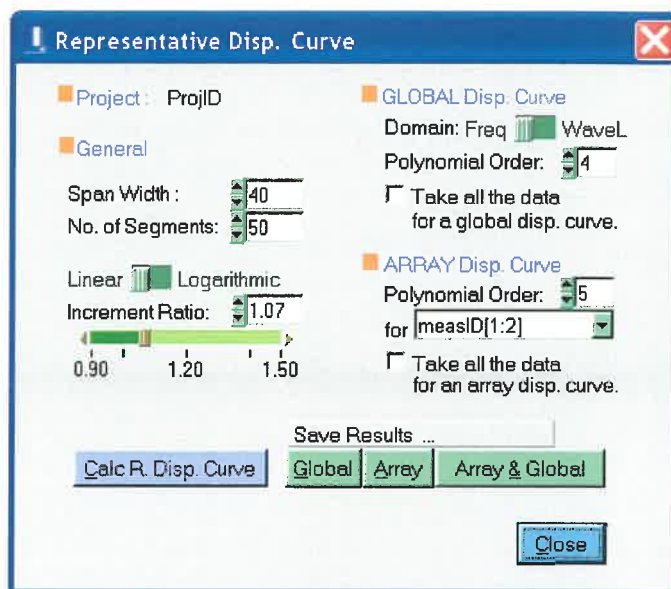
6.2.2 Καμπύλη διασποράς

Το πρώτο βήμα σε αυτό το λογισμικό είναι η κατασκευή της πειραματικής καμπύλης διασποράς από τα εισαγόμενα δεδομένα. Ο υπολογισμός της καμπύλης πραγματοποιείται αφού οριστούν οι αποστάσεις των δεκτών από την πηγή. Ένα παράδειγμα πειραματικής καμπύλης διασποράς φαίνεται στο σχήμα 6.4.



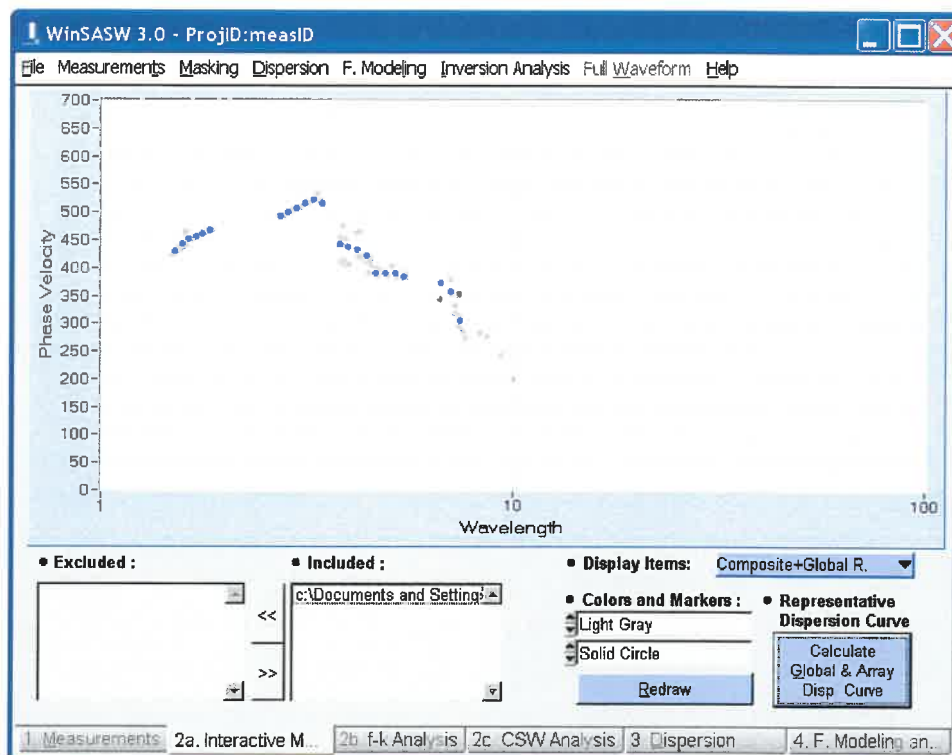
Σχήμα 6.4 Πειραματική καμπύλη διασποράς

Μετά από αυτό το βήμα ακολουθεί ο υπολογισμός της γενικής καμπύλης διασποράς, η οποία αντιπροσωπεύει όλα τα δεδομένα διασποράς της πειραματικής καμπύλης διασποράς χωρίς όμως να λαμβάνει υπόψη την θέση των δεκτών που χρησιμοποιούνται για να τα μετρήσουν (WinSASW user's guide). Για να γίνει αυτός ο υπολογισμός ορισμένες παράμετροι επιλέγονται από το χρήστη (Σχήμα 6.5).



Σχήμα 6.5 Πίνακας εισαγωγής παραμέτρων

Η επιλογή αυτών των παραμέτρων γίνεται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας (trial and error). Οι τελικές παράμετροι επιλέγονται με κριτήριο την καλύτερη δυνατή ταύτιση της γενικής καμπύλης με την αρχική πειραματική καμπύλη διασποράς. Αυτό το βήμα πραγματοποιείται ώστε η καμπύλη διασποράς που θα χρησιμοποιηθεί στην αντιστροφή να έχει λιγότερα σημεία. Αν η καμπύλη διασποράς έχει πολλά σημεία το στάδιο της αντιστροφής είναι υπερβολικά χρονοβόρο. Η γενική καμπύλη διασποράς για την πειραματική καμπύλη διασποράς του σχήματος 6.4 φαίνεται στο σχήμα 6.6.



Σχήμα 6.6 Γενική καμπύλη διασποράς

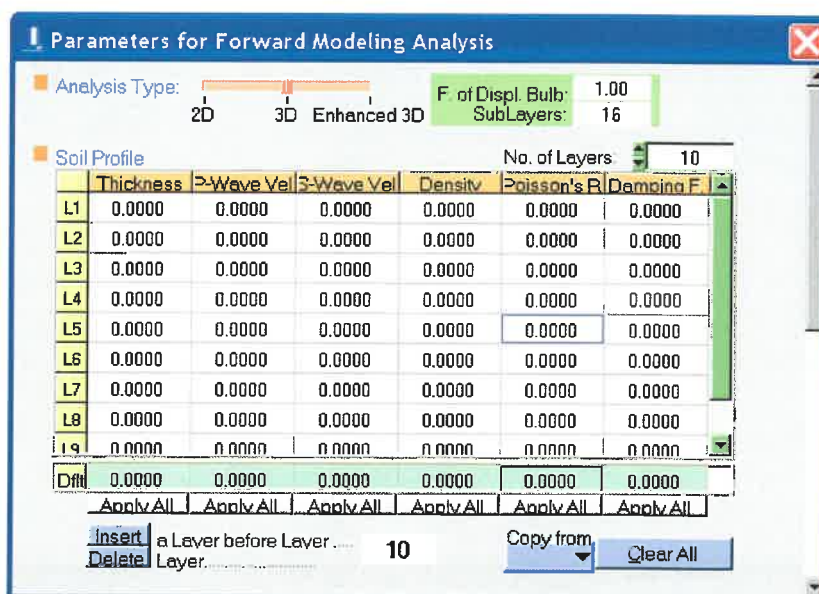
6.2.3 Ανάλυση αντιστροφής

Μετά τον καθορισμό της πειραματικής καμπύλης διασποράς ακολουθεί το στάδιο της ανάλυσης αντιστροφής το οποίο αποτελείται από τρία επιμέρους βασικά βήματα: τη θεώρηση της διαστρωμάτωσης του οδοστρωματικού προσομοιώματος, τον καθορισμό των παραμέτρων του αρχικού μοντέλου και την ανάλυση αντιστροφής με τη μέθοδο μέγιστης πιθανοφάνειας.

Η μέθοδος μέγιστης πιθανοφάνειας θεωρεί ότι τα δεδομένα διασποράς και οι παράμετροι του αρχικού μοντέλου (δηλαδή οι τιμές που δίνονται στις ταχύτητες των διατμητικών κυμάτων ως αρχικό σημείο για την αντιστροφή) ακολουθούν Γκαουσιανές κατανομές. Αυτές είναι λογικές

παραδοχές για την αντιστροφή στη ΦΑΕΚ. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της διαδικασίας της μεγίστης πιθανοφάνειας είναι ότι απαιτεί κάποιες πληροφορίες εκ των προτέρων (πριν την εφαρμογή της αντιστροφής) οι οποίες παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια της αντιστροφής και μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στη λύση. Αυτές οι αρχικές παράμετροι είναι : η αβεβαιότητα των πειραματικών δεδομένων, ο αριθμός των στρωμάτων και τα πάχη τους, οι αρχικές τιμές της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων και οι σταθερές αποκλίσεις της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων (Orozco, 2003).

Το πρώτο από τα επιμέρους βήματα της ανάλυσης αντιστροφής είναι ο καθορισμός του οδοστρωματικού προσομοιώματος και περιλαμβάνει πολλές παραμέτρους. Ο αριθμός των στρωμάτων, το πάχος των στρωμάτων, η πυκνότητα, ο λόγος του Poisson και ο βαθμός απόσβεσης πρέπει να οριστούν για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση (σχήμα 6.7). Από εκτεταμένες έρευνες έχει αποδειχθεί ότι η ανάλυση αντιστροφής δεν είναι πολύ ευαίσθητη στην πυκνότητα, στο λόγο του Poisson και στον βαθμό απόσβεσης. Σε αυτές τις παραμέτρους πρέπει να δίνονται τιμές που να υποστηρίζονται από τη βιβλιογραφία (Nazarian et al., 1989, Xia et al., 1999). Στην παρούσα ανάλυση ο αριθμός και το πάχος των στρωμάτων διέφεραν σε κάθε εφαρμογή. Η πυκνότητα μάζας ορίζεται ίση με 2320 kg/m^3 για την ασφαλτική στρώση και 1800 kg/m^3 για τις υπόλοιπες, ο λόγος του Poisson ίσος με 0.3333 και ο βαθμός απόσβεσης ίσος με 0.02 σύμφωνα με τις πηγές (Joh, 2004).

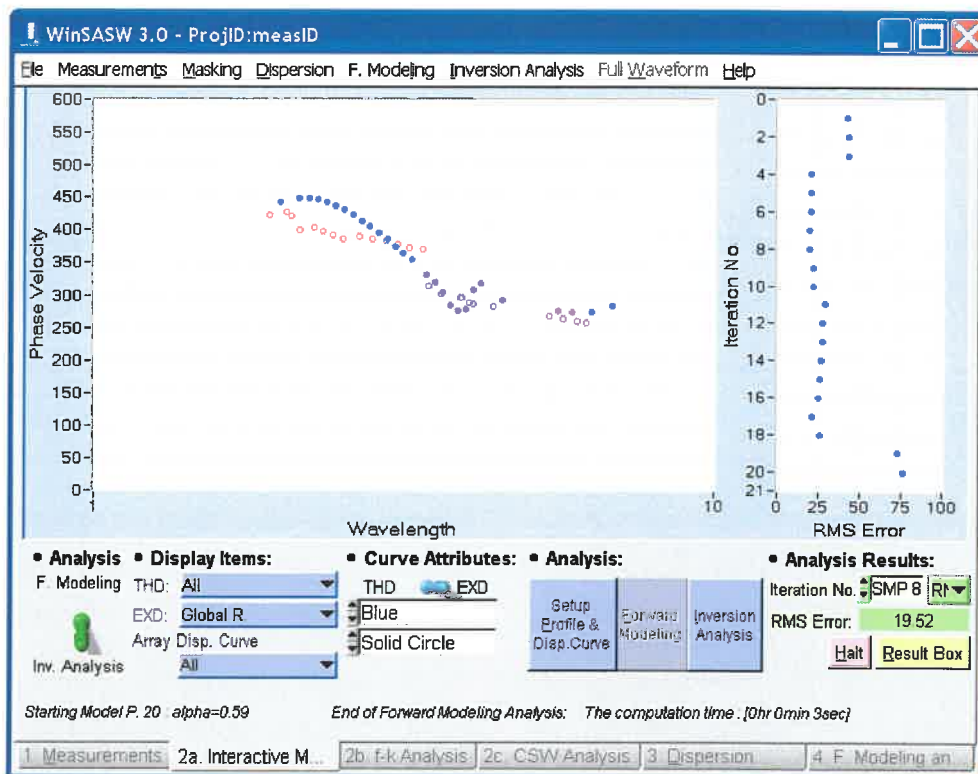


Σχήμα 6.7 Παράμετροι για την ανάλυση αντιστροφής

Η ανάλυση αντιστροφής απαιτεί τον προσδιορισμό ενός αρχικού μοντέλου, το οποίο περιλαμβάνει τις αρχικές τιμές των παραμέτρων του προσομοιώματος. Για την απόκτηση του

αρχικού μοντέλου ο χρήστης ρυθμίζει τον αριθμό των αρχικών μοντέλων που θέλει να αποκτήσει σε ένα συγκεκριμένο εύρος λόγων βάθους- μήκους κύματος.

Το σχήμα 6.8 δείχνει τη διαδικασία επιλογής αρχικού μοντέλου. Η διαδικασία αυτή μας παρέχει έναν αριθμό διαφορετικών αρχικών μοντέλων. Σε κάθε αρχικό μοντέλο αντιστοιχεί μία τιμή σφάλματος RMS (Root Mean Square). Το δεξί διάγραμμα του σχήματος 5.8 δείχνει τη μεταβολή του σφάλματος RMS με τον αριθμό της επανάληψης. Το σφάλμα RMS είναι ένα μέτρο που δείχνει πόσο απέχει η θεωρητική καμπύλη διασποράς που υπολογίζεται από τις εκτιμηθείσες παραμέτρους του μοντέλου από τα μετρηθέντα δεδομένα διασποράς. Η σύγκριση της γενικής καμπύλης διασποράς με τη θεωρητική καμπύλη διασποράς για κάθε αρχικό μοντέλο φαίνεται στο αριστερό διάγραμμα του σχήματος 5.8. Ο δείκτης RMS είναι το μέτρο με βάση το οποίο γίνεται η αρχική αξιολόγηση του θεωρητικού προσομοιώματος που επιλέξαμε. Κατά συνέπεια ως αρχικό μοντέλο επιλέγεται αυτό με το μικρότερο σφάλμα RMS.

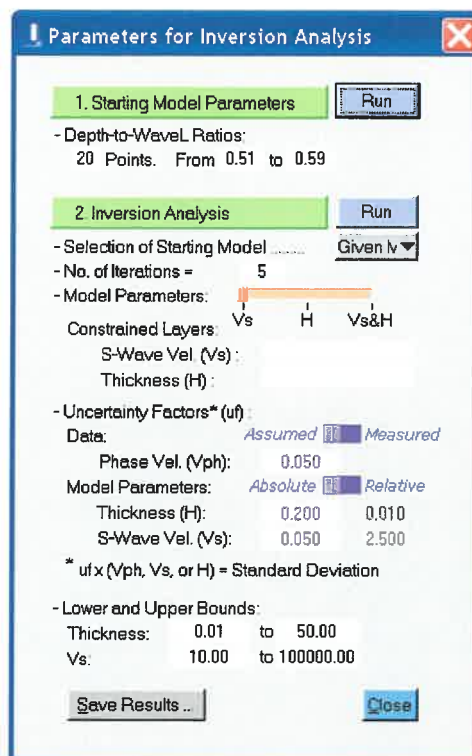


Σχήμα 6.8 Διαδικασία επιλογής αρχικού μοντέλου

Μετά την επιλογή του αρχικού μοντέλου πραγματοποιείται η καθαυτή ανάλυση αντιστροφής για την οποία το πρόγραμμα WinSASW δίνει τρεις επιλογές. Μπορεί να αξιολογήσει το προφίλ της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων, το προφίλ του πάχους των στρωμάτων, ή της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων και του πάχους μαζί. Σε αρχικό στάδιο προτιμάται να γίνεται αντιστροφή μόνο της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων. Στη συνέχεια, όταν θα έχει αποκτηθεί ένα ικανοποιητικό προφίλ της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων, μπορεί ο

χρήστης να προχωρήσει στην από κοινού αντιστροφή ταχύτητας διατμητικών κυμάτων και πάχους.

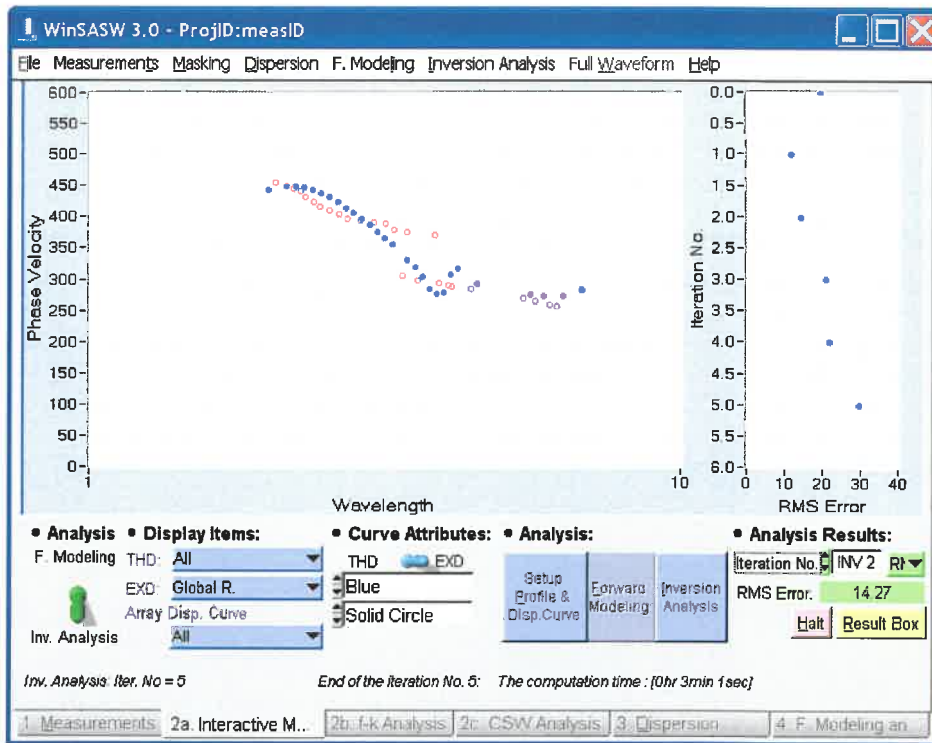
Πριν τη διεξαγωγή της ανάλυσης αντιστροφής είναι απαραίτητο να οριστούν ορισμένες επιπλέον παράμετροι (σχήμα 6.9). Για αυτές τις παραμέτρους συνιστώνται οι ακόλουθες τιμές : 0.03 για τον συντελεστή αβεβαιότητας των πειραματικών δεδομένων, 150 m/s ως αρχική τιμή της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων, 0.2 για το συντελεστή αβεβαιότητας της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων και 0.02 για το συντελεστή αβεβαιότητας του πάχους (Orozco, 2003, Joh, 2004). Οι προαναφερθείσες τιμές χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα ανάλυση.



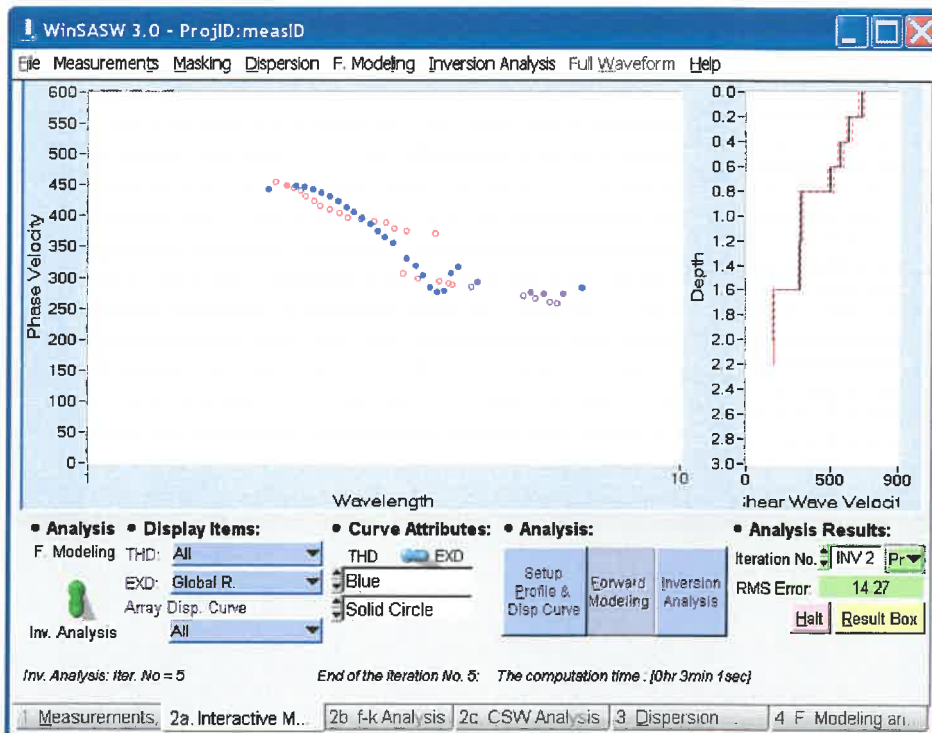
Σχήμα 6.9 Παράμετροι ελέγχου της διαδικασίας αντιστροφής

Ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα στην ανάλυση αντιστροφής είναι πόσο βαθιά μπορούμε να αναλύσουμε την ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων. Ένας δείκτης αυτής της ικανότητας είναι η αναλυτικότητα (resolution) των παραμέτρων του μοντέλου η οποία συσχετίζει τις παραμέτρους του άγνωστου πραγματικού μοντέλου (V_{true}) με τις υπολογισθείσες παραμέτρους (V_{scal}). Η αναλυτικότητα παίρνει τιμές από το 0 έως 1. Η αναλυτικότητα θεωρείται αποδεκτή όταν είναι μεγαλύτερη από το 0.1 (WinSASW user's guide). Εκτός από την τιμή της αναλυτικότητας για την αξιολόγηση της ανάλυσης αντιστροφής λαμβάνεται υπόψη και ο δείκτης RMS. Η μορφή των αποτελεσμάτων μετά την ανάλυση αντιστροφής απεικονίζεται στα σχήματα 5.10, 5.11 και 5.12. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν τη σύγκριση της πειραματικής καμπύλης διασποράς με τη θεωρητική καμπύλη διασποράς

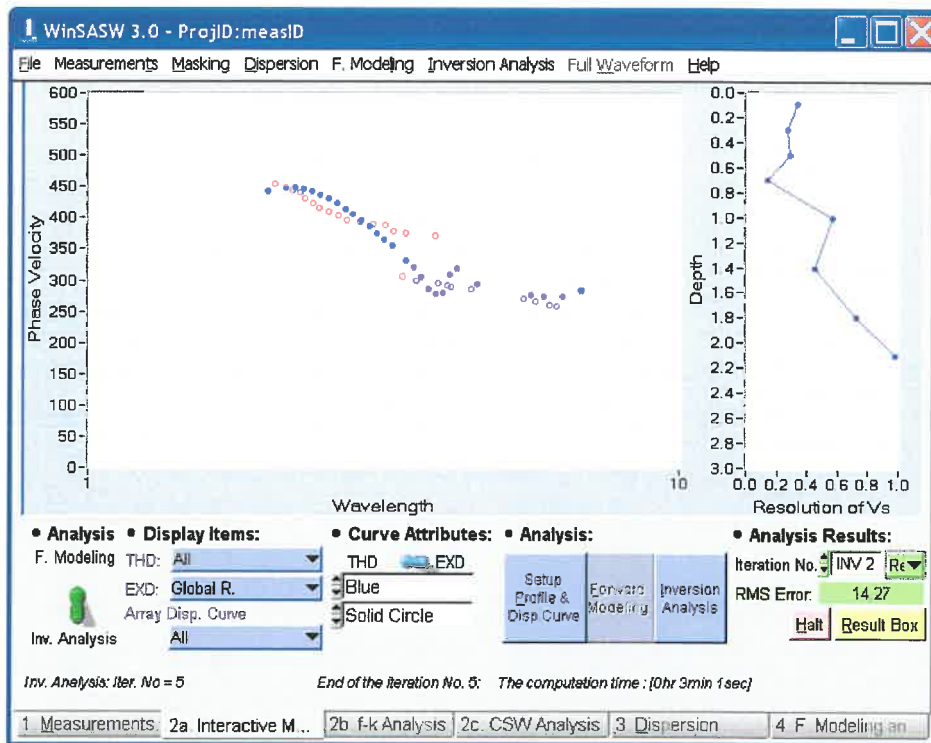
(σχήμα 6.10), το προφίλ της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων (σχήμα 6.11) και τις τιμές της αναλυτικότητας της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων για κάθε υπόστρωμα (6.12).



Σχήμα 6.10 Σύγκριση πειραματικής και θεωρητικής καμπύλης διασποράς



Σχήμα 6.11 Προφίλ ταχύτητας διατμητικών κυμάτων



Σχήμα 6.12 Τιμές αναλυτικότητας ταχύτητας διατμητικών κυμάτων

6.2.4 Εμπρόσθια Ανάλυση

Η διαδικασία ανάλυσης των στοιχείων των μετρήσεων ολοκληρώνεται με την εμπρόσθια ανάλυση. Η εμπρόσθια ανάλυση στο λογισμικό WinSASW βασίζεται στη μέθοδο μητρώου δυναμικής δυσκαμψίας (dynamic stiffness matrix).

Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην κατασκευή μητρώων δυσκαμψίας για κάθε μεμονωμένο στρώμα. Η κατασκευή αυτών των μητρώων επιτυγχάνεται μέσω των κανόνων της μητρικής ανάλυσης που οδηγούν σε ένα σύστημα εξισώσεων της παρακάτω μορφής:

$$P=KU \tag{6.1}$$

όπου K είναι το μητρώο της δυναμικής δυσκαμψίας των υλικών του οδοστρώματος, U είναι τα πλάτη των μετακινήσεων στις διεπιφάνειες των στρωμάτων και P το άνωστρο της φόρτισης σε αυτές τις διεπιφάνειες (Rosyidi, 2007).

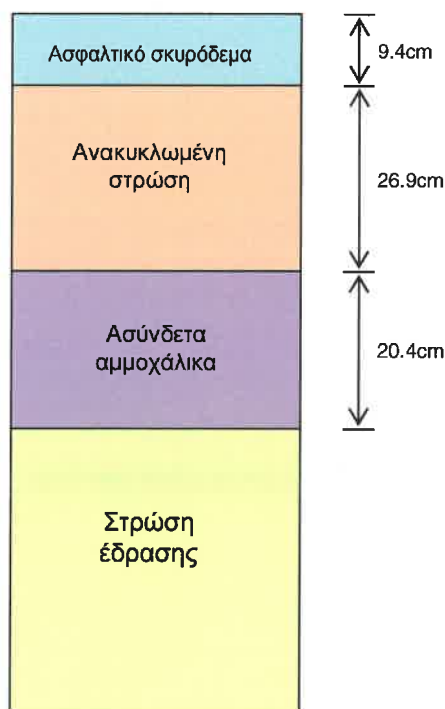
Η εμπρόσθια ανάλυση αποτελείται από μία επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού της θεωρητικής καμπύλης διασποράς για μια δεδομένη διαστρωμάτωση. Μετά το τέλος κάθε επανάληψης τα αποτελέσματα ελέγχονται. Ο έλεγχος αυτός βασίζεται στο δείκτη RMS και στις τιμές αναλυτικότητας των στρωμάτων. Αν τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά η διαδικασία σταματάει. Σε διαφορετική περίπτωση, οι παράμετροι του μοντέλου ενημερώνονται με βάση τα αποτελέσματα της τελευταίας εφαρμογής και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

6.3 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων

Για να μελετηθεί η ακρίβεια και η αποτελεσματικότητα της μεθόδου ΦΑΕΚ στα οδοστρώματα καθώς και η επίδραση που έχει στα τελικά αποτελέσματα η επιλογή των παραμέτρων του αρχικού μοντέλου, επιλέχθηκαν τα πειραματικά δεδομένα για μία από τις μετρηθείσες διατομές και ακολούθησε η ανάλυση και επεξεργασία τους με χρήση του λογισμικού WinSASW.

Για να γίνει η επιλογή της συγκεκριμένης διατομής ακολουθήθηκαν τα βήματα μέχρι και την επιλογή του αρχικού μοντέλου (όπως περιγράφονται σε προηγούμενη ενότητα) για αρκετές από τις μετρηθείσες διατομές. Η διατομή που επιλέχθηκε ήταν εκείνη που παρουσίασε το μικρότερο RMS σφάλμα.

Για τα δεδομένα της διατομής αυτής δοκιμάστηκαν διαφορετικά μοντέλα ανάλυσης και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματά τους. Σε αυτό το σημείο υπενθυμίζεται ότι το οδόστρωμα στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις αποτελείται από τις παρακάτω στρώσεις: 1) ενοποιημένες στρώσεις ασφαλτικού σκυροδέματος πάχους 9.4 cm, 2) ενοποιημένες ανακυκλωμένες στρώσεις με χρήση αφρώδους ασφάλτου πάχους 26.9 cm και 3) ενοποιημένη στρώση ασύνδετων αμμοχάλικων πάχους 20.4 cm. Η διαστρωμάτωση της υπό διερεύνησης διατομής απεικονίζεται στο σχήμα 6.13. Τα στοιχεία των παχών της διατομής προέρχονται από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ.

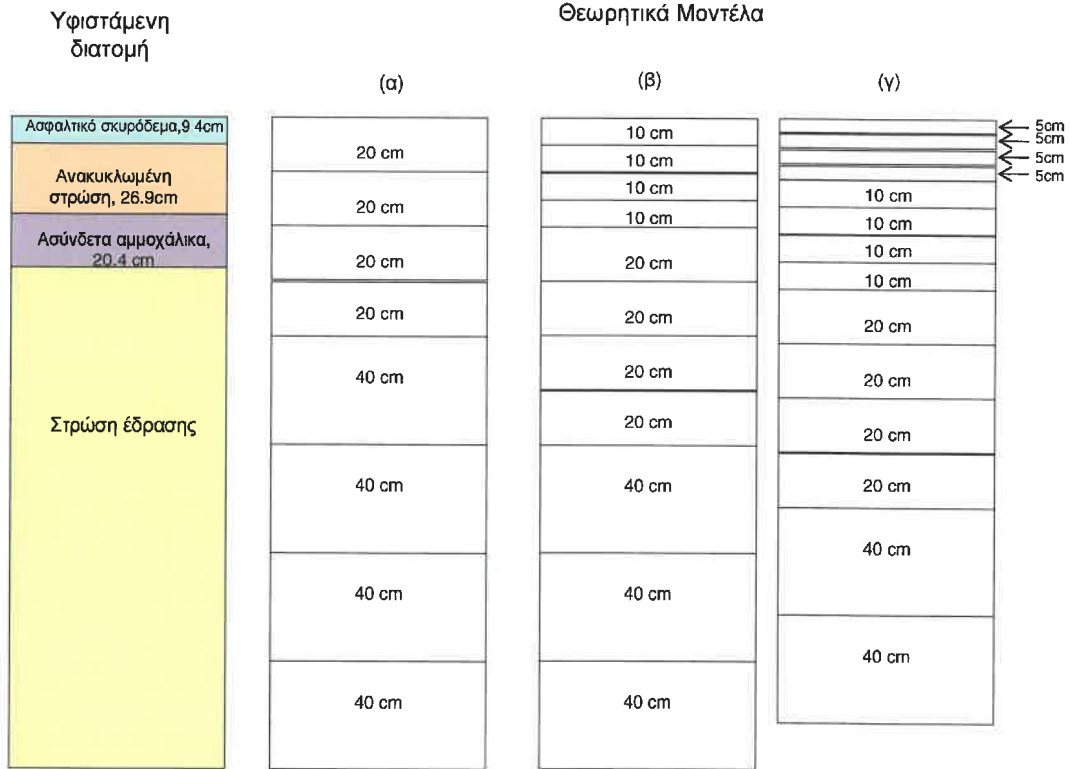


Σχήμα 6.13 Διαστρωμάτωση υπό διερεύνηση διατομής

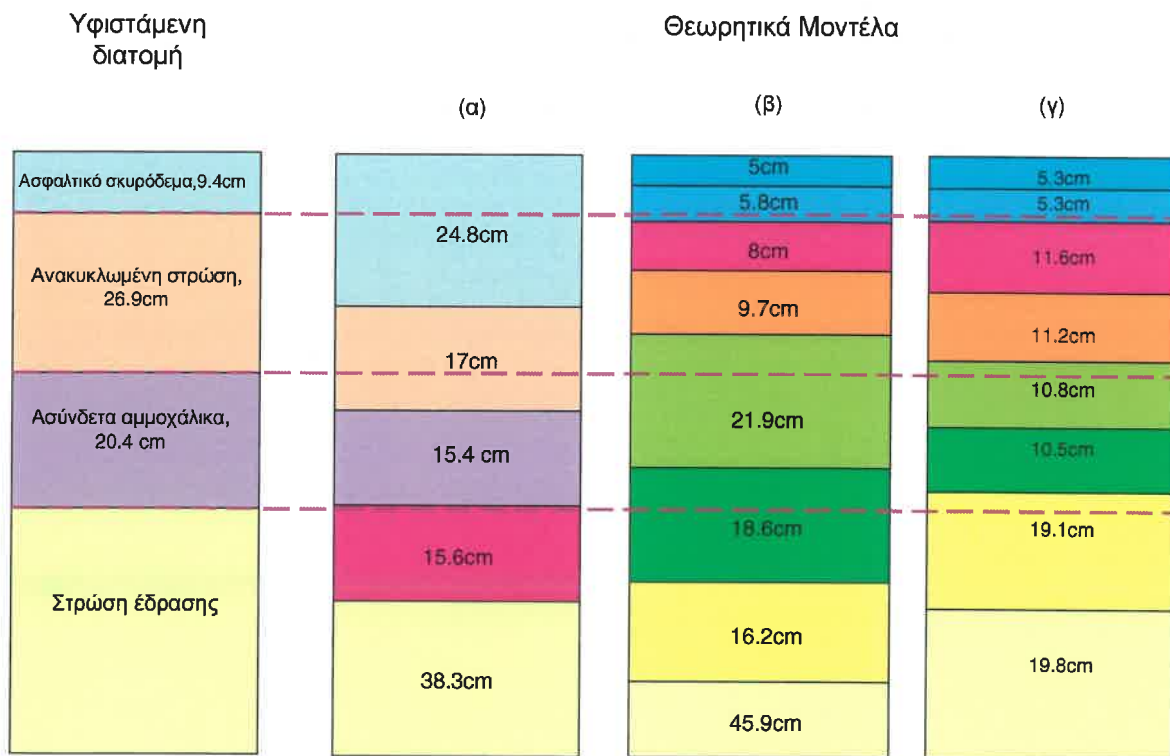
6.3.1 Πρότυπο 1

Αρχικά θεωρείται ότι δεν έχουμε καθόλου στοιχεία για τη διαστρωμάτωση της διατομής. Εξετάζονται διαφορετικά θεωρητικά μοντέλα για να διαπιστωθεί η δυνατότητα της μεθόδου ΦΑΕΚ να εντοπίσει τις διαφορετικές στρώσεις του οδοστρώματος στην περίπτωση που δεν υπάρχουν στοιχεία παχών των επιμέρους στρώσεων του υπό διερεύνηση οδοστρώματος. Τα θεωρητικά μοντέλα επιλέχθηκαν με βάση τυπικά παραδείγματα διαστρωμάτωσης που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση των μετρήσεων της μεθόδου ΦΑΕΚ (Joh, 2004). Τα θεωρητικά μοντέλα για το πρότυπο 1 απεικονίζονται στο σχήμα 6.14. Σε αυτό το σημείο υπενθυμίζεται ότι για την πραγματοποίηση της ανάλυσης αντιστροφής είναι απαραίτητος ο εκ των προτέρων καθορισμός των τιμών της πυκνότητας, του λόγου του Poisson και του βαθμού απόσβεσης. Για το υπόψη πρότυπο για την πυκνότητα θεωρείται τιμή ίση με 2320 kg/m^3 για το πρώτο στρώμα των θεωρητικών μοντέλων (α) και (β) καθώς και για τα δύο πρώτα στρώματα του θεωρητικού μοντέλου (γ) ενώ για τα υπόλοιπα στρώματα η τιμή της πυκνότητας τίθεται ίση με 1800 kg/m^3 . Οι τιμές του λόγου του Poisson και του βαθμού απόσβεσης τίθενται ίσες με 0.3333 και 0.02 και διατηρούνται αμετάβλητες σε όλα τα πρότυπα που ακολουθούν (όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα).

Τα αποτελέσματα ως προς τη διαστρωμάτωση που προέκυψαν μετά το πέρας της ανάλυσης για καθένα από τα παραπάνω θεωρητικά μοντέλα φαίνονται στο σχήμα 6.15 και συγκρίνονται με την υφιστάμενη διατομή.



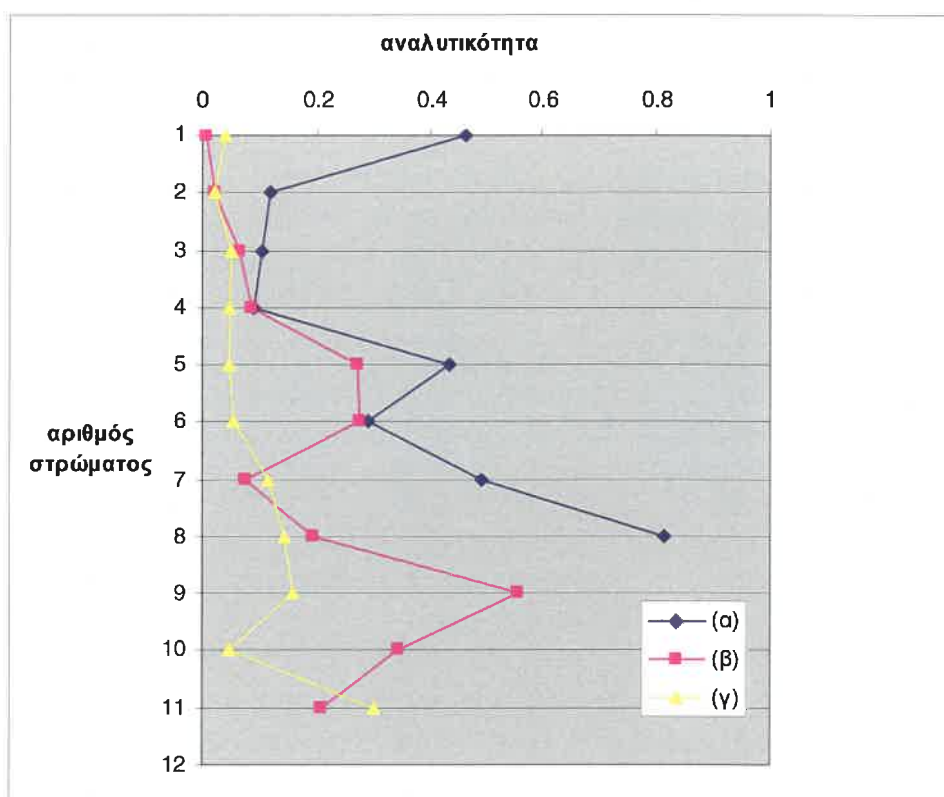
Σχήμα 6.14 Θεωρητικά μοντέλα για το Πρότυπο 1



Σχήμα 6.15 Έλεγχος διαστρωμάτωσης του Προτύπου 1

Κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που αφορούν στη διαστρωμάτωση πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι οι στρώσεις του υπό εξέταση οδοστρώματος είναι ενοποιημένες και συνεπώς αποτελούνται από επιμέρους υποστρώματα. Υπό αυτό το πρίσμα τα θεωρητικά μοντέλα (β) και (γ) είναι πιθανό να προσεγγίζουν ικανοποιητικά τη διαστρωμάτωση της υφιστάμενης διατομής ενώ το θεωρητικό μοντέλο (α) παρουσιάζει σημαντική απόκλιση. Για την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων θα ήταν απαραίτητη η γνώση περισσότερων στοιχείων για τα επιμέρους υποστρώματα από τα οποία αποτελούνται οι στρώσεις.

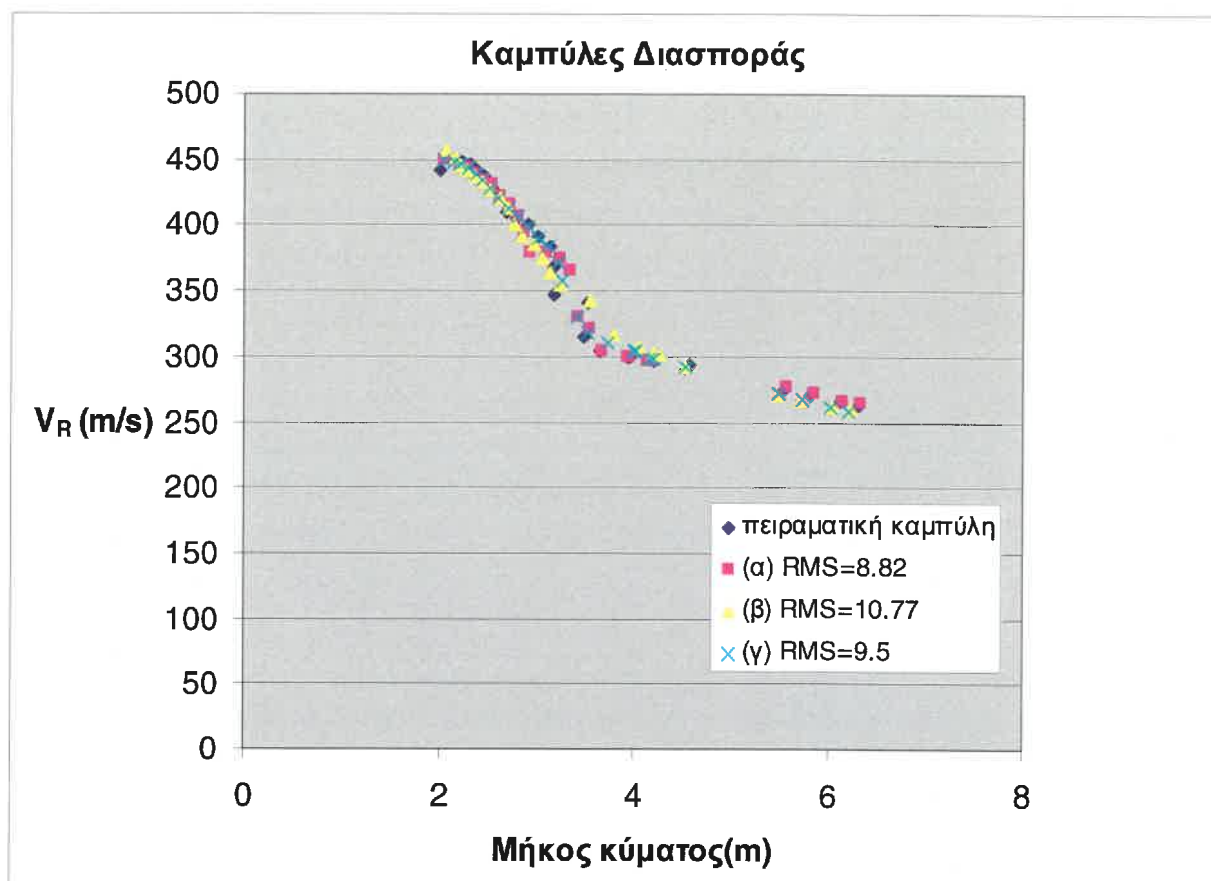
Στο σχήμα 6.16 φαίνονται οι τιμές της αναλυτικότητας των στρωμάτων κάθε διαφορετικού θεωρητικού μοντέλου. Υπενθυμίζεται ότι η τιμή της αναλυτικότητας και το σφάλμα RMS είναι δύο δείκτες με τη βοήθεια των οποίων κρίνεται κατά πόσο η ανάλυση είναι επιτυχής και συνεισφέρουν σημαντικά στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν για κάθε θεωρητικό μοντέλο.



Σχήμα 6.16 Τιμές αναλυτικότητας για το Πρότυπο 1

Οι τιμές της αναλυτικότητας για το θεωρητικό μοντέλο (α) είναι σε αποδεκτά όρια για όλα τα στρώματα ενώ για τα θεωρητικά μοντέλα (β) και (γ) παρουσιάζονται χαμηλότερες τιμές ειδικά για τα πρώτα στρώματα.

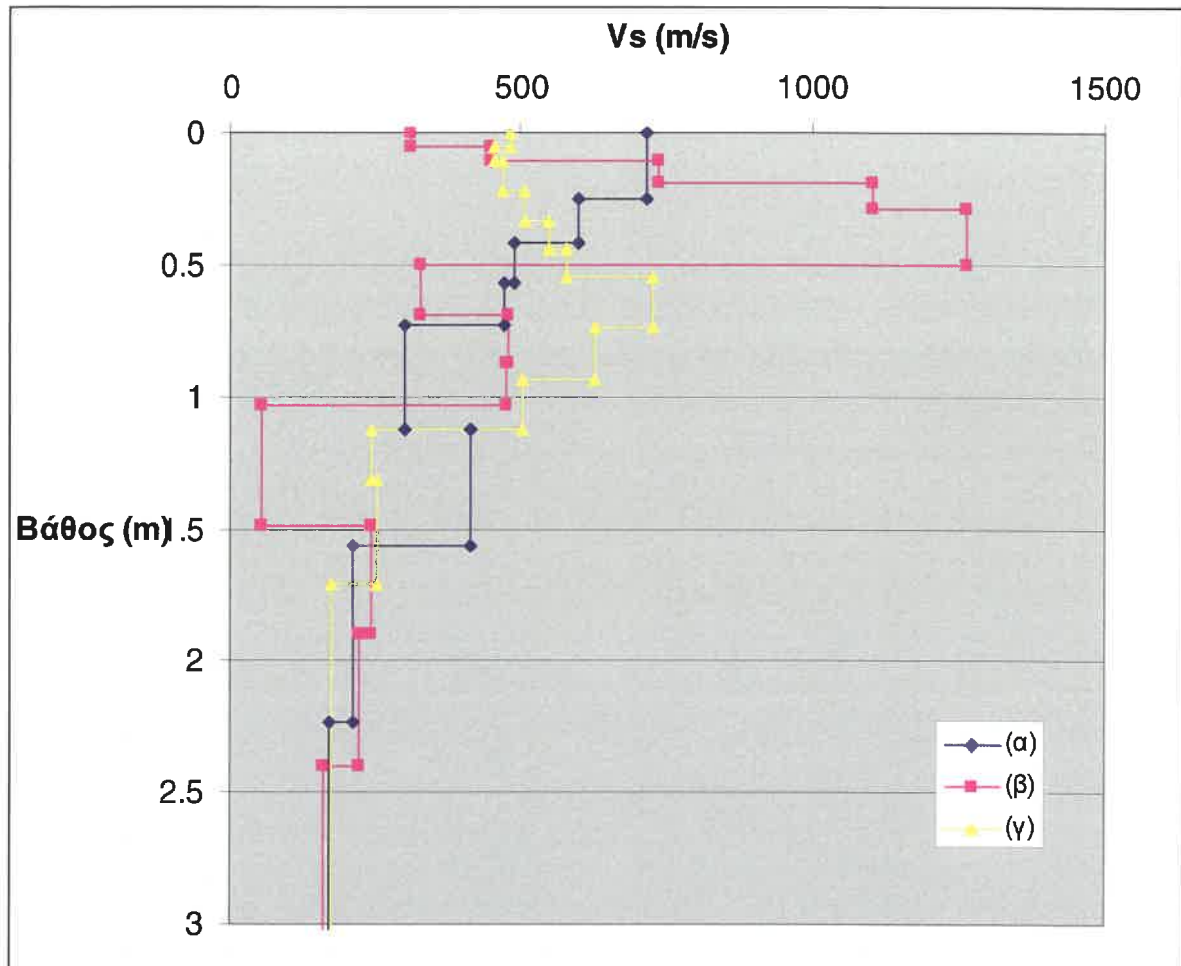
Στο σχήμα 6.17 φαίνεται η σύγκριση της πειραματικής καμπύλης διασποράς με τις θεωρητικές καμπύλες διασποράς που προκύπτουν για κάθε θεωρητικό μοντέλο. Για κάθε θεωρητικό μοντέλο αναγράφεται και ο δείκτης RMS που του αντιστοιχεί.



Σχήμα 6.17 Σύγκριση πειραματικής –θεωρητικών καμπυλών για το Πρότυπο 1

Για το πρότυπο 1 παρατηρείται ικανοποιητική προσέγγιση των θεωρητικών καμπυλών με την πειραματική καμπύλη διασποράς για όλα τα θεωρητικά μοντέλα.

Εκτός των αποτελεσμάτων που αφορούν τα πάχη των στρωμάτων η μέθοδος ΦΑΕΚ μας παρέχει αποτελέσματα για το προφίλ της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων συναρτήσει του βάθους ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω αξιολόγηση της δομικής συμπεριφοράς του οδοστρώματος. Στο σχήμα 6.18 παρουσιάζονται τα προφίλ της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων για το πρότυπο 1.



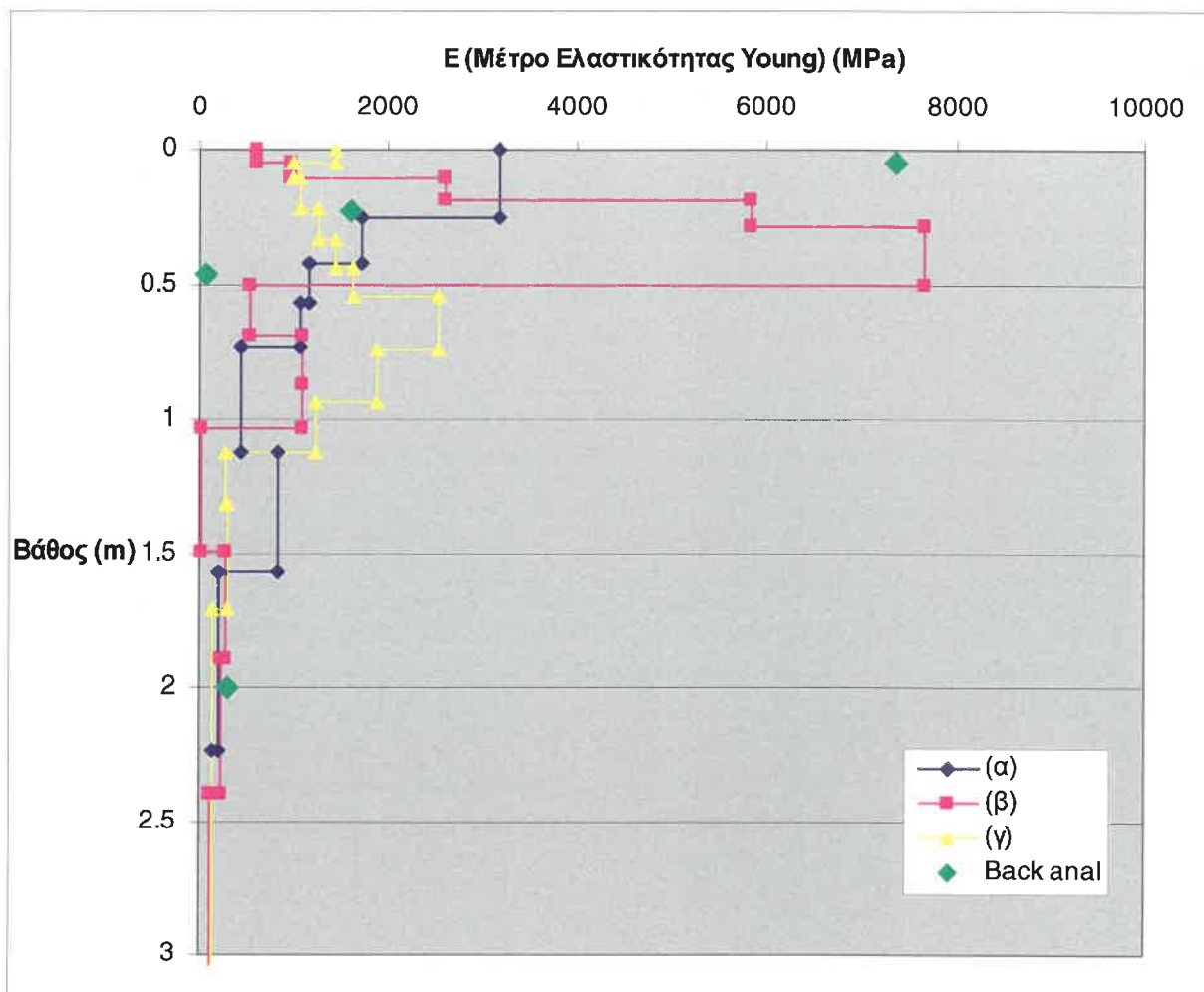
Σχήμα 6.18 Προφίλ ταχύτητας διατμητικών κυμάτων για το Πρότυπο 1

Για το θεωρητικό μοντέλο (α) είναι εμφανές το φαινόμενο της αντικανονικής διασποράς κατά το οποίο η δυσκαμψία μειώνεται με το βάθος. Στο θεωρητικό μοντέλο (β) τα δύο πρώτα στρώματα παρουσιάζουν χαμηλές τιμές για την ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων σε σύγκριση με τις τιμές που αναφέρονται στις πηγές ενώ παρουσιάζεται μια απότομη αύξηση της τιμής της ταχύτητας για επόμενα τρία στρώματα (Rydèn, 2004). Στο θεωρητικό μοντέλο (γ) με εξαίρεση το τελευταίο στρώμα παρατηρείται και πάλι μείωση της δυσκαμψίας με το βάθος. Τα δύο πρώτα στρώματα αυτού του μοντέλου έχουν σχετικά χαμηλή τιμή ταχύτητας διατμητικών κυμάτων .

Για το πρότυπο 1, το οποίο προσομοιάζει την κατάσταση κατά την οποία δεν υπάρχουν πληροφορίες για τα στοιχεία της υπό διερεύνηση διατομής, παρατηρείται ότι τα προφίλ που προκύπτουν μετά την ολοκλήρωση της ανάλυσης δεν είναι κατ' ανάγκη εσφαλμένα αν λάβουμε υπόψη ότι οι στρώσεις του οδοστρώματος αποτελούνται από επιμέρους υποστρώματα. Όσον αφορά τα αποτελέσματα που σχετίζονται με την ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων, κρίνοντας βάσει και των τιμών της αναλυτικότητας, παρουσιάζεται σε

μερικές περιπτώσεις αδυναμία κατά την ανάλυση των πρώτων στρώσεων ειδικά όταν αυτές έχουν μικρό πάχος.

Στο σχήμα 6.19 απεικονίζονται τα προφίλ των μέτρων ελαστικότητας Young για κάθε θεωρητικό μοντέλο. Οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας υπολογίστηκαν από τις τιμές των ταχυτήτων των διατμητικών κυμάτων μέσω της σχέσης 2.4. Το ίδιο σχήμα περιλαμβάνει και τα μέτρα ελαστικότητας που υπολογίστηκαν μέσω ανάστροφου υπολογισμού από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με το σύστημα FWD.



Σχήμα 6.19 Προφίλ μέτρων ελαστικότητας για το Πρότυπο 1

Παρατηρείται ότι οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας που αφορούν τις ασφαλτικές στρώσεις και υπολογίζονται από τη μέθοδο ΦΑΕΚ είναι πολύ μικρότερες από την αντίστοιχη τιμή που υπολογίστηκε από τις μετρήσεις του FWD μέσω ανάστροφου υπολογισμού. Απόκλιση παρατηρείται και για το στρώμα των ασύνδετων αμμοχάλικων ενώ για την ανακυκλωμένη στρώση και τη στρώση έδρασης οι τιμές προσεγγίζουν σε μεγαλύτερο βαθμό.

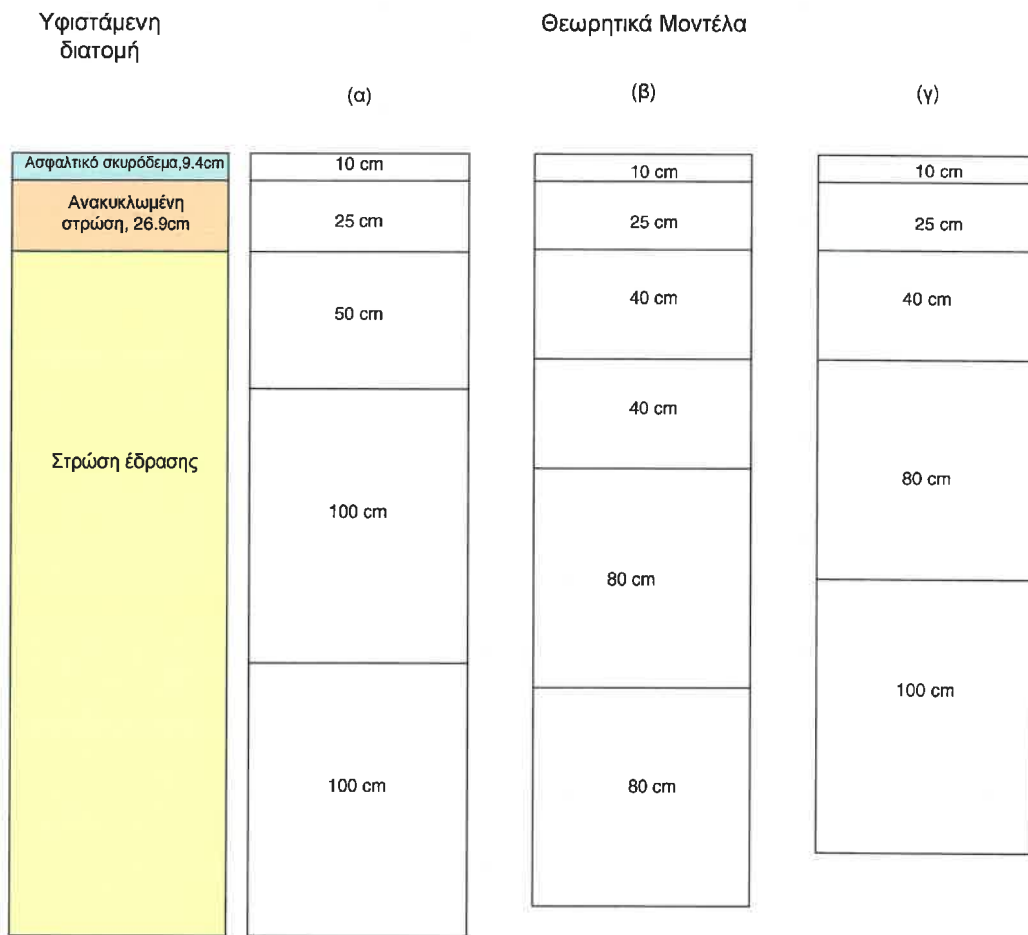
Παρά το γεγονός ότι η πλήρης άγνοια της διαστρωμάτωσης της διατομής που μας ενδιαφέρει είναι μια συνήθης περίπτωση στην αξιολόγηση των οδοστρώματων, δεν είναι δύσκολο να αποκτήσει κανείς πληροφορίες για τα πάχη των μελετών των στρώσεων ενός οδικού τμήματος. Στα επόμενα τρία πρότυπα η διαστρωμάτωση της διατομής θεωρείται γνωστή ενώ για καθένα από αυτά εξετάζονται διαφορετικές παραλλαγές ώστε να αξιολογηθεί η επίδραση που έχει η μεταβολή κάποιων από τις παραμέτρους του αρχικού μονέλου στα τελικά αποτελέσματα.

Αξίζει σε αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι σύμφωνα με έρευνα, η οποία περιελάμβανε την ανάλυση πειραματικών μετρήσεων με χρήση του προγράμματος WinSASW, στην περίπτωση που δεν υπάρχουν πληροφορίες για τη διατομή του οδοστρώματος η μέθοδος ΦΑΕΚ οδηγεί στην υπερεκτίμηση του πάχους των στρώσεων από 30%-150% και επομένως για τη σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι απαραίτητη η χρήση μίας τουλάχιστον γεώτρησης (Khanna and Mooney, 2002). Για το πρότυπο 1 οι αποκλίσεις μεταξύ των παχών των στρώσεων που υπολογίστηκαν για τα θεωρητικά μοντέλα (α), (β) και (γ) και των αντίστοιχων παχών της υφιστάμενης διατομής κυμαίνονται από 7% - 170%.

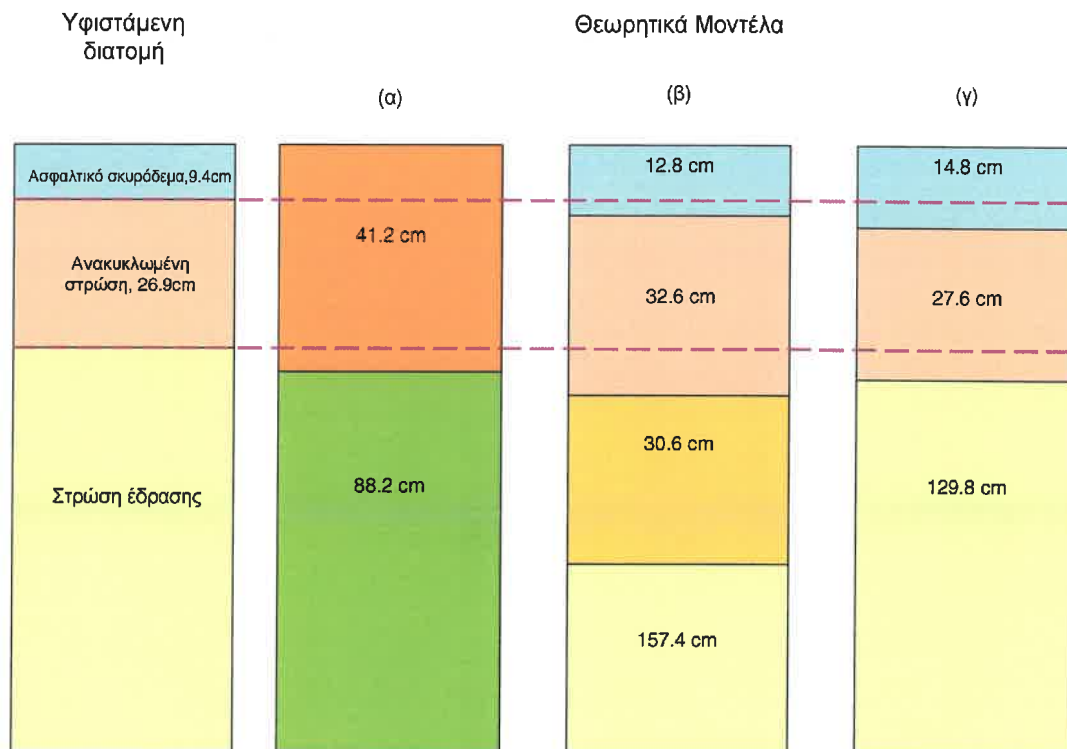
6.3.2 Πρότυπο 2

Το στατικό πρότυπο του υπό εξέταση οδοστρώματος είναι ένα σύστημα 4 στρώσεων και αποτελείται από τρεις επάλληλες στρώσεις, πεπερασμένου πάχους και απείρων διαστάσεων κατά την οριζόντια έννοια, που εδράζονται πάνω σε μία στρώση απεριόριστων οριζόντιων διαστάσεων και απεριόριστου πάχους (όπως έχει ήδη αναφερθεί και σε προηγούμενες υποενότητες). Στο πρότυπο 2 της παρούσας ανάλυσης η στρώση των ασύνδετων αμμοχάλικων θεωρείται ότι αποτελεί μέρος τη στρώσης έδρασης ώστε το στατικό πρότυπο του υπό εξέταση οδοστρώματος να απλοποιηθεί και να γίνει τριστρωματικό. Επίσης τα πάχη των στρώσεων του ασφαλικού σκυροδέματος και της ανακυκλωμένης στρώσης τίθενται ίσα με αυτά της υφιστάμενης διατομής ενώ δοκιμάζονται διαφορετικά θεωρητικά μοντέλα στα οποία μεταβάλλεται η διαστρωμάτωση του υποκείμενου εδαφικού ημίχωρου (σχήμα 6.20). Για τις πυκνότητες θεωρείται τιμή ίση με 2320 kg/m^3 για το πρώτο στρώμα και τιμή 1800 kg/m^3 για τα υπόλοιπα στρώματα.

Τα αποτελέσματα μετά το τέλος της ανάλυσης όσον αφορά στη διαστρωμάτωση για το πρότυπο 2, όπου η στρώση των ασύνδετων αμμοχάλικων θεωρήθηκε ως ενιαία με τη στρώση έδρασης, φαίνονται στο σχήμα 6.21.



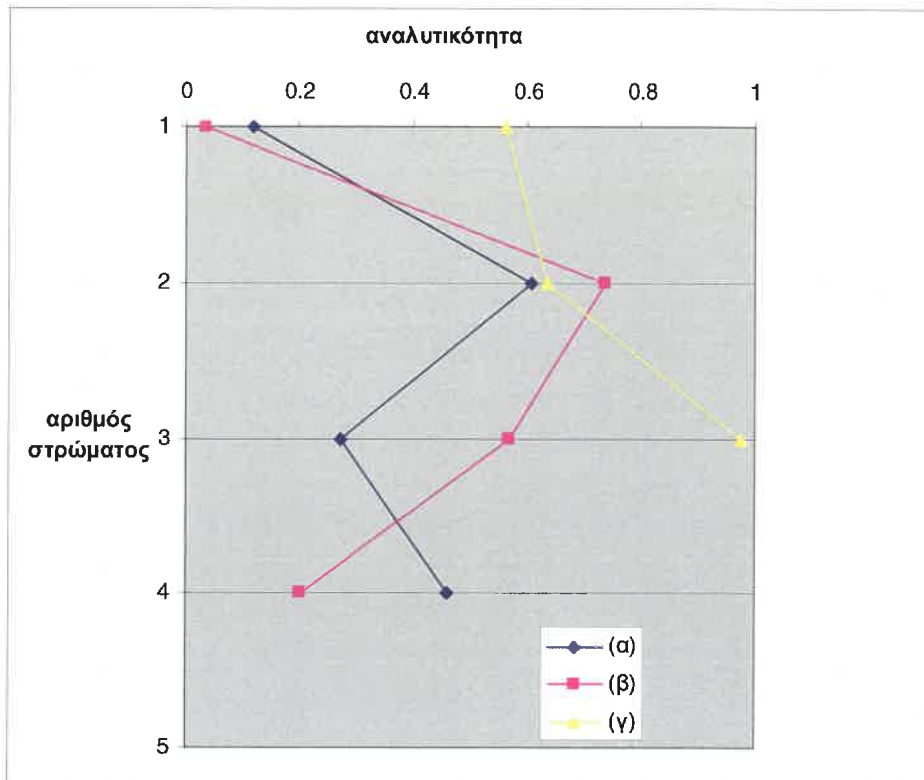
Σχήμα 6.20 Θεωρητικά μοντέλα για το Πρότυπο 2



Σχήμα 6.21 Έλεγχος διαστρωμάτωσης του Πρότυπου 2

Σε αυτή την περίπτωση παρατηρούμε ότι το πάχος του πρώτου υποστρώματος έχει υπερεκτιμηθεί σε όλα τα θεωρητικά μοντέλα. Με εξαίρεση το πρώτο θεωρητικό μοντέλο το οποίο απέχει πολύ από την υφιστάμενη διατομή στα υπόλοιπα δύο η ανακυκλωμένη στρώση έχει προσδιοριστεί επιτυχώς ως προς το πάχος της.

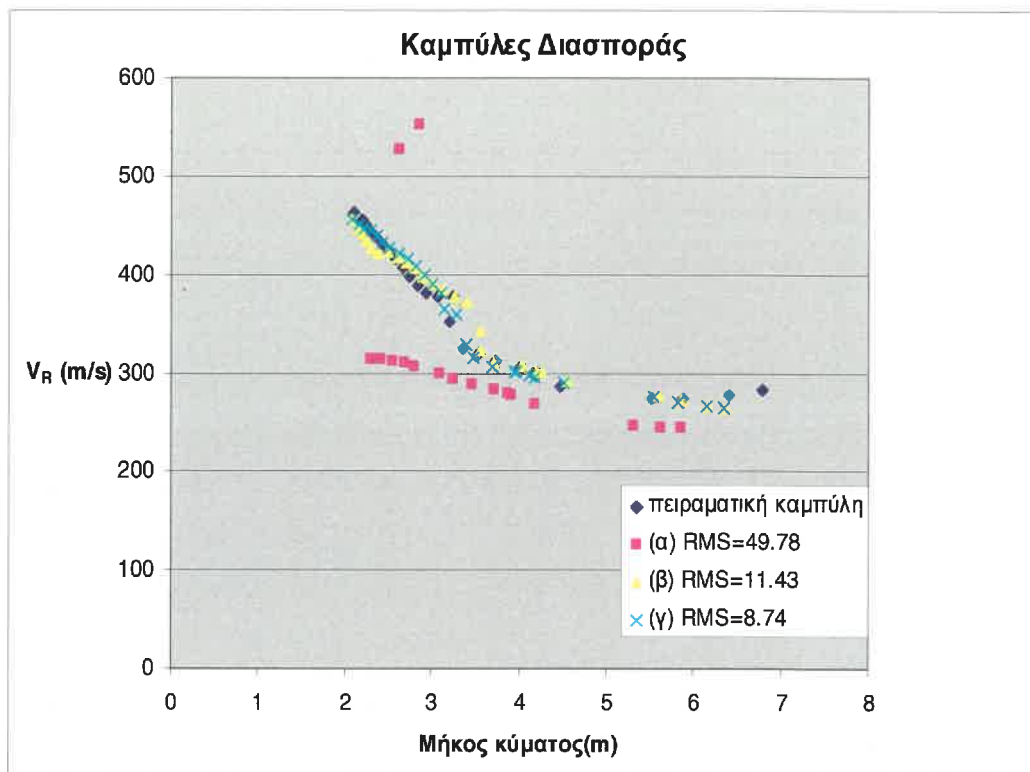
Στο σχήμα 6.22 απεικονίζονται οι τιμές της αναλυτικότητας των επιμέρους στρωμάτων που θεωρήθηκαν για κάθε ένα από τα μοντέλα.



Σχήμα 6.22 Τιμές αναλυτικότητας για το Πρότυπο 2

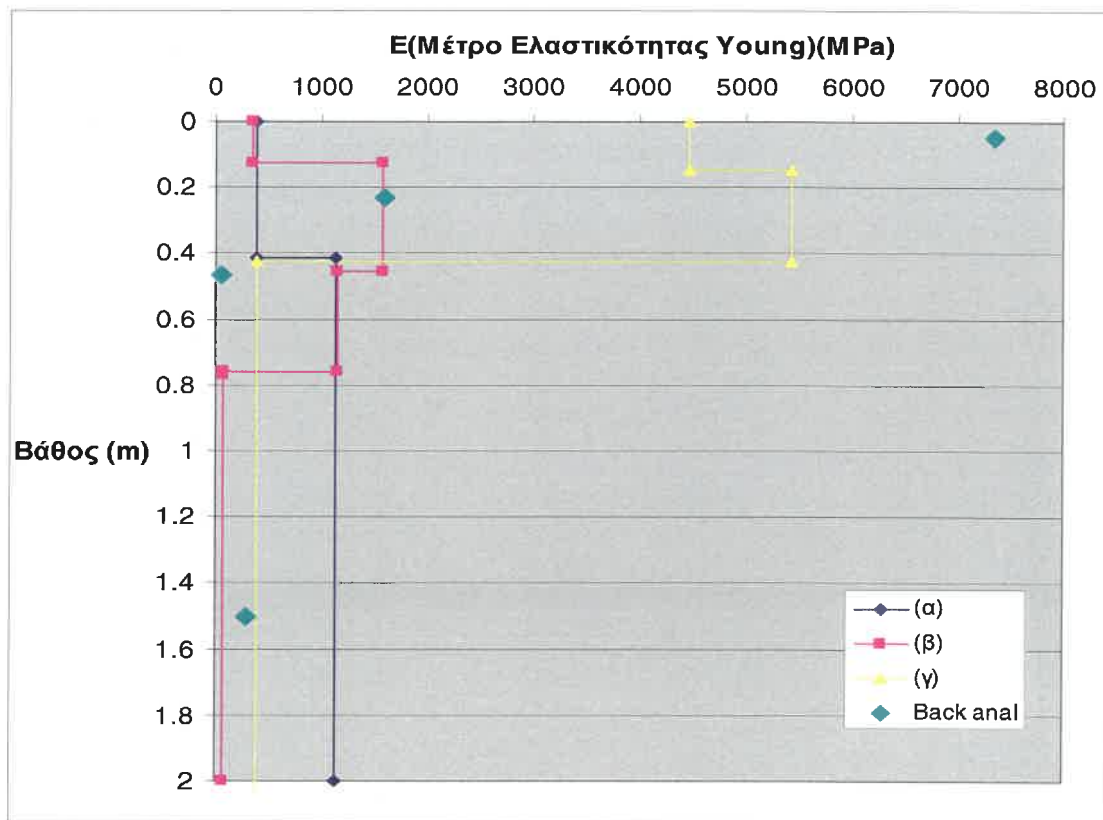
Σε αυτό το πρότυπο παρατηρούμε ότι οι τιμές της αναλυτικότητας για το πρώτο στρώμα του πρώτου θεωρητικού μοντέλου είναι πολύ χαμηλή ενώ στις υπόλοιπες δύο παίρνει αποδεκτές τιμές. Για τα υπόλοιπα στρώματα ο δείκτης αναλυτικότητας είναι υψηλός για όλες τις περιπτώσεις.

Στο σχήμα 6.23 φαίνεται η σύγκριση της πειραματικής καμπύλης διασποράς με τις θεωρητικές καμπύλες διασποράς που προκύπτουν για καθένα από τα τρία θεωρητικά μοντέλα. Παρατηρούμε ότι για το πρώτο θεωρητικό μοντέλο η απόκλιση των καμπυλών είναι μεγάλη, γεγονός που τεκμηριώνεται μέσω της υψηλής τιμής του δείκτη RMS. Για τα υπόλοιπα δύο θεωρητικά μοντέλα η προσέγγιση των καμπυλών είναι ικανοποιητική.



Σχήμα 6.23 Σύγκριση πειραματικής –θεωρητικών καμπυλών για το Πρότυπο 2

Στο σχήμα 6.24 φαίνονται τα προφίλ των μέτρων ελαστικότητας για τα διαφορετικά θεωρητικά μοντέλα του προτύπου 2



Σχήμα 6.24 Προφίλ μέτρων ελαστικότητας για το Πρότυπο 2

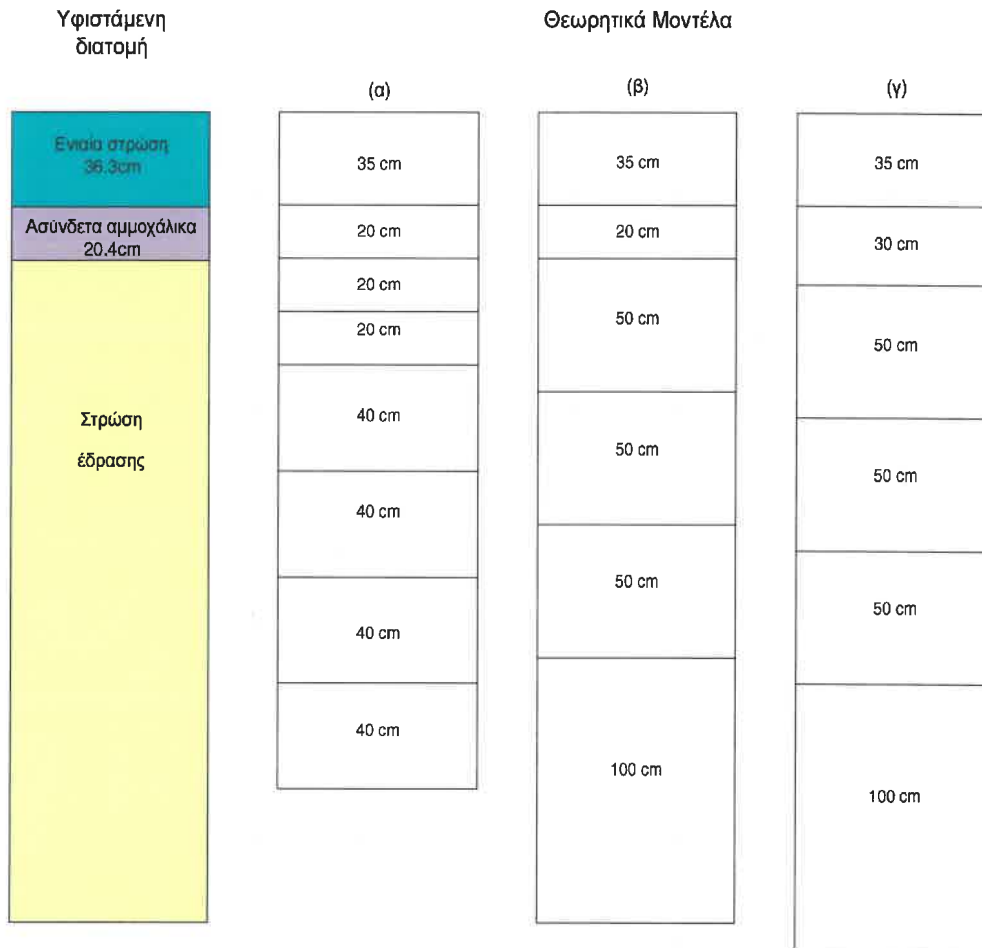
Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται με τον ίδιο τρόπο όπως και στο σχήμα 6.8. Η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων και το μέτρο ελαστικότητας Young αποτελούν διαφορετικούς τρόπους έκφρασης της δυσκαμψίας ενός υλικού και οι κατανομές τους με το βάθος ακολουθούν την ίδια μορφή (όπως γίνεται κατανοητό και από τα σχήματα 5.18 και 5.19). Για αυτό το λόγο, και δεδομένου ότι τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού από τις μετρήσεις του FWD εκφράζονται με τα μέτρα ελαστικότητας, για τα πρότυπα που ακολουθούν θα παραθέτονται μόνο τα προφίλ των μέτρων ελαστικότητας για τα διαφορετικά εξεταζόμενα θεωρητικά μοντέλα.

Σε αυτό το πρότυπο παρατηρούμε οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας της μεθόδου ΦΑΕΚ για το στρώμα του ασφαλτικού σκυροδέματος είναι χαμηλές συγκρινόμενες με την αντίστοιχη του FWD. Επίσης η τιμή του μέτρου ελαστικότητας του δεύτερου στρώματος είναι αρκετά υψηλή και μεγαλύτερη από αυτή του ασφαλτικού στρώματος ακόμα και στις περιπτώσεις που προσεγγίζεται ικανοποιητικά η διαστρωμάτωση της υφιστάμενης διατομής.

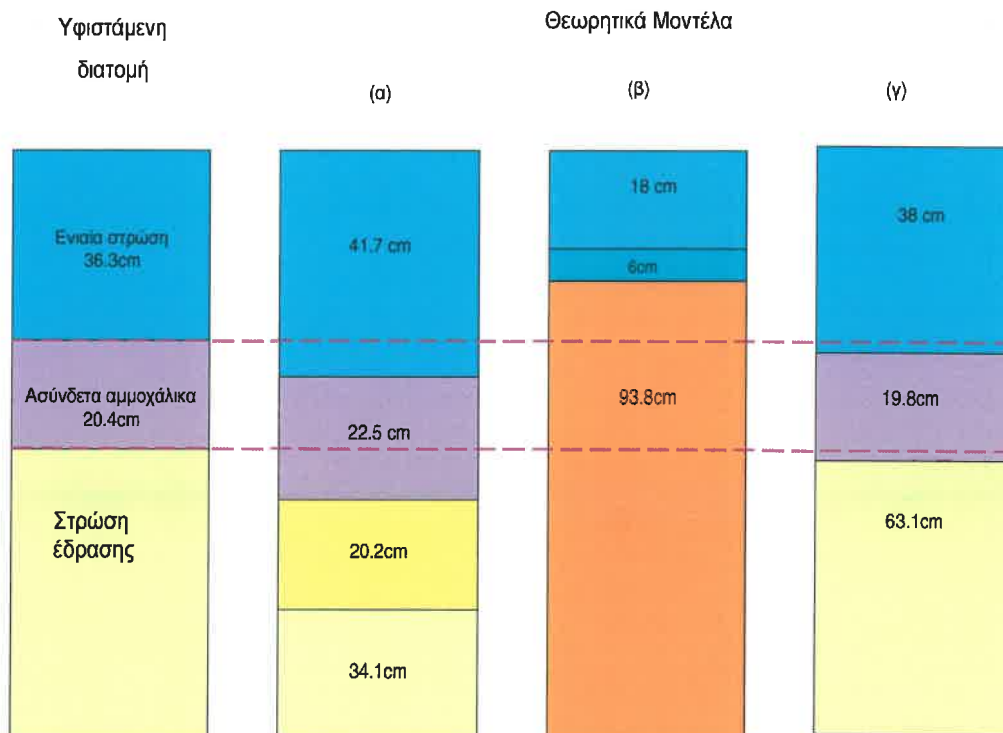
6.3.3 Πρότυπο 3

Σε αυτό το πρότυπο πραγματοποιείται και πάλι απλοποίηση του στατικού προτύπου του υπό εξέταση οδοστρώματος. Η στρώση της βάσης η οποία αποτελείται από ενοποιημένες ανακυκλωμένες στρώσεις με χρήση αφρώδους ασφάλτου θεωρείται ενιαία με τη στρώση κυκλοφορίας και κατά αυτό τον τρόπο το στατικό πρότυπο μετατρέπεται σε τριστρωματικό. Το πάχος της ενιαίας στρώσης τίθεται ίσο με το άθροισμα των παχών του ασφαλτικού σκυροδέματος και της ανακυκλωμένης στρώσης της υφιστάμενης διατομής. Το πάχος του δεύτερου στρώματος έχει την τιμή του πάχους των ασύνδετων αμμοχάλικων της υφιστάμενης διατομής ενώ για τα διαφορετικά θεωρητικά μοντέλα που δοκιμάζονται μεταβάλλεται η διαστρωμάτωση του υποκείμενου εδαφικού ημίχωρου (σχήμα 6.25). Για τις πυκνότητες θεωρείται τιμή ίση με 2320 kg/m^3 για το πρώτο στρώμα και τιμή 1800 kg/m^3 για τα υπόλοιπα στρώματα.

Τα αποτελέσματα μετά το τέλος της ανάλυσης όσον αφορά στη διαστρωμάτωση για το πρότυπο 3, όπου τα δύο πρώτα στρώματα θεωρήθηκαν ως μία ενιαία στρώση, απεικονίζονται στο σχήμα 6.26.



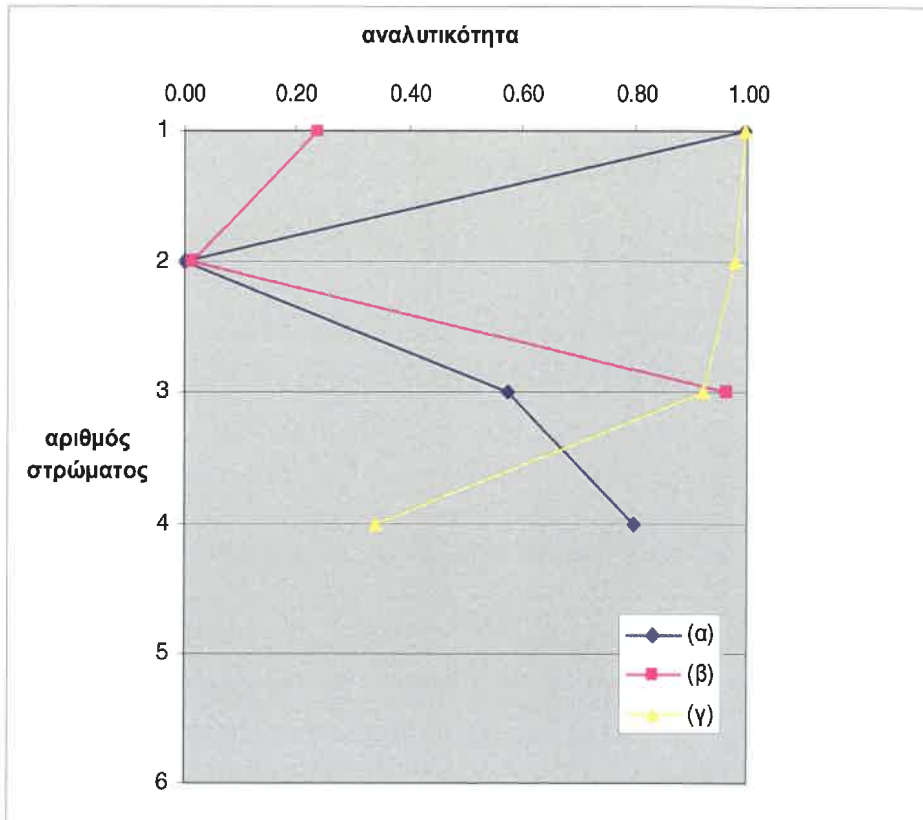
Σχήμα 6.25 Θεωρητικά μοντέλα για το Πρότυπο 3



Σχήμα 6.26 Έλεγχος διαστρωμάτωσης του Πρότυπου 3

Σε αυτό το πρότυπο παρατηρείται ότι η ανάλυση πετυχαίνει να εντοπίσει τη διαστρωμάτωση της υφιστάμενης διατομής ενώ καθοριστικός κρίνεται ο ρόλος της διαστρωμάτωσης του θεωρητικού μοντέλου. Απαιτούνται αρκετές δοκιμές μέχρι να επιτευχθεί μια διαστρωμάτωση που προσεγγίζει την υφιστάμενη διατομή.

Στο σχήμα 6.27 φαίνονται οι τιμές της αναλυτικότητας για κάθε στρώμα κάθε διαφορετικού θεωρητικού μοντέλου.

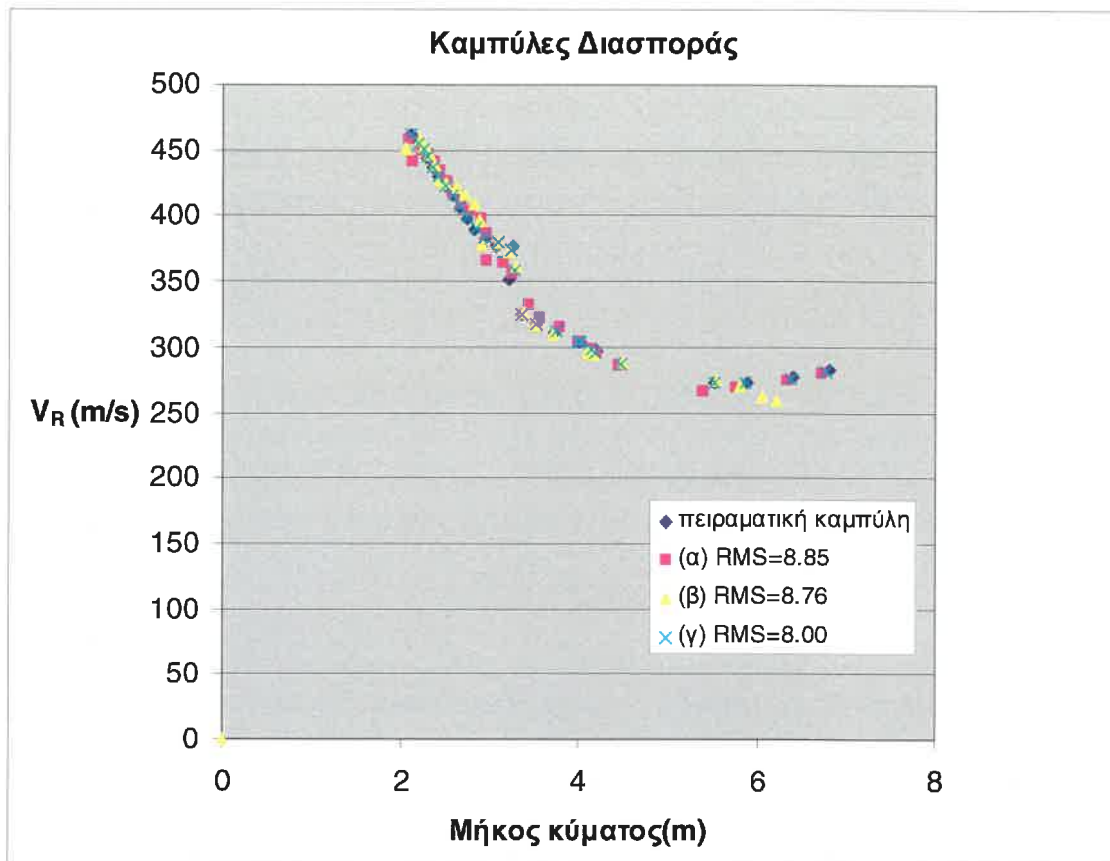


Σχήμα 6.27 Τιμές αναλυτικότητας για το Πρότυπο 3

Είναι εμφανές ότι το πρώτο στρώμα έχει αποδεκτές τιμές αναλυτικότητας για όλα τα θεωρητικά μοντέλα. Στα δύο πρώτα θεωρητικά μοντέλα το δεύτερο στρώμα έχει σχεδόν μηδενικές τιμές αναλυτικότητας. Αντίθετα στο θεωρητικό μοντέλο (γ) το οποίο προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό την υφιστάμενη διατομή παρατηρείται ότι όλα τα στρώματα έχουν πολύ ικανοποιητικές τιμές αναλυτικότητας και μάλιστα η ενιαία στρώση παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη τιμή από τις αντίστοιχες που παρουσίαζαν τα δύο πρώτα στρώματα του προτύπου 1.

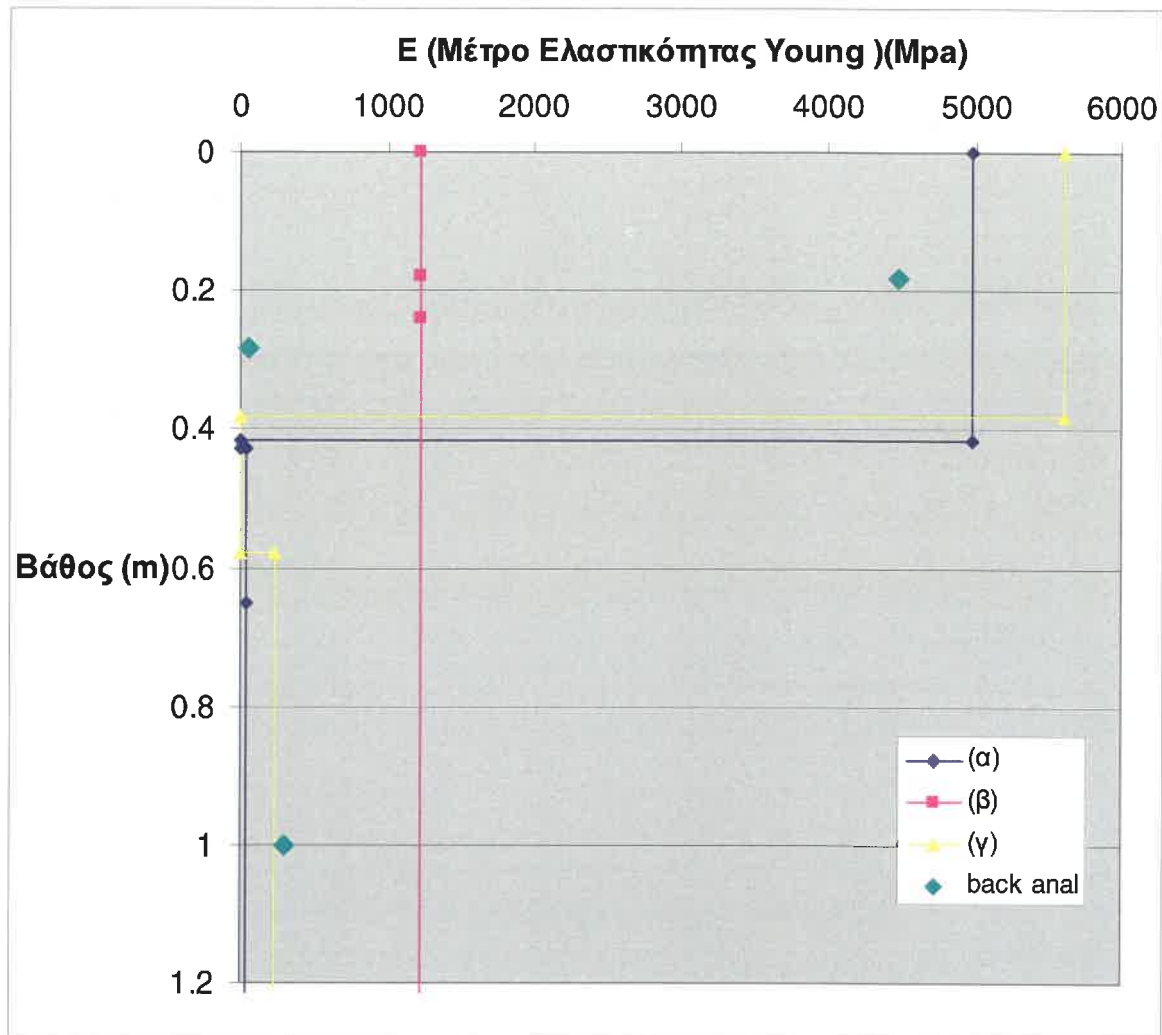
Στο σχήμα 6.28 απεικονίζεται η σύγκριση της πειραματικής καμπύλης διασποράς με τις θεωρητικές καμπύλες διασποράς που προκύπτουν για καθένα από τα τρία διαφορετικά

θεωρητικά μοντέλα και παρατηρείται ότι για όλα τα μοντέλα το σφάλμα RMS έχει ικανοποιητικά μικρή τιμή.



Σχήμα 6.28 Σύγκριση πειραματικής –θεωρητικών καμπυλών για το Πρότυπο 3

Στο σχήμα 6.29 απεικονίζονται τα προφίλ των μέτρων ελαστικότητας που προέκυψαν από τη μέθοδο ΦΑΕΚ για τα θεωρητικά μοντέλα του πρότυπου 3. Πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή της πυκνότητας για το δεύτερο στρώμα του θεωρητικού μοντέλου (γ) μεταβλήθηκε κατά την ανάλυση αντιστροφής και έγινε ίση με αυτή του πρώτου στρώματος ενώ για τα άλλα δύο θεωρητικά μοντέλα παρέμεινε αμετάβλητη. Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας του ενιαίου στρώματος που προέκυψε από τον ανάστροφο υπολογισμό των στοιχείων μέτρησης του FWD τίθεται ίση με το μέσο όρο των μέτρων ελαστικότητας του ασφαλτικού σκυροδέματος και της ανακυκλωμένης στρώσης.



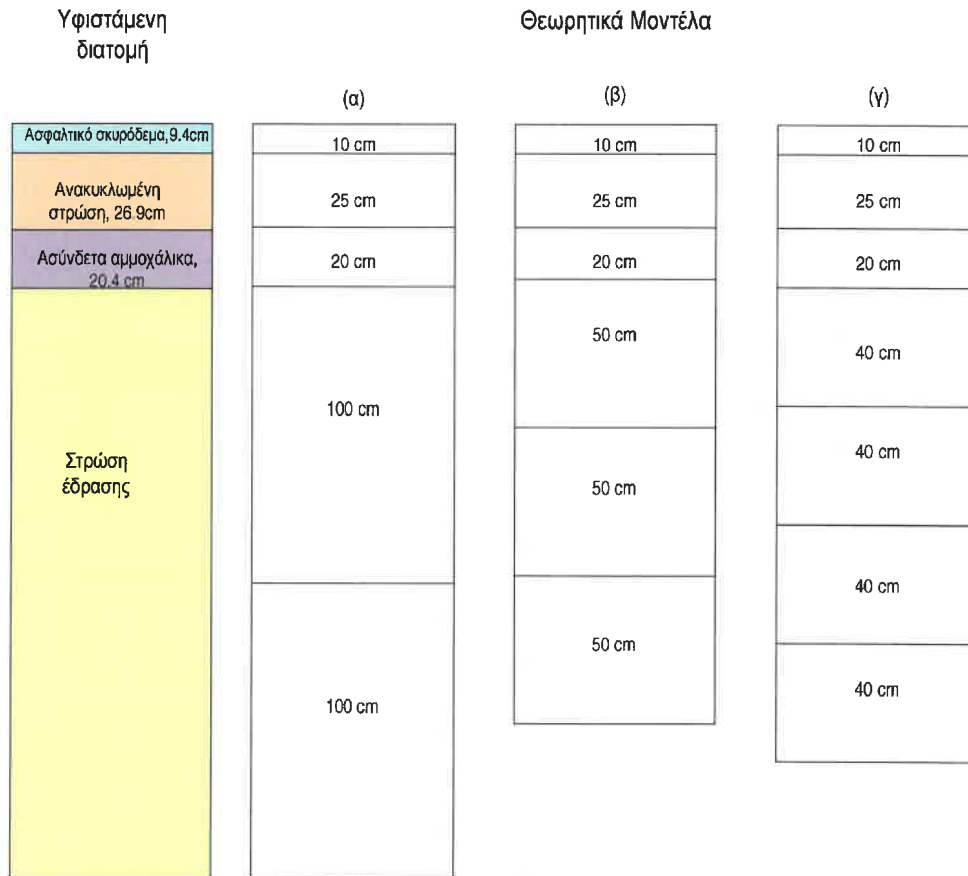
Σχήμα 6.29 Προφίλ μέτρων ελαστικότητας για το Πρότυπο 3

Σε αυτό το πρότυπο παρατηρούμε ότι το μέτρο ελαστικότητας του πρώτου ενιαίου στρώματος είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από την αντίστοιχη τιμή του πρώτου στρώματος του προηγούμενου προτύπου ενώ αντίθετα το μέτρο ελαστικότητας της βάσης είναι πολύ μικρότερο.

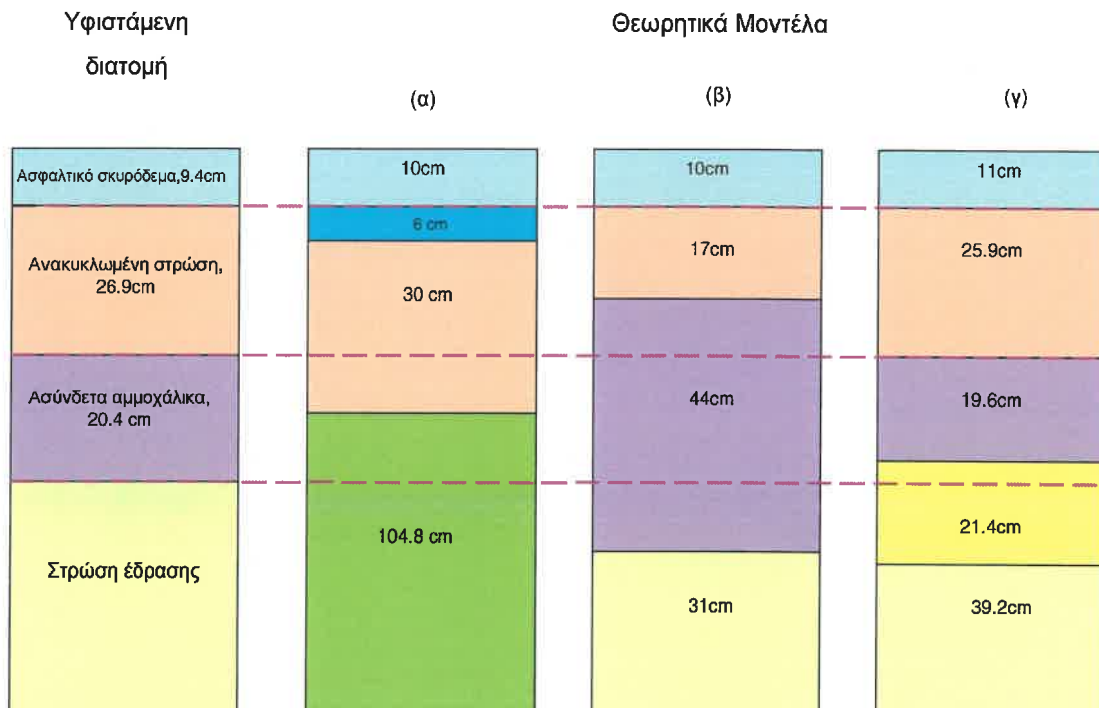
6.3.4 Πρότυπο 4

Σε αυτή την περίπτωση το στατικό πρότυπο του υπό εξέταση οδοστρώματος διατηρείται αμετάβλητο. Στα διαφορετικά θεωρητικά μοντέλα ορίζονται τα πάχη της υφιστάμενης διατομής και μεταβάλλεται μόνο η διαστρωμάτωση του υποκείμενου ημιχώρου (σχήμα 6.30). Σε όλες τις περιπτώσεις για τις πυκνότητες θεωρείται τιμή ίση με 2320 kg/m^3 για το πρώτο στρώμα και τιμή 1800 kg/m^3 για τα υπόλοιπα στρώματα.

Τα αποτελέσματα μετά το τέλος της ανάλυσης όσον αφορά στη διαστρωμάτωση φαίνονται στο σχήμα 6.31.



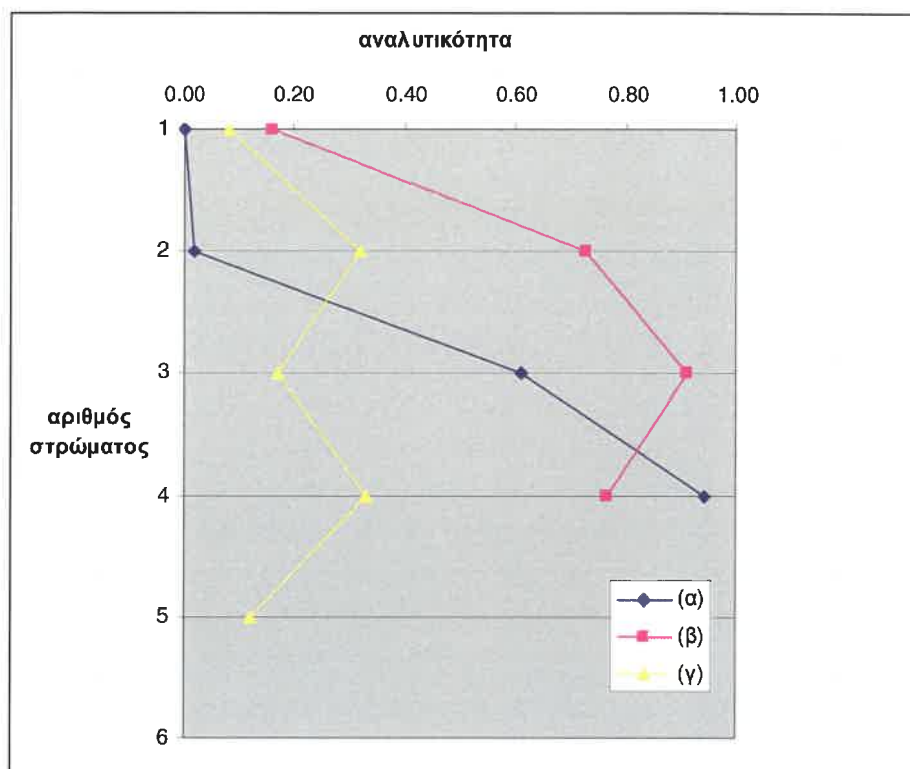
Σχήμα 6.30 Θεωρητικά μοντέλα για το Πρότυπο 4



Σχήμα 6.31 Έλεγχος διαστρωμάτωσης του Προτύπου 4

Παρατηρείται ότι η μέθοδος ΦΑΕΚ έχει τη δυνατότητα να εντοπίσει την πραγματική διαστρωμάτωση του οδοστρώματος. Για να γίνει όμως αυτό απαιτούνται για ακόμα μία φορά δοκιμές με αρκετά διαφορετικά θεωρητικά μοντέλα.

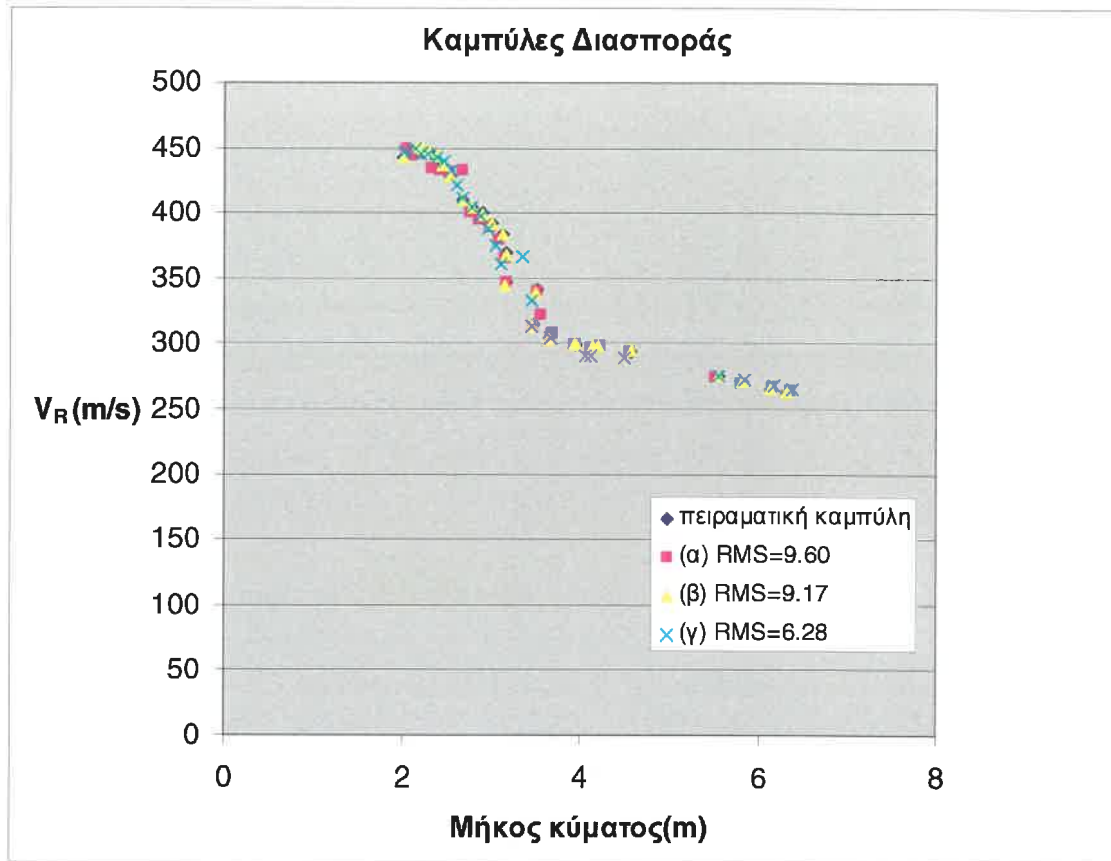
Στο σχήμα 6.32 φαίνονται οι τιμές της αναλυτικότητας για κάθε στρώμα κάθε θεωρητικού μοντέλου.



Σχήμα 6.32 Τιμές αναλυτικότητας για το Πρότυπο 4

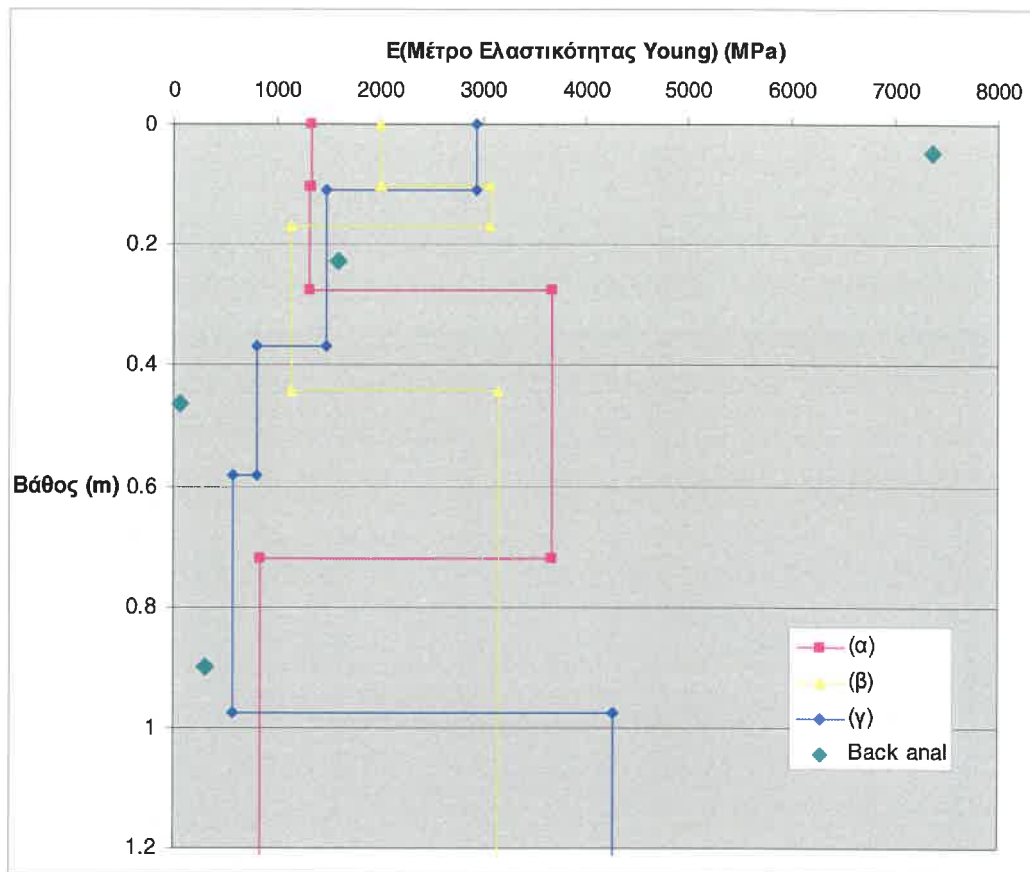
Διαπιστώνεται ότι οι τιμές της αναλυτικότητας για το επιφανειακό στρώμα είναι χαμηλές σε όλα τα θεωρητικά μοντέλα. Για τα υπόλοιπα στρώματα οι τιμές είναι αποδεκτές με εξαίρεση το δεύτερο στρώμα του θεωρητικού μοντέλου (α) το οποίο έχει επίσης χαμηλή τιμή.

Στο σχήμα 6.33 απεικονίζεται η σύγκριση της πειραματικής καμπύλης διασποράς με τις θεωρητικές καμπύλες διασποράς που προκύπτουν για τα διαφορετικά θεωρητικά μοντέλα. Παρατηρούμε ότι η προσέγγιση των θεωρητικών καμπυλών με την πειραματική καμπύλη είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική ιδιαίτερα για το θεωρητικό μοντέλο (γ) το οποίο προσεγγίζει επιτυχώς τη διαστρωμάτωση της υφιστάμενης διατομής.



Σχήμα 6.33 Σύγκριση πειραματικής –θεωρητικών καμπυλών για το Πρότυπο 4

Στο σχήμα 6.34 φαίνονται τα προφίλ των μέτρων ελαστικότητας για τα θεωρητικά μοντέλα του προτύπου 4. Για το πρότυπο αυτό διαπιστώνεται ότι όταν δεν επιτυγχάνεται η σωστή διαστρωμάτωση το στρώμα της βάσης έχει αρκετά υψηλή τιμή μέτρου ελαστικότητας. Αξίζει να επισημανθεί ότι σύμφωνα με τις πηγές το στρώμα της βάσης συνήθως παρουσιάζει τις περισσότερες δυσκολίες ως προς την ανάλυσή του. σε σχέση με τα υπόλοιπα στρώματα (Rydèn, 2004, Roesset, 1998). Για ακόμα μία φορά οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο ΦΑΕΚ είναι κατά πολύ χαμηλότερες από την αντίστοιχη τιμή που προέκυψε από τον ανάστροφο υπολογισμό των στοιχείων μέτρησης του FWD ενώ το αντίθετο φαινόμενο παρατηρείται για το στρώμα των ασύνδετων αμμοχάλικων.



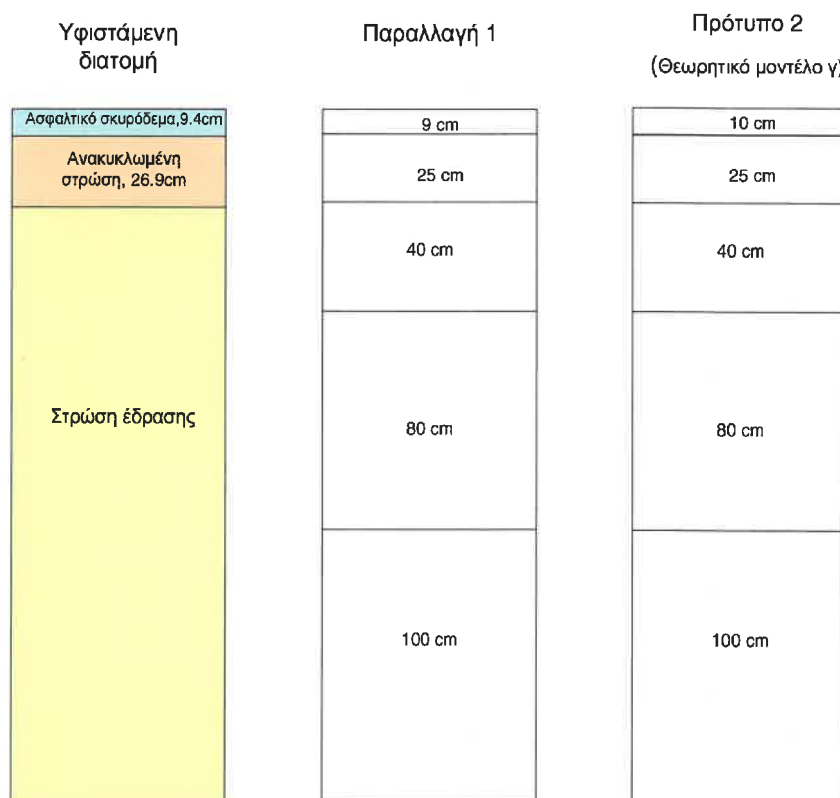
Σχήμα 6.34 Προφίλ μέτρων ελαστικότητας για το Πρότυπο 4

Για τα θεωρητικά μοντέλα (α), (β) και (γ) καθενός από τα πρότυπα 1, 2 και 3 το πάχος του ασφαλτικού σκυροδέματος από τα 9.4 cm της υφιστάμενης διατομής στρογγυλοποιήθηκε στα 10 cm. Στο πρότυπο που ακολουθεί το πάχος της ασφαλτικής στρώσης τίθεται ίσο με 9 cm στην προσπάθεια επίτευξης μιας καλύτερης προσέγγισης της υφιστάμενης διατομής. Με την παραλλαγή μόνο αυτής της παραμέτρου και διατηρώντας όλες τις υπόλοιπες σταθερές καθίσταται δυνατό να εξεταστεί σε μεγαλύτερο βαθμό η επίδραση που έχει η διαστρωμάτωση του αρχικού μοντέλου στα τελικά αποτελέσματα.

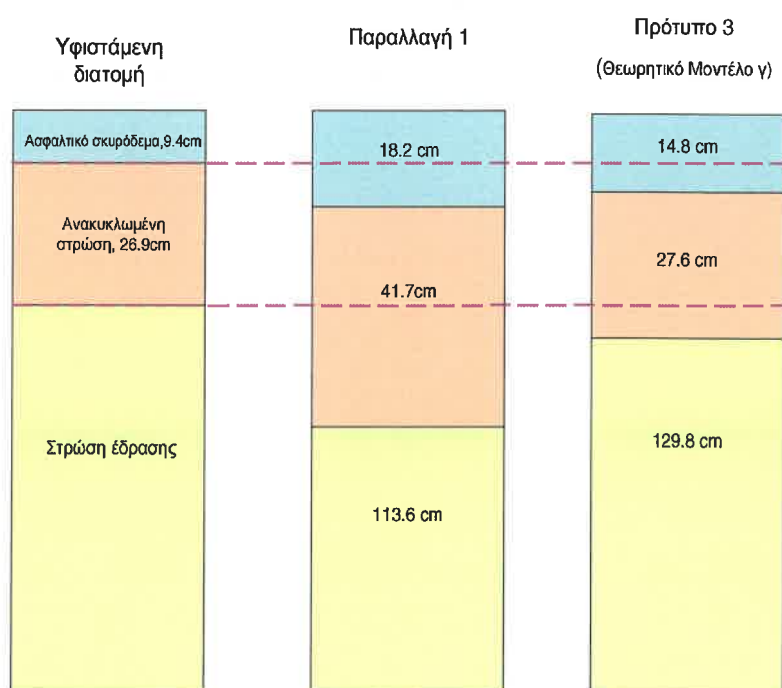
6.3.5 Πρότυπο 5

Το πρότυπο αυτό περιλαμβάνει τρεις παραλλαγές, μία για καθένα από τα τρία πρότυπα που προηγήθηκαν. Στο σχήμα 6.35 φαίνεται το θεωρητικό μοντέλο της παραλλαγής 1 το οποίο διαφέρει από το θεωρητικό μοντέλο (γ) του προτύπου 2 μόνο στο πάχος του πρώτου στρώματος. Στο αριστερό μέρος του σχήματος εμφανίζεται η υφιστάμενη διατομή, στο κέντρο φαίνεται το θεωρητικό μοντέλο της παραλλαγής 1 και στο δεξί φαίνεται το θεωρητικό μοντέλο (γ) του προτύπου 2. Τα αποτελέσματα μετά την ανάλυση όσον αφορά στη διαστρωμάτωση για την παραλλαγή 1 φαίνονται στο σχήμα 6.36. Στο σχήμα περιλαμβάνονται και τα

αποτελέσματα για το θεωρητικό μοντέλο (γ) του προτύπου 2 ώστε να είναι πιο εύκολη η σύγκριση.



Σχήμα 6.35 Θεωρητικό μοντέλο της Παραλλαγής 1

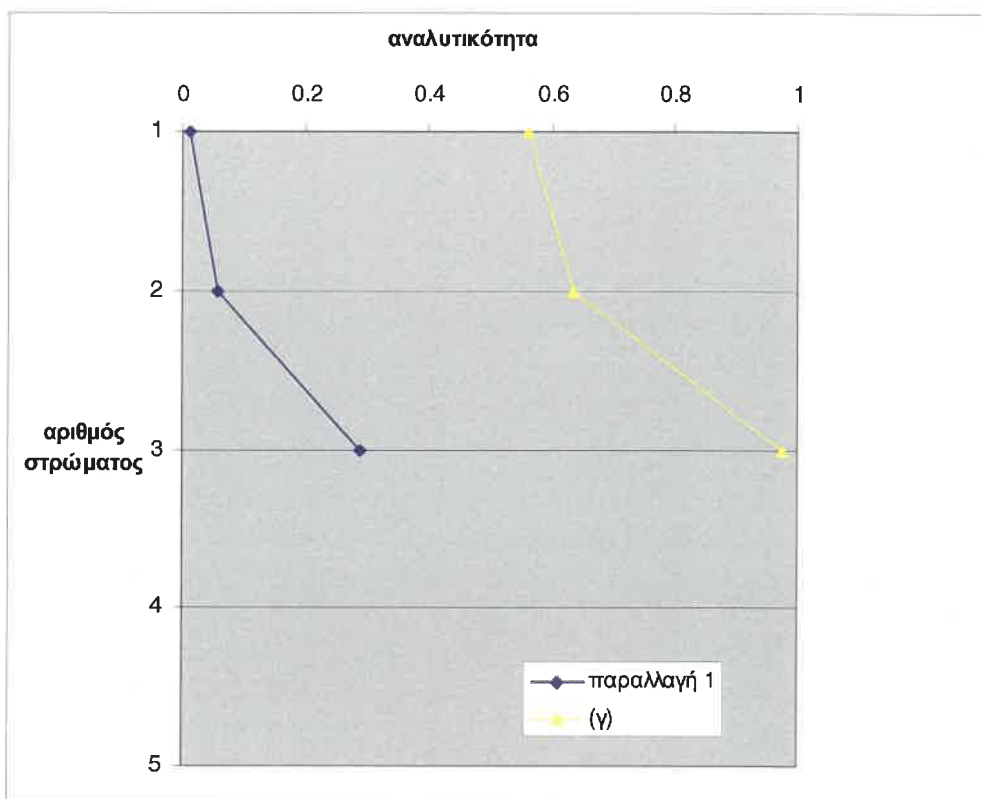


Σχήμα 6.36 Έλεγχος διαστρωμάτωσης της Παραλλαγής 1

Παρά το γεγονός ότι το πάχος του πρώτου στρώματος του αρχικού μοντέλου της παραλλαγής 1 είναι μικρότερο από το αντίστοιχο του θεωρητικού μοντέλου (γ) του προτύπου 2 παρατηρείται ότι μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας της ανάλυσης τα πάχη τόσο της πρώτης όσο και της δεύτερης στρώσης είναι μεγαλύτερα από αυτά του θεωρητικού μοντέλου (γ) και αρκετά μεγαλύτερα από αυτά της υφιστάμενης διατομής.

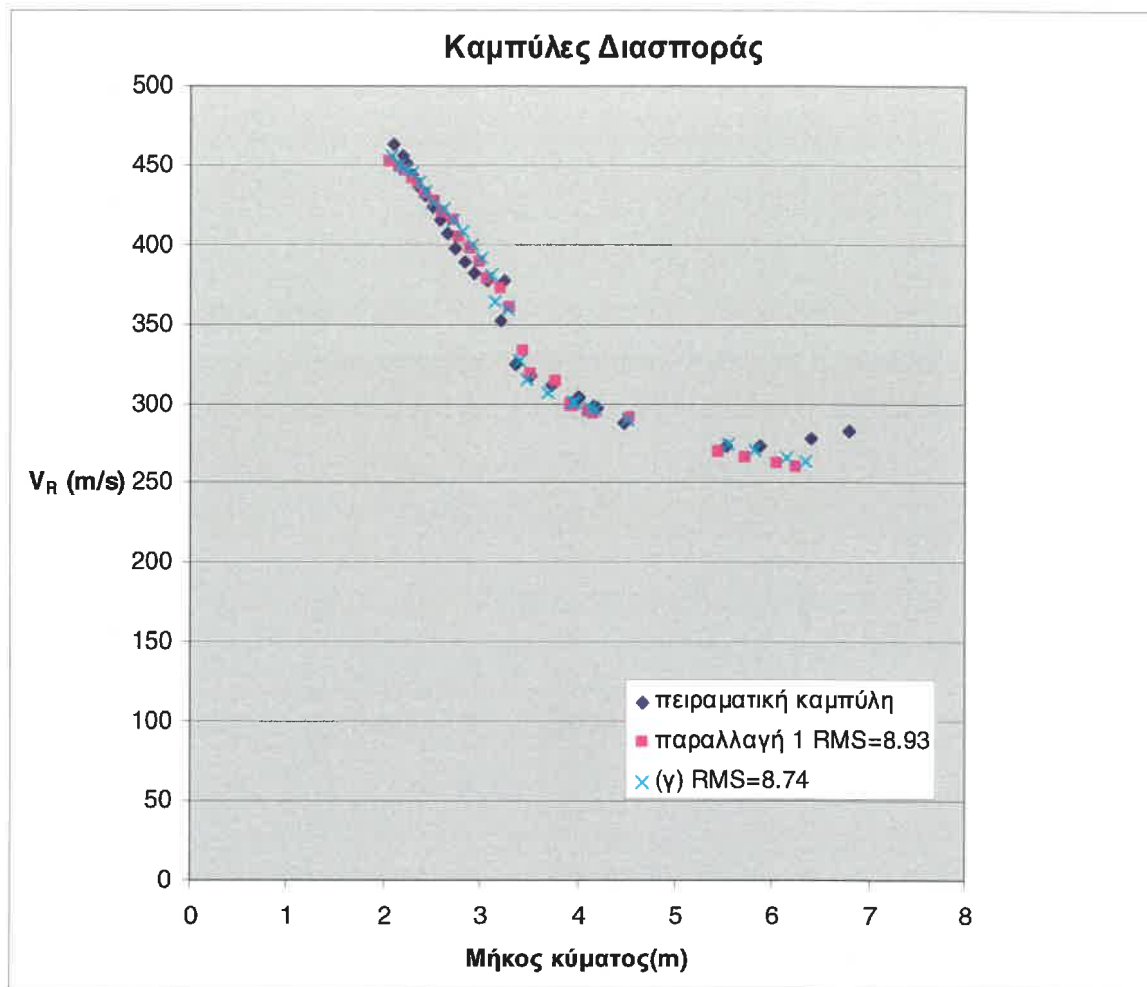
Στο σχήμα 6.37 φαίνονται οι τιμές της αναλυτικότητας για τα στρώματα της παραλλαγής 1 και του θεωρητικού μοντέλου (γ) του προτύπου 2.

Η τιμή της αναλυτικότητας για το πρώτο στρώμα της παραλλαγής 1 είναι σχεδόν μηδενική ενώ για το δεύτερο στρώμα αν και είναι αρκετά ικανοποιητική εξακολουθεί να είναι μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή του θεωρητικού μοντέλου (γ) του προτύπου 2.



Σχήμα 6.37 Τιμές αναλυτικότητας για την Παραλλαγή 1

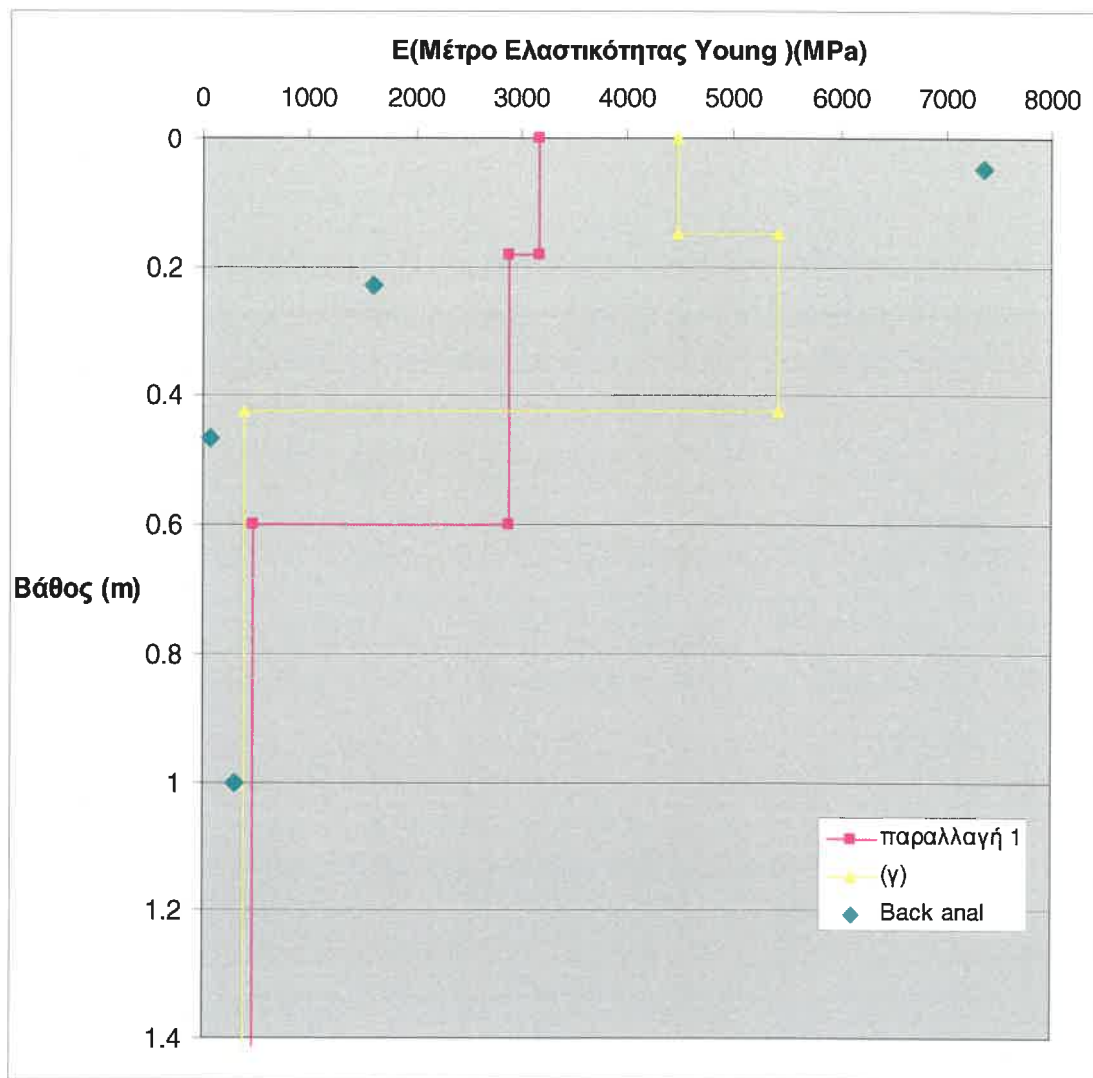
Στο σχήμα 6.38 απεικονίζεται η θεωρητική καμπύλη της παραλλαγής 1 σε σχέση με την πειραματική καμπύλη και τη θεωρητική καμπύλη του θεωρητικού μοντέλου (γ) του προτύπου 2. Η θεωρητική καμπύλη προσεγγίζει σε ικανοποιητικό βαθμό την πειραματική καμπύλη.



Σχήμα 6.38 Σύγκριση πειραματικής –θεωρητικών καμπυλών για την Παραλλαγή 1

Στο σχήμα 6.39 φαίνεται το προφίλ των μέτρων ελαστικότητας για την παραλλαγή 1. Το προφίλ αυτό συγκρίνεται με το αντίστοιχο του θεωρητικού μοντέλου (γ) του προτύπου 2 και με τα μέτρα ελαστικότητας από την ανάστροφη ανάλυση των μετρήσεων του FWD.

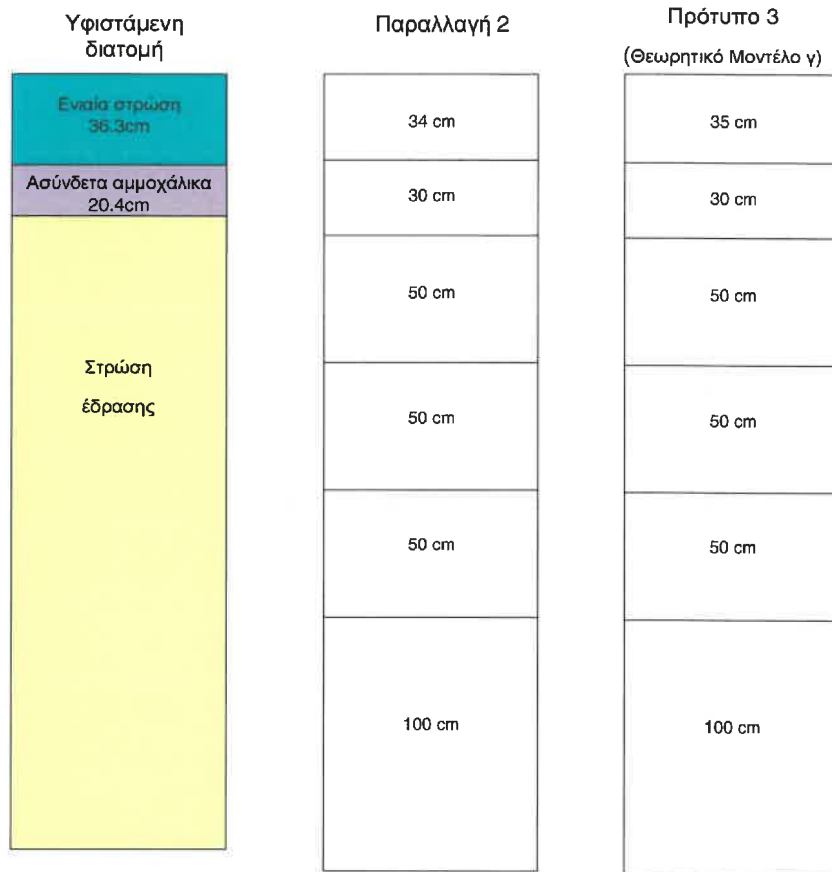
Τα μέτρα ελαστικότητας για την παραλλαγή 1 είναι μικρότερα από αυτά της διαστρωμάτωσης (γ) του μοντέλου 3 για τα δύο πρώτα στρώματα σε αντίθεση με το τρίτο στρώμα. Η τιμή της πυκνότητας για το δεύτερο στρώμα της παραλλαγής 1 μεταβλήθηκε κατά την ανάλυση αντιστροφής και έγινε ίση με αυτή του πρώτου στρώματος.



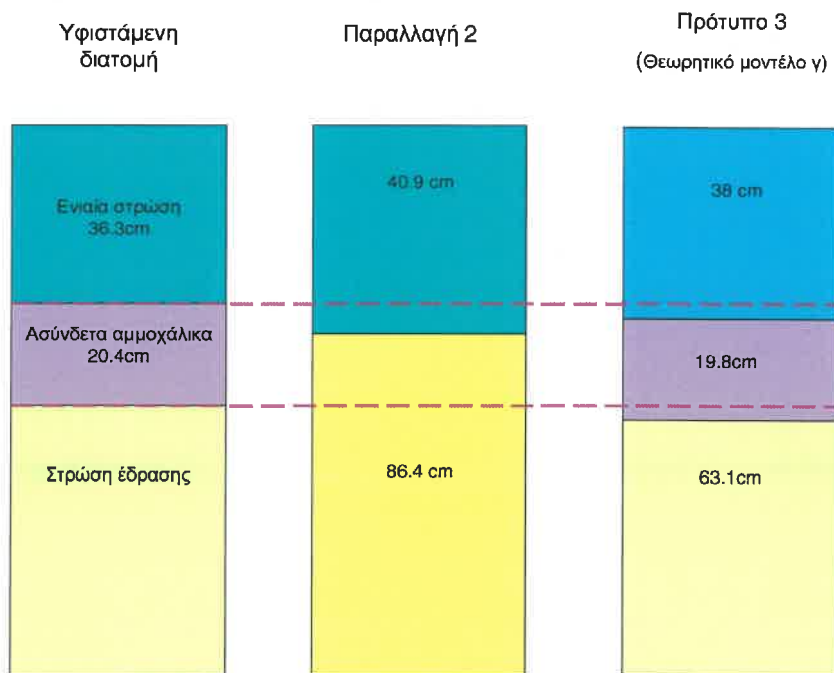
Σχήμα 6.39 Προφίλ μέτρων ελαστικότητας για την Παραλλαγή 1

Η ίδια διαδικασία σύγκρισης πραγματοποιείται και για την παραλλαγή 2 η οποία ακολουθεί τη διαστρωμάτωση του θεωρητικού μοντέλου (γ) του προτύπου 3 με εξαίρεση το πρώτο στρώμα (σχήμα 6.40).

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για το θεωρητικό μοντέλο της παραλλαγής 2 παρουσιάζονται με τον ίδιο τρόπο με αυτά της παραλλαγής 1. Η σύγκριση γίνεται με τα αποτελέσματα για το θεωρητικό μοντέλο (γ) του προτύπου 3.



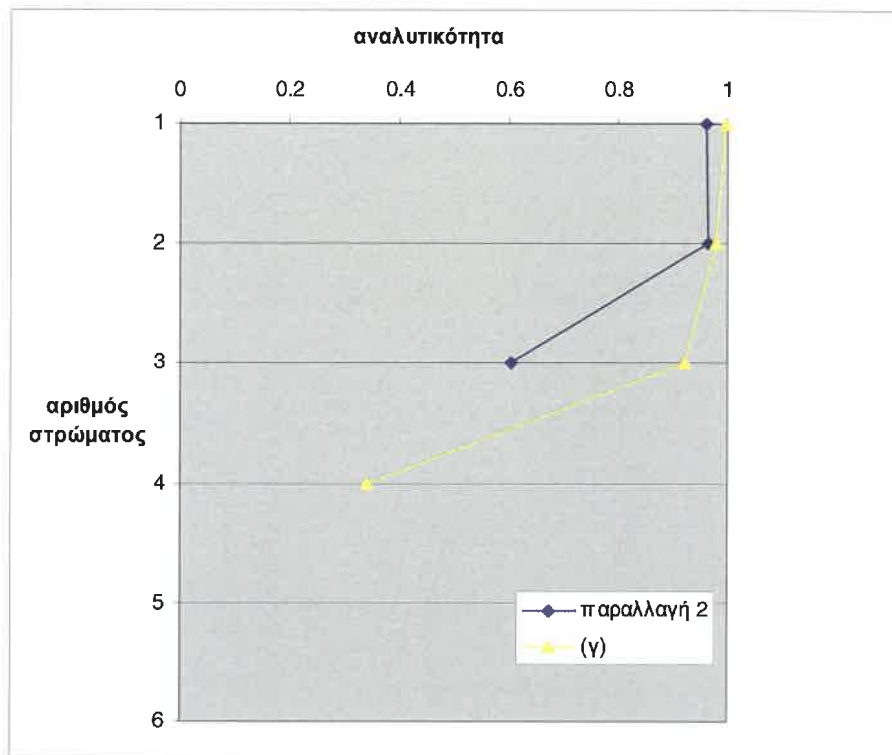
Σχήμα 6.40 Θεωρητικό μοντέλο της Παραλλαγής 2



Σχήμα 6.41 Έλεγχος διαστρωμάτωσης της Παραλλαγής 2

Στα αποτελέσματα αυτής της παραλλαγής το δεύτερο στρώμα δεν υφίσταται ως ανεξάρτητο και αυτό αποτελεί μία σημαντική διαφορά τόσο με την υφιστάμενη διατομή όσο και με τα αποτελέσματα του θεωρητικού μοντέλου (γ) του προτύπου 3.

Στα ακόλουθο σχήμα φαίνονται οι τιμές της αναλυτικότητας (σχήμα 6.42) για την παραλλαγή 2.

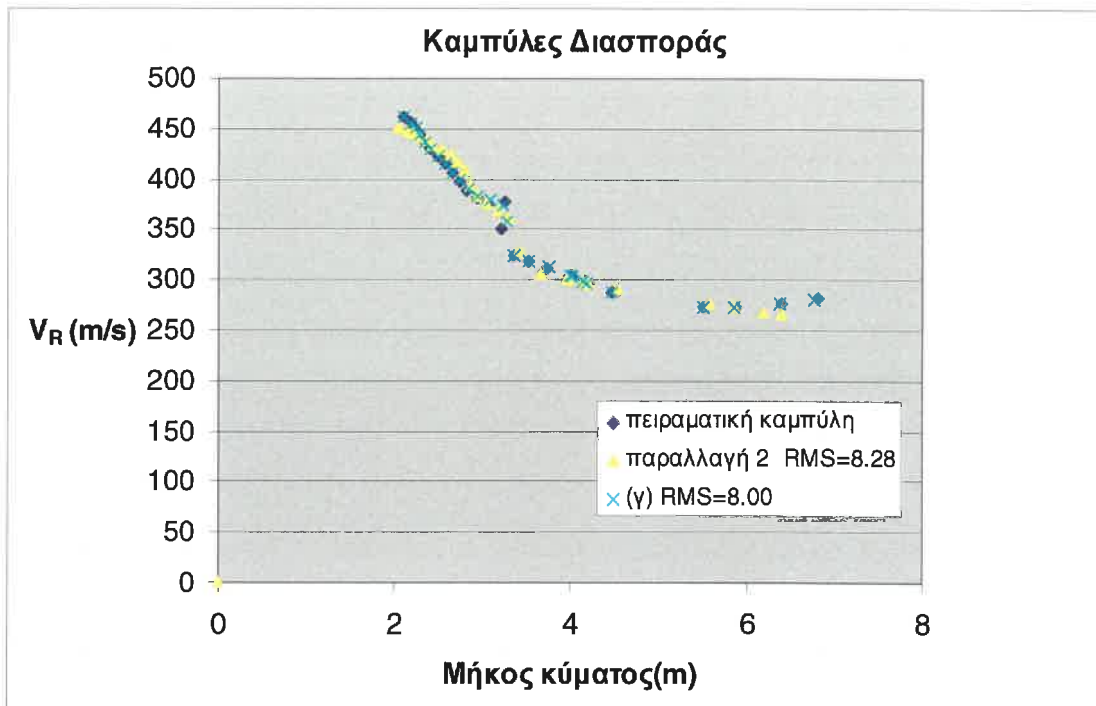


Σχήμα 6.42 Τιμές αναλυτικότητας για την Παραλλαγή 2

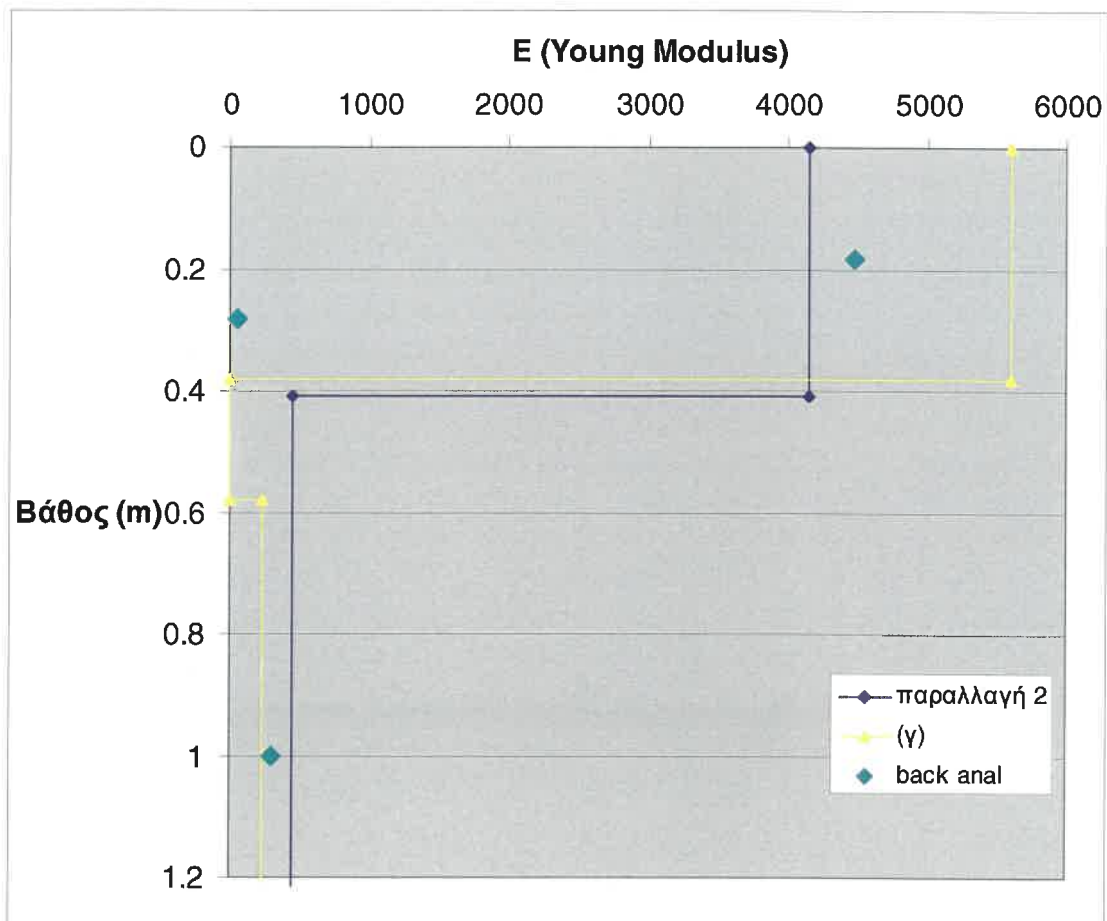
Παρατηρείται ότι τόσο ο δείκτης αναλυτικότητας έχει αποδεκτές τιμές για τα στρώματα της παραλλαγή 2 οι οποίες όμως είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές του θεωρητικού μοντέλου (γ) του προτύπου 3.

Ακολουθεί η σύγκριση της θεωρητικής καμπύλης της παραλλαγής 2 με την πειραματική καμπύλη διασποράς (σχήμα 6.43). Ο δείκτης RMS έχει αποδεκτές τιμές για την παραλλαγή 2.

Στο σχήμα 6.44 φαίνονται τα προφίλ των μέτρων ελαστικότητας για την παραλλαγή 2.



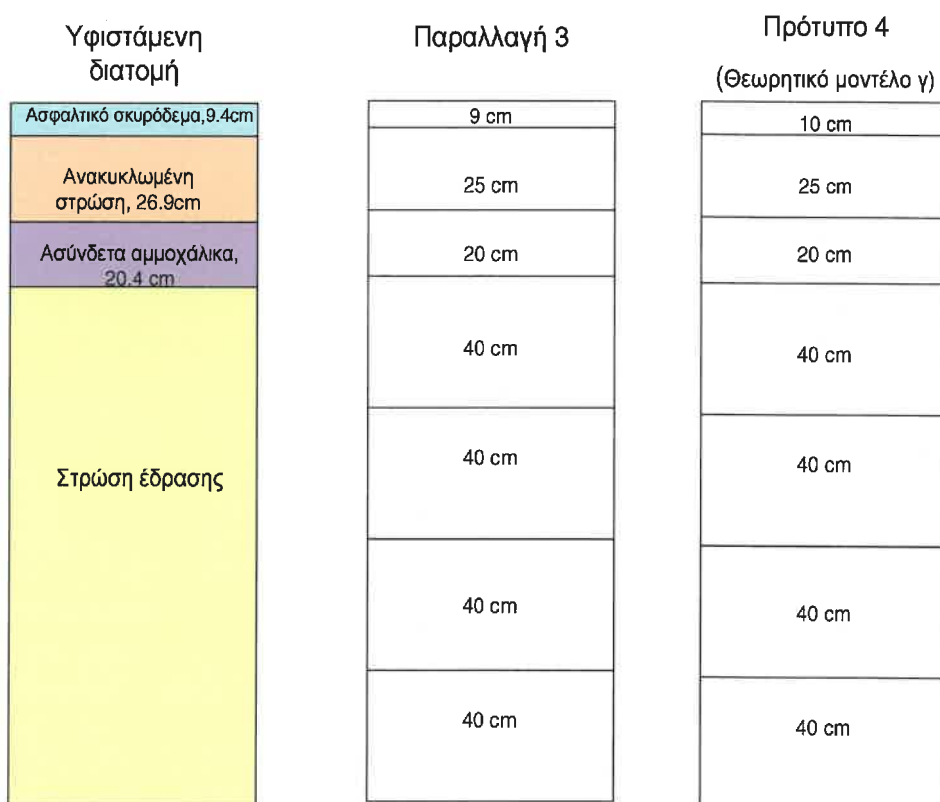
Σχήμα 6.43 Σύγκριση πειραματικής –θεωρητικών καμπυλών για την Παραλλαγή 2



Σχήμα 6.44 Προφίλ μέτρων ελαστικότητας για την Παραλλαγή

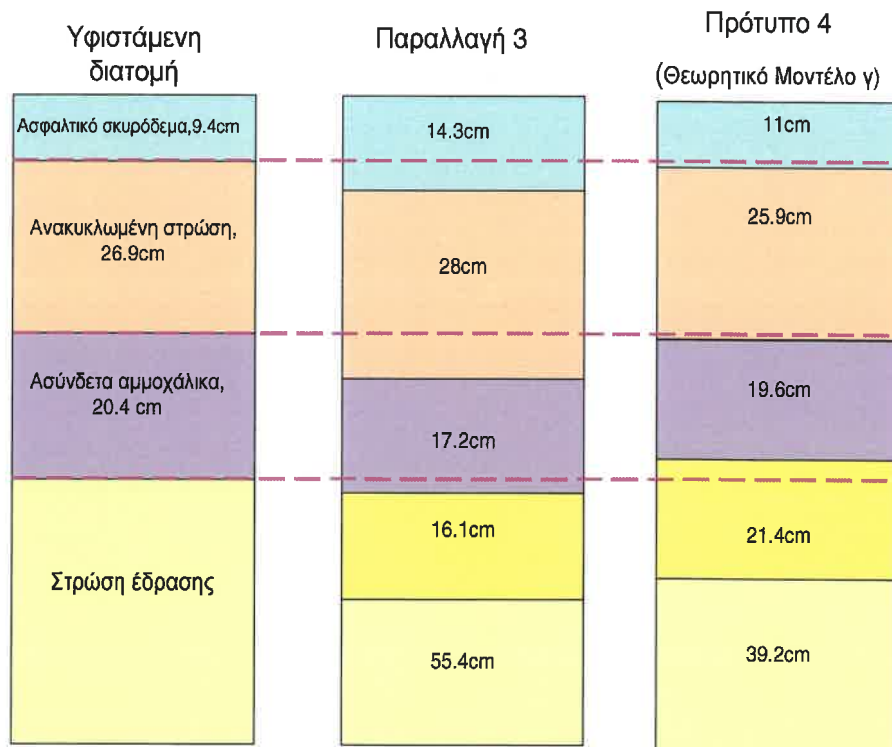
Σε αυτή την παραλλαγή δε μεταβλήθηκαν οι τιμές της πυκνότητας των στρωμάτων κατά το στάδιο της ανάλυσης αντιστροφής. Διαπιστώνεται ότι το μέτρο ελαστικότητας του πρώτου στρώματος για την παραλλαγή 2 δε διαφέρει σημαντικά από το αντίστοιχο μέτρο ελαστικότητας που υπολογίστηκε με τη μέθοδο FWD, είναι όμως μικρότερο από αυτό του πρώτου στρώματος του θεωρητικού μοντέλου (γ) του προτύπου 3. Καθώς η τελική διαστρωμάτωση διαφέρει για την παραλλαγή 2 είναι δύσκολο να γίνουν συγκρίσεις για τα υπόλοιπα στρώματα.

Ακολουθώντας τη λογική των δύο προηγούμενων παραλλαγών, η διαστρωμάτωση του θεωρητικού μοντέλου της παραλλαγής 3 (σχήμα 6.45) διαφέρει από την αντίστοιχη του θεωρητικού μοντέλου (γ) του προτύπου 4 μόνο στο πάχος του πρώτου στρώματος.



Σχήμα 6.45 Θεωρητικό μοντέλο Παραλλαγής 3

Τα αποτελέσματα μετά την ανάλυση όσον αφορά στη διαστρωμάτωση για την παραλλαγή 3 φαίνονται στο σχήμα 6.46. Στο σχήμα περιλαμβάνονται και τα αποτελέσματα για το θεωρητικό μοντέλο (γ) του προτύπου 4 ώστε να είναι πιο εύκολη η σύγκριση.



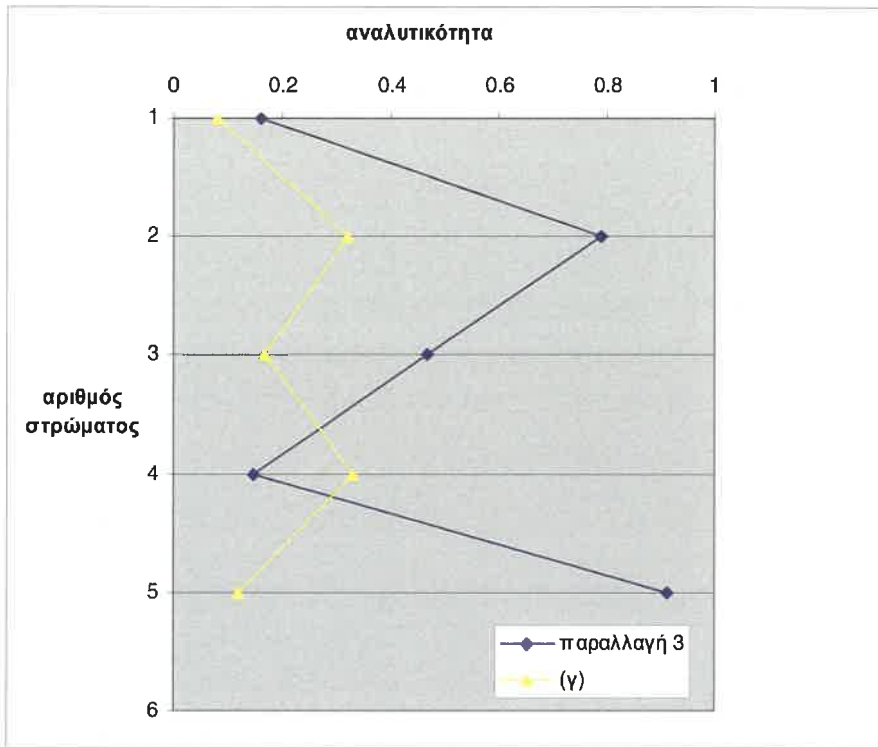
Σχήμα 6.46 Έλεγχος διαστρωμάτωσης της Παραλλαγής 3

Παρατηρείται ότι για την παραλλαγή 3 τα πάχη των δύο πρώτων στρωμάτων είναι μεγαλύτερα σε σύγκριση με τα αντίστοιχα του θεωρητικού μοντέλου (γ) του προτύπου 4. Αντίθετα για το τρίτο και τέταρτο στρώμα τα πάχη που προέκυψαν από την ανάλυση της παραλλαγής 3 είναι μικρότερα. Είναι επίσης σημαντικό ότι μια μικρή αλλαγή στο πάχος του πρώτου στρώματος του αρχικού μοντέλου επέφερε αλλαγές στα αποτελέσματα της ανάλυσης οι οποίες όμως δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές.

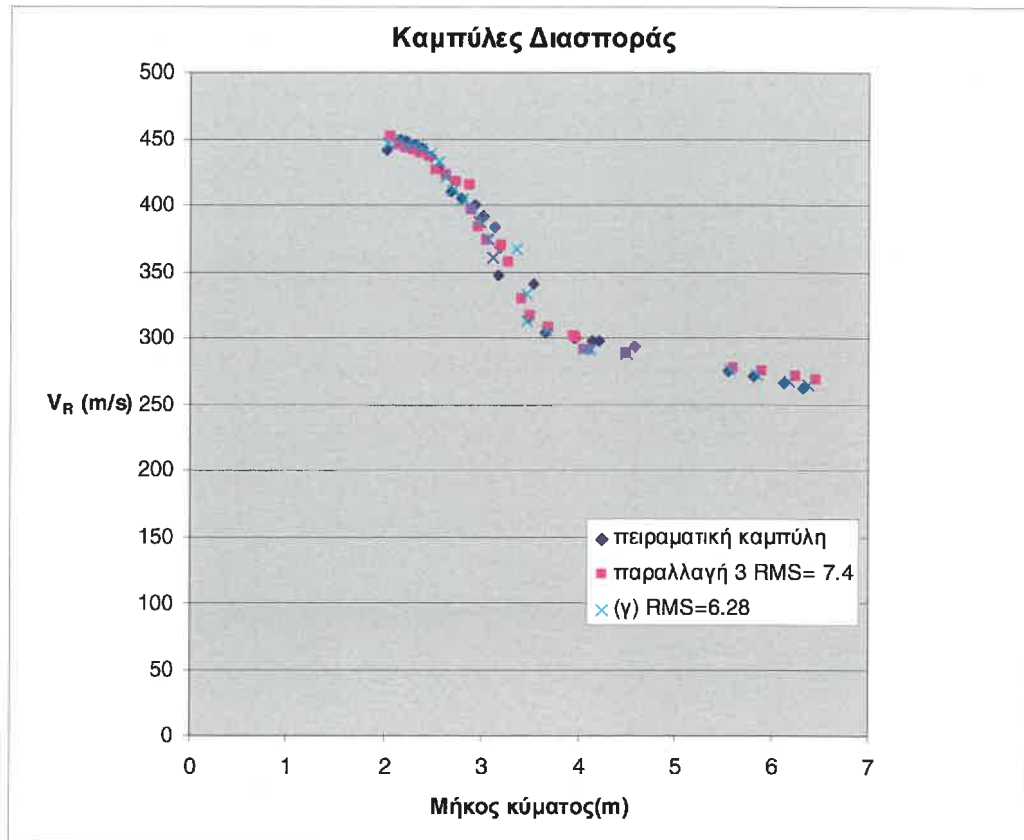
Στο σχήμα 6.47 φαίνονται οι τιμές της αναλυτικότητας για τα στρώματα της παραλλαγής 3.

Διαπιστώνεται ότι με εξαίρεση το τέταρτο στρώμα οι τιμές της αναλυτικότητας για το θεωρητικό μοντέλο της παραλλαγής 1 είναι μεγαλύτερες.

Στο σχήμα 6.48 φαίνεται η θεωρητική καμπύλη της παραλλαγής 1 σε σχέση με την πειραματική καμπύλη και τη θεωρητική καμπύλη του θεωρητικού μοντέλου (γ) του προτύπου 4. Οι θεωρητικές καμπύλες και στις δύο περιπτώσεις προσεγγίζουν ικανοποιητικά την πειραματική καμπύλη.

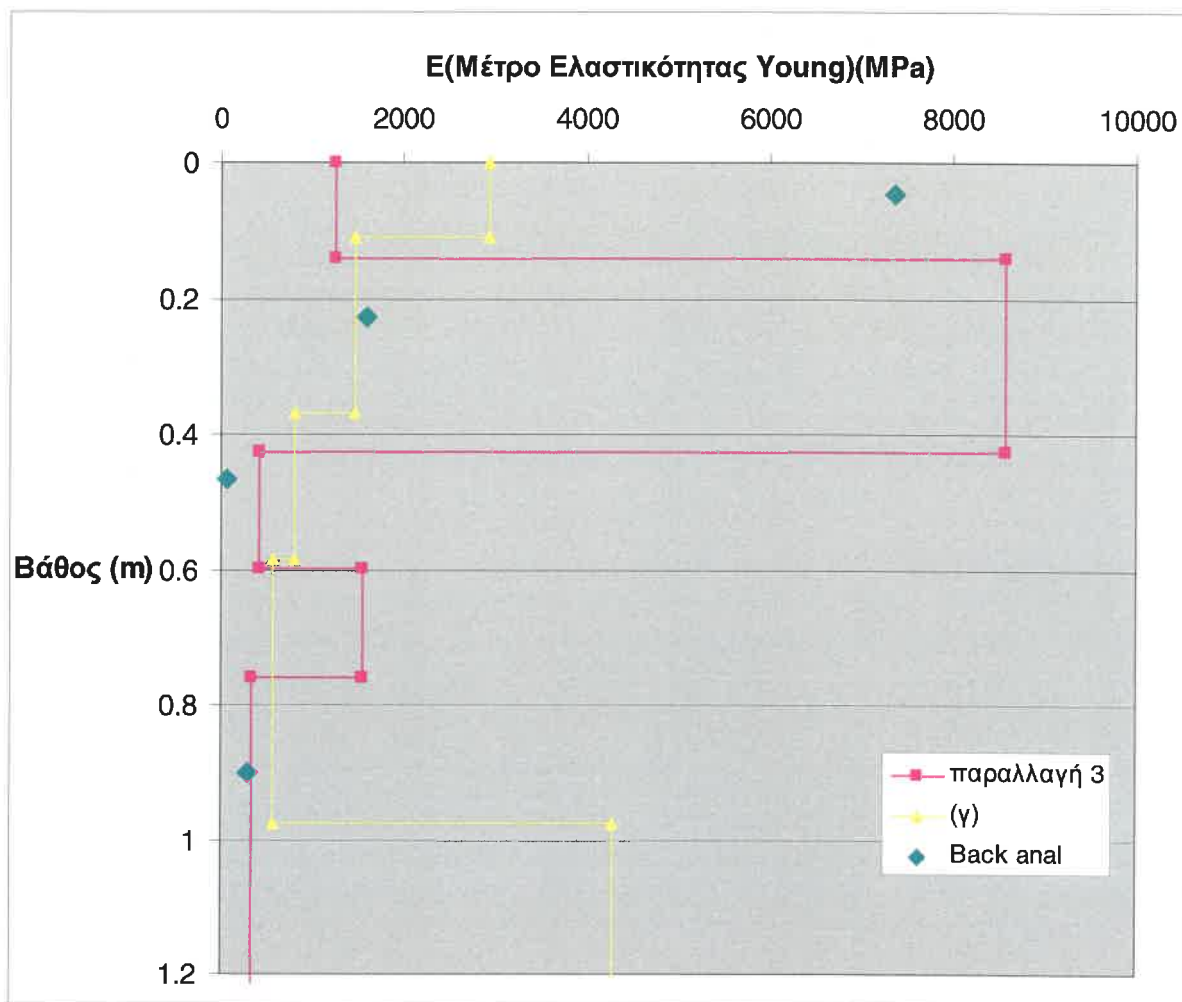


Σχήμα 6.47 Τιμές αναλυτικότητας για την Παραλλαγή 3



Σχήμα 6.48 Σύγκριση πειραματικής –θεωρητικών καμπυλών για την Παραλλαγή 3

Στο σχήμα 6.49 παρουσιάζεται το προφίλ των μέτρων ελαστικότητας για την παραλλαγή 3. Παρατηρούμε ότι τα μέτρα ελαστικότητας που προκύπτουν για την παραλλαγή 3 διαφέρουν πολύ από αυτά που προκύπτουν από τον ανάστροφο υπολογισμό των μετρήσεων του FWD εκτός από τη στρώση έδρασης. Η μεγαλύτερη διαφορά παρουσιάζεται στο στρώμα της βάσης όπου η τιμή του μέτρου ελαστικότητας είναι ιδιαίτερα υψηλή.



Σχήμα 6.49 Προφίλ μέτρων ελαστικότητας για την Παραλλαγή 3

Στις παραλλαγές του προτύπου 5 διαπιστώνεται πως ενώ όλες οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές μόνο η αλλαγή του πάχους της πρώτης στρώσης της διαστρωμάτωσης του αρχικού μοντέλου προκαλεί διαφορές στα τελικά αποτελέσματα τόσο στα πάχη των στρωμάτων όσο και στις ταχύτητές τους. Οι μεταβολές στα πάχη των στρωμάτων κυμαίνονται από 8% έως 51%(αν και πρέπει να παρατηρηθεί ότι στα αποτελέσματα για την παραλλαγή 2 η στρώση του αμμοχάλικου δεν υφίσταται ως ξεχωριστή στρώση), ενώ οι μεταβολές στις ταχύτητες κυμαίνονται από 1.7% έως 112%.

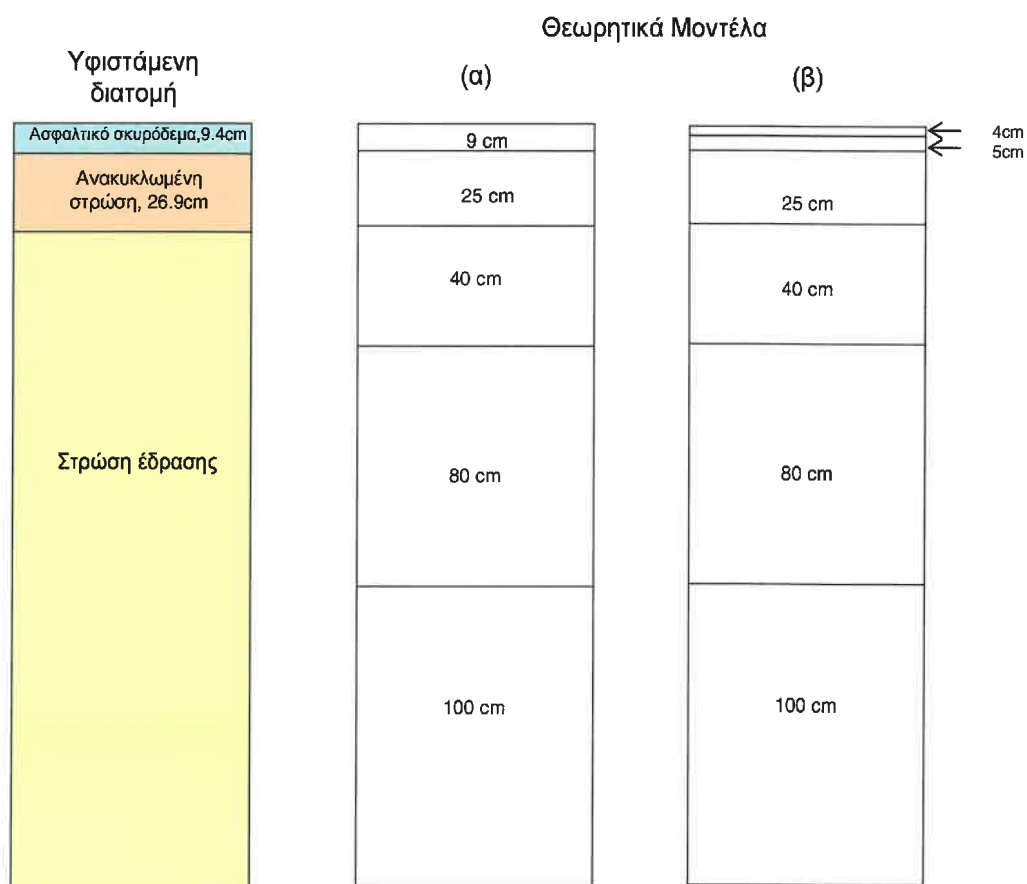
Μέχρι τώρα για τις τιμές της πυκνότητας των στρωμάτων θεωρήθηκαν κάποιες λογικές τιμές χωρίς να υπάρχουν ακριβείς πληροφορίες. Στο επόμενο πρότυπο χρησιμοποιήθηκαν οι

πραγματικές τιμές της πυκνότητας των στρώσεων με σκοπό να διαπιστωθεί κατά πόσο η χρήση τους θα συνέβαλε σε μία καλύτερη προσέγγιση της υφιστάμενης διατομής.

6.3.6 Πρότυπο 6

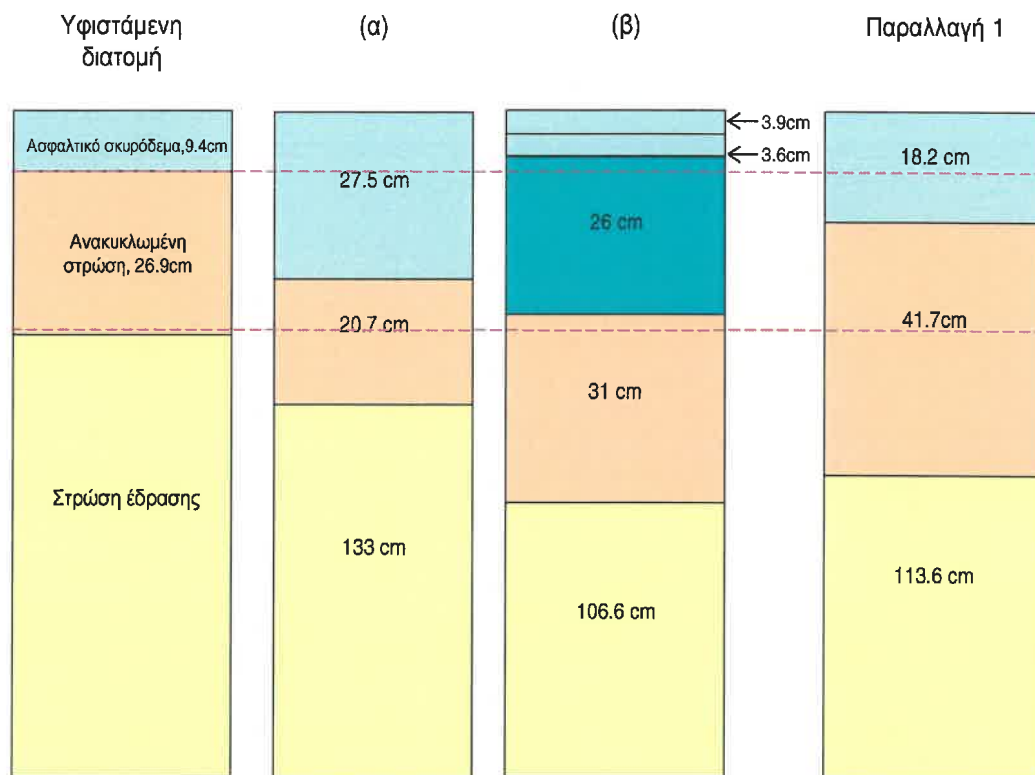
Σε αυτό το πρότυπο όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι πυκνότητες των στρωμάτων ήταν γνωστές. Οι ασφαλτικές στρώσεις αποτελούνται από αντιολισθηρή στρώση κυκλοφορίας πάχους 4 cm με πυκνότητα 2300 kg/m^3 και μία ισοπεδωτική στρώση τύπου A265 πάχους 5 cm με πυκνότητα 2380 kg/m^3 ενώ η ανακυκλωμένη στρώση με χρήση αφρώδους ασφάλτου είχε πυκνότητα 2000 kg/m^3 .

Στην πρώτη περίπτωση αυτού του προτύπου διατηρήθηκε η διαστρωμάτωση της παραλλαγής 1 ενώ εξετάστηκαν δύο διαφορετικά θεωρητικά μοντέλα : ένα θεωρώντας τις ασφαλτικές στρώσεις αποτελούμενες από δυο επιμέρους στρώσεις με τις πυκνότητες που αναφέρονται παραπάνω και ένα θεωρώντας τις ενοποιημένες με πυκνότητα ίση με το μέσο όρο τους (σχήμα 6.50).



Σχήμα 6.50 Θεωρητικά μοντέλα της Περίπτωσης 1

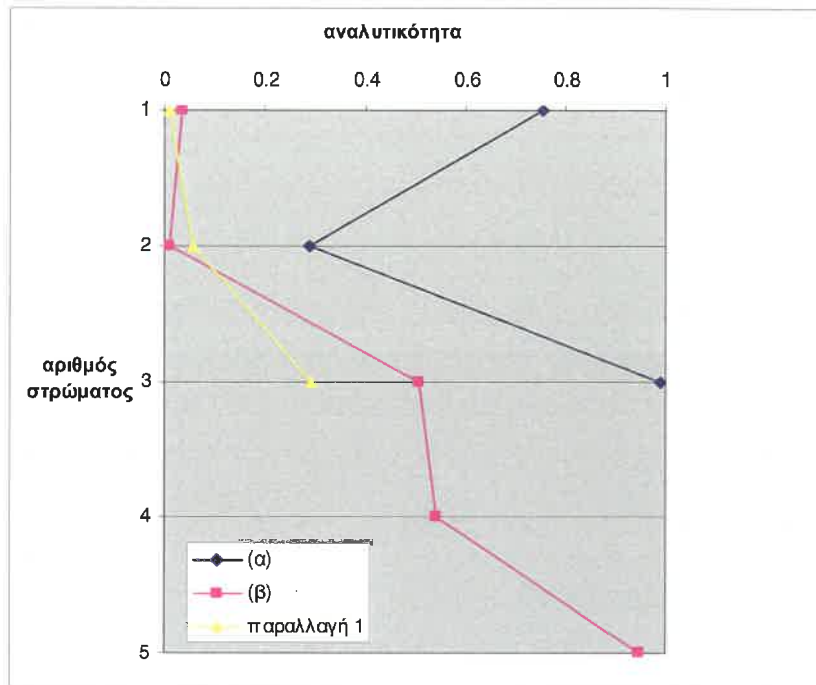
Τα αποτελέσματα από την ανάλυση της περίπτωσης 1 του προτύπου 6 παρουσιάζονται παρακάτω και κάθε φορά συγκρίνονται και με αυτά της παραλλαγής 1 η οποία είχε την ίδια διαστρωμάτωση με το θεωρητικό μοντέλο (α) με τη διαφορά ότι οι τιμές της πυκνότητας δεν ήταν γνωστές.



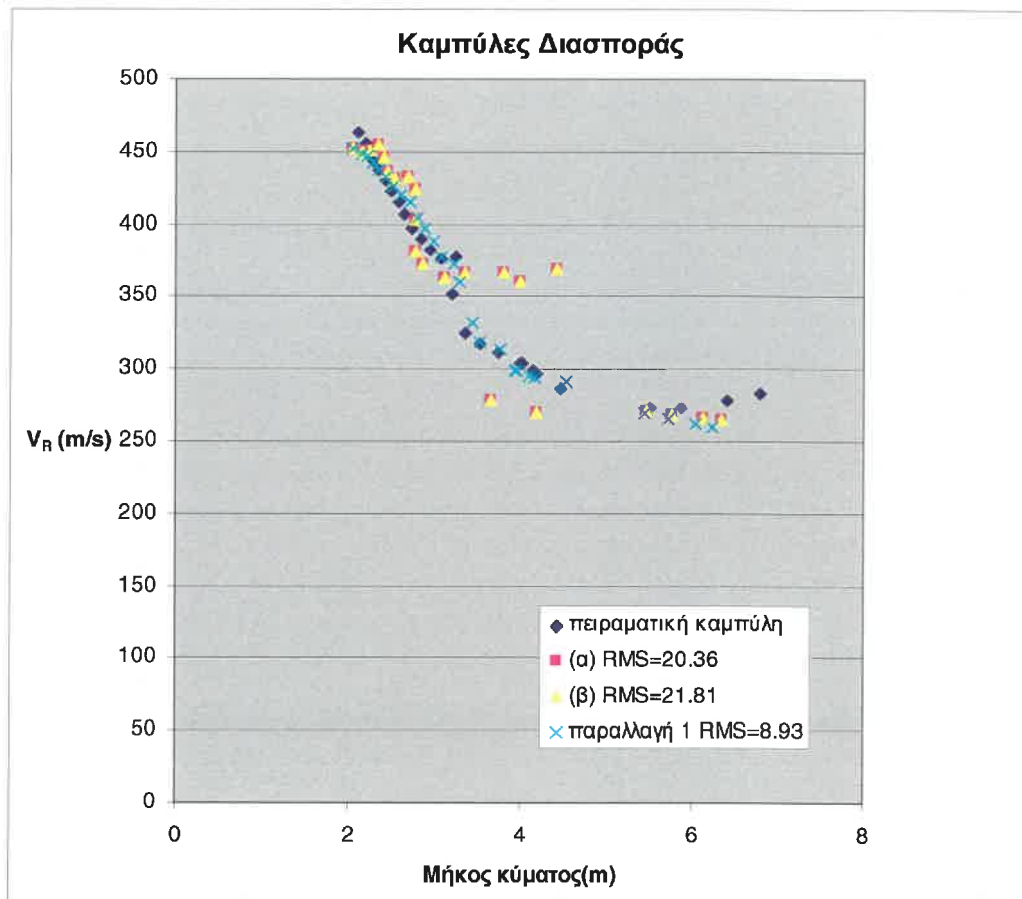
Σχήμα 6.51 Έλεγχος διαστρωμάτωσης της Περίπτωσης 1

Για το θεωρητικό μοντέλο (α) της περίπτωσης 1 παρατηρούμε ότι το πάχος του πρώτου στρώματος υπερεκτιμάται ενώ το πάχος της ανακυκλωμένης στρώσης έχει μικρή διαφορά από το πάχος της υφιστάμενης διατομής. Το θεωρητικό μοντέλο (β) προσεγγίζει τη διαστρωμάτωση των υφιστάμενων επιμέρους ασφαλτικών στρώσεων εμφανίζει όμως ένα επιπλέον στρώμα σε σχέση με τη διαστρωμάτωση της πραγματικής διατομής.

Στο σχήμα 6.52 φαίνονται οι τιμές της αναλυτικότητας για την περίπτωση 1 του προτύπου 6 ενώ στο σχήμα 6.53 απεικονίζονται οι θεωρητικές καμπύλες για την περίπτωση 1 σε συνδυασμό με την πειραματική καμπύλη και τη θεωρητική καμπύλη της παραλλαγής 1.



Σχήμα 6.52 Τιμές αναλυτικότητας για την Περίπτωση 1

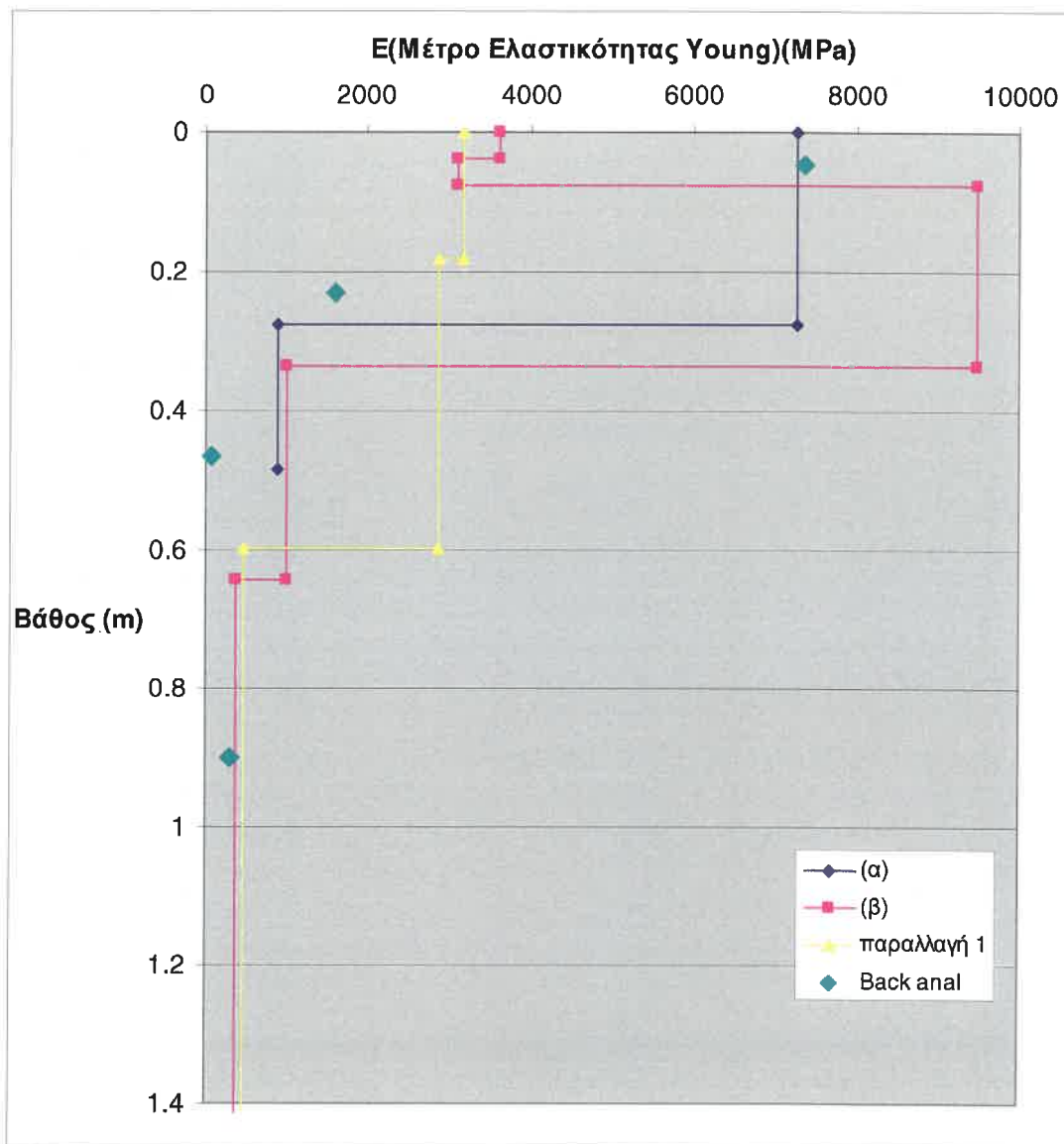


Σχήμα 6.53 Σύγκριση πειραματικής –θεωρητικών καμπυλών για την Περίπτωση 1

Για την περίπτωση 1 για το θεωρητικό μοντέλο (α) η αναλυτικότητα έχει ικανοποιητικές τιμές για όλα τα στρώματα και μάλιστα κατά πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της παραλλαγής 1. Δεν ισχύει όμως το ίδιο και για το θεωρητικό μοντέλο (β) στο οποίο η αναλυτικότητα έχει χαμηλές τιμές στα ανώτερα στρώματα

Το σφάλμα RMS έχει υψηλές σχετικά τιμές για τα θεωρητικά μοντέλα της περίπτωσης 1.

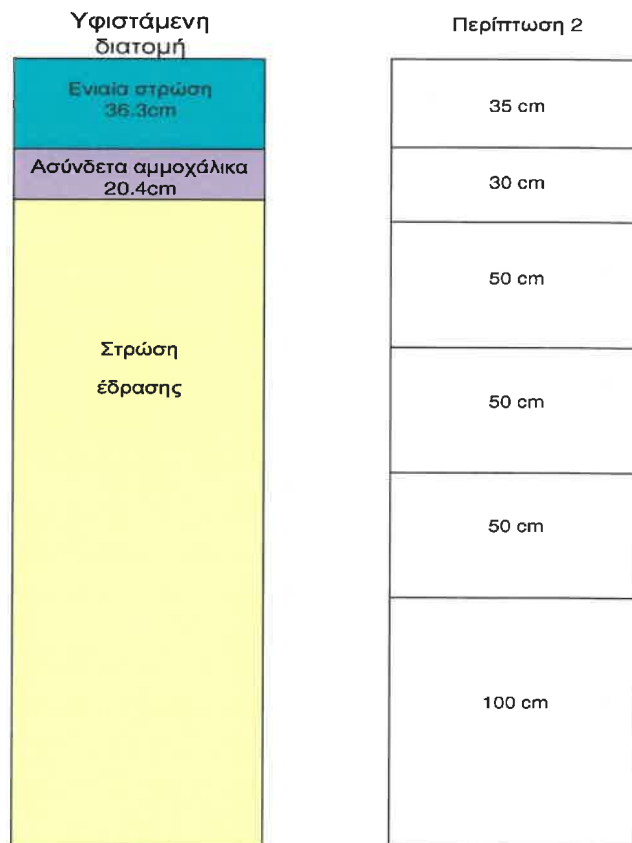
Στο σχήμα 6.54 φαίνονται τα προφίλ του μέτρου ελαστικότητας για την περίπτωση 1. Στο σχήμα περιλαμβάνεται και το προφίλ μέτρου ελαστικότητας της παραλλαγής 1.



Σχήμα 6.54 Προφίλ μέτρων ελαστικότητας για την Περίπτωση 1

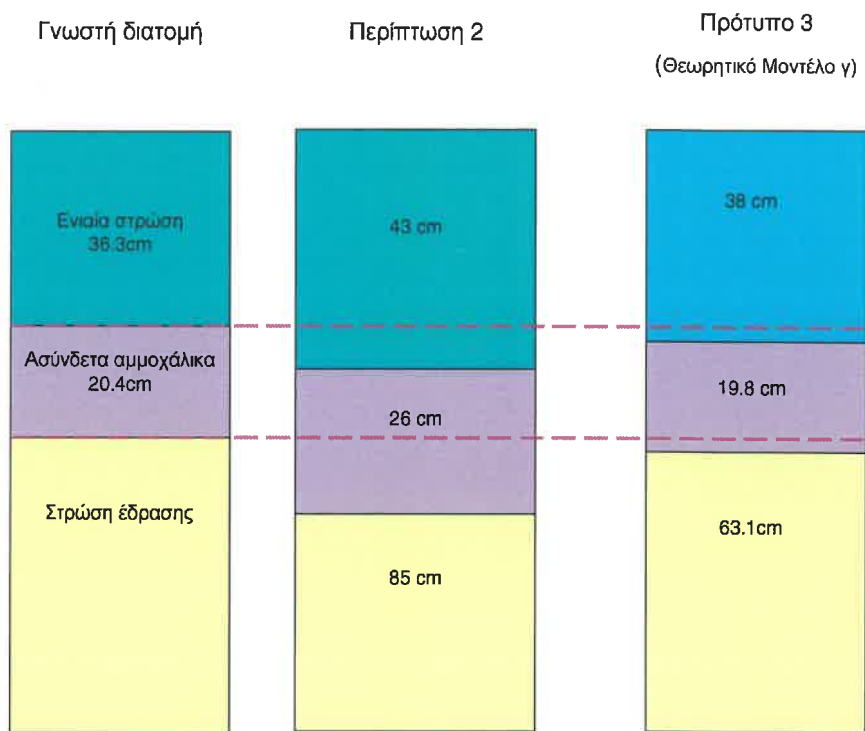
Για το θεωρητικό μοντέλο (α) της περίπτωσης 1 υπάρχει πολύ μικρή διαφορά στο μέτρο ελαστικότητας του πρώτου στρώματος με το αντίστοιχο που υπολογίστηκε μέσω ανάστροφου υπολογισμού ενώ η διαφορά για το δεύτερο στρώμα είναι σημαντική. Για το θεωρητικό μοντέλο (β) υπάρχουν μεγάλες διαφορές στα μέτρα ελαστικότητας, αν και η σύγκριση με τις τιμές της υφιστάμενης διατομής είναι δύσκολη λόγω της ύπαρξης ενός επιπλέον στρώματος.

Στη δεύτερη περίπτωση υιοθετήθηκε η διαστρωμάτωση του θεωρητικού μοντέλου (γ) του προτύπου 3 και η πυκνότητα του πρώτου στρώματος τέθηκε ίση με το μέσο όρο της πυκνότητας του ασφαλτικού σκυροδέματος και της ανακυκλωμένης στρώσης (=2227 kg/m³), (σχήμα 6.55).



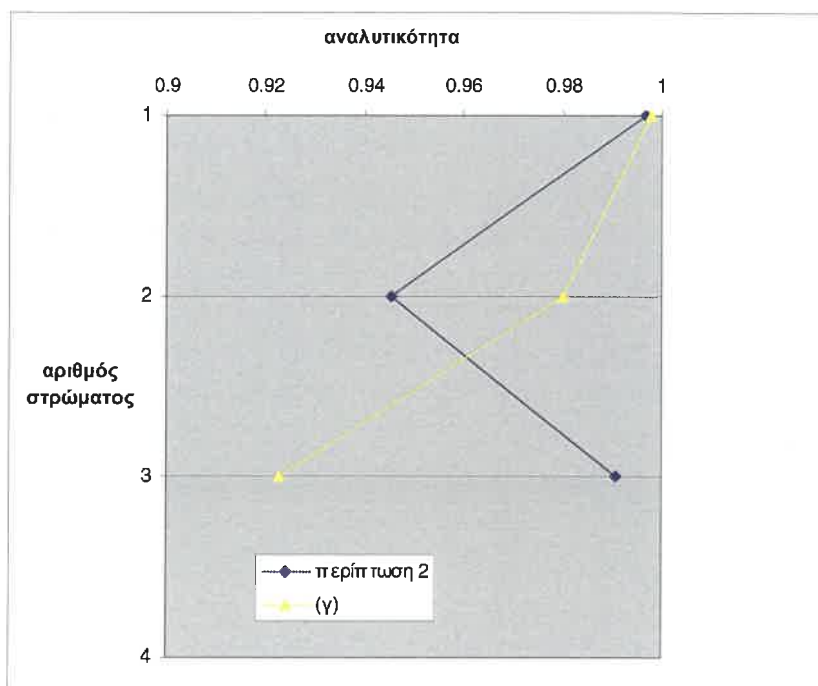
Σχήμα 6.55 Θεωρητικό μοντέλο της Περίπτωσης 2

Τα αποτελέσματα από την ανάλυση της περίπτωσης 2 του προτύπου 6 παρουσιάζονται παρακάτω (σχήμα 6.56) και κάθε φορά συγκρίνονται και με αυτά του θεωρητικού μοντέλου (γ) του προτύπου 3.

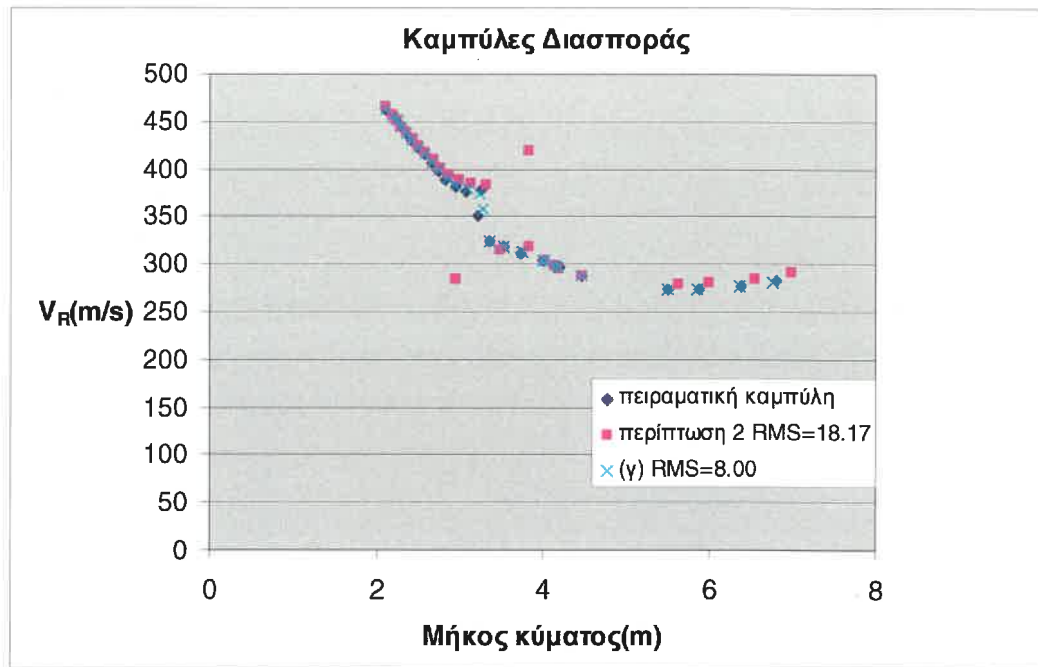


Σχήμα 6.56 Έλεγχος διαστρωμάτωσης της Περίπτωσης 2

Παρατηρείται ότι για την περίπτωση 2 τα πάχη των στρωμάτων υπερεκτιμώνται συγκρινόμενα με τα πάχη της υφιστάμενης διατομής ενώ είναι μεγαλύτερα και από τα αντίστοιχα πάχη του θεωρητικού μοντέλου (γ) του προτύπου 3.

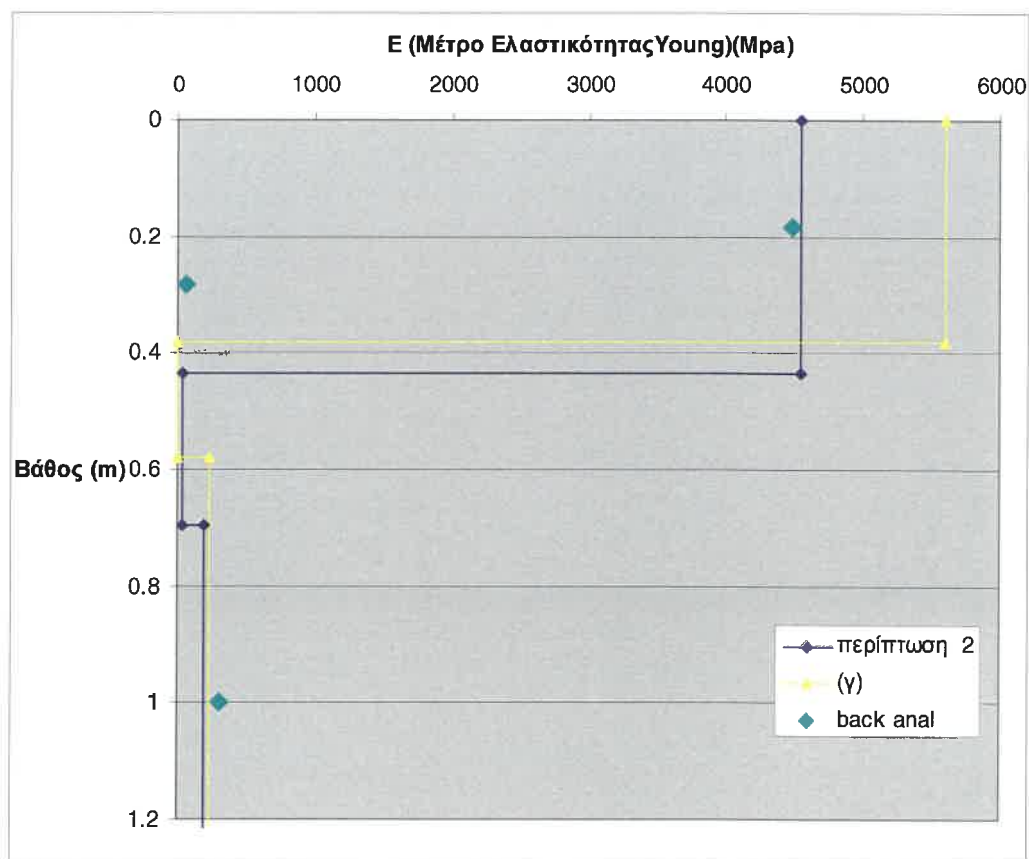


Σχήμα 6.57 Τιμές αναλυτικότητας για την Περίπτωση 2



Σχήμα 6.58 Σύγκριση πειραματικής –θεωρητικών καμπυλών για την Περίπτωση 2

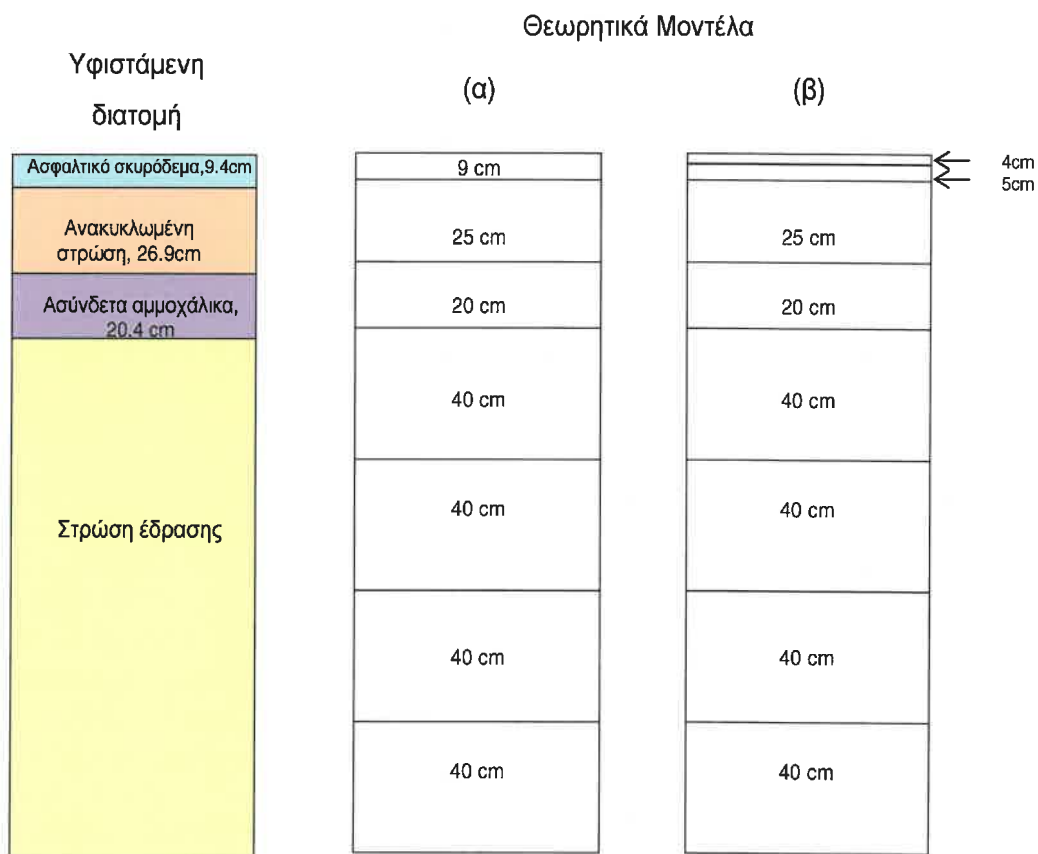
Η περίπτωση 2 παρουσιάζει μεγάλο δείκτη RMS ενώ οι τιμές της αναλυτικότητας είναι ικανοποιητικές για όλα τα στρώματα.



Σχήμα 6.59 Προφίλ μέτρων Ελαστικότητας για την Περίπτωση 2

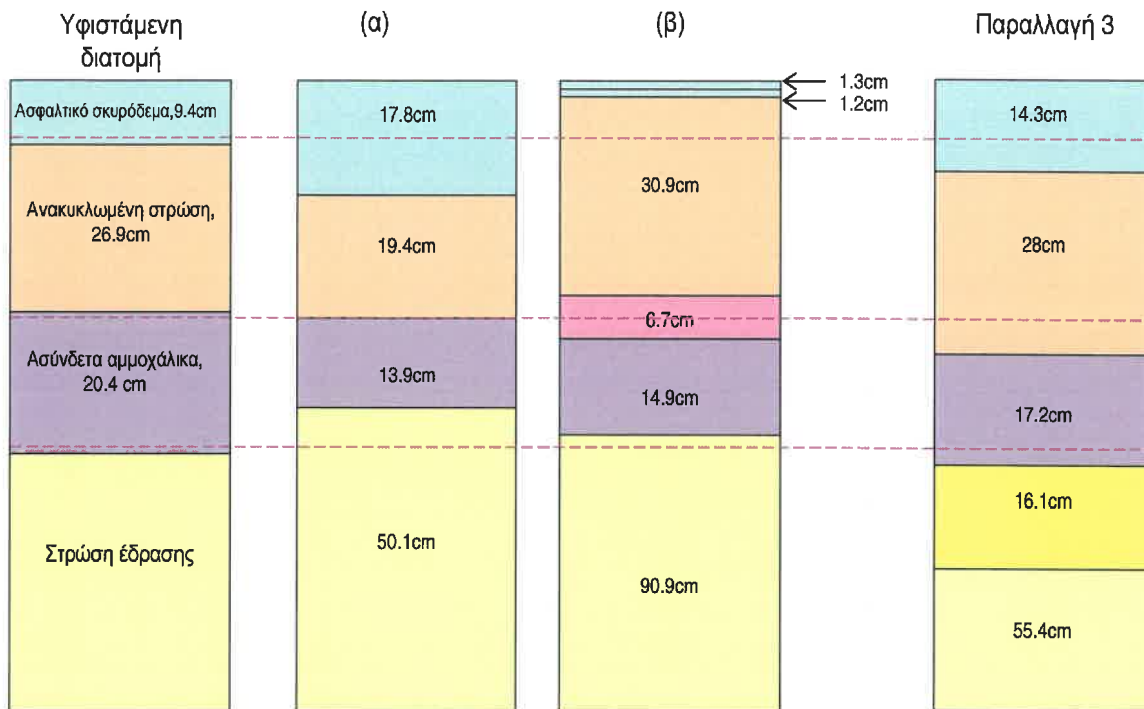
Στην περίπτωση 2 η τιμή της πυκνότητας έγινε ίση με 2227 kg/m^3 για το δεύτερο στρώμα ενώ για τα υπόλοιπα στρώματα οι τιμές παρέμειναν αμετάβλητες. Σε σχέση με το θεωρητικό μοντέλο (γ) του προτύπου 2, τα μέτρα ελαστικότητας για τα δύο πρώτα στρώματα της περίπτωσης 2 προσεγγίζουν περισσότερο τις τιμές των μέτρων ελαστικότητας της υφιστάμενης διατομής.

Στην τρίτη περίπτωση αυτού του προτύπου διατηρήθηκε η διαστρωμάτωση της παραλλαγής 3 ενώ εξετάστηκαν δκαι πάλι δύο υποπεριπτώσεις : μία θεωρώντας τις ασφαλτικές στρώσεις αποτελούμενες από δυο επιμέρους στρώσεις με τις πυκνότητες που αναφέρονται στην περίπτωση 1 και μία θεωρώντάς τις ενοποιημένες με πυκνότητα ίση με το μέσο όρο τους (σχήμα 6.60).



Σχήμα 6.60 Διαστρωμάτωση της Περίπτωσης 3

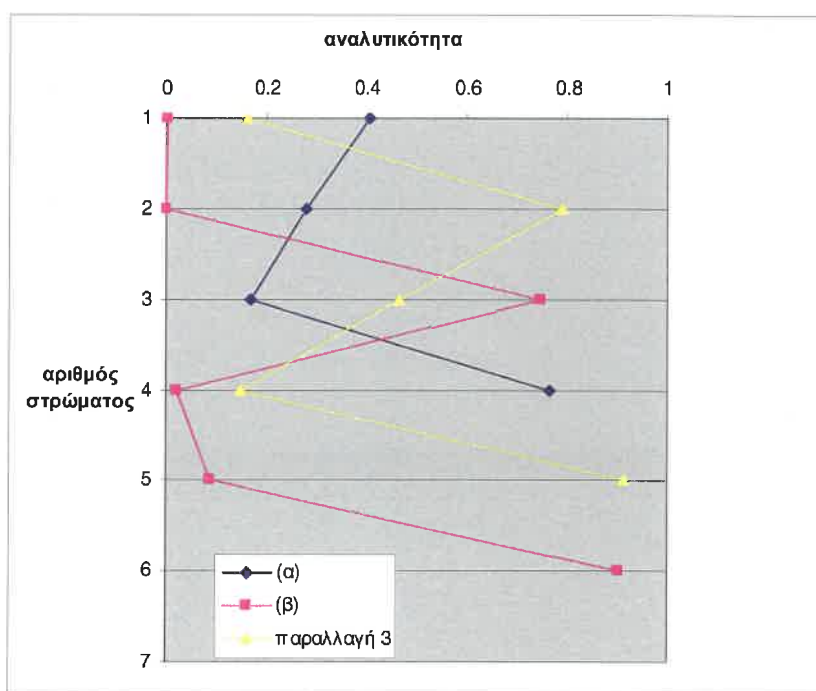
Τα αποτελέσματα από την ανάλυση της περίπτωσης 3 του προτύπου 6 παρουσιάζονται παρακάτω και κάθε φορά συγκρίνονται και με αυτά της παραλλαγής 3 η οποία είχε την ίδια διαστρωμάτωση με το θεωρητικό μοντέλο (α) αλλά οι τιμές της πυκνότητας δεν ήταν γνωστές.



Σχήμα 6.61 Έλεγχος διαστρωμάτωσης της Περίπτωσης 3

Το θεωρητικό μοντέλο (α) προσεγγίζει τη γνωστή διατομή αλλά το πάχος του πρώτου στρώματος υπερεκτιμάται. Το θεωρητικό μοντέλο (β) απέχει σημαντικά από τη διαστρωμάτωση της υφιστάμενης διατομής.

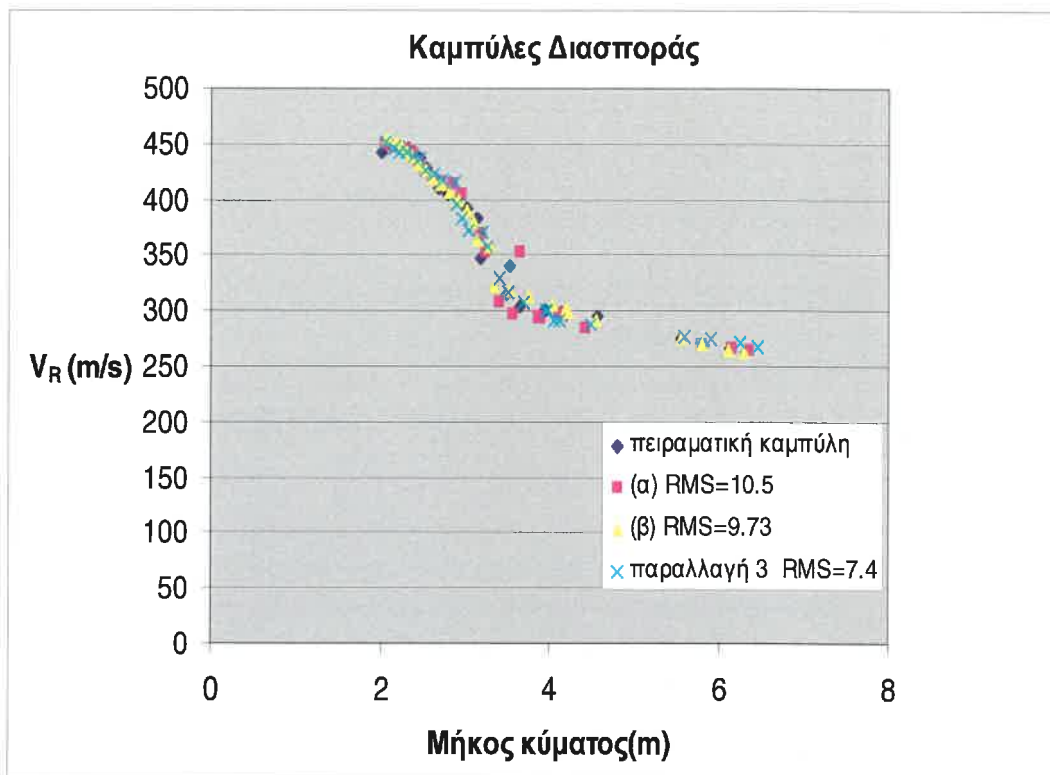
Στο σχήμα 6.62 απεικονίζονται οι τιμές αναλυτικότητας για την περίπτωση 3.



Σχήμα 6.62 Τιμές αναλυτικότητας για την Περίπτωση 3

Οι τιμές της αναλυτικότητας για τα στρώματα 1,2 και 4 του θεωρητικού μοντέλου (β) είναι σχεδόν μηδενικές ενώ για το θεωρητικό μοντέλο (α) είναι ικανοποιητικές για όλα τα στρώματα.

Στο σχήμα 6.63 παριστάνεται γραφικά η σύγκριση των θεωρητικών καμπυλών της παραλλαγής 3 με την πειραματική καμπύλη.

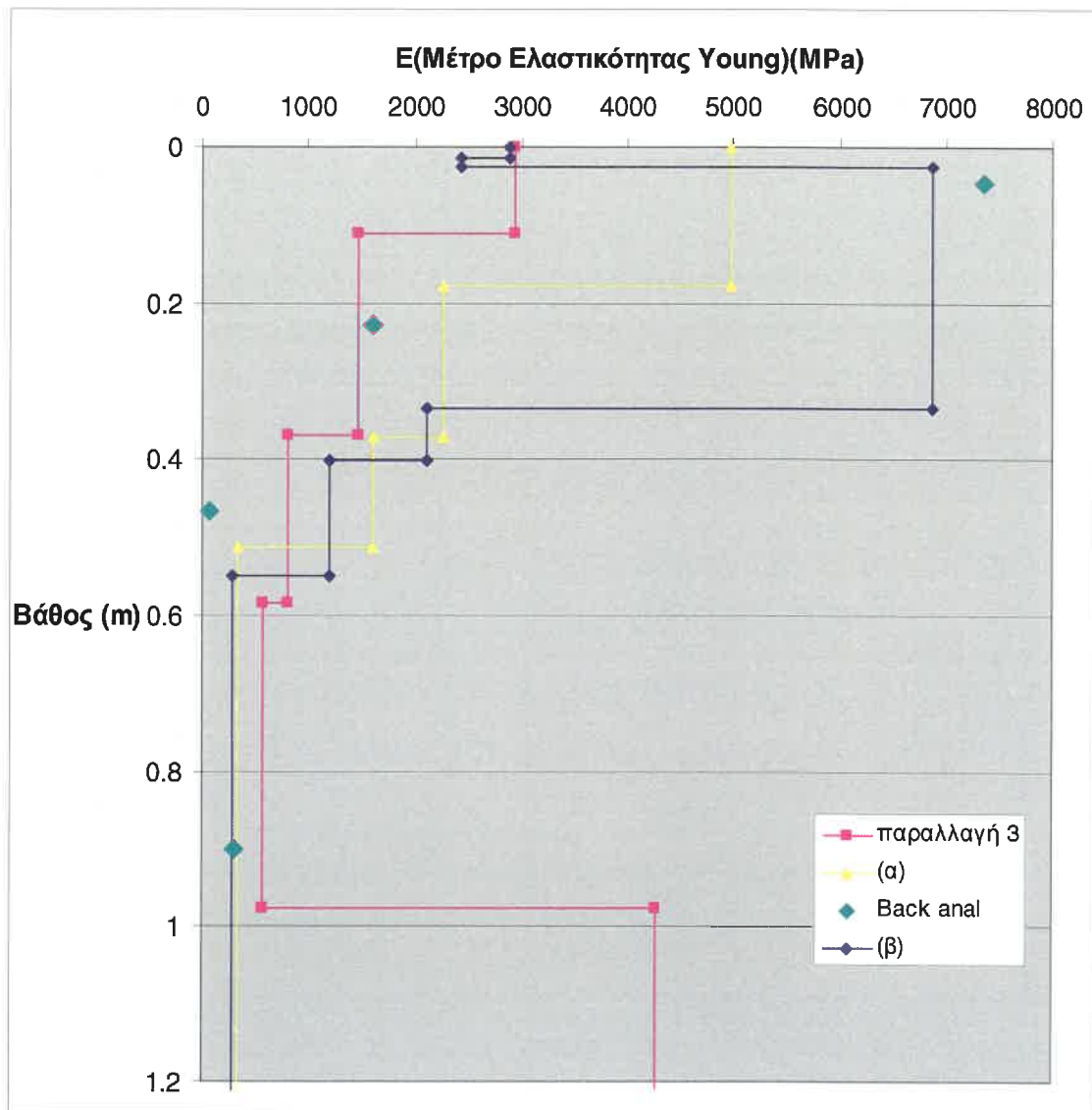


Σχήμα 6.63 Σύγκριση πειραματικής –θεωρητικών καμπυλών για την Περίπτωση 3

Η προσέγγιση των θεωρητικών καμπυλών με την πειραματική καμπύλη διασποράς είναι επαρκής και για τα δύο θεωρητικά μοντέλα.

Στο σχήμα 6.64 ακολουθούν τα προφίλ των μέτρων ελαστικότητας για τα θεωρητικά μοντέλα της περίπτωσης 3.

Τα μέτρα ελαστικότητας για το θεωρητικό μοντέλο (α) σε σχέση με αυτά της παραλλαγής 3 παρουσιάζουν μικρότερη απόκλιση από τα μέτρα ελαστικότητας που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο FWD. Όσον αφορά στις τιμές της πυκνότητας η μόνη που μεταβλήθηκε από το πρόγραμμα ήταν αυτή του δεύτερου στρώματος που έγινε ίση με 1800 kg/m^3 . Στο θεωρητικό μοντέλο (β) οι τιμές της πυκνότητας των τριών πρώτων στρωμάτων μεταβλήθηκαν και έγιναν ίσες με 2300 kg/m^3 , 2300 kg/m^3 και 2000 kg/m^3 για τα στρώματα 1, 2 και 3 αντίστοιχα. Για τη διαστρωμάτωση αυτή τα μέτρα ελαστικότητας είναι αρκετά διαφορετικά από αυτά της υφιστάμενης διατομής.



Σχήμα 6.64 Προφίλ μέτρων ελαστικότητας για την Περίπτωση 3

Σε αυτό το πρότυπο διαπιστώνεται ότι υπάρχει μεγαλύτερη απόκλιση στα πάχη των στρωμάτων ανάμεσα στην υφιστάμενη διατομή και στα τελικά αποτελέσματα σε σχέση με τη διαφορά που υπήρχε όταν οι τιμές της πυκνότητας δεν ήταν γνωστές. Όσον αφορά στις τιμές των μέτρων ελαστικότητας παρατηρείται ότι για τις περιπτώσεις που η ασφαλτική στρώση θεωρείται ως ενιαία ισχύει το φαινόμενο της ανικανονικής διασποράς και η δυσκαμψία μειώνεται με το βάθος. Στην αντίθετη περίπτωση, κατά την οποία η ασφαλτική στρώση διαχωρίζεται σε δύο υποστρώματα, τα μέτρα ελαστικότητας των ασφαλτικών υποστρωμάτων κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα ενώ παρατηρείται ιδιαίτερα υψηλή τιμή μέτρου ελαστικότητας για το στρώμα της βάσης.

Η πιο επιτυχημένη προσέγγιση της υφιστάμενης διατομής όσον αφορά στη διαστρωμάτωση παρατηρείται για το θεωρητικό μοντέλο (γ) του προτύπου 1 στο οποίο το στατικό πρότυπο του υπό εξέταση οδοστρώματος έχει παραμείνει τετραστρωματικό και οι τιμές των

πυκνοτήτων των επιμέρους στρώσεων δεν είναι γνωστές. Οι τιμές που προέκυψαν για τα πάχη των στρωμάτων μετά το πέρας της ανάλυσης του υπόψη θεωρητικού μοντέλου χρησιμοποιούνται στη συνέχεια ως δεδομένα για τον καθορισμό των μέτρων ελαστικότητας των στρώσεων μέσω ανάστροφου υπολογισμού.

6.4 Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού της βέλτιστης προσέγγισης

Στον πίνακα 6.1 φαίνονται τα μέτρα ελαστικότητας που υπολογίστηκαν μέσω ανάστροφου υπολογισμού με χρήση δύο διαφορετικών προφίλ διαστρωμάτωσης. Στην πρώτη περίπτωση για τα πάχη των στρωμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ, ενώ στη δεύτερη οι τιμές που προέκυψαν για τη βέλτιστη προσέγγιση της υφιστάμενης διατομής με τη μέθοδο ΦΑΕΚ.

Πίνακας 6.1 Αποτελέσματα μέτρων ελαστικότητας

Μέθοδος	Μέτρο ελαστικότητας Young (MPa)			
	Ασφαλικό σκυρόδεμα	Ανακυκλωμένη στρώση	Ασύνδετα αμμοχάλικα	Στρώση έδρασης
ΦΑΕΚ	2934	1476	808	570
Back anal (Εργαστήριο Οδοποιίας)*	7360	1600	60	304
Back anal (ΦΑΕΚ)*	6040	1510	62.5	298

*Πηγή προσδιορισμού πάχους στρώσεων

Η σύγκριση των μέτρων ελαστικότητας που προκύπτουν από τον ανάστροφο υπολογισμό για το πρώτο προφίλ διαστρωμάτωσης με τα αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας που προκύπτουν από τη μέθοδο ΦΑΕΚ έχει ήδη πραγματοποιηθεί στη μέχρι τώρα ανάλυση. Διαπιστώνεται όμως ότι για το δεύτερο προφίλ διαστρωμάτωσης οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας που υπολογίστηκαν μέσω ανάστροφου υπολογισμού προσεγγίζουν σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό τις αντίστοιχες τιμές που υπολογίστηκαν για το πρώτο προφίλ, με εξαίρεση τις ασφαλτικές στρώσεις όπου παρατηρείται απόκλιση.

7 ΣΧΟΛΙΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μέθοδος ΦΑΕΚ θεωρείται πλέον ευρέως αποδεκτή για το γεωτεχνικό χαρακτηρισμό των εδαφών και σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η διευρέυνση της ικανότητάς της να αποτελέσει και ένα χρήσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων.

Η υπόψη μέθοδος παρουσιάζει πλεονεκτήματα αλλά υπόκειται και σε αρκετούς περιορισμούς και εμφανίζει αδυναμίες.

Η διαδικασία των μετρήσεων είναι απλή και σχετικά σύντομη για κάθε εφαρμογή. Δυνατότητα για περαιτέρω επιτάχυνση της διαδικασίας μέτρησης υπάρχει με την αυτοματοποίηση των θέσεων πηγής και δεκτών.

Τα περισσότερα προβλήματα παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια της ανάλυσης των μετρήσεων η οποία είναι μια ιδιαίτερα χρονοβόρα διαδικασία. Επίσης η διαδικασία αυτή απαιτεί ένα πεπειραμένο μελετητή ο οποίος καλείται να πάρει πολλές κρίσιμες αποφάσεις που έχουν σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα. Υπάρχει έντονη ανάγκη για αυτοματοποίηση τόσο της διαδικασίας ελάττωσης των δεδομένων όσο και της διαδικασίας αντιστροφής ώστε αυτές να πραγματοποιούνται σε μικρότερο χρόνο και να μην εξαρτώνται σε τόσο μεγάλο βαθμό από την ικανότητα του αναλυτή.

Η κατασκευή της πειραματικής καμπύλης διασποράς και η ελάττωση των δεδομένων βασίστηκε σε αρκετά μεγάλο ποσοστό σε οπτικά κριτήρια γεγονός που θέτει σε κίνδυνο την ορθότητα των αποτελεσμάτων. Επίσης, λόγω της αντίστροφης διασποράς που ισχύει στα οδοστρώματα, υπήρξε σε αρκετές περιπτώσεις πρόβλημα στην ταύτιση της πειραματικής καμπύλης διασποράς με τη θεωρητική καμπύλη διασποράς.

Παρά τις όποιες δυσκολίες όμως η μέθοδος ΦΑΕΚ μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο και χαμηλού κόστους μέσο για τον καθορισμό δύο βασικών παραμέτρων οι οποίες επιτρέπουν την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων: τα πάχη των στρώσεων και το προφίλ των μέτρων ελαστικότητας των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος. Παρατηρήθηκε ότι όταν υπήρχαν αρχικές εκτιμήσεις για τα πάχη των στρωμάτων, η μέθοδος ΦΑΕΚ κατάφερε να προσεγγίσει επιτυχώς τη διαστρωμάτωση της υφιστάμενης διατομής. Αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς θα μπορούσε να αποφευχθεί η χρήση άλλων πολύ ακριβότερων μεθόδων για τον προσδιορισμό της διαστρωμάτωσης του υπό εξέταση οδικού τμήματος (π.χ. γεωφυσικές μέθοδοι). Πρέπει να σημειωθεί ότι ως αρχικές εκτιμήσεις για τα πάχη των στρωμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τιμές που ορίζονται από τις μελέτες κατασκευής του οδοστρώματος οι οποίες είναι και σχετικά εύκολα προσβάσιμες. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τα πάχη των στρωμάτων από τη μέθοδο ΦΑΕΚ

μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα για τον καθορισμό των μέτρων ελαστικότητας των στρώσεων μέσω ανάστροφου υπολογισμού.

Όσον αφορά στα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου ΦΑΕΚ για των προσδιορισμό του προφίλ των μέτρων ελαστικότητας δίνεται η δυνατότητα μιας αρχικής εκτίμησης της συμπεριφοράς του υπό εξέταση οδοστρώματος. Πολύ χρήσιμη θα ήταν η συσχέτιση των μέτρων ελαστικότητας που προκύπτουν από τη μέθοδο ΦΑΕΚ με τα αντίστοιχα που προκύπτουν από ανάστροφο υπολογισμό μετρήσεων της μεθόδου FWD. Για να καταλήξει όμως κανείς στη μαθηματική διατύπωση σχέσης μεταξύ των δύο αυτών μεγεθών θα ήταν απαραίτητη η πραγματοποίηση πολυάριθμων δοκιμών με χρήση των δύο μεθόδων και στη συνέχεια στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους.

Επιπροσθέτως, για περαιτέρω διερεύνηση της εφαρμοσιμότητας της μεθόδου ΦΑΕΚ στην αξιολόγηση της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων προτείνεται η διεξαγωγή πειραμάτων σε ένα οδόστρωμα απλούστερης δομής (π.χ. τυπικό εύκαμπτο) καθώς στην παρούσα εργασία το υπό εξέταση οδόστρωμα ήταν αρκετά σύνθετο. Τέλος, θα ήταν επίσης χρήσιμο να δοθεί η δυνατότητα μέσω της μεθόδου ΦΑΕΚ να ληφθούν υπόψη στην απόκριση του οδοστρώματος και οι επιδράσεις της θερμοκρασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΕΣ

- Βλαχάκης, Β.Σ., Αθανασόπουλος, Γ.Α. 2006. Εφαρμογή της Μεθόδου SASW σε Κεκλιμένο Έδαφος – Αριθμητική Προσομοίωση και Παραμετρική Διερεύνηση Αξιοπιστίας. *Πρακτικά 5ου Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής*, Ξάνθη.
- Γκαζέτας, Γ. 2007. *Σημειώσεις Εδαφοδυναμικής*. Τομέας Γεωτεχνικής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών.
- Κρητικάκης, Γ. Σ., Βαφειάδης, Α., Λούης, Ι. 2004. Εκτίμηση Ταχυτήτων Διάδοσης Εγκάρσιου Κύματος από Καταγραφές Επιφανειακών Κυμάτων Rayleigh. *Τεχνικά Χρονικά*, Επιστ.Εκδ. ΤΕΕ Ι (2-3).
- Λοΐζος, Α. και Σαριδάκης, Δ. 1994. Αξιολόγηση Μετρήσεων Φέρουσας Ικανότητας Ασφαλοταπτήτων Οδοστρωμάτων. *Τεχνικά Χρονικά* 14 (4).
- Τσίτος, Α.Κ., Αθανασόπουλος, Γ.Α. 2006. Αντιστροφή των Δεδομένων Πεδίου της Μεθόδου SASW – Αριθμητική Προσομοίωση και Διερεύνηση της Επίδρασης των Εδαφικών Συνθηκών. *Πρακτικά 5ου Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής*, Ξάνθη.
- Abdallah I., Williams R., and Nazarian S. 2009. Application of Data Fusion Using the Fuzzy Logic Method to Nondestructive Evaluation of Pavements. *Compendium of Papers, DVD of 88th Annual Meeting of TRB, 11-15 January 2009*. Washington, D.C.
- CSWS/SASW Handbook 2006. *Surface Wave System v3 SASW & CSWS*. GDS instruments Ltd.
- Heisey, J.S., Stokoe, K.H.II, Hudson, W.R., and Meyer, A.H. 1982. *Determination of In Situ Shear Wave Velocities from Spectral Analysis of Surface Waves*. Summary Report 256-2(S), Project 3-8-80-256. Austin:Center for Transportation Research, Bureau of Engineering Research, University of Texas.
- Hiltunen, D.R., and Woods, R.D. 1989. Influence of Source and Receiver Geometry on the Testing of Pavements by the Surface Waves Method. *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli*. Philadelphia: A.J. Bush III and G.Y. Baladi, American Society for Testing and Materials. ASTM STP 1026: 138-154
- Joh, S.-H. 2004. *Tips on the Inversion Analysis for the CSW Measurements*. Seoul: Chung-Ang University, Korea.

- Joh, S.-H., Kang, T.-H., Cho, M.-R., Kwon, S. A., and Nam, J. H. 2008. Pavement-Integrity Scanner for Characterization of Modulus Contrast between Near-Surface Material and Deeper Material of Concrete Layer in Pavement Systems. *Compendium of Papers, CD-ROM of 87th Annual Meeting of TRB, 13-17 January 2008*. Washington, D.C.
- Khanna, V., and Mooney, M.A. 2002. Comparison of Back-Calculated SASW Profiles with Results from Coring and DCP Testing. *Proceedings of the Geophysics 2002 Second Annual Conference on the application of the Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure Los Angeles, California*.
- Kim, Y.R., Xu, B. and Kim, Y. 2000. A New Backcalculation Procedure Based on Dispersion Analysis of FWD Time-History Deflections and Surface Wave Measurements Using Artificial Neural Networks. *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli*. 3: 297-312. West Conshohocken, PA: S.D. Tayabji and E.O. Lukanen, American Society for Testing and Materials.
- Nazarian, S.,and Stokoe, K.H.II 1989. Nondestructive Evaluation of Pavements by Surface Waves Method. *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli*., ASTM STP 1026: 119-137. Philadelphia: A.J. Bush III and G.Y. Baladi, Eds., American Society for Testing and Materials.
- Nazarian, S., Yuan, D., and Baker, M.R. 1995. *Rapid Determination of Pavement Moduli with Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method*. Research Project 0-1243, TX 79968-0516, Research Report 1243-1. El Paso.
- Roësset, J.M. 1998. Nondestructive Testing of Soils and Pavements. *Tamkang Journal of Science and Engineering* 1 (2): 61-81.
- Orozco, C. 2003. *Inversion Method for Spectral Analysis of Surface Waves*. Doctoral Thesis. Georgia Institute of Technology.
- Rosyidi, S.A. 2007. Comparison between 2-D and 3-D Stiffness Matrix Model Simulation of SASW Inversion for Pavement Structure. *Civil Engineering Dimension* 9(1): 42-48.
- Rydén, N. 2004. *Surface Wave Testing of Pavements*. Doctoral Thesis. Department of Engineering Geology Lund Institute of Technology, Lund University, in cooperation with Kansas Geological Survey University of Kansas.
- Stokoe, K.H.II, Wright, S.G., Bay, J.A., and Roësset, J.M. 1994. Characterization of Geotechnical Sites by SASW Method. *Geophysical Characteristics of Sites*. Rotterdam: A.A. Balkema and Netherlands: Brookfield.

- WinSASW version 2.0 user's guide 2002. *Data Interpretation and Analysis for SASW Measurements*. An Seong : Dept. of Civil Engineering, Chug-Ang University.
- Wu, H., Wang, S, Abdallah, I., and Nazarian S. 2002. A Rapid Approach to Interpretation of SASW Results. Correia & Branco. Eds, *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields* 1: 761-769. Lisse: Swets and Zeitlinger
- Xia, J., Miller R.D., and Park, C.B. 1999. Estimation of Near-Surface Shear-Wave Velocity by Inversion of Rayleigh Waves. *Geophysics* 64 (3): 691-700.