



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

## ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΕΝΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ



**ΤΡΙΑΔΑ ΔΙΠΛΑ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ανδρέας Λοΐζος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2019

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω τον κ. Ανδρέα Λοΐζο, Καθηγητή του ΕΜΠ για την ανάθεση του θέματος και την συνολική καθοδήγηση και οργάνωση σε όλα τα στάδια εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον κ. Κωνσταντίνο Γκυρτή, Υποψήφιο Διδάκτορα για τις πολύτιμες συμβουλές και τη καθοριστική βοήθεια κατά την ανάλυση και συγγραφή της διπλωματικής μου.

Τέλος, ευχαριστώ τα αγαπημένα μου πρόσωπα για τη κατανόηση τους και ιδιαίτερα τους γονείς μου και τα αδέρφια μου για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξη τους όλα τα χρόνια.

## **Περίληψη**

Η υποβάθμιση της δομικής κατάστασης ενός υφιστάμενου οδοστρώματος με τη πάροδο του χρόνου καθιστά απαραίτητο τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας του σε κάθε χρονική στιγμή της ζωής του οδοστρώματος. Προς τούτο, μεταξύ άλλων θεωρείται σημαντική η γνώση της εντατικής κατάστασης του οδοστρώματος η οποία οδηγεί στον προσδιορισμό της εναπομένουσας ζωής του υποδεικνύοντας ενδεχόμενη ανάγκη συντήρησής του. Λόγω των χρονοβόρων διαδικασιών που περιλαμβάνει η διενέργεια της δομικής αξιολόγησης, έχουν αναπτυχθεί διαχρονικά αλγόριθμοι πρόβλεψης της εντατικής κατάστασης των οδοστρωμάτων. Υπό το πρίσμα αυτό, η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη διερεύνηση και αξιολόγηση υφιστάμενων αλγορίθμων πρόβλεψης των παραμορφώσεων στις κρίσιμες θέσεις αστοχίας των ασφαλικών οδοστρωμάτων με έμφαση στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων. Συγκεκριμένα διερευνάται η προσαρμογή των αλγορίθμων σε στοιχεία που αφορούν υφιστάμενα οδοστρώματα στη χώρα μας καθώς και η δημιουργία νέου προτύπου πρόβλεψης. Για το σκοπό αυτό, αξιοποιούνται στοιχεία συλλογής από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ τα οποία αφορούν σε μετρήσεις ελαστικών υποχωρήσεων καθώς και μετρήσεις στρωματογραφίας με μη καταστρεπτικά συστήματα σε πειραματικό οδόστρωμα τμήματος αυτοκινητοδρόμου. Η επεξεργασία των στοιχείων συλλογής με ένα πρώτο επίπεδο ανάλυσης αλλά και με αναλύσεις ανάστροφου υπολογισμού και εντατικής κατάστασης οδοστρωμάτων, τροφοδοτεί τα πρότυπα πρόβλεψης των παραμορφώσεων που προέκυψαν από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Τα σχετικά αποτελέσματα για την αξιολόγηση των αλγορίθμων πρόβλεψης της εντατικής κατάστασης των οδοστρωμάτων περιλαμβάνονται στα επιμέρους κεφάλαια της εργασίας.

## **Λέξεις-κλειδιά :**

δείκτες δομικής αξιολόγησης, ανάστροφος υπολογισμός, αναλύσεις εντατικής κατάστασης, αλγόριθμοι πρόβλεψης παραμορφώσεων.

## **Abstract**

Pavements structural condition deteriorates over time, thus it is necessary to monitor pavements bearing capacity evolution at any time. In order to succeed it, knowledge of stresses and strains are necessary for calculating remaining life and indicating potential maintenance needs. So the present diploma thesis deals with the investigation and evaluation of predictive algorithms of the strains at the bottom of the asphalt layers. Through this investigation, an additional objective is to assess the applicability of these algorithms on field data from pavements within Greece and to develop a new one. For this purpose, deflections and thickness data from an experimental pavement section are utilized, taken from the database of the Laboratory of Pavement Engineering of National Technical University of Athens (NTUA). Taking into account results by first- level analysis, back-calculation and strain analysis, predictive algorithms are evaluated and the relevant results are included within this thesis.

## **Keywords:**

structural evaluation indexes, back-analysis, strain analysis, strain predictive algorithms.

## Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή .....	1
1.1 Γενική ανασκόπηση .....	1
1.2 Στόχος και μεθοδολογία .....	2
1.3 Δομή εργασίας .....	3
2. Δομική αξιολόγηση εύκαμπτου οδοστρώματος.....	4
2.1 Γενικά Στοιχεία .....	4
2.2 Εύκαμπτο οδόστρωμα .....	5
2.3 Ασφαλτόμιγμα .....	6
2.4 Κρίσιμες θέσεις εύκαμπτου οδοστρώματος.....	6
2.5 Μέθοδοι δομικής αξιολόγησης.....	9
2.5.1 Βασικές αρχές.....	9
2.5.2 Καταστρεπτικές δοκιμές – Πυρηνοληψία.....	10
2.5.3 Μη καταστρεπτικές δοκιμές .....	10
2.5.4 Σύστημα μέτρησης FWD .....	14
3. Άμεση ανάλυση υποχωρήσεων .....	18
3.1 Γενικά Στοιχεία .....	18
3.2 Χαρακτηριστικοί δείκτες.....	18
3.2.1 Γενική Κατάσταση Οδοστρώματος.....	19
3.2.2 Ασφαλτικές Στρώσεις.....	21
3.2.3 Στρώση βάσης και υπόβασης.....	22
3.2.4 Στρώση έδρασης.....	23
3.3 Επίδραση φορτίου και θερμοκρασίας στους δομικούς δείκτες.....	23
4. Ανάστροφος υπολογισμός και ανάλυση εντατικής κατάστασης .....	26
4.1 Γενικά στοιχεία.....	26
4.2 Ανάστροφος υπολογισμός.....	26
4.2.1 Ζητήματα ανάστροφου υπολογισμού .....	28
4.3 Ανάλυση εντατικής κατάστασης .....	29
4.3.1 Προσδιορισμός παραμορφώσεων .....	29
4.3.2 Εκτίμηση παραμορφώσεων μέσω αλγορίθμων.....	30
5. Πειραματική διαδικασία .....	35
5.1 Γενική περιγραφή.....	35
5.2 Άμεση ανάλυση.....	36

5.2.1 Αναγωγή σε φορτίο αναφοράς .....	36
5.2.2 Υπολογισμός δεικτών δομικής κατάστασης .....	36
5.3 Ανάστροφος υπολογισμός με τη θεωρία πολλαπλών ελαστικών στρώσεων .....	37
5.3.1 Γενικές αρχές.....	37
5.3.2 Περιγραφή διαδικασίας ανάστροφου υπολογισμού .....	38
5.4 Υπολογισμός παραμορφώσεων .....	40
5.5 Εφαρμογή μηχανικών προτύπων πρόβλεψης .....	42
5.5.1 Υφιστάμενοι αλγόριθμοι.....	42
5.5.2 Δημιουργία νέου αλγορίθμου.....	44
6. Αποτελέσματα.....	47
6.1 Δείκτες δομικής κατάστασης .....	47
6.2 Μέτρα δυσκαμψίας.....	51
6.3 Παραμορφώσεις.....	55
6.4 Αξιολόγηση υφιστάμενων αλγορίθμων πρόβλεψης των παραμορφώσεων .....	59
6.4.1 Συγκριτική αξιολόγηση προβλεπόμενων παραμορφώσεων .....	59
6.4.2 Σύνοψη.....	69
6.5 Εισαγωγή νέου αλγορίθμου.....	70
7. Συμπεράσματα και προτάσεις .....	74
8. Βιβλιογραφία .....	76

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Γενική ανασκόπηση

Η δομική επάρκεια ενός οδοστρώματος αποτελεί μείζον ζήτημα τόσο κατά το σχεδιασμό νέων οδοστρωμάτων όσο και κατά τη διαχείριση των υφιστάμενων καθώς συνδέεται άμεσα με τη δυνατότητα παραλαβής των αξονικών φορτίων της κυκλοφορίας και έμμεσα με την εξυπηρετικότητα που προσφέρει στους χρήστες της οδού. Βάσει αυτού, κρίνεται απαραίτητο να αξιολογείται η δομική κατάσταση του οδοστρώματος καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του για τον καθορισμό των στρατηγικών συντήρησής του.

Η δομική αξιολόγηση προϋποθέτει τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος. Προς τούτο, απαιτείται μεταξύ άλλων η γνώση τόσο των μηχανικών χαρακτηριστικών του οδοστρώματος όσο και της εντατικής κατάστασης που αναπτύσσεται στις κρίσιμες θέσεις αστοχίας. Για την περίπτωση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, οι κρίσιμες θέσεις εντοπίζονται στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων και στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης. Σε αυτές τις θέσεις είναι αναγκαίο να ελέγχεται η αντοχή έναντι κόπωσης και έναντι παραμενουσών παραμορφώσεων αντίστοιχα, με σκοπό τον προσδιορισμό της εναπομένουσας ζωής του οδοστρώματος, η οποία ενδέχεται να υποδείξει την ανάγκη για συντήρηση του οδοστρώματος.

Δεδομένου ότι στο πλαίσιο του κύκλου ζωής ενός οδοστρώματος η υποβάθμιση της αρχικής δομικής κατάστασής του με την πάροδο του χρόνου θεωρείται αναπόφευκτη, η διατήρησή του σε κατάσταση παρόμοια με αυτή που είχε αμέσως μετά τη κατασκευή του είναι πρακτικά αδύνατη. Κατά συνέπεια, προκειμένου να ελέγχεται σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος, απαιτούνται περιοδικοί έλεγχοι και μετρήσεις των χαρακτηριστικών του, με στόχο την αξιολόγηση της δομικής κατάστασής του. Μέσω αυτής της αξιολόγησης είναι δυνατόν να καθοριστεί ένα σύστημα επεμβάσεων με σκοπό τη διαχείριση της συντήρησης του οδοστρώματος, εφόσον προκύψει σχετική ανάγκη. Πέραν της παραδοσιακής πυρηνοληψίας, η οποία ανήκει στα καταστρεπτικά συστήματα και παρέχει σημειακή πληροφόρηση, τέτοιοι περιοδικοί έλεγχοι και μετρήσεις χαρακτηριστικών ενός οδοστρώματος πραγματοποιούνται τα τελευταία χρόνια με συστήματα μη καταστρεπτικού χαρακτήρα (Non Destructive Testing NDT), όπως μεταξύ άλλων αναφέρεται χαρακτηριστικά το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer - FWD) το οποίο καταγράφει τις ελαστικές υποχωρήσεις στην επιφάνεια του οδοστρώματος ως αποτέλεσμα της επιβολής φόρτισης που προσομοιάζει τη διέλευση βαρέου οχήματος.

Στο πλαίσιο της δομικής αξιολόγησης, τα στοιχεία που συλλέγονται από το FWD αξιοποιούνται σε ένα πρώτο επίπεδο άμεσης ανάλυσης (first-level analysis) καθώς και σε ένα ακριβέστερο δεύτερο επίπεδο ανάλυσης (second-level analysis). Πιο συγκεκριμένα, με την άμεση ανάλυση προσδιορίζονται δείκτες που εκτιμούν την δομική κατάσταση του οδοστρώματος βάσει των υποχωρήσεων. Με τη δεύτερου επιπέδου ανάλυση προσδιορίζονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος μέσω του ανάστροφου υπολογισμού και οι κρίσιμες παραμορφώσεις στις θέσεις αστοχίας μέσω αναλύσεων εντατικής κατάστασης. Αξίζει να σημειωθεί, ότι αυτές οι αναλύσεις προϋποθέτουν χρήση εξειδικευμένων λογισμικών αλλά και συναφή εμπειρία από τους αναλυτές-μηχανικούς, διαδικασίες οι οποίες είναι χρονοβόρες.

Κατόπιν τούτων και δεδομένου ότι στη δομική αξιολόγηση είναι επιθυμητές αξιόπιστες λύσεις σε βέλτιστο χρόνο, έχουν αναπτυχθεί διαχρονικά αλγόριθμοι πρόβλεψης της εντατικής κατάστασης υφιστάμενων ασφαλικών οδοστρωμάτων. Οι εν λόγω αλγόριθμοι αξιοποιούν στοιχεία συλλογής από μη καταστρεπτικά συστήματα, συνήθως υποχωρήσεις, δομικούς δείκτες ή και πάχη των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος, και συμβάλουν καθοριστικά στην εξοικονόμηση χρόνου. Ωστόσο, οι αλγόριθμοι δεν είναι καθολικά εφαρμόσιμοι καθώς έχουν αναπτυχθεί για οδοστρώματα υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Κατά συνέπεια, θεωρείται αναγκαίος ο έλεγχος της χρησιμότητας τους για πιθανή προσαρμογή σε διαφορετικά οδοστρώματα.

## **1.2 Στόχος και μεθοδολογία**

Κατόπιν των ανωτέρω, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της χρησιμότητας των αλγορίθμων πρόβλεψης της κρίσιμης εντατικής κατάστασης στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων, μέσω στοιχείων συλλογής με μη καταστρεπτικά συστήματα, καθώς και η διερεύνηση ζητημάτων προσαρμογής των διαθέσιμων αλγορίθμων σε στοιχεία που αφορούν υφιστάμενο ασφαλικό οδόστρωμα στη χώρα μας. Επιπρόσθετα, διερευνάται η δυνατότητα δημιουργίας ενός νέου αλγορίθμου.

Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας αναφορικά με την ύπαρξη αντίστοιχων προτύπων πρόβλεψης των κρίσιμων παραμορφώσεων εντός της δομής ασφαλικών οδοστρωμάτων με έμφαση στην οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων, μέγεθος το οποίο σχετίζεται με φαινόμενα κόπωσης ασφαλτομιγμάτων. Στη συνέχεια αξιοποιήθηκαν στοιχεία συλλογής με μη καταστρεπτικά συστήματα από τη βάση δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ. Προκειμένου να αξιολογηθούν οι αλγόριθμοι, έγινε αρχικά επεξεργασία των στοιχείων συλλογής, τα οποία αφορούν σε μετρήσεις με το FWD και το Γεωραντάρ (Ground Penetrating



Radar, GPR) σε πειραματικό τμήμα αυτοκινητοδρόμου για διάστημα τριών ετών. Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε ανάστροφος υπολογισμός για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών του οδοστρώματος καθώς και αναλύσεις εντατικής κατάστασης για τον προσδιορισμό των κρίσιμων παραμορφώσεων του. Βάσει αυτών, διερευνάται στατιστικά η δυνατότητα προσαρμογής των αλγορίθμων στα διαθέσιμα στοιχεία ενώ πραγματοποιείται εκ νέου βαθμονόμηση αυτών καθώς και δημιουργία νέου προτύπου.

### **1.3 Δομή εργασίας**

Η παρούσα εργασία συμπεριλαμβανομένου του παρόντος περιλαμβάνει 8 κεφάλαια.

Συγκεκριμένα:

Το 2ο κεφάλαιο αφορά στα χαρακτηριστικά των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, στη δομική αξιολόγηση με έμφαση στα μη καταστρεπτικά συστήματα και ειδικότερα στο Παραμορφωσίμετρο Πίπτοντος Βάρους (Falling Weight Deflectometer - FWD).

Το 3ο κεφάλαιο περιλαμβάνει βιβλιογραφική ανασκόπηση αναφορικά με την άμεση ανάλυση δηλαδή τους δείκτες δομικής κατάστασης των οδοστρωμάτων βάσει των υποχωρήσεων.

Το 4ο κεφάλαιο περιγράφει το θεωρητικό υπόβαθρο για τις διαδικασίες προσδιορισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών του οδοστρώματος μέσω του ανάστροφου υπολογισμού και τις αναλύσεις της εντατικής κατάστασης για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων. Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται ανασκόπηση των διαθέσιμων αλγορίθμων πρόβλεψης του εντατικού μεγέθους που αναπτύσσεται στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων ( $\epsilon_R$ ).

Το 5ο κεφάλαιο περιλαμβάνει την περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας που πραγματοποιείται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Το 6ο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας με έμφαση στην αξιολόγηση των αλγορίθμων πρόβλεψης των παραμορφώσεων  $\epsilon_R$ .

Το 7ο κεφάλαιο περιλαμβάνει συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Το 8ο κεφάλαιο περιλαμβάνει το σύνολο της βιβλιογραφίας που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

## 2. Δομική αξιολόγηση εύκαμπτου οδοστρώματος

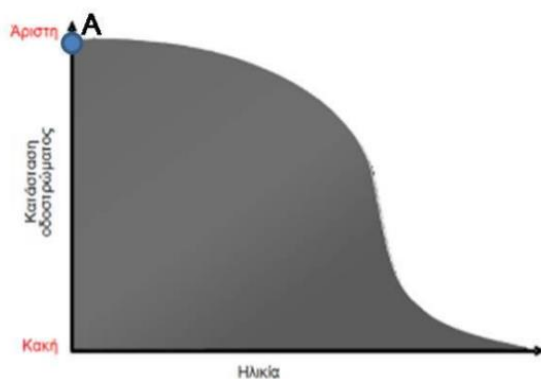
### 2.1 Γενικά Στοιχεία

Η αλματώδης πρόοδος της τεχνολογίας αλλά και οι διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών κάθε οδού για άνεση και ασφάλεια έχουν οδηγήσει το σχεδιασμό και τη μελέτη των εύκαμπτων οδοστρωμάτων σε σημαντική ανάπτυξη.

Η δομική επάρκεια ενός υφιστάμενου οδοστρώματος είναι άμεσα συνυφασμένη με την δυνατότητα ασφαλούς παραλαβής των αξονικών φορτίων της κυκλοφορίας και έμμεσα με την αξιολόγηση της εξυπηρετικότητας που προσφέρει το υπό μελέτη οδόστρωμα. Συνεπώς, για να διατηρείται υψηλό το επίπεδο εξυπηρετικότητας χρειάζεται:

- Σωστός σχεδιασμός κατά τη φάση μελέτης σχεδιασμού
- Αριότητα κατά το στάδιο κατασκευής του
- Επαρκής και περιοδική παρακολούθηση του οδοστρώματος για τον προσδιορισμό τόσο της λειτουργικής όσο και της δομικής κατάστασης του (Λοΐζος & Πλατή2016).

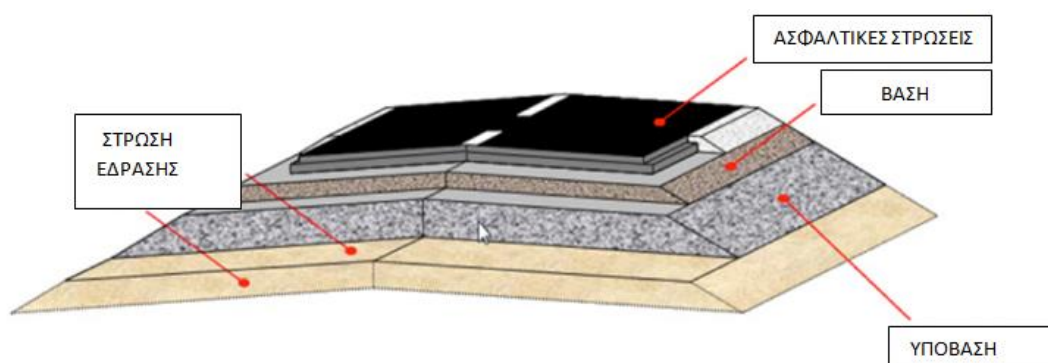
Ωστόσο, το οδόστρωμα με τη πάροδο του χρόνου και υπό την επίδραση της κυκλοφορίας (κυρίως των βαρέων οχημάτων) και των κλιματολογικών συνθηκών (που προκαλούν γήρανση υλικών) χάνει την αρχική αντοχή του. Καθώς, λοιπόν, φθίνει η φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος στο πλαίσιο του κύκλου ζωής του κρίνεται αδήριτη η ανάγκη επέμβασης για τη συντήρηση του ώστε να επανέλθει το επίπεδο εξυπηρέτησης σε αποδεκτά επίπεδα (εικόνα 2.1). Όπως χαρακτηριστικά αναφέρει ο Molenaar (2006) επειδή η αποκατάσταση των οδοστρωμάτων είναι μια δαπανηρή διαδικασία, πρέπει να υπάρχει μέριμνα ώστε να προσδιοριστούν με ακρίβεια η έκταση και η σοβαρότητα των φθορών και ο ρυθμός εξέλιξης τους.



Εικόνα 2.1: Καμπύλη συμπεριφοράς οδοστρώματος (Λοΐζος&Πλατή 2018).

## 2.2 Εύκαμπτο οδόστρωμα

Ο συνηθέστερος τύπος οδοστρώματος που συναντάται στη χώρα μας είναι το εύκαμπτο οδόστρωμα το οποίο περιλαμβάνει ασφαλτικές στρώσεις, τη στρώση βάσης, τη στρώση υπόβασης και τη στρώση έδρασης (Yoder , 1975) (Εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2: Τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος (European Asphalt Pavement Association, 2019).

Πιο αναλυτικά, οι ασφαλτικές στρώσεις κατασκευάζονται από ασφαλτομίγματα και εν γένει διακρίνονται στην ανώτερη στρώση που ονομάζεται στρώση κυκλοφορίας και η οποία οφείλει να είναι αντιολισθηρή, στις ισοπεδωτικές στρώσεις και στην ασφαλτική βάση που έχουν περισσότερο δομική συνεισφορά. Οι στρώσεις της βάσης και της υπόβασης κατασκευάζονται από συμπυκνωμένο ασύνδετο (θραυστό) αμμοχάλικο ορισμένης διαβάθμισης. Ειδικότερα για τη στρώση υπόβασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και φυσικό αμμοχάλικο ορισμένης διαβάθμισης. Η στρώση έδρασης είναι το συμπυκνωμένο υπέδαφος πάνω στο οποίο εδράζονται οι προηγούμενες στρώσεις.

## 2.3 Ασφαλτόμιγμα

Καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά των εύκαμπτων οδοστρωμάτων έχουν οι ασφαλικές στρώσεις οι οποίες αποτελούνται από μίγμα ασφάλτου και αδρανών δηλαδή το ασφαλτόμιγμα. Από τα υλικά αυτά, τα αδρανή αποτελούν τα ασύνδετα υλικά με ελαστική κατά βάση συμπεριφορά. Η ασφαλτος αποτελεί ένα ιξώδες ημίρρευστο υλικό (προϊόν αργού πετρελαίου) το οποίο λειτουργεί ως συνδετικό υλικό. Τέλος, στη δομή του ασφαλτόμιγματος περιλαμβάνονται τα κενά του αέρα.

Η ιξωδοελαστική συμπεριφορά της ασφάλτου υπερισχύει και επομένως το ασφαλτόμιγμα συμπεριφέρεται και αυτό ως ιξωδοελαστικό υλικό. Στο πλαίσιο αυτής της θεώρησης η συμπεριφορά του ασφαλτομίγματος εξαρτάται από τον χρόνο φόρτισης ( $t$ ) και τη θερμοκρασία ( $T$ ). Ο λόγος της τάσης προς την παραμόρφωση, ονομάζεται λόγος δυσκαμψίας ( $S_m$ ) (Vander Poel) για να γίνει διάκριση από το μέτρο ελαστικότητας  $E$ , από το οποίο διαφέρει με τις παραπάνω προϋποθέσεις, μόνο στο ότι εξαρτάται και από τη θερμοκρασία και από τη ταχύτητα φόρτισης (τύπος 2.1).

$$S_m = \left( \frac{\sigma}{\varepsilon} \right) T, t \quad (2.1)$$

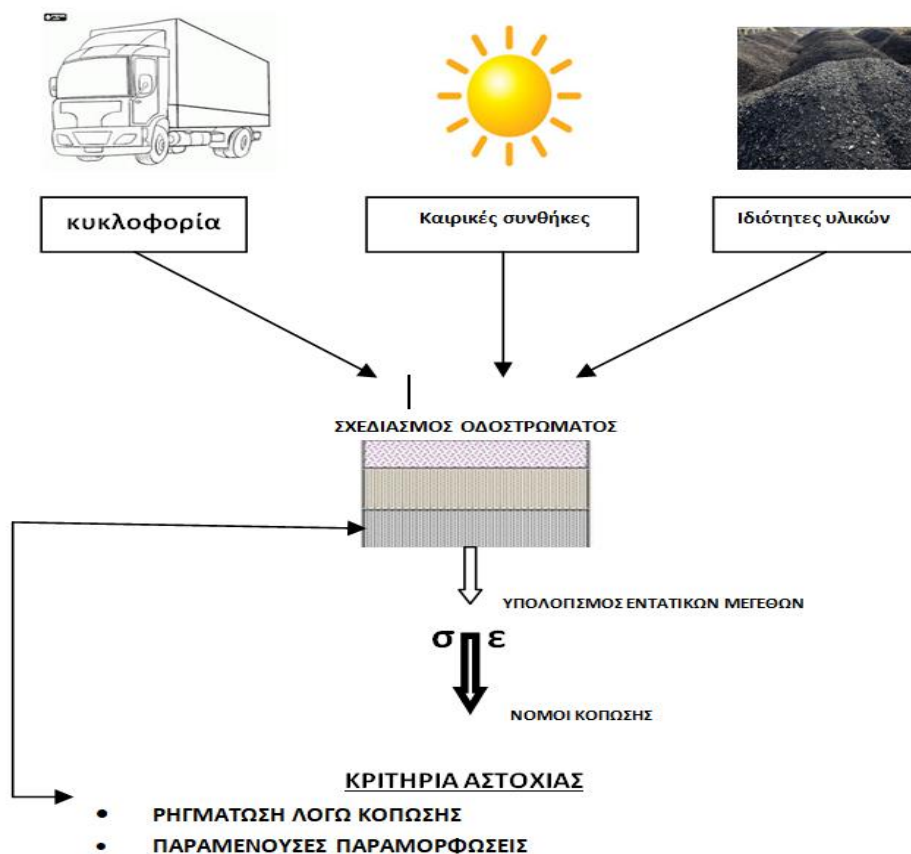
$\sigma$ : επιβαλλόμενη τάση,  $\varepsilon$ : αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση

Το μέτρο δυσκαμψίας είναι πολύ σημαντική παράμετρος στον εξελιγμένο αναλυτικό υπολογισμό των οδοστρωμάτων διότι καθιστά δυνατή τη χρησιμοποίηση της θεωρίας των επάλληλων ελαστικών στρώσεων για την ανάλυση των οδοστρωμάτων όταν μία ή περισσότερες στρώσεις αυτών αποτελούνται από ασφαλτόμιγμα τα οποία είναι πραγματικά ιξωδοελαστικά υλικά (Λοϊζος και Πλατή 2018).

## 2.4 Κρίσιμες θέσεις εύκαμπτου οδοστρώματος

Λαμβάνοντας υπόψη τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ασφαλτομιγμάτων αλλά και των υποκείμενων υλικών, σχεδιάζεται μια δομή οδοστρώματος προκειμένου αυτό να φέρει την προβλεπόμενη κυκλοφορία υπό τις αναμενόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Υπό την επιβολή των αξονικών φορτίων τα εύκαμπτα οδοστρώματα έχουν δύο κρίσιμες θέσεις αστοχίας. Ο υπολογισμός των εντατικών μεγεθών σε αυτές τις θέσεις και η εφαρμογή νόμων κόπωσης και νόμων αστοχίας της στρώσης έδρασης έχουν ως αποτέλεσμα την εκτίμηση της εναπομένουσας ζωής του

οδοστρώματος. Στη βάση των παραπάνω πληροφοριών προκύπτει η φιλοσοφία του σχεδιασμού των οδοστρωμάτων η οποία συνοψίζεται στο εξής σκαρίφημα της εικόνας 2.3.



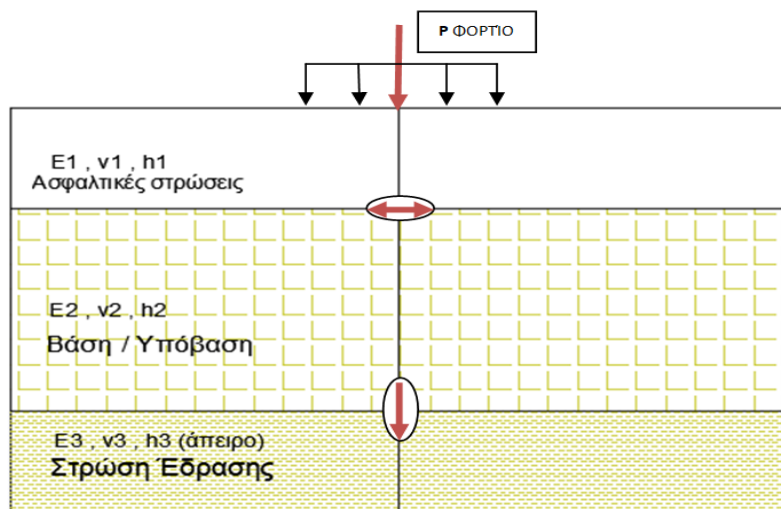
Εικόνα 2.3: Φιλοσοφία σχεδιασμού οδοστρωμάτων.

Με σκοπό να υπολογιστούν οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως, κρίνεται αναγκαίο να διαμορφωθεί κατάλληλο προσομοίωμα της κατασκευαστικής διατομής του οδοστρώματος. Αυτό αποτελείται συνήθως από δύο στρώσεις πεπερασμένου πάχους(ασφαλτικές στρώσεις, βάση-υπόβαση) και την απείρου πάχους στρώση έδρασης, οι οποίες όλες στο σύνολο τους είναι θεωρητικά απείρων διαστάσεων κατά την οριζόντια έννοια.

Το σύστημα των επάλληλων στρώσεων που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των τάσεων και παραμορφώσεων βασίζεται στη παραδοχή της θεωρίας Burmister (1944-45) στην οποία τα υλικά θεωρούνται ελαστικά ομογενή και ισότροπα. Για να ορισθεί πλήρως το στατικό πρότυπο ορίζονται τα πάχη των στρώσεων, το μέτρο ελαστικότητας καθώς και ο λόγος Poisson κάθε στρώσης.

Συνεπώς υπό την επίδραση ενός φορτίου  $P$ , τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στις κρίσιμες θέσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως είναι οι οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις και παραμορφώσεις στον πυθμένα των ασφαλτικών

στρώσεων  $\sigma_{R1}$ ,  $\epsilon_{R1}$  και οι κατακόρυφες θλιπτικές τάσεις και παραμορφώσεις στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης  $\sigma_{Z3}$  και  $\epsilon_{Z3}$  (εικόνα 2.4).



Εικόνα 2.4: Κρίσιμες θέσεις εύκαμπτου οδοστρώματος.

Η γνώση των εντατικών μεγεθών μπορεί να τροφοδοτήσει τους νόμους αστοχίας που διέπουν την εναπομένουσα ζωή των οδοστρωμάτων έναντι δύο τύπων αστοχίας. Αυτοί είναι:

- Ο νόμος κόπωσης (fatigue cracking), ο οποίος αφορά την αντοχή του ασφαλτομίγματος έναντι ρηγμάτωσης και συνδέεται με την οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων και
- Ο νόμος αστοχίας – παραμορφωσιμότητας της στρώσης έδρασης που συνδέεται με την κατακόρυφη θλιπτική παραμόρφωση στην κορυφή αυτής της στρώσης (Λοΐζος & Πλατή 2018).

Γίνεται αντιληπτό ότι, τα πάχη των επιμέρους στρώσεων ( $h$ ) και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των μιγμάτων δηλαδή τα μέτρα δυσκαμψίας ( $E$ ) και ο λόγος Poisson( $\nu$ ), προσδιορίζουν τη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος. Για ένα νέο οδόστρωμα, η γνώση των προηγούμενων στοιχείων μέσω επιτόπου μετρήσεων και καταγραφών οδηγεί στην εκτίμηση της επιτόπου (in-situ) φέρουσας ικανότητάς του κι εφόσον αυτή πραγματοποιηθεί αμέσως μετά την κατασκευή του οδοστρώματος οδηγεί στο προσδιορισμό της αρχικής του κατάστασης. Έπειτα από περιοδική παρακολούθηση του οδοστρώματος, σημειώνονται νέες καταγραφές οι οποίες συγκρινόμενες με την αρχική, αξιολογούν τη μεταβολή της δομικής επάρκειας σε κάθε δεδομένη στιγμή και έτσι δημιουργείται μία βάση δεδομένων για τη παρακολούθηση της συμπεριφοράς του οδοστρώματος σε βάθος χρόνου.

## 2.5 Μέθοδοι δομικής αξιολόγησης

### 2.5.1 Βασικές αρχές

Προκειμένου να επιτευχθεί η διαχείριση της συντήρησης ενός οδοστρώματος καθίσταται αναγκαία η αξιολόγηση της δομικής κατάστασης αυτού. Η αξιολόγηση της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος πραγματοποιείται με την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητάς του (Φ.Ι). Ως φέρουσα ικανότητα, εννοείται η ικανότητα ενός οδοστρώματος να φέρει τα προβλεπόμενα αξονικά φορτία κυκλοφορίας, για τη χρονική περίοδο που έχει σχεδιαστεί (Yoder, 1975). Η έννοια της φέρουσας ικανότητας αφορά τόσο σε κάθε μία από τις επιμέρους στρώσεις του οδοστρώματος, όσο στο σύνολο του. Η εκτίμηση της δομικής κατάστασης ενός οδοστρώματος, κρίνεται απαραίτητη με στόχο την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων και πληροφοριών, καθώς η φέρουσα ικανότητα μειώνεται υπό την επίδραση διαφόρων παραγόντων όπως η κυκλοφορία, οι καιρικές συνθήκες και η γήρανση των υλικών και κατ' επέκταση υποβαθμίζεται το επίπεδο εξυπηρέτησης.

Βασικές απαιτήσεις για τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας είναι η συνεκτίμηση διαφόρων χαρακτηριστικών δηλαδή τα πάχη καθώς και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των επιμέρους στρώσεων (τα μέτρα ελαστικότητας τους και οι λόγοι Poisson).

Για τον προσδιορισμό των παραπάνω στοιχείων έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι με τις οποίες προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά ενός οδοστρώματος. Οι μέθοδοι αυτές ανάλογα με την επίδραση τους στο οδόστρωμα διακρίνονται σε καταστρεπτικές και μη καταστρεπτικές (Hu, 2015).

### 2.5.2 Καταστρεπτικές δοκιμές – Πυρηνοληψία

Ο προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών των ασφαλτικών στρώσεων ενός υφιστάμενου οδοστρώματος μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω εργαστηριακών δοκιμών σε πυρήνες που λαμβάνονται επί τόπου. Ο εργαστηριακός έλεγχος απαιτεί τη λήψη πυρήνων επιτόπου στο οδόστρωμα, οι οποίοι στη συνέχεια μεταφέρονται στο εργαστήριο όπως φαίνεται στην εικόνα 2.5, όπου υποβάλλονται σε κατάλληλες δοκιμές όπως είναι δοκιμές προσδιορισμού ογκομετρικών χαρακτηριστικών (πχ. πυκνότητας) και δοκιμές προσδιορισμού του μέτρου δυσκαμψίας κ.α.



Εικόνα 2.5: Πυρηνοληψία και πυρήνες ασφαλτομίγματος στο εργαστήριο.

Οι εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιούνται στα δείγματα που εξετάζονται στο εργαστήριο ποικίλλουν ανάλογα με το υλικό (Καββαδάς, 2009). Έτσι ανάλογα με το αν ο πυρήνας αποτελείται από ασύνδετα υλικά ή ασφαλτόμιγμα εφαρμόζεται δοκιμή τριαξονικής φόρτισης ή μονοαξονικής θλίψης αντίστοιχα. Άλλη χαρακτηριστική δοκιμή που εφαρμόζονται σε πυρήνες ασφαλτομίγματος είναι η δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού.

Εν γένει, η μέθοδος της λήψης πυρήνων είναι καταστρεπτική μέθοδος και αποτελεί την πλέον παραδοσιακή αλλά και χρονοβόρα μέθοδο συλλογής στοιχείων ενώ επιπλέον παρέχεται σημειακή πληροφόρηση. Παρά τα μειονεκτήματά της, η πυρηνοληψία επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό του πάχους των ασφαλτικών στρώσεων.

### 2.5.3 Μη καταστρεπτικές δοκιμές

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστούν και να συλλεχθούν στοιχεία από υφιστάμενα οδοστρώματα χωρίς να επιδρούν καταστρεπτικά σε αυτά ονομάζονται μη καταστρεπτικές. Με στόχο την επί τόπου συλλογή πληροφοριών ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά των επιμέρους υλικών του οδοστρώματος έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται εξελιγμένα μη καταστρεπτικά συστήματα (Non Destructive Testing –NDT). Συγκρινόμενες οι μη καταστρεπτικές δοκιμές έναντι των παραδοσιακών καταστρεπτικών, όπως είναι η πυρηνοληψία, πλεονεκτούν για



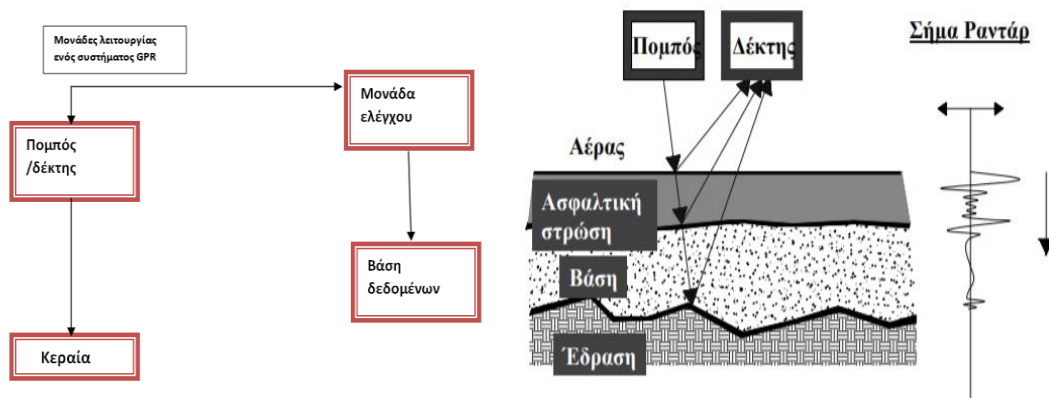
πληθώρα λόγων. Από τη μία πλευρά, η λήψη πυρήνων που είναι αναγκαία για την πραγματοποίηση εργαστηριακών δοκιμών χαρακτηρίζεται από α) τη καταστροφή της δομής και της ομοιογένειας του οδοστρώματος και β) τη σημειακή πληροφόρηση. Αντίθετα, οι μη καταστρεπτικές μέθοδοι χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητα συνεχούς πληροφόρησης και μάλιστα σε ορισμένες περιπτώσεις χωρίς διακοπή της κυκλοφορίας (ή έστω με περιορισμένα ρυθμιστικά μέτρα κυκλοφορίας).

Τα πλέον συνηθέστερα μη καταστρεπτικά συστήματα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: αυτά που εκτιμούν την στρωματογραφία του οδοστρώματος (δηλαδή τα πάχη των στρώσεων) και αυτά που εκτιμούν την ελαστική απόκριση/υποχώρηση του οδοστρώματος υπό την επιβολή φορτίου.

Στην πρώτη κατηγορία των μη καταστρεπτικών συστημάτων, ανήκει το γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar- GPR) (εικόνα 2.6), το οποίο μέσω της διηλεκτρικής σταθεράς των υλικών προσδιορίζει τα πάχη των επιμέρους στρώσεων (Hu , 2015). Πιο συγκεκριμένα, η θεμελιώδης αρχή λειτουργίας του GPR, βασίζεται στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία, αφού τα σήματα που εκπέμπει είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία περιγράφονται μαθηματικά από τις εξισώσεις της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας. Ένα σύστημα GPR δημιουργεί βραχείς παλμούς ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, οι οποίοι διεισδύουν στη δομή του οδοστρώματος και ανακλώνται κάθε φορά που συναντούν υλικά με διαφορετικά ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά (διηλεκτρική σταθερά). Το εύρος και ο χρόνος άφιξης των κυμάτων στο δέκτη χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των παχών, καθώς και άλλων χαρακτηριστικών των στρώσεων του οδοστρώματος όπως είναι ο εντοπισμός κενών και η χαρτογράφηση της στρωματογραφίας του εδάφους. Αυτή η αρχή λειτουργίας του και οι μονάδες από τις οποίες αποτελείται το GPR παρουσιάζονται στην εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.6: Παράδειγμα σύγχρονου γεωραντάρ, GSSI GPR (900MHz,SIR-20 DATA ACQUISITION SYSTEM) (Hu , 2015).



Εικόνα 2.7: Αρχή λειτουργίας και μονάδες ενός συστήματος GPR.

Για την πραγματοποίηση μιας έρευνας το σύστημα GPR τοποθετείται, αρχικά, κοντά στην υπό μελέτη επιφάνεια και μακριά από αντικείμενα που θα μπορούσαν να επηρεάσουν το ηλεκτρομαγνητικό σήμα (π.χ μεταλλικές επιφάνειες). Τα ραδιοκύματα κατευθύνονται στο έδαφος. Όταν συναντούν υλικό με διαφορετικά ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά, αφενός μέρος τους ανακλάται πίσω στο δέκτη και αφετέρου μεταβάλλεται η ταχύτητα ( $v$ ) που το διαπερνούν. Ουσιαστικά, το σύστημα μετράει τα χρονικά διαστήματα που χρειάζονται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα να διαπεράσουν τα υλικά του οδοστρώματος και να επιστρέψουν στο δέκτη.

Στην δεύτερη κατηγορία των μη καταστρεπτικών συστημάτων, έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί διάφορα συστήματα ανάλογα με τον τρόπο επιβολής του φορτίου (δυναμικό ή στατικό) επί του οδοστρώματος και της μεθοδολογίας

καταγραφής των στοιχείων συλλογής. Κάποια από αυτά είναι η δοκός Benkelman (εικόνα 2.8), το Road Rater (εικόνα 2.9), το Deflectograph (εικόνα 2.10) καθώς και το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος ελαφρού βάρους (Light Falling Weight Deflectometer – LWD) (εικόνα 2.11) το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως για την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας των εδαφών και των στρώσεων από ασύνδετα υλικά κατά τη φάση κατασκευής του οδοστρώματος.



**Εικόνα 2.8: δοκός Benkelman**



**Εικόνα 2.9: Road Rater**



**Εικόνα 2.10: Deflectograph**



**Εικόνα 2.11: LWD με γεώφωνο (Icenogle&Kabir 2013)**

Ως πλέον εξελιγμένο σύστημα για την δομική αξιολόγηση του οδοστρώματος θεωρείται το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (Falling Weight Deflectometer – FWD) (εικόνα 2.12) το οποίο προσομοιώνει συνθήκες δυναμικής καταπόνησης και είναι ιδιαίτερα διαδεδομένο λόγω της ολοκληρωμένης μεθόδου συλλογής των επιτόπου στοιχείων. Για το σύστημα αυτό γίνεται ιδιαίτερη μνεία στο επόμενο υποκεφάλαιο.

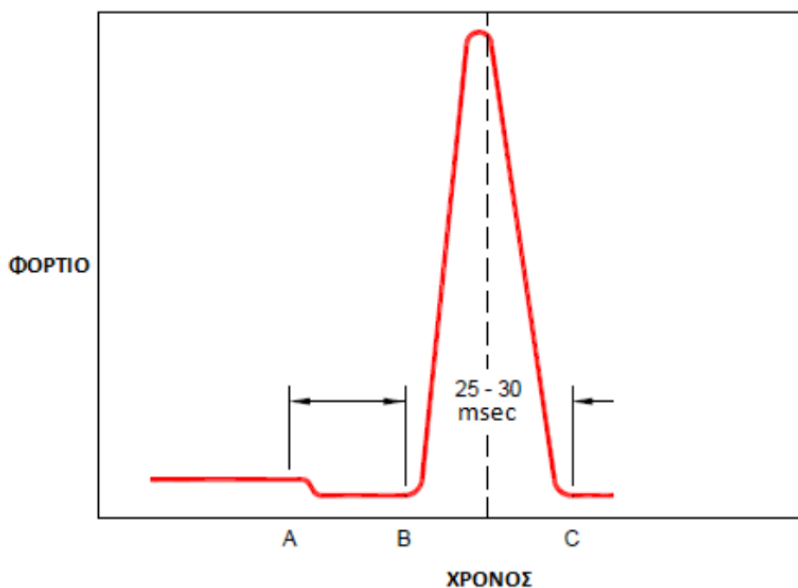


Εικόνα 2.12: Παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους FWD.

#### 2.5.4 Σύστημα μέτρησης FWD

Ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών του οδοστρώματος με το σύστημα του παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους (FWD), αποτελεί όπως έχει αναφερθεί το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα επί τόπου συλλογής στοιχείων για την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος.

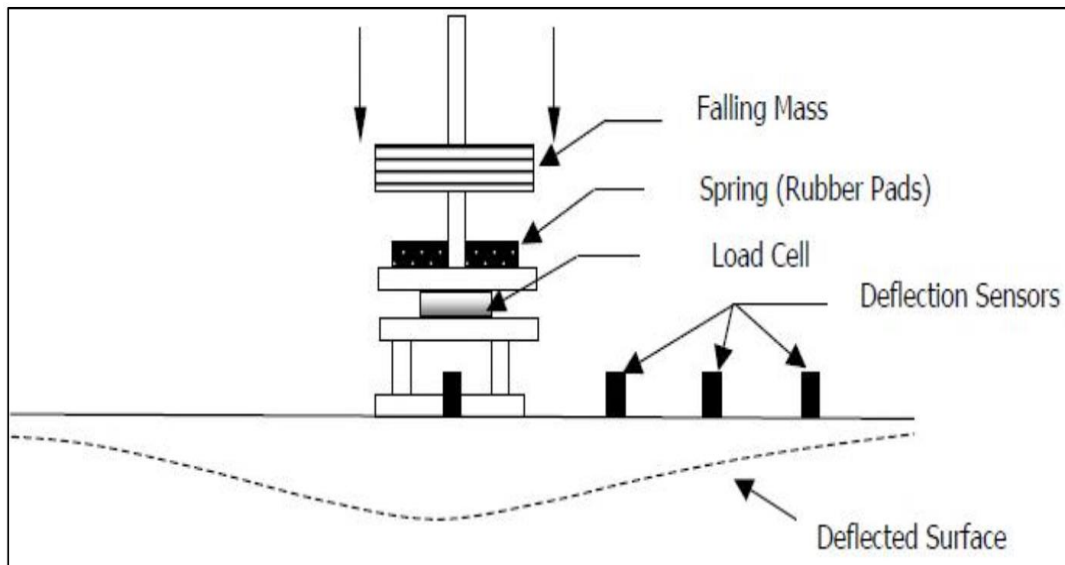
Η βασική αρχή λειτουργίας του συστήματος FWD συνίσταται στην πτώση καθορισμένου βάρους, δηλαδή ενός φορτίου που αφήνεται να πέσει κατακόρυφα (falling weight) υπό την επίδραση της βαρύτητας. Το βάρος προσκρούει σε μια ειδικά σχεδιασμένη μεταλλική επιφάνεια δημιουργώντας παλμική φόρτιση που μεταβιβάζεται στο οδόστρωμα μέσω ενός κυκλικού δίσκου, ο οποίος βρίσκεται σε επαφή με το οδόστρωμα. Η διάρκεια της φόρτισης αυτής είναι συνήθως 25-30 msec ή 45-60 msec (εικόνα 2.13), ανάλογα με τον τύπο του συστήματος που χρησιμοποιείται. Με αυτόν τον τρόπο, προσομοιάζεται σε μεγάλο βαθμό η πραγματική φόρτιση που υφίσταται το οδόστρωμα από τη διέλευση ενός τροχού. Ενδεικτικά αναφέρεται, ότι η φόρτιση από τη διέλευση ενός φορτηγού με ταχύτητα 50 km/h, διαρκεί περίπου 20 msec (Λοΐζος & Πλατή,2016). Το μέγεθος του φορτίου πρόσκρουσης μπορεί να μεταβληθεί, επιλέγοντας το κατάλληλο πίπτων βάρος ή/και αλλάζοντας το ύψος της πτώσης (Tutumluer&Pekcan ,2009).



Εικόνα 2.13: Παλμική φόρτιση FWD (FAA, Advisory CIRCULAR AC 150/5370-11 B, 2001).

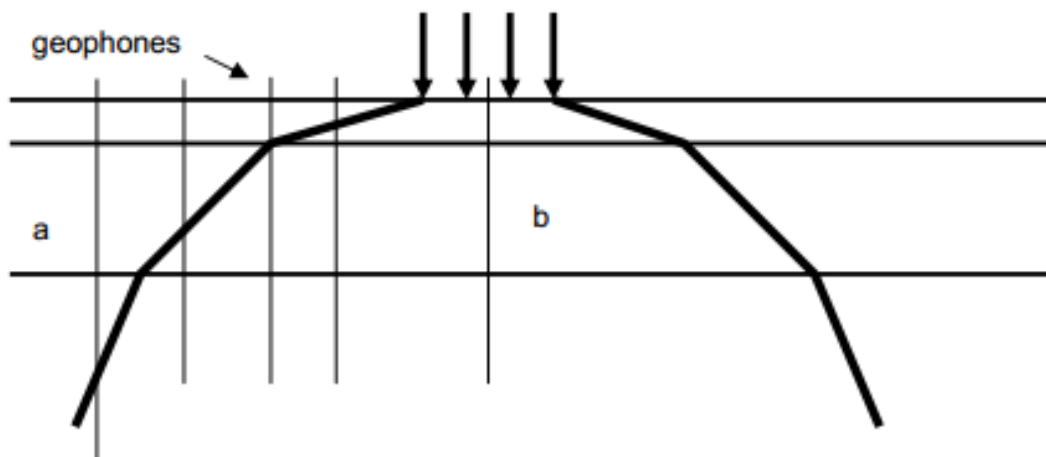
Με αναφορά στην προηγούμενη εικόνα ο χρόνος που μεσολαβεί από το σημείο A έως το σημείο B, αντιπροσωπεύει το χρόνο που απαιτείται για να ανυψωθεί το βάρος της συσκευής στο απαραίτητο ύψος. Η φόρτιση ξεκινάει από το σημείο B και τελειώνει στο σημείο C. Το μέγεθος του φορτίου εξαρτάται από το πίπτον βάρος και το ύψος που επιλέγεται να αφεθεί ελεύθερο.

Κατά τη διάρκεια της φόρτισης καταγράφονται οι μέγιστες ελαστικές υποχωρήσεις κάτω από το σημείο επιβολής του φορτίου αλλά και σε καθορισμένες αποστάσεις από αυτό, όπου είναι κατάλληλα τοποθετημένα επιταχυνσιόμετρα – γεώφωνα, για την καταγραφή αυτών των ψευδοελαστικών υποχωρήσεων ( $D_i$ ) (εικόνα 2.14). Κατά την πραγματοποίηση μετρήσεων πεδίου, σημαντικό ζητούμενο είναι η πυκνότητα των θέσεων (δηλαδή ανά πόσα μέτρα) που θα πρέπει να μετρηθούν σε ένα τμήμα αυτοκινητοδρόμου για να αποκτηθεί μια ρεαλιστική εικόνα της δομικής επάρκειας του οδοστρώματος (Molenaar, 2006).



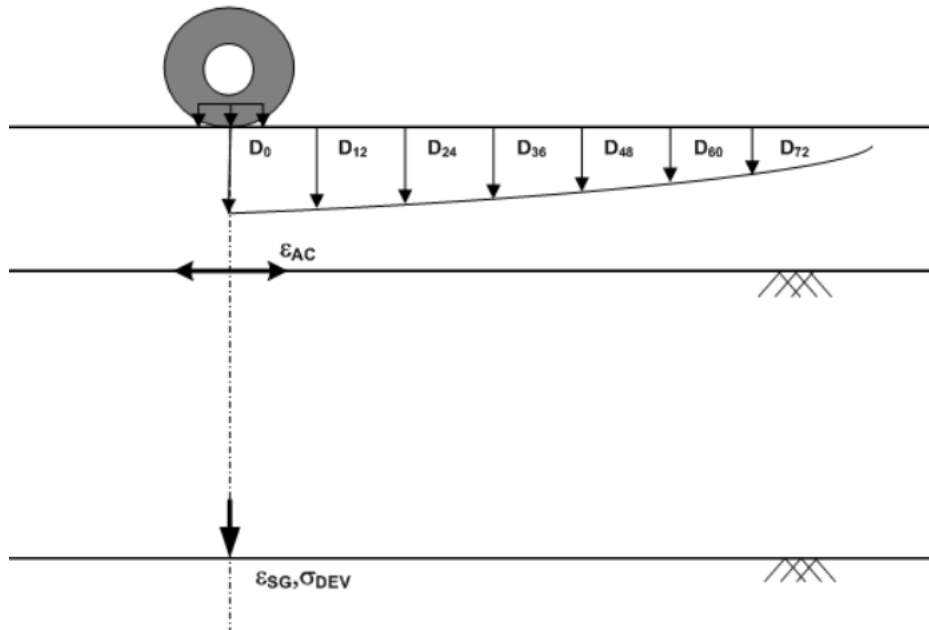
Εικόνα 2.14: Σχηματική περιγραφή της συσκευής του παραμορφωσίμετρου πίπτοντος βάρους (Solanki 2014).

Στην ακόλουθη εικόνα (2.15), η διαγραμμισμένη περιοχή αντιστοιχεί στη ζώνη εντός της δομής του οδοστρώματος που επηρεάζεται από την επιφανειακή φόρτιση.



Εικόνα 2.15: Περιοχές επιρροής φορτίου από την εφαρμογή του FWD (Molenaar ,2006).

Επιπρόσθετα , στην εικόνα 2.16 φαίνεται ένα τυπικό προφίλ υποχωρήσεων στις θέσεις που βρίσκονται τα γεώφωνα του FWD καθώς και οι κρίσιμες θέσεις αστοχίας του οδοστρώματος.



Εικόνα 2.16: Υποχωρήσεις από FWD και κρίσιμες θέσεις αστοχίας εύκαμπτου οδοστρώματος (Tutumluer&Pekcan, 2009).

Παράλληλα με τις καταγραφές των ελαστικών παραμορφώσεων, πραγματοποιούνται και καταγραφές θερμοκρασίας, δεδομένου ότι η δυσκαμψία των ασφαλτικών στρώσεων εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Αναλυτικότερα, γίνονται μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα, της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του οδοστρώματος, με χρήση υπερύθρων και τέλος, της θερμοκρασίας στο μέσο των ασφαλτικών στρώσεων με τη βοήθεια δημιουργίας μικρής οπής που διανοίγεται στο σώμα του οδοστρώματος.

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα όπως αναφέρει ο Solanki (2014) της χρήσης του FWD είναι :

- Η δυνατότητα εφαρμογής του συστήματος σε όλους τους τύπους οδοστρωμάτων, εύκαμπτων, ημιάκαμπτων και δύσκαμπτων.
- Η ικανοποιητική προσομοίωση της φόρτισης του οδοστρώματος με την πραγματική συχνότητα φόρτισης από την κυκλοφορία βαρέων οχημάτων.
- Φιλική διαδικασία διεξαγωγής των δοκιμών προς το χρήστη που διαρκεί περίπου τρία λεπτά ανά θέση.
- Για υφιστάμενα οδοστρώματα, δεν απαιτείται ολική διακοπή της κυκλοφορίας αλλά είναι απαραίτητα κάποια ρυθμιστικά μέτρα στη λωρίδα διεξαγωγής των μετρήσεων με σκοπό την ασφάλεια του μηχανήματος και των χρηστών.

### 3. Άμεση ανάλυση υποχωρήσεων

#### 3.1 Γενικά Στοιχεία

Η επιβολή στατικού ή δυναμικού φορτίου στην επιφάνεια του οδοστρώματος ,οδηγεί σε υποχώρηση δηλαδή σε απόκλιση της επιφάνειας του οδοστρώματος από την επίπεδη επιφάνεια. Με την πολύτιμη βοήθεια των μεθόδων που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (μη καταστρεπτικές μέθοδοι) είναι δυνατόν να καταγράφονται οι ελαστικές υποχωρήσεις οι οποίες στο σύνολο τους αποτελούν το προφίλ της υποχώρησης ή διαφορετικά την περιοχή της υποχώρησης. Σε ένα πρώτο επίπεδο ανάλυσης με τη κατάλληλη επεξεργασία των μετρούμενων υποχωρήσεων εξάγονται συμπεράσματα που οδηγούν σε μία πιο γενική εικόνα αναφορικά με τη κατάσταση του οδοστρώματος.

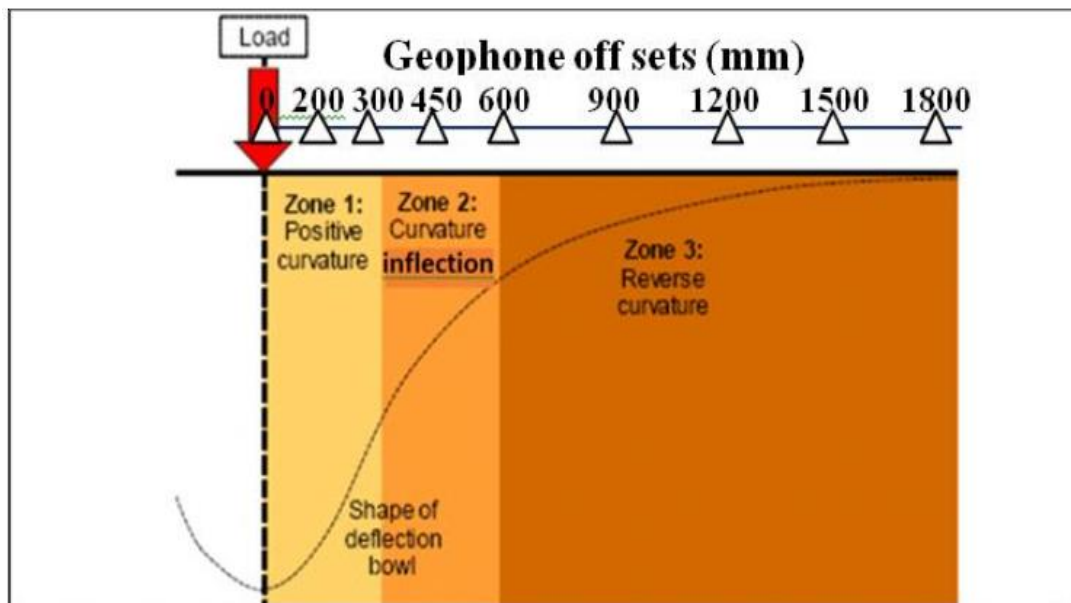
#### 3.2 Χαρακτηριστικοί δείκτες

Οι δομικοί δείκτες υπολογίζονται με βάση τις μετρούμενες ελαστικές υποχωρήσεις που καταγράφονται από το παραμορφωσίμετρο πίπτοντος βάρους (FWD) στα γεώφωνα που τοποθετούνται ακτινικά σε ορισμένες αποστάσεις έστω  $r$  (σε mm) ξεκινώντας από το κέντρο του δίσκου της συσκευής. Για μια τυπική διάταξη με εννέα γεώφωνα οι ακριβείς θέσεις τους γύρω από τον κυκλικό δίσκο(διαμέτρου 300 mm) είναι σε αποστάσεις 200, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500 και 1800 mm δηλαδή σε κάθε περίπτωση  $D_i$  είναι η υποχώρηση σε απόσταση  $i$  mm από το κέντρο φόρτισης του FWD(εικόνα 3.1). Υπολογισμοί μεταξύ αυτών των  $D_i$  δίνουν σαν αποτέλεσμα δείκτες που αξιολογούν τη δομική κατάσταση των επιμέρους στρώσεων ή ακόμα και του συνόλου του οδοστρώματος. Γενικά η χρήση των δεικτών δομικής κατάστασης των στρώσεων γίνεται λαμβάνοντας υπόψη και το πάχος των επί μέρους στρώσεων του οδοστρώματος. Χαρακτηριστικοί δείκτες όπως τους αναφέρει ο Horak (2015) ως τους πλέον συνηθισμένους για την δομική αξιολόγηση είναι επιγραμματικά οι εξής :

- Μετρημένες υποχωρήσεις του FWD :
  - i.  $D_0$ , η κεντρική μέγιστη υποχώρηση
  - ii.  $D_{1800}$ , η υποχώρηση στο τελευταίο γεώφωνο
- Δείκτες που προκύπτουν από διαφορές υποχωρήσεων :
  - i.  $SCI_{300}$ , η ακτίνα καμπυλότητας επιφάνειας (Surface Curvature Indexή BLI, Base Layer Index)
  - ii. BDI, ο δείκτης υποχώρησης βάσης (Base Damage Indexή MLI, Middle Layer Index)



- iii. BCI, ο δείκτης καμπυλότητας βάσης (Base Curvature Indexή LLI , Lower Layer Index)
- Συντελεστές σχήματος :
  - i. F1,F2, οι παράγοντες σχήματος (shape Factors) (αδιάστατος)
  - ii. A, η περιοχή προφίλ υποχωρήσεων(Area) (αδιάστατος)
  - iii. Aurr, ο δείκτης περιοχής υπό το προφίλ υποχωρήσεων(Area under pavement profile)
  - iv. AI1, ο δείκτης περιοχής ασφαλτικών(Area Indice) (αδιάστατος)



Εικόνα 3.1: Ζώνες επιρροής φορτίου ,“FWD deflection bowl” (Horak, 2015).

Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στους πιο σημαντικούς δείκτες ως προς τον ορισμό και την περιοχή του οδοστρώματος για την οποία δίνουν πληροφορία.

### 3.2.1 Γενική Κατάσταση Οδοστρώματος

Η συνολική κατάσταση της δομής του οδοστρώματος εκφράζεται με τους συντελεστές Do, AREA και Aurr οι τύποι των οποίων συνοψίζονται στον πίνακα 3.1.

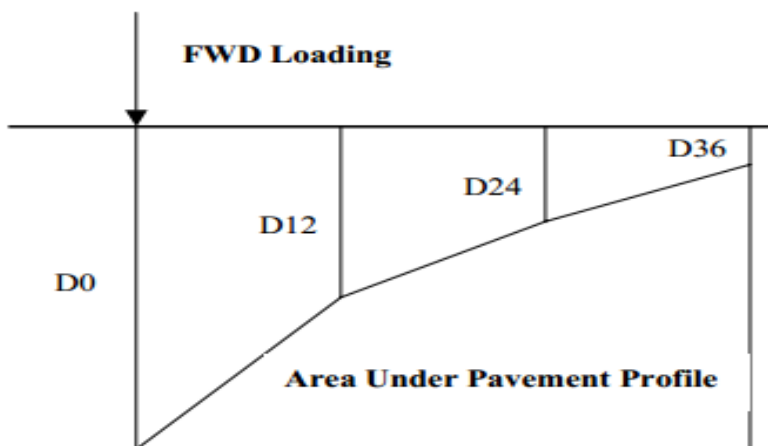
Πίνακας 3.1: Δείκτες για γενική κατάσταση οδοστρώματος.

ΔΕΙΚΤΕΣ	ΤΥΠΟΙ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
<b>D<sub>0</sub></b>	Η κεντρική υποχώρηση του FWD (μέγιστη).	Δομική αξιολόγηση συνολικής κατάστασης οδοστρώματος.
<b>AREA</b>	$150\left(\frac{D_0 + 2D_{300} + 2D_{600} + D_{900}}{D_0}\right)$	Χρησιμοποιείται για την δομική αξιολόγηση τόσο του συνολικού οδοστρώματος όσο και για τη στρώση έδρασης.
<b>Aupp</b>	$\frac{5D_0 - 2D_{300} - 2D_{600} - D_{900}}{2}$	Χαρακτηρίζει τις συνθήκες που επικρατούν στο σύνολο των στρώσεων του οδοστρώματος.

Σχετικά με τον D<sub>0</sub>, που είναι η μεγαλύτερη υποχώρηση και παρατηρείται στο κέντρο φόρτισης, χρησιμοποιείται ευρέως και είναι κοινώς αποδεκτός για την εκτίμηση της δομικής αντοχής του συνόλου του οδοστρώματος. Η τιμή του δείκτη εξαρτάται από τον τύπο του οδοστρώματος (εύκαμπτο, ημιάκαμπτο, δύσκαμπτο) καθώς και από τη θερμοκρασία (η οποία παρουσιάζει αυξομειώσεις λόγω εποχιακών διακυμάνσεων). Όσο μικρότερη η τιμή του δείκτη τόσο μεγαλύτερη η φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος. Βέβαια είναι κρίσιμο να λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή του δείκτη κατά μήκος ενός υπό εξέταση τμήματος προκειμένου να ελέγχονται πιθανά θέματα ομοιογένειας του οδοστρώματος.

Στη συνέχεια, αναφορικά με τον δείκτη AREA καθορίζεται η σχετική δομική κατάσταση του οδοστρώματος και της στρώσης έδρασης λαμβάνοντας υπόψη περισσότερες υποχωρήσεις από ότι προηγουμένως. Όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές του δείκτη, τόσο μεγαλύτερη δυσκαμψία υποδηλώνεται για το οδόστρωμα.

Τέλος, ο δείκτης Aupp (εικόνα 3.2) καθορίζει επίσης την γενική εικόνα της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος. Αυτό γίνεται καθώς κατά τον ορισμό του χρησιμοποιούνται οι υποχωρήσεις D<sub>600</sub> και D<sub>900</sub>, που αντιστοιχούν σε μεγαλύτερα βάθη. Όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές του δείκτη τόσο χαμηλότερη δυσκαμψία υποδηλώνεται για το οδόστρωμα.



Εικόνα 3.2: Σχηματική απεικόνιση δείκτη Aupp (Kim&Park 2002).

### 3.2.2 Ασφαλτικές Στρώσεις

Η δομική κατάσταση των ασφαλτικών στρώσεων του οδοστρώματος εκφράζεται με τους συντελεστές  $SCI_{300}$  και  $AI1$  οι τύποι των οποίων συνοψίζονται στον πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Δείκτες για ασφαλτικές στρώσεις.

ΔΕΙΚΤΕΣ	ΤΥΠΟΙ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
<b>SCI300</b>	$D_0 - D_{300}$	Δίνει ένδειξη για την αξιολόγηση της δομικής επάρκειας της στρώσης βάσης / υπόβασης .
<b>AI1</b>	$\frac{D_0 + D_{300}}{2D_0}$	Προσδιορίζει την δομική κατάσταση των ασφαλτικών στρώσεων.

Ο δείκτης  $SCI_{300}$  έχει ευρεία πρακτική εφαρμογή στη δομική αξιολόγηση των ασφαλτικών στρώσεων καθώς θεωρείται από τους πλέον συνηθισμένους. Η παράμετρος αυτή εκφράζει την καμπυλότητα της επιφάνειας στο κέντρο του φορτίου στην πλάκα ( $D_0$ ) και της υποχώρησης σε απόσταση 300 mm. Κρίνεται σημαντικό να διευκρινισθεί ότι στη βιβλιογραφία προκύπτουν και άλλοι δείκτες  $SCI$ , όπως οι  $SCI_{200}$ ,  $SCI_{600}$  που είναι η καμπυλότητα της επιφάνειας στο κέντρο του φορτίου στην πλάκα ( $D_0$ ) και της υποχώρησης σε αποστάσεις 200 και 600mm αντίστοιχα. Ωστόσο έχει επικρατήσει η χρήση του  $SCI_{300}$ .

Όπως αναφέρει ο Horak (2015) ο δείκτης AI1 αναφέρεται στην κατάσταση των ανώτερων στρώσεων του οδοστρώματος και εφαρμόζεται σε αναλύσεις συγκριτικής αξιολόγησης. Η διαφορά του από τον προηγούμενο δείκτη είναι ότι βρίσκεται σε αδιάστατη μορφή.

### 3.2.3 Στρώση βάσης και υπόβασης

Η δομική κατάσταση των στρώσεων βάσης και υπόβασης του οδοστρώματος εκφράζεται με τους συντελεστές BDI, BCI, F1 και F2 οι τύποι των οποίων συνοψίζονται στον πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3: Δείκτες για βάση/υπόβαση.

ΔΕΙΚΤΕΣ	ΤΥΠΟΙ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
<b>BDI (MLI)</b>	$D_{300} - D_{600}$	Αξιολογεί τη βάση ως προς τη δομική της κατάσταση.
<b>BCI (LLI)</b>	$D_{600} - D_{900}$	Αξιολογεί δομικά την υπόβαση και συνήθως τη στρώση έδρασης.
<b>F1</b>	$\frac{D_0 - D_{600}}{D_{300}}$	Προσδιορίζει τη κατάσταση της στρώσης από αμμοχάλικα.
<b>F2</b>	$\frac{D_{300} - D_{900}}{D_{600}}$	Προσδιορίζει τη κατάσταση της υπόβασης και ενίοτε της στρώσης έδρασης.

Ο δείκτης φθοράς BDI που δίνει ένδειξη της δομικής κατάστασης της στρώσης βάσης, ισούται με τη διαφορά της υποχώρησης σε απόσταση 300 mm από το κέντρο ( $D_{300}$ ) και της υποχώρησης σε απόσταση 600mm από το κέντρο ( $D_{600}$ ). Ο δείκτης καμπυλότητας ισούται με την αντίστοιχη διαφορά της υποχώρησης σε απόσταση 600mm ( $D_{600}$ ) και της υποχώρησης σε απόσταση 900mm ( $D_{900}$ ) και δίνει μια εικόνα για τα κατώτερα δομικά στρώματα, δηλαδή την υπόβαση και ενίοτε την στρώση έδρασης. Ο BCI μπορεί να δώσει πληροφορία για ένα μεγαλύτερο βάθος από το BDI, επειδή για τον υπολογισμό του χρησιμοποιούνται υποχωρήσεις γεωφώνων με μεγαλύτερη απόσταση από το φορτίο που ασκείται μέσω του FWD. Οι δείκτες F1 και F2 είναι παράγοντες που επηρεάζουν το σχήμα ή αλλιώς την καμπυλότητα του προφίλ υποχώρησης (shape factors).

### 3.2.4 Στρώση έδρασης

Η δομική κατάσταση της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος εκφράζεται με τον συντελεστή  $D_{1800}$  ο οποίος αντιστοιχεί στο πιο απομακρυσμένο γεώφωνο. Δηλαδή, εκφράζει την υποχώρηση του FWD που βρίσκεται σε απόσταση 1800 mm από το κέντρο του δίσκου της συσκευής.

### 3.3 Επίδραση φορτίου και θερμοκρασίας στους δομικούς δείκτες

Στις ελαστικές υποχωρήσεις επιδρούν καθοριστικά δύο παράγοντες, το φορτίο που εφαρμόζεται στο οδόστρωμα και η θερμοκρασία. Μάλιστα, ο παράγοντας της θερμοκρασίας φαίνεται να επηρεάζει κυρίως τη συμπεριφορά των ασφαλτικών στρώσεων λόγω της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος. Εξαιτίας της επίδρασης αυτών των παραγόντων στο οδόστρωμα, ο Molenaar (2006) αναφέρει την ανάγκη οι μετρήσεις του FWD να ανάγονται σε κοινές συνθήκες που αφορούν φορτίο και θερμοκρασία αναφοράς. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται οι προαναφερθείσες μετρήσεις να είναι άμεσα συγκρίσιμες μεταξύ τους και να προκύπτουν αξιόπιστα συμπεράσματα για τη δομική αξιολόγηση του οδοστρώματος, καθώς και για την εξέλιξη της δομικής κατάστασης σε σχέση με τον χρόνο.

Το επιβαλλόμενο φορτίο μπορεί να ρυθμιστεί ως προς το μέγεθος από 40kN (ή 566kPA) έως 120kN (ή 1700kPA) ανάλογα με την μεταβολή του ύψους πτώσης του πίπτοντος βάρους του FWD. Για τη δημιουργία κοινών συνθηκών μεταξύ των μετρήσεων γίνεται κανονικοποίηση (normalization) σε φορτίο αναφοράς με τη συμβολή του εξής μαθηματικού τύπου:

$$D_i (P_{\text{αναφ}}) = \frac{D_i(P) * P_{\text{αναφ}}}{P} \quad (3.1)$$

Όπου :

- $D_i(P)$  : η υποχώρηση σε απόσταση  $i$ , υπό φορτίο  $P$
- $P$  : το φορτίο στο οποίο έχει γίνει η φόρτιση
- $D_i (P_{\text{αναφ}})$  : η αναγωγή υποχώρησης στο φορτίο αναφοράς  $P_{\text{αναφ}}$

Αναφορικά με τη θερμοκρασία, η δυσκαμψία του ασφαλτομίγματος μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία με αποτέλεσμα να καταγράφονται μεγαλύτερες υποχωρήσεις. Ωστόσο, η επίδραση της θερμοκρασίας με τη πάροδο του χρόνου ενδέχεται να φθίνει. Συγκεκριμένα, τα μεγαλύτερης ηλικίας ασφαλτομίγματα είναι λιγότερο ευαίσθητα θερμοκρασιακά (Losa et al. 2008).

Η διόρθωση των μετρημένων υποχωρήσεων σε μία ενιαία θερμοκρασία αναφοράς (συνήθως 20 ή 25 °C) απαιτείται για την ορθή αξιολόγηση των στοιχείων συλλογής. Ένας διεθνούς χρήσης συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας, που χρησιμοποιείται και στην Ελλάδα, είναι ο συντελεστής TNF (Temperature Normalization Factor) ο οποίος ανάγει τις υποχωρήσεις σε θερμοκρασία 20°C. Ο συντελεστής αυτός εκφράζεται από την εξίσωση :

$$TNF = 1 + \left[ \alpha_1 + \left( \frac{\alpha_2}{h_1} \right) \right] * (TA - 20) + \left[ \alpha_3 + \left( \frac{\alpha_4}{h_1} \right) \right] * (TA - 20)^2 \quad (3.2)$$

όπου:

- TNF: ο συντελεστής διόρθωσης θερμοκρασίας
- TA: η θερμοκρασία στο μέσο του πάχους των ασφαλτικών στρώσεων (°C)
- h1: το πάχος ασφαλτικών στρώσεων (mm)
- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  : σταθερές που όπως αναφέρει ο Molenaar (2006) παίρνουν τις τιμές του πίνακα 3.4.

Πίνακας 3.4: Σταθερές δείκτη TNF.

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ	$\alpha_1$ (°C <sup>-1</sup> )	$\alpha_2$ (mm/°C)	$\alpha_3$ (0.001 °C <sup>-1</sup> )	$\alpha_4$ (mm/°C)
D <sub>0</sub>	0.01661	-0.67095	0.28612	-0.01408
SCI <sub>300</sub>	0.05398	-2.61130	1.28439	-0.07493

Για την αναγωγή των υποχωρήσεων σε θερμοκρασία αναφοράς, υπολογίζεται ο συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας και δεδομένου ότι έχει προηγηθεί αναγωγή στο εκάστοτε φορτίο αναφοράς, πραγματοποιείται η αναγωγή των αντίστοιχων υποχωρήσεων και σε θερμοκρασία αναφοράς 20°C. Η σχέση, στην οποία βασίζεται η αναγωγή αυτή αφορά στους δείκτες D<sub>0</sub> και SCI ως εξής:

$$D_0(20^\circ C) = \frac{D_0(T)}{TNF} \quad (3.3)$$

$$SCI(20^\circ C) = \frac{SCI(T)}{TNF} \quad (3.4)$$

όπου:

- $D_o(T)$ : η μέτρηση  $D_o$  σε θερμοκρασία  $T$ ,
- $T$ : η θερμοκρασία αναφοράς στους  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ,
- $D_o(20\text{ }^\circ\text{C})$ : η αναγωγή του  $D_o$  σε θερμοκρασία αναφοράς των  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ,
- TNF: ο συντελεστής διόρθωσης θερμοκρασίας
- SCI( $T$ ): δείκτης δομικής αξιολόγησης ακτίνας καμπυλότητας (Surface Curvature Index) σε θερμοκρασία  $T$
- SCI( $20^\circ\text{C}$ ): δείκτης δομικής αξιολόγησης ακτίνας καμπυλότητας(Surface Curvature Index) σε θερμοκρασία αναφοράς των  $20\text{ }^\circ\text{C}$ .

## **4. Ανάστροφος υπολογισμός και ανάλυση εντατικής κατάστασης**

### **4.1 Γενικά στοιχεία**

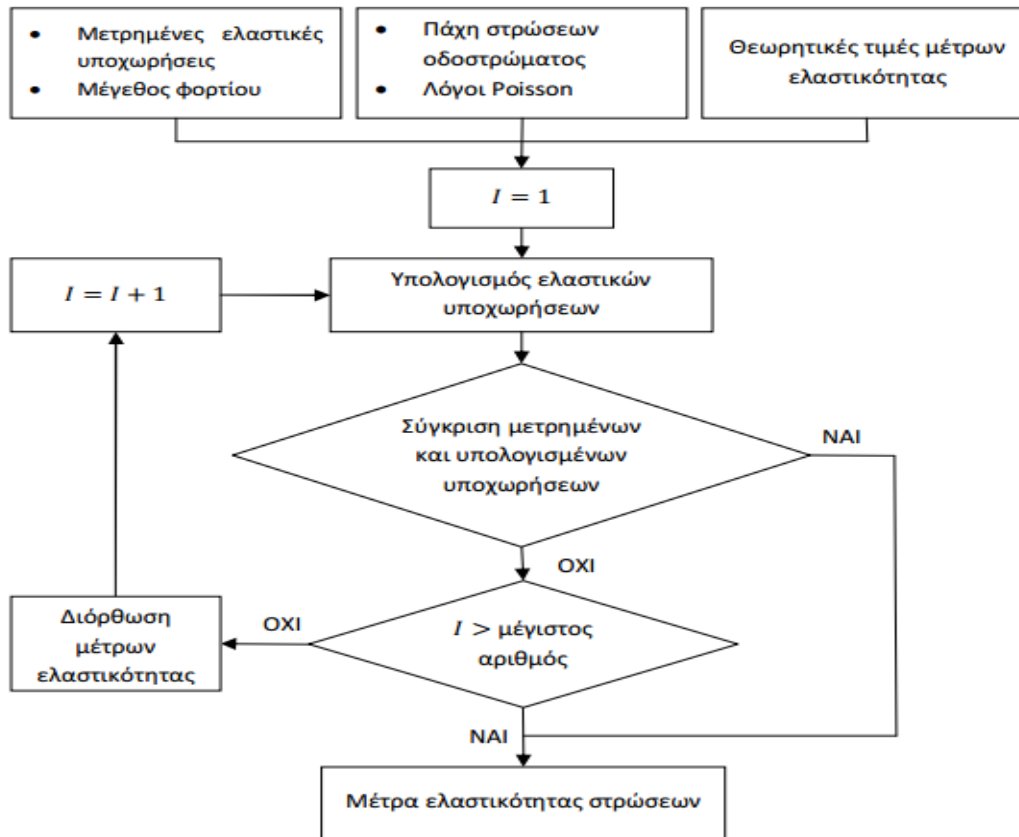
Εξαιρουμένης της άμεσης ανάλυσης, έχουν αναπτυχθεί και άλλοι πολυπλοκότεροι και ακριβέστεροι τρόποι που συμβάλλουν στη δομική αξιολόγηση ενός οδοστρώματος όπως είναι η ανάλυση που προκύπτει μέσω του ανάστροφου υπολογισμού. Ως ανάστροφος υπολογισμός ορίζεται η διαδικασία του έμμεσου προσδιορισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών των στρώσεων του οδοστρώματος που εξετάζεται (Pan,2012). Τα στοιχεία των ελαστικών υποχωρήσεων και της θερμοκρασίας που καταγράφονται από τα NDT αποτελούν μαζί με άλλα στοιχεία μεταβλητές εισόδου για όλες τις μεθοδολογίες ανάστροφου υπολογισμού (back- analysis), μέσω των οποίων γίνεται εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των στρώσεων του οδοστρώματος. Όταν μάλιστα η λειτουργία του FWD συνδυάζεται με τη λειτουργία γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar- GPR), ο ανάστροφος υπολογισμός δίνει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα για τα μηχανικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος (μέτρα δυσκαμψίας) εφόσον τα πάχη των στρώσεων είναι ήδη γνωστά (Hu , 2015) (εικόνα 2.19 ).

Περαιτέρω εμβάθυνση στα ζητήματα δομικής αξιολόγησης συνιστά η ανάλυση της εντατικής κατάστασης του οδοστρώματος για την εκτίμηση των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στις κρίσιμες θέσεις αστοχίας. Η γνώση αυτών των μεγεθών συμβάλλει στον προσδιορισμό της εναπομένουσας ζωής του οδοστρώματος (remaining life).

### **4.2 Ανάστροφος υπολογισμός**

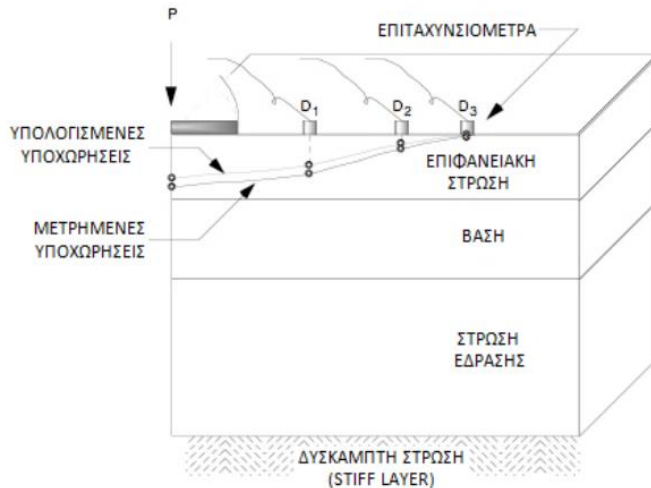
Η διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού βασίζεται στην ενεργοποίηση αλγόριθμων, μέσω της χρήσης των στοιχείων συλλογής από τις μετρήσεις FWD και άλλων στοιχείων που μετρώνται ή εκτιμώνται επιτόπου (πάχη στρώσεων, θερμοκρασία κ.ά.). Η διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού παρουσιάζεται σχηματικά στο διάγραμμα ροής που ακολουθεί (εικόνα 4.1).





Εικόνα 4.1: Διάγραμμα ροής ανάστροφου υπολογισμού.

Έτσι, για την πρώτη επανάληψη καταχωρούνται ως δεδομένα εισόδου οι ελαστικές υποχωρήσεις από το FWD, το μέγεθος του φορτίου του, τα πάχη των στρώσεων (για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα) και οι λόγοι Poisson. Επιπρόσθετα, είναι αναγκαία η θεώρηση κάποιων ενδεικτικών αρχικών τιμών των μέτρων δυσκαμψίας κάθε στρώσης. Αυτές αποτελούν τιμές εκκίνησης με τις οποίες υπολογίζονται οι ελαστικές υποχωρήσεις που συγκρινόμενες με τις μετρημένες ολοκληρώνουν τον πρώτο κύκλο επανάληψης της διαδικασίας. Όπως αποτυπώνεται και στο διάγραμμα ροής, λοιπόν, η επαναληπτική διαδικασία (βρόγχος) συγκρίνει τις μετρημένες ελαστικές υποχωρήσεις (measured deflections) με εκείνες που προέρχονται από την υπολογιστική διαδικασία μέσω προτύπων απόκρισης (calculated deflections)(εικόνα 4.2). Η διαδικασία συνεχίζεται αναπροσαρμόζοντας τα μέτρα δυσκαμψίας των στρώσεων, μέχρι να επιτευχθεί η κατά το δυνατόν μικρότερη απόκλιση μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων υποχωρήσεων. Η απόκλιση αυτή ποσοτικοποιείται με ένα μέτρο εκτίμησης σφάλματος που μπορεί να διαφέρει από μεθοδολογία σε μεθοδολογία (Turkiyyah, 2005).



Εικόνα 4.2: Σύγκλιση μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων υποχωρήσεων (AASHTO Guide for design of pavement structures, Everseries Users Guide, 2005).

Ανάμεσα στις μεθοδολογίες προσομοίωσης της διαδικασίας του ανάστροφου υπολογισμού ξεχωρίζουν οι εξής :

- ❖ Οι συμβατικές μεθοδολογίες που βασίζονται στη θεωρία πολλαπλών ελαστικών στρώσεων και στη θεωρία Boussinesq (1885).
- ❖ Η νέας γενιάς μεθοδολογία που βασίζεται στην θεωρία των γενετικών αλγορίθμων (genetic algorithms) (Pan et al. 2012).
- ❖ Τέλος, η επίσης νέας γενιάς μεθοδολογία που βασίζεται στη θεωρία των τεχνητών νευρωνικών στοιχείων (artificial neural network) η οποία όπως αναφέρει ο Roger W.Meier (2004) ξεχωρίζει από τις υπόλοιπες καθώς βασίζεται στο προσδιορισμό των μέτρων δυσκαμψίας σε πολύ σύντομο χρόνο. Ωστόσο, η μεθοδολογία απαιτεί πληθώρα στοιχείων για την σωστή «εκπαίδευση» του μοντέλου.

#### 4.2.1 Ζητήματα ανάστροφου υπολογισμού

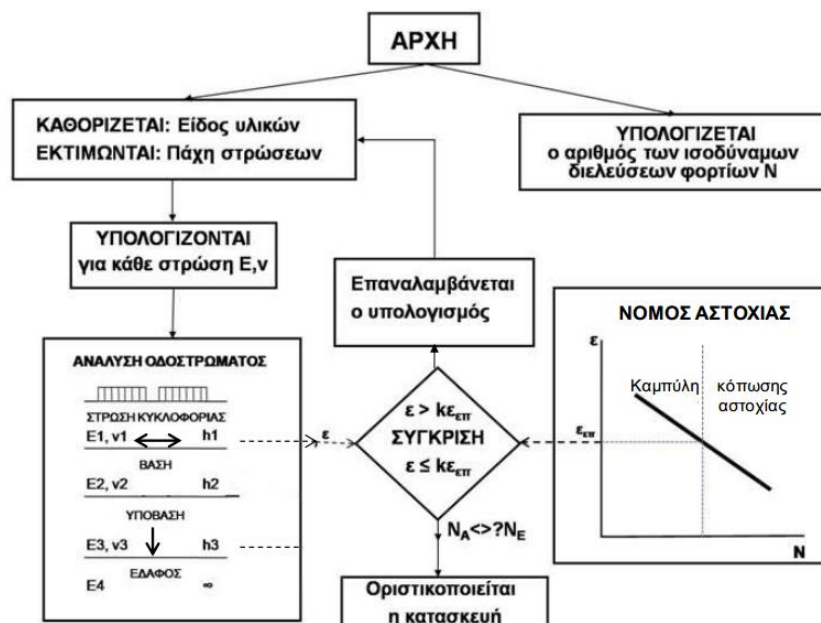
Αρκετά σημαντικό είναι κατά τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού να γίνεται έλεγχος της λύσης που προκύπτει, καθώς ενδέχεται να μην είναι μοναδική. Το χαμηλό ποσοστιαίο σφάλμα απόκλισης μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων υποχωρήσεων δεν αποτελεί μοναδικό κριτήριο αξιόπιστου προσδιορισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών (Pan,2012). Σε κάθε περίπτωση, είναι αναγκαία η ορθή κρίση του μηχανικού (engineering judgment) ώστε να απορριφθούν μη ρεαλιστικές τιμές στα μέτρα δυσκαμψίας και να ελεγχθεί η επιστημονική αρτιότητα της λύσης που άπτεται ζητημάτων της μηχανικής των υλικών. Για παράδειγμα είναι σκόπιμο να διερευνώνται τυχόν επιδράσεις της στρώσης έδρασης στα μεγέθη των μέτρων δυσκαμψίας (γνωστές ως rigid-bottom

effects). Τέλος, ορισμένα λογισμικά που πραγματοποιούν ανάστροφο υπολογισμό έχουν ενσωματωμένους αλγόριθμους για την αναγωγή των μέτρων δυσκαμψίας των ασφαλτικών σε ενιαία θερμοκρασία αναφοράς που ενδέχεται να μην έχουν μια καθολικά ικανοποιητική εφαρμογή.

### 4.3 Ανάλυση εντατικής κατάστασης

#### 4.3.1 Προσδιορισμός παραμορφώσεων

Η θεώρηση μηχανιστικών αρχών ανάλυσης περιλαμβάνουν την ανάλυση των τάσεων-παραμορφώσεων νέων και υφιστάμενων οδοστρωμάτων. Η διαδικασία του υπολογισμού των παραμορφώσεων βασίζεται κυρίως στην ενεργοποίηση σύγχρονων αλγόριθμων. Οι αλγόριθμοι αυτοί, έχουν ως βάση ένα στατικό πρότυπο το οποίο για να είναι ορισμένο απαιτείται η γνώση των παχών των στρώσεων, τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους και το μέγεθος του φορτίου. Οι υπολογιζόμενες τιμές των παραμορφώσεων στη συνέχεια συγκρίνονται με τις επιτρεπόμενες τιμές (συνδυάζοντας τους νόμους αστοχίας που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο) και βάσει αυτής της σύγκρισης, εξάγονται συμπεράσματα αναφορικά με την δομική επάρκεια και την εναπομένουσα ζωή του οδοστρώματος, στοιχείο που καθορίζει τις στρατηγικές συντήρησης (εικόνα 4.3).



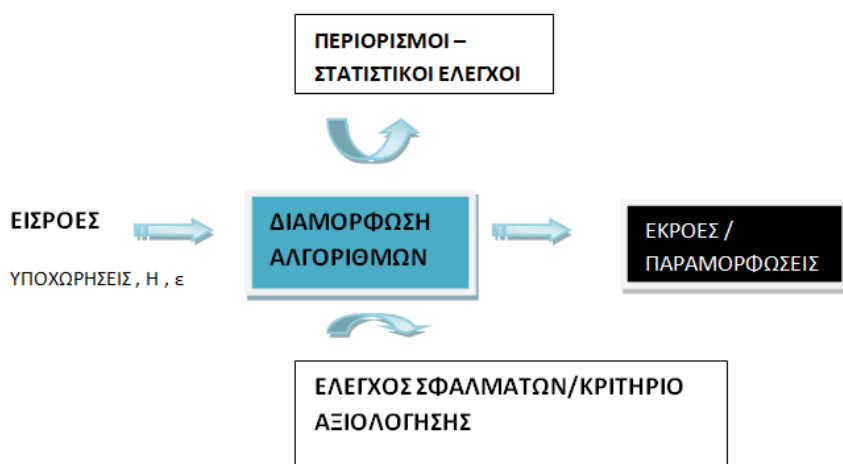
Εικόνα 4.3: Θέση σύγκρισης υπολογιζόμενων και επιτρεπόμενων παραμορφώσεων στα στάδια ανάλυσης σχεδιασμού των οδοστρωμάτων.

Λόγω της σημασίας υπολογισμού και γνώσης των εντατικών μεγεθών έχουν εξελιχθεί συστήματα ανάλυσης οδοστρωμάτων που περιλαμβάνουν αλγόριθμους υπολογισμού των ελαστικών παραμορφώσεων. Παραδείγματα τέτοιων συστημάτων σχεδιασμού οδοστρωμάτων αποτελούν οι έρευνες της Shell (χαρακτηριστικό

παράδειγμα ο αλγόριθμος BISAR που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία) και του Asphalt Institute. Οι αλγόριθμοι αυτοί αξιοποιούν δεδομένα της διατομής του οδοστρώματος όπως είναι τα πάχη των στρώσεων αλλά και μηχανικά χαρακτηριστικά αυτών (μέτρα δυσκαμψίας και λόγοι Poisson). Επιπλέον, οι αλγόριθμοι που εκτελούν τη διαδικασία, εκτός από τα προαναφερθέντα δεδομένα εισόδου, απαιτούν και καθορισμό θέσης που θα υπολογιστεί το εντατικό μέγεθος καθώς και το τύπο του οδοστρώματος, λόγω του γεγονότος ότι ανάλογα με τον τύπο του οδοστρώματος, οι κρίσιμες θέσεις αστοχίας διαφοροποιούνται.

#### 4.3.2 Εκτίμηση παραμορφώσεων μέσω αλγορίθμων

Με δεδομένη την αξία της δομικής αξιολόγησης των οδοστρωμάτων και έπειτα από τη διαπίστωση ότι οι αναλύσεις δεύτερου επιπέδου απαιτούν χρόνο, εμπειρία και εξειδικευμένα λογισμικά, προέκυψε επιτακτική η ανάγκη ανάπτυξης μεθόδων διερεύνησης αλγορίθμων πρόβλεψης των κρίσιμων παραμορφώσεων. Με βάση τα πρότυπα αυτά προκύπτει ένα σύνολο πληροφοριών που μπορεί να αξιοποιηθεί στα πλαίσια ενός συστήματος διαχείρισης της συντήρησης των οδοστρωμάτων. Στην ακόλουθη εικόνα αποτυπώνονται τα στάδια των μεθόδων πρόβλεψης ενός μεγέθους.



Εικόνα 4.4: Στάδια εφαρμογής μεθόδου πρόβλεψης ενός μεγέθους.

Έτσι, η ανάγκη για αναζήτηση αλγορίθμων πρόβλεψης της εντατικής κατάστασης έγινε γρήγορα αντιληπτή και εκτεταμένες έρευνες άρχισαν να πραγματοποιούνται. Με δεδομένο ότι η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται σε αλγόριθμους πρόβλεψης της οριζόντιας εφελκυστικής παραμόρφωσης στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων, ακολουθεί βιβλιογραφική ανασκόπηση σε συναφή θέματα.

Το 1988, ο Jung πρότεινε μία μέθοδο που προέβλεπε την τάση εφελκυσμού στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων χρησιμοποιώντας την κλίση της παραμόρφωσης στην άκρη του δίσκου FWD. Η παραμόρφωση εφελκυσμού ( $\epsilon_R$ )

καθορίζεται από την ακτίνα καμπυλότητας R χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\varepsilon_{ac} = \frac{H_{ac}}{2R} \quad (4.1)$$

$$R = \frac{-\alpha}{2(D_0 - D_{edge})} \quad (4.2)$$

Όπου :

$\varepsilon_{ac}$ : παραμόρφωση στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων [ $\mu\text{m} / \text{m}$ ]

$H_{ac}$ : πάχος ασφαλτικών στρώσεων [m]

$\alpha$ : ακτίνα δίσκου μηχανήματος FWD [m]

$D_0$  : κεντρική υποχώρηση μηχανήματος FWD

$D_{edge}$  : υποχώρηση στην άκρη της πλάκας του φορτίου

Ωστόσο, όπως χαρακτηριστικά αναφέρουν οι Kim&Park (2002), τα πρότυπα απόκρισης του οδοστρώματος πρέπει να χρησιμοποιούνται για να συνδεθούν άμεσα οι υποχωρήσεις της επιφάνειας με την εντατική κατάσταση του οδοστρώματος. Αναφορικά με τους αλγόριθμους πρόβλεψης, μια πολύ αποτελεσματική προσέγγιση είναι να χρησιμοποιούνται απλές σχέσεις που μπορεί να υπάρχουν μεταξύ κάποιου δομικού δείκτη (που προκύπτει από την άμεση ανάλυση των μετρούμενων υποχωρήσεων από το FWD) και της παραμόρφωσης σε κάποια από τις δύο κρίσιμες θέσεις αστοχίας του εύκαμπτου οδοστρώματος.

Με γνώμονα αυτή τη προσέγγιση, οι Kim&Park αναφέρονται στον Thompson (1998) ο οποίος δημιούργησε αλγόριθμο πρόβλεψης, στον οποίο το AUPP θεωρήθηκε μια σημαντική παράμετρος του προφίλ υποχωρήσεων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της εφελκυστικής παραμόρφωσης στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων (AC) με αρκετά καλή ακρίβεια. Δεδομένου ότι ο δείκτης AUPP είναι μία σημαντική γεωμετρική ιδιότητα του προφίλ υποχωρήσεων, η χρήση του για την πρόβλεψη του  $\varepsilon_R$  δεν επηρεάζεται από τον τύπο του οδοστρώματος. Έτσι, το πρότυπο των ερευνητών διαμορφώθηκε ως εξής :

$$\log \varepsilon_R = 0.821 * \log AUPP + 1.210 \quad (4.3)$$

(για οδοστρώματα με ενιαία βάση / υπόβαση)

όπου,

$\varepsilon_R$  : παραμόρφωση στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων [ $\mu\text{m} / \text{m}$ ]

Aurr : [mils] (πίνακας 3.1)

Αξιοποιώντας τις δύο παραπάνω προσπάθειες πρόβλεψης της παραμόρφωσης αλλά συνδυάζοντας και τη δική τους έρευνα, οι Kim&Park το 2002 ,διατύπωσαν τα εξής δύο πρότυπα πρόβλεψης της παραμόρφωσης στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων για οδοστρώματα με ενιαία βάση / υπόβαση από ασύνδετα υλικά :

$$\log \varepsilon_R = 1.034 * \log AUPP + 0.932 \quad (4.4)$$

όπου ,

$\varepsilon_R$  : παραμόρφωση στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων [ $\mu\text{m} / \text{m}$ ]

Aurr : [mils] (πίνακας 3.1)

$$\log \varepsilon_R = 1.082 * \log BDI + 0.259 * \log Hac + 1.409 \quad (4.5)$$

όπου,

$\varepsilon_R$ : παραμόρφωση στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων [ $\mu\text{m} / \text{m}$ ]

$H_{ac}$ : πάχος ασφαλτικών στρώσεων [inches]

BDI: [mils] (πίνακας 3.3)

Επιπρόσθετα, εκτεταμένη και πιο σύγχρονη έρευνα του Molenaar (2006), έχει δείξει ότι υπάρχει μια άμεση σχέση μεταξύ του εφελκυσμού στο κάτω μέρος της στρώσης ασφάλτου και του δείκτη καμπυλότητας επιφάνειας (δείκτης SCI) ως εξής:

$$\log \varepsilon_R = C_0 + C_1 * \log SCI \quad (4.6)$$

Για οδοστρώματα των οποίων το πάχος των ασφαλτικών στρώσεων είναι μεγαλύτερο από 150mm η προηγούμενη σχέση διαμορφώνεται ως εξής:

$$\log \varepsilon_R = 0.481 + 0.881 * \log SCI \quad (4.7)$$

Όπου,

$\varepsilon_R$ : παραμόρφωση στον πυθμένα των ασφαλτικών [ $\mu\text{m} / \text{m}$ ]

$SCI_{300}$ : [ $\mu\text{m}$ ] (πίνακας 3.2)

Σε συνέχεια της ίδιας μελέτης ένα ακόμα πρότυπο αποτυπώνει τη συσχέτιση μεταξύ διαφόρων παραμέτρων του προφίλ των υποχωρήσεων και παραμορφώσεων, σε διάφορες θέσεις στο οδόστρωμα. Το δεύτερο, λοιπόν, πρότυπο πρόβλεψης του Molenaar (2006) έχει ως εξής :

$$\log \varepsilon_R = -1.06755 + 0.56178 * \log h_1 + 0.03233 * \log D_{1800} + 0.47462 * \log SCI + 1.15612 * \log BDI - 0.68266 * \log BCI \quad (4.8)$$

Όπου,

$\epsilon_R$ : παραμόρφωση στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων [ $\mu\text{m} / \text{m}$ ]

$h_1$ : πάχος ασφαλτικών στρώσεων [m]

$d_{1800}$ : υποχώρηση στο γεώφωνο απόστασης 1800mm

$SCI_{300}$ : [ $\mu\text{m}$ ] (πίνακας 3.2)

$BDI$ : [ $\mu\text{m}$ ] (πίνακας 3.3)

$BCI$ : [ $\mu\text{m}$ ] (πίνακας 3.3)

Βέβαια, σύμφωνα με τον Losa et al. (2008), υπάρχουν πολλοί παράγοντες που μπορούν να εμποδίσουν την δόκιμη αξιολόγηση, κάποιιοι από αυτούς είναι :

- η έλλειψη καθολικής ομοιογένειας των δομικών συνθηκών εξαιτίας της ποικιλομορφίας παχών και μηχανικών χαρακτηριστικών των στρώσεων
- η παρουσία από πάχη μικρότερα των 10-11 cm για τις ασφαλτικές στρώσεις που καθιστούν τον ανάστροφο υπολογισμό μη αξιόπιστο
- η παρουσία συνεκτικών υλικών στη στρώση έδρασης τα οποία έχουν μη γραμμική μηχανική συμπεριφορά

Έτσι, για να ξεπεραστούν αυτές οι δυσκολίες τέθηκε ως στόχος τους η υιοθέτηση ενός νέου αλγορίθμου πρόβλεψης του εντατικού μεγέθους  $\epsilon_R$ . Έπειτα από εκτεταμένη έρευνα με κατάλληλη στατιστική προσαρμογή προέκυψε ο εξής αλγόριθμος:

$$\log \epsilon_R = 0.387 * \log h_1 + 0.108 * \log h_2 + 0.242 * \log D_{900} + 0.080 * \log D_{1800} + 0.446 * \log SCI + 0.735 * \log BDI - 0.869 \quad (4.9)$$

Όπου:

$\epsilon_R$ : παραμόρφωση στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων [ $\mu\text{m} / \text{m}$ ]

$h_1$ : πάχος ασφαλτικών στρώσεων [m]

$h_2$ : πάχος στρώσης βάσης / υπόβασης [m]

$d_{900}$ : υποχώρηση στο γεώφωνο σε απόσταση 900mm από το κέντρο φόρτισης

$d_{1800}$ : υποχώρηση στο γεώφωνο σε απόσταση 1800mm από το κέντρο φόρτισης

$SCI_{300}$ : [ $\mu\text{m}$ ] (πίνακας 3.2)

$BDI$ : [ $\mu\text{m}$ ] (πίνακας 3.3)

Γενικά, συνίσταται ο έλεγχος χρησιμότητας των υπόψη αλγορίθμων καθώς δεν είναι πάντα εφαρμόσιμοι για όλες τις περιπτώσεις καθολικά. Η δημιουργία τους στηρίζεται σε στοιχεία συλλογής από μετρήσεις πεδίου ή από αναλύσεις εντατικής κατάστασης που αφορούν ασφαλτικά οδοστρώματα με διαφορετικές συνθήκες και υλικά. Επομένως είναι σκόπιμο να διερευνάται η προσαρμογή τους όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικά οδοστρώματα.

Οι προηγούμενοι αλγόριθμοι που διατυπώθηκαν αφορούν την πρόβλεψη της παραμόρφωσης στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων των εύκαμπτων οδοστρώματων. Ανάλογη μελέτη έχει πραγματοποιηθεί και για την κρίσιμη παραμόρφωση στην κορυφή της στρώσης έδρασης, ωστόσο, αυτό δεν αποτελεί αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας. Η επιλογή ενασχόλησης με τις ασφαλικές στρώσεις προκύπτει στη λογική ότι οι επεμβάσεις συντήρησης των ασφαλικών στρώσεων είναι λιγότερο δαπανηρές συγκριτικά με την αποκατάσταση του οδοστρώματος σε μεγαλύτερα βάθη. Συνεπώς, ο δομικός έλεγχος των ασφαλικών στρώσεων είναι ζωτικής σημασίας καθώς υπάρχει και σχετικό τεchnο-οικονομικό ενδιαφέρον.



## 5. Πειραματική διαδικασία

### 5.1 Γενική περιγραφή

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αξιοποιήθηκαν στοιχεία από την τράπεζα δεδομένων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ, τα οποία προέρχονται από μετρήσεις πεδίου σε ένα σύγχρονο αυτοκινητόδρομο. Τα δεδομένα περιλαμβάνουν στοιχεία συλλογής με μη καταστρεπτικά συστήματα (συγκεκριμένα με τα συστήματα FWD και GPR) από ένα τμήμα αυτοκινητοδρόμου συνολικού μήκους δέκα χιλιομέτρων για τρία έτη.

Αναφορικά με την πραγματοποίηση μετρήσεων πεδίου με το FWD, σε κάθε θέση ελέγχου πραγματοποιούνται τρεις ρίψεις του φορτίου, από τις οποίες η τιμή της τελευταίας λαμβάνεται υπόψη για περαιτέρω ανάλυση. Αυτή η διαδικασία ακολουθείται προκειμένου να προσαρμοστεί κατά το βέλτιστο ο δίσκος του FWD στην επιφάνεια της ασφαλτικής στρώσης και να προκύψουν αξιόπιστες καταγραφές υποχωρήσεων. Για την άμεση ανάλυση, όλες οι υποχωρήσεις ανάγονται στο φορτίο αναφοράς. Ακολουθεί ο υπολογισμός των δομικών δεικτών που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο και οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν σε αλγόριθμους πρόβλεψης του μεγέθους  $\epsilon_R$ .

Ύστερα, με δεδομένες τις μετρούμενες υποχωρήσεις, το φορτίο του προσπίπτοντος βάρους, τα πάχη των στρώσεων που έχουν προκύψει από κατάλληλη επεξεργασία και ανάλυση των στοιχείων συλλογής με το GPR, πραγματοποιείται ανάστροφος υπολογισμός με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού που βασίζεται στη θεωρία πολλαπλών ελαστικών στρώσεων (Multi-Layered Elastic Theory, MLET). Τα μέτρα δυσκαμψίας των επιμέρους στρώσεων που προκύπτουν από τη διαδικασία αποτελούν τα δεδομένα του επόμενου βήματος. Έτσι, στο επόμενο βήμα των αναλύσεων της εντατικής κατάστασης του οδοστρώματος, προσδιορίζονται με χρήση κατάλληλου λογισμικού, που βασίζεται επίσης στην MLET, τα εντατικά μεγέθη στις δύο κρίσιμες θέσεις αστοχίας.

Στη συνέχεια, με τη βοήθεια των αλγορίθμων πρόβλεψης των παραμορφώσεων που προέκυψαν από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση και με δεδομένες τις τιμές των δομικών δεικτών πραγματοποιείται διερεύνηση της χρησιμότητάς τους και της δυνατότητας προσαρμογής τους στα διαθέσιμα στοιχεία. Τελευταίο βήμα, είναι να διερευνηθεί και η δυνατότητα ανάδειξης ενός νέου προτύπου πρόβλεψης, το οποίο στην φιλοσοφία των υφιστάμενων αλγορίθμων, θα συνδυάζει τους δομικούς δείκτες με τον επιπρόσθετο παράγοντα της θερμοκρασίας. Υπενθυμίζεται ότι κατά τη διάρκεια των μετρήσεων πεδίου πραγματοποιούνται συνεχείς καταγραφές της

θερμοκρασίας εντός του σώματος των ασφαλικών στρώσεων(μέσω διάνοιξης μικρής οπής).

## 5.2 Άμεση ανάλυση

### 5.2.1 Αναγωγή σε φορτίο αναφοράς

Προτού υπολογιστούν οι δείκτες δομικής αξιολόγησης, όλες οι υποχωρήσεις ανάγονται σε φορτίο αναφοράς. Το φορτίο που εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων θεωρείται ως φορτίο αναφοράς  $P_{target}$  και στην προκειμένη περίπτωση το φορτίο αναφοράς είναι 50 kN. Κατά την εκτέλεση, όμως, των δοκιμών παρατηρούνται μικρές αποκλίσεις και έτσι, είναι απαραίτητη η αναγωγή των υποχωρήσεων στο φορτίο αναφοράς, με τη βοήθεια της σχέσης:

$$D_i(50kN) = \frac{(D_i(P) \times 50kN)}{P} \quad (5.1)$$

Όπου,

–  $D_i(P)$ : η υποχώρηση που αντιστοιχεί σε φορτίο  $P$

–  $P$ : το φορτίο στο οποίο έχει γίνει η φόρτιση και

–  $D_i(50kN)$ : η υποχώρηση που αντιστοιχεί στο φορτίο αναφοράς 50kN.

### 5.2.2 Υπολογισμός δεικτών δομικής κατάστασης

Για κάθε θέση όπου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πεδίου, υπολογίζονται οι δείκτες δομικής κατάστασης, λαμβάνοντας υπόψη πλέον τις υποχωρήσεις, που έχουν αναχθεί σε φορτίο 50kN. Σύμφωνα με τους δείκτες που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, υπολογίζονται οι δείκτες  $D_0$ , AREA και AUPP για τη γενική δομική κατάσταση του οδοστρώματος. Οι δείκτες  $SCI_{300}$  και AI υπολογίζονται με τους αντίστοιχους τύπους, κυρίως για τη δομική κατάσταση των ασφαλικών στρώσεων και οι δείκτες BDI, BCI και F για τη στρώση βάσης/υπόβασης και ενδεχομένως για μέρος της στρώσης έδρασης. Τέλος ο δείκτης  $D_{1800}$ , υποδεικνύει την κατάσταση του υπεδάφους.

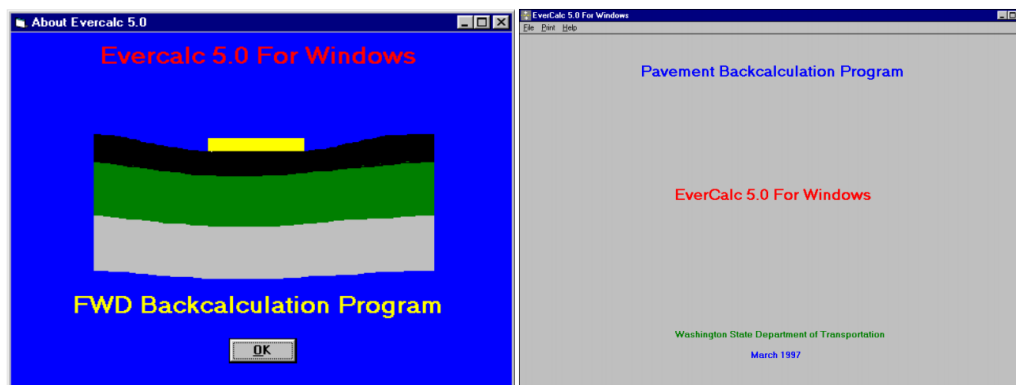
Ο υπολογισμός αυτών των δεικτών κρίνεται απαραίτητος προκειμένου να τροφοδοτηθούν οι αλγόριθμοι πρόβλεψης με τα στοιχεία που αφορούν το υπό διερεύνηση οδόστρωμα. Σημειώνεται ότι, πραγματοποιήθηκε στατιστική επεξεργασία αυτών, υπολογίζοντας διάμεσο, τυπική απόκλιση και συντελεστή μεταβλητότητας παρουσιάζοντας τη σχετική ανάλυση σε πίνακες μαζί με την

ελάχιστη και μέγιστη τιμή τους. Με αυτόν τον τρόπο δίνονται πληροφορίες σχετικά με τη διακύμανση των τιμών των δεικτών και κρίνεται η ομοιογένεια των τιμών κάθε δείκτη με τον συντελεστή μεταβλητότητας (CV%). Για τη παρούσα εργασία θεωρείται ομοιογενές ένα δείγμα το οποίο διαθέτει συντελεστή μεταβλητότητας έως 20%. Επιπλέον, για κάθε δείκτη υπολογίστηκαν εκτός από τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές και τα εκατοστημόρια 25%, 50% (διάμεσος) και 75% με τα οποία παρουσιάζεται η κατανομή των τιμών των δεικτών. Στο τέλος, αξιολογούνται συγκριτικά οι δείκτες της δομικής κατάστασης του οδοστρώματος με τον δείκτη  $D_0$  χρησιμοποιώντας τη ποσότητα  $R^2$ , που λέγεται συντελεστής συσχέτισης και για τον οποίο θα γίνει εκτενέστερη αναφορά σε επόμενο κεφάλαιο.

### 5.3 Ανάστροφος υπολογισμός με τη θεωρία πολλαπλών ελαστικών στρώσεων

#### 5.3.1 Γενικές αρχές

Ο ανάστροφος υπολογισμός στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό EVERCALC που βασίζεται στην θεωρία πολλαπλών ελαστικών στρώσεων (εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1: Κεντρική οθόνη προγράμματος EVERCALC.

Το εν λόγω λογισμικό χρησιμοποιεί μια επαναληπτική προσέγγιση για την αλλαγή των μέτρων δυσκαμψίας προκειμένου να υπολογιστούν οι ελαστικές υποχωρήσεις και να συγκριθούν με τις μετρημένες υποχωρήσεις σε κάθε επανάληψη.

Για τον υπολογισμό των υποχωρήσεων κατά την επαναληπτική διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού το λογισμικό χρησιμοποιεί τόσο τον αλγόριθμο WESLEA για την ελαστική λύση στον υπολογισμό των θεωρητικών υποχωρήσεων όσο και έναν τροποποιημένο αλγόριθμο Gauss-Newton για τη διενέργεια βελτιστοποίησης. Βασικές υποθέσεις της ελαστικής θεωρίας των στρώσεων, στην οποία βασίζεται ο ανάστροφος υπολογισμός (όπως και οι αναλύσεις εντατικής κατάστασης που θα αναλυθούν σε επόμενο υποκεφάλαιο) αποτελούν οι εξής:

- Οι στρώσεις έχουν άπειρο μήκος στην οριζόντια κατεύθυνση
- Οι στρώσεις έχουν ομοιόμορφο πάχος
- Η κατώτερη στρώση είναι άπειρου πάχους(στην κατακόρυφη κατεύθυνση)
- Οι στρώσεις χαρακτηρίζονται ως ομοιογενείς από ισότροπα, γραμμικά ελαστικά υλικά, που χαρακτηρίζονται με το μέτρο ελαστικότητας και το λόγο Poisson.

Το λογισμικό EVERCALC μπορεί να δεχθεί ως δεδομένα εισόδου υποχωρήσεις από μέχρι δέκα γεώφωνα και έως δώδεκα κρούσεις ανάθεση. Ακόμη, είναι σε θέση να αξιολογήσει διατομές εύκαμπτου οδοστρώματος που περιέχουν έως και πέντε στρώσεις. Από μια αρχική εκτίμηση του μέτρου δυσκαμψίας για κάθε στρώση (seed moduli), γίνεται εκκίνηση του ανάστροφου υπολογισμού μέχρι την εύρεση του "τελικού" μέτρου για κάθε στρώση οδοστρώματος.

Η διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού τερματίζει όταν ικανοποιείται η εξής συνθήκη:

$$RMS(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{d_{ci}-d_{mi}}{d_{mi}}\right)^2}{n}} * 100 \quad (5.2)$$

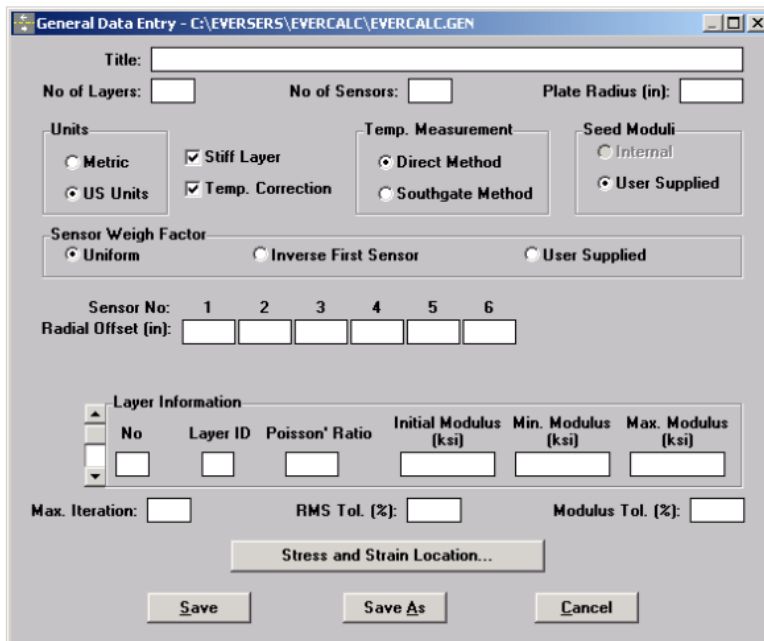
όπου,

$d_{ci}$  και  $d_{mi}$  είναι οι υπολογιζόμενες και οι μετρημένες υποχωρήσεις στο  $i$  γεώφωνο και  $n$  είναι ο αριθμός γεωφώνων.

Δεδομένου ότι το ασφαλτόμιγμα εξαρτάται από τη θερμοκρασία η οποία μπορεί να μεταβάλλεται κατά μήκος του αυτοκινητοδρόμου προκύπτει η ανάγκη αναγωγής του μέτρου ελαστικότητας των ασφαλτομιγμάτων σε μια ενιαία θερμοκρασία για να είναι συγκρίσιμα τα μεγέθη. Το λογισμικό πραγματοποιεί επιλογή τυπικής θερμοκρασίας για τον προσδιορισμό του μέτρου δυσκαμψίας ασφάλτου στους 77° F (25°C) και έτσι υπολογίζεται το  $E_{ADJ}$  που ισοδυναμεί με το  $E_{1_{25oC}}$  (μέτρο δυσκαμψίας ασφαλικών στρώσεων στους 25° C).

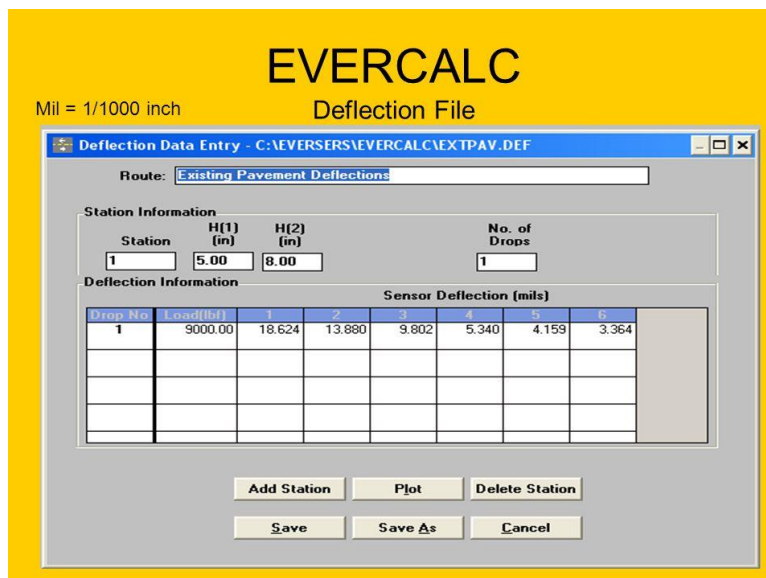
### 5.3.2 Περιγραφή διαδικασίας ανάστροφου υπολογισμού

Αρχικά, κατά τη πειραματική διαδικασία ,απαιτείται η δημιουργία ενός αρχείου με γενικές πληροφορίες που αφορούν όλες τις θέσεις μέτρησης όπως η ακτίνα της πλάκας φόρτισης, η διάταξη των γεωφώνων, το επιθυμητό σύστημα μονάδων, πλήθος στρώσεων και τιμές εκκίνησης για τα μέτρα δυσκαμψίας των υλικών. Οι τιμές εκκίνησης περιλαμβάνουν θεωρητικές τιμές για την αρχική (initial), την μέγιστη (max) και την ελάχιστη (min) τιμή των μέτρων δυσκαμψίας για κάθε στρώση (εικόνα 5.2).



Εικόνα 5.2: Αρχείο GENERAL DATA (Everseries user's guide,2005).

Στη συνέχεια για την εισαγωγή των υποχωρήσεων δημιουργείται ένα δεύτερο αρχείο. Στην περίπτωση του οδικού πειράματος που έλαβε χώρα στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, εισάχθηκαν τα στοιχεία των υποχωρήσεων για κάθε θέση από τις 232 που μετρήθηκαν συνολικά. Η εισαγωγή αυτών έγινε συμπληρώνοντας καρτέλες της μορφής της εικόνας 5.3.



Εικόνα 5.3: Εισαγωγή υποχωρήσεων στο πρόγραμμα EVERCALC (Everseries user's guide,2005).

Έπειτα, ακολουθεί η επιλογή για ενεργοποίηση του ανάστροφου υπολογισμού. Τα αποτελέσματα με τα μέτρα δυσκαμψίας για κάθε στρώση ( $E_1$  και  $E_{ADJ}$  για τις ασφαλικές στρώσεις,  $E_2$  για την βάση-υπόβασης,  $E_3$  για την στρώση έδρασης) αποθηκεύονται σε δύο αρχεία καταγραφής, τα οποία αξιοποιούνται για περαιτέρω ανάλυση.

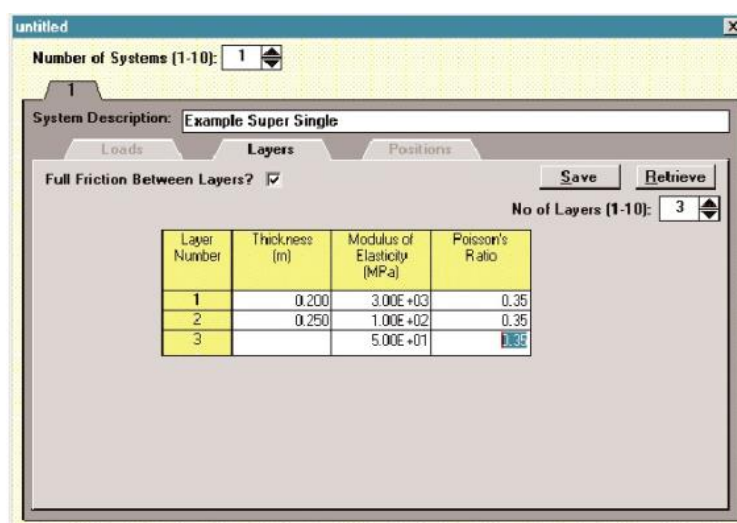
## 5.4 Υπολογισμός παραμορφώσεων

Αναπόσπαστο σκέλος για το δεύτερο επίπεδο ανάλυσης αποτελεί ή εκτίμηση της εντατικής κατάστασης του οδοστρώματος. Τα στοιχεία των επιτόπου μέτρων δυσκαμψίας που προκύπτουν από τον ανάστροφο υπολογισμό επεξεργάζονται μέσω λογισμικού υπολογισμού των εντατικών μεγεθών. Το εν λόγω λογισμικό, που αποτελεί προϊόν των μελετών της Shell στηρίζεται στη θεωρία των πολλαπλών ελαστικών στρώσεων και καλείται BISAR 3.0 .

Εκτός από τον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών το λογισμικό είναι ικανό να υπολογίζει παραμορφώσεις και να λαμβάνει υπόψη οριζόντιες δυνάμεις και πιθανές συνθήκες ολίσθησης μεταξύ των στρώσεων του οδοστρώματος. Η διατομή του οδοστρώματος φορτίζεται στην επιφάνεια με ένα ή περισσότερα κυκλικά φορτία, με ομοιόμορφα κατανεμημένη τάση στην περιοχή φόρτισης.

Επιπλέον, οι υπολογισμοί των εντατικών μεγεθών “απαιτούν” την ακόλουθη εισαγωγή(εικόνα 5.5):

- τον αριθμό των στρώσεων
- τα μέτρα δυσκαμψίας (Young Moduli) των στρώσεων
- τους λόγους POISSON στρώσεων
- το πάχος των στρώσεων (εκτός από την ημι-άπειρη στρώση έδρασης)

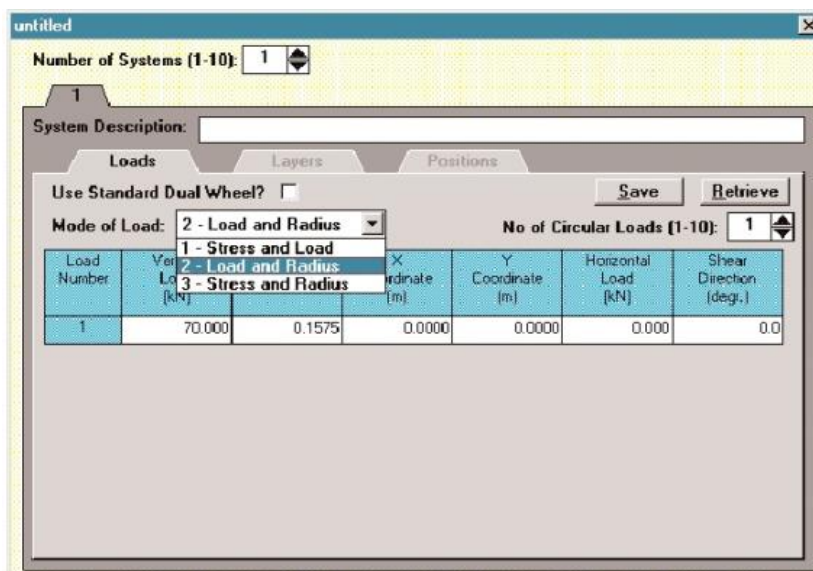


Εικόνα 5.5: Εισαγωγή στοιχείων καρτέλας layers στον αλγόριθμο BISAR (User Manual BISAR 3.0,1998).

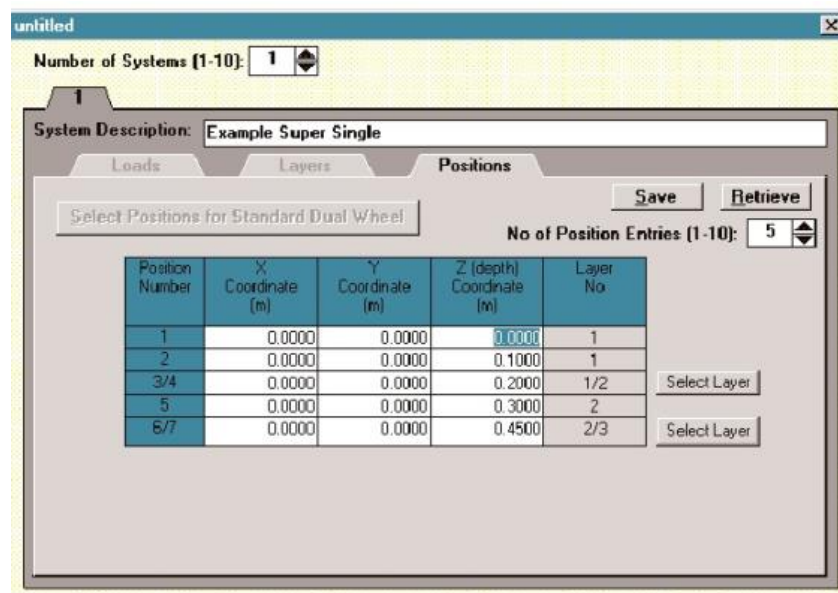
Η θεώρηση των συνθηκών φόρτισης πραγματοποιείται με έναν από τους ακόλουθους εναλλακτικούς τρόπους(εικόνα 5.6):

1. τάση και φορτίο
2. φορτίο και ακτίνα
3. τάση και ακτίνα

Τέλος, προσδιορίζονται οι συντεταγμένες των θέσεων στις οποίες απαιτείται ο υπολογισμός των εντατικών μεγεθών (εικόνα 5.7).



Εικόνα 5.6: Εισαγωγή στοιχείων καρτέλας loads στον αλγόριθμο BISAR (User Manual BISAR 3.0,1998).



Εικόνα 5.7: Εισαγωγή στοιχείων καρτέλας Positions στον αλγόριθμο BISAR 3.0 (User Manual BISAR 3.0,1998).

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε μία από τις θέσεις που χρειάζεται να υπολογισθούν τα εντατικά μεγέθη. Η μορφή των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στην εικόνα 5.8.





## BISAR 3.0 – Block Report

### Example Project

System: 1: Positions Between the Wheels and Under a Wheel

Structure				Loads							
Layer Number	Thickness (m)	Modulus Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Load Number	Vertical Load (kN)	Stress (MPa)	Horizonal Load (kN)	Stress (MPa)	Radius (m)	X-Coord (m)	Y-Coord (m)
1	0.300	5.000E+03	0.35	1	2.000E+01	5.774E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.050E-01	0.000E+00	-1.575E-01
2	0.200	1.000E+03	0.35								
3	0.150	8.000E+02	0.35								
4		2.000E+02	0.35								

Position Number	Layer Number	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Depth (m)	Stresses (MPa)			Strains (μstrain)			Displacement (μm)	
					XX	YY	ZZ	XX	YY	ZZ		
1	1	0.000E+00	0.000E+00	1.500E-01	-1.475E-02	-9.446E-02	-1.290E-01	1.269E+01	-8.831E+00	-1.815E+01	0.000E+00	0.000E+00
2	1	0.000E+00	0.000E+00	3.000E-01	1.519E-01	1.409E-01	-5.823E-02	3.246E+01	1.868E+01	-3.454E+01	0.000E+00	0.000E+00
3	2	0.000E+00	0.000E+00	3.000E-01	1.416E-02	3.954E-03	-5.823E-02	3.246E+01	1.868E+01	-6.257E+01	0.000E+00	0.000E+00
4	3	0.000E+00	0.000E+00	6.500E-01	2.704E-02	2.539E-02	-1.327E-02	2.849E+01	2.572E+01	-3.933E+01	0.000E+00	0.000E+00
5	4	0.000E+00	0.000E+00	6.500E-01	1.399E-03	9.881E-04	-1.327E-02	2.849E+01	2.572E+01	-7.054E+01	0.000E+00	0.000E+00
6	1	0.000E+00	-1.575E-01	1.500E-01	-2.084E-02	-3.776E-02	-2.388E-01	1.519E+01	1.062E+01	-4.366E+01	0.000E+00	-1.366E+00
7	1	0.000E+00	-1.575E-01	3.000E-01	1.834E-01	1.450E-01	-5.453E-02	3.034E+01	1.998E+01	-3.389E+01	0.000E+00	-3.101E+00
8	2	0.000E+00	-1.575E-01	3.000E-01	1.319E-02	5.514E-03	-5.453E-02	3.035E+01	1.998E+01	-6.108E+01	0.000E+00	-3.101E+00
9	3	0.000E+00	-1.575E-01	6.500E-01	2.593E-02	2.317E-02	-1.262E-02	2.743E+01	2.327E+01	-3.712E+01	0.000E+00	-3.920E+00
10	4	0.000E+00	-1.575E-01	6.500E-01	1.314E-03	6.976E-04	-1.262E-02	2.743E+01	2.327E+01	-6.660E+01	0.000E+00	-3.920E+00

Calculated: 02-Dec-1993:18:52

Printed: 02-Dec-1997

P

Εικόνα 5.8: Φύλλο αποτελεσμάτων αλγόριθμου BISAR 3.0 (User Manual BISAR 3.0,1998).

Είναι σημαντικό να διευκρινισθεί ότι τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν τις τάσεις και τις παραμορφώσεις και για τις δύο κρίσιμες θέσεις του εύκαμπτου οδοστρώματος. Στην παρούσα διπλωματική εργασία δίνεται έμφαση στο εντατικό μέγεθος που αναπτύσσεται στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων  $\epsilon_R$ .

## 5.5 Εφαρμογή μηχανικών προτύπων πρόβλεψης

### 5.5.1 Υφιστάμενοι αλγόριθμοι

Βασική συνιστώσα της πειραματικής διαδικασίας είναι η ανάδειξη και αξιολόγηση αλγορίθμων πρόβλεψης της κρίσιμης παραμόρφωσης στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων καθώς και η διερεύνηση της χρησιμότητάς τους. Με βάση το θεωρητικό υπόβαθρο, αξιοποιούνται έξι υφιστάμενοι αλγόριθμοι με τους οποίους επιτυγχάνεται πρόβλεψη των παραμορφώσεων με δεδομένα τα στοιχεία συλλογής με NDT και την άμεση ανάλυση αυτών, δηλαδή με βάση τους δεδομένους δομικούς δείκτες, υποχωρήσεις και σε ορισμένες περιπτώσεις τα πάχη στρώσεων.

Στην επίτευξη αυτού του στόχου συμβάλλει η χρήση υπολογιστικών φύλλων στα οποία θα καθοριστούν για τα έξι πρότυπα πρόβλεψης οι σταθερές  $C_i$  και οι αναγκαίες μεταβλητές (δείκτες, υποχωρήσεις κλπ) για την εφαρμογή τους.

Αναλυτικότερα, για τον αλγόριθμο Thompson(1998) (τον οποίο αναφέρουν και αρχικά οι Kim&Park (2002)) ισχύουν οι τιμές του πίνακα 5.1:



Πίνακας 5.1: Αλγόριθμος Thompson (1998).

Thompson(1998)		
Μεταβλητές	AUPP	(μεταβάλλεται ανά σημείο)
Σταθερές	C1=0.821	C2=1.21

Για τον πρώτο από τους αλγόριθμους που δημιούργησαν οι Kim&Park (2002b) ισχύουν οι τιμές του πίνακα 5.2 :

Πίνακας 5.2: Αλγόριθμος Kim&Park (2002b).

Kim&Park(2002b)		
Μεταβλητές	AUPP	(μεταβάλλεται ανά σημείο)
Σταθερές	C1=1.034	C2=0.932

Ενώ για τον άλλο αλγόριθμο Kim&Park (2002a) ισχύουν οι τιμές του πίνακα 5.3 :

Πίνακας 5.3: Αλγόριθμος Kim&Park (2002a).

Kim&Park(2002a)			
Μεταβλητές	BDI	H1	(μεταβάλλονται ανά σημείο)
Σταθερές	C1=1,089	C2=0,259	C3=1,409

Επιπρόσθετα, για τον πρώτο αλγόριθμο Molenaar (2006a) ισχύουν οι τιμές του πίνακα 5.4 :

Πίνακας 5.4: Αλγόριθμος Molenaar (2006a).

Molenaar (2006a)		
Μεταβλητές	SCI	(μεταβάλλεται ανά σημείο)
Σταθερές	C1=0.481	C2=0.881

Για τον δεύτερο αλγόριθμο Molenaar (2006b) ισχύουν οι τιμές του πίνακα 5.5 :

Πίνακας 5.5: Αλγόριθμος Molenaar (2006b).

Molenaar (2006b)						
Μεταβλητές	(μεταβάλλονται ανά σημείο)	H1	D1800	SCI	BDI	BCI
Σταθερές	C1=-1.067	C2=0.562	C3=0.032	C4=0.475	C5=1.156	C6=-0.683

Τέλος , για τον αλγόριθμο των Losa et al.(2008) ισχύουν οι τιμές του πίνακα 5.6 :

Πίνακας 5.6: Αλγόριθμος Losa et al. (2008).

Losa et al. (2008)							
Μεταβλητές	H1	H2	D900	D1800	SCI	BDI	(μεταβάλλοντ αι ανά σημείο)
Σταθερές	C1=0.387	C2=0.108	C3=-0.242	C4=0.08	C5=0.446	C6=0.735	C7=-0.869

Αφού γίνει η εφαρμογή των ανωτέρω αλγορίθμων πρόβλεψης για τα στοιχεία συλλογής ανά θέση μέτρησης, προκύπτουν οι προβλεπόμενες παραμορφώσεις.

Σημαντικό και αναγκαίο για τον έλεγχο της χρησιμότητας των προτύπων είναι η σύγκριση των προβλεπόμενων παραμορφώσεων βάσει των επιτόπου στοιχείων με τις παρατηρηθείσες παραμορφώσεις όπως αυτές προέκυψαν από τη θεωρία πολλαπλών ελαστικών στρώσεων. Για αυτό το λόγο θα υπολογισθούν τα ποσοστιαία σφάλματα με βάση τον ακόλουθο τύπο:

$$RMSPE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\epsilon_{pred} - \epsilon_{obs}}{\epsilon_{obs}}\right)^2}{n}} * 100 \quad (5.3)$$

Όπου :

n: ο αριθμός του δείγματος (σημεία που έγιναν οι μετρήσεις με το FWD)

$\epsilon_{pred}$ : οι προβλεπόμενες παραμορφώσεις όπως προκύπτουν από τους αλγόριθμους

$\epsilon_{obs}$ : οι παρατηρηθείσες παραμορφώσεις όπως υπολογίστηκαν από τις αναλύσεις της εντατικής κατάστασης

Έπειτα από τη συγκριτική ανάλυση, επιπρόσθετος στόχος αποτελεί η εκ νέου βαθμονόμηση των προτύπων πρόβλεψης, εφόσον προκύψει σχετική ανάγκη με βάση την τάξη μεγέθους του σφάλματος. Η βελτιστοποίηση αυτή, θα γίνει με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του μέσου ποσοστιαίου σφάλματος και θα επαναπροσδιορίσει τους συντελεστές  $c_i$  που έχουν οριστεί στους πίνακες 5.1 έως 5.6. Η λογική της εκ νέου βαθμονόμησης θα αναδείξει εάν τα υφιστάμενα πρότυπα μπορούν να γίνουν περισσότερο εφαρμόσιμα για το υπόψη οδόστρωμα.

### 5.5.2 Δημιουργία νέου αλγορίθμου

Έπειτα από την ανάλυση και εφαρμογή των προηγούμενων αλγορίθμων της βιβλιογραφικής ανασκόπησης διαπιστώθηκε ότι ο παράγοντας της θερμοκρασίας

δεν λαμβάνεται άμεσα υπόψη. Σκεπτόμενοι τον επιπρόσθετο στόχο της παρούσας εργασίας να διερευνηθούν ζητήματα προσαρμογής των υπόψη αλγορίθμων σε στοιχεία που αφορούν το εν λειτουργία ασφαλτικό οδόστρωμα, επιχειρείται η εισαγωγή της θερμοκρασίας ως επιπρόσθετη παράμετρος στους αλγορίθμους πρόβλεψης των παραμορφώσεων.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της προσθήκης ως “πρωτοεμφανιζόμενη” παράμετρος είναι αρκετά. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η θερμοκρασία είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που επιδρά στη συμπεριφορά των ασφαλτικών στρώσεων εξαιτίας της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του ασφαλτομίγματος. Για το λόγο αυτό, είναι σημαντικό να είναι γνωστή η θερμοκρασία στην οποία αντιστοιχεί η εκάστοτε προβλεπόμενη παραμόρφωση. Επιπρόσθετα, η καταγραφή της θερμοκρασίας προσδιορίζεται κατά το χρόνο εφαρμογής του FWD (μέσω των οπών όπως έχει αναφερθεί), συνεπώς δεν απαιτείται κάποια επιπρόσθετη χρονοβόρα διαδικασία.

Με βάση τα παραπάνω, δημιουργείται η ανάγκη δημιουργίας ενός νέου αλγορίθμου πρόβλεψης ο οποίος στο σύνολο των παραμέτρων θα περιέχει την μεταβλητή της θερμοκρασίας εντός των ασφαλτικών στρώσεων ( $T$  °C). Στο νέο αυτό πρότυπο θα συνδυάζονται δομικοί δείκτες και υποχωρήσεις με τις ελαστικές παραμορφώσεις, στη βάση της λογικής των υφιστάμενων αλγορίθμων από άλλους ερευνητές, με τη χρήση της λογαριθμικής συνάρτησης LOG η οποία έχει καλύτερη προσαρμογή στις τιμές.

Για αυτό τον σκοπό, θα γίνουν δοκιμές που θα συνδυάζουν διαφορετικές παραμέτρους με συντελεστές οι οποίοι υπό την βελτιστοποίηση με ελαχιστοποίηση του μέσου ποσοστιαίου σφάλματος θα έχουν σαν αποτέλεσμα τον τελικό αλγόριθμο (με θεώρηση της θερμοκρασίας). Οι παράμετροι που θα συνδυαστούν καταρχήν δοκιμαστικά είναι αυτές που συναντώνται συχνότερα στους αλγόριθμους πρόβλεψης της παραμόρφωσης  $\epsilon_R$  με βάση τη βιβλιογραφική ανασκόπηση με σκοπό να αξιοποιηθούν παράμετροι από όλο το προφίλ υποχωρήσεων.

Τέλος, στον νέο αλγόριθμο (με την ενσωμάτωση της θερμοκρασίας) θα πραγματοποιηθεί έλεγχος καλής προσαρμογής με βάση την τιμή του ποσοστιαίου σφάλματος RMSPE%, όμοια με τη διαδικασία ελέγχου προσαρμογής των υφιστάμενων αλγορίθμων. Ακόμη θα γίνει έλεγχος στατιστικής σημαντικότητας (t-test). Αναφορικά με τον έλεγχο t-test, διεξάγεται λόγω των διαφοροποιήσεων που εμφανίζονται στις παρατηρήσεις κατά ζεύγη για τις προβλεπόμενες και τις υπολογισμένες από το λογισμικό παραμορφώσεις  $\epsilon_R$ . Η t-δοκιμασία χρησιμοποιείται για την σύγκριση των μέσων όρων δυο συνόλων τιμών που διαφέρουν. Ο βαθμός εμπιστοσύνης του αλγόριθμου αξιολογείται μέσω του ελέγχου t-test (κριτήριο t της κατανομής student). Με τον δείκτη  $t_{stat}$  προσδιορίζεται η στατιστική σημαντικότητα των ανεξάρτητων μεταβλητών. Όσο μειώνεται το τυπικό σφάλμα τόσο αυξάνεται ο συντελεστής  $t_{stat}$  και συνεπώς αυξάνεται η

επάρκεια (efficiency). Από στατιστικούς πίνακες και ανάλογα με το επίπεδο εμπιστοσύνης προσδιορίζονται οι κρίσιμες τιμές του συντελεστή  $t$  ( $t_{crit}$ ). Για τη παρούσα διπλωματική εργασία, στη βάση των προηγούμενων, θα χρησιμοποιηθεί ο έλεγχος στατιστικής σημαντικότητας μέσω της σχετικής δυνατότητας που παρέχεται από τα υπολογιστικά φύλλα. Μέσω αυτού θα προκύψει αποτέλεσμα που θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο για το αν είναι στατιστικά σημαντικές οι διαφορές των δύο δειγμάτων.

## 6. Αποτελέσματα

### 6.1 Δείκτες δομικής κατάστασης

Για τη παρούσα διπλωματική εργασία, από τους δείκτες δομικής αξιολόγησης της βιβλιογραφίας που περιγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, υπολογίστηκαν και παρουσιάζονται οι SCI, AI1, BDI, BCI, F1, F2, AREA, Aurr, Do και D<sub>1800</sub>.

Από τους δείκτες που αφορούν τις ασφαλτικές στρώσεις υπολογίστηκαν για τα 232 σημεία μετρήσεων με FWD ο SCI και ο AI1. Έπειτα από επεξεργασία των δεικτών παρουσιάζονται τα στατιστικά μεγέθη τους στον πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Στατιστικά μεγέθη SCI - AI1.

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ	SCI ( $\mu\text{m}$ )	AI1 (αδιάστατο)
Ελάχιστη τιμή	25.30	0.70
Εκατοστημόριο 25%	44.05	0.79
Εκατοστημόριο 50%	54.09	0.81
Εκατοστημόριο 75%	63.47	0.84
Μέγιστη τιμή	87.00	0.90
Μέσος όρος	54.60	0.80
Τυπική απόκλιση	13.80	0.03
<b>Συντελεστής μεταβλητότητας %</b>	<b>25.26%</b>	<b>3.85%</b>

Θεωρώντας την παραδοχή ότι ένας συντελεστής μεταβλητότητας μικρότερος του 20% αποτελεί ένδειξη ομοιογένειας του δείγματος, παρατηρείται μεγαλύτερη διακύμανση στις τιμές του δείκτη SCI και πολύ καλή ομοιογένεια στις τιμές του AI1 .

Στη συνέχεια, από τους δείκτες που δίνουν πληροφορία για την δομική κατάσταση της βάσης – υπόβασης υπολογίστηκαν οι BDI, BCI, F1 και F2. Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα στατιστικά μεγέθη αυτών των δεικτών .

Πίνακας 6.2: Στατιστικά μεγέθη BDI, BCI, F1 και F2.

<b>ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ</b>	<b>BDI (μm)</b>	<b>BCI (μm)</b>	<b>F1 (αδιάστατο)</b>	<b>F2 (αδιάστατο)</b>
Ελάχιστη τιμή	23.60	8.20	0.50	0.70
Εκατοστημόριο 25%	38.90	17.50	0.90	1.10
Εκατοστημόριο 50%	45.00	20.90	1.00	1.20
Εκατοστημόριο 75%	50.60	25.10	1.20	1.50
Μέγιστη τιμή	68.00	34.00	1.50	2.20
Μέσος όρος	44.70	21.00	1.00	1.30
Τυπική απόκλιση	8.87	5.60	0.20	0.30
<b>Συντελεστής μεταβλητότητας %</b>	<b>19.84%</b>	<b>26.56%</b>	<b>21.11%</b>	<b>23.57%</b>

Σχετικά με τους συντελεστές μεταβλητότητας των δεικτών αυτής της κατηγορίας, παρατηρείται για τους BCI, F1 και F2 μεγαλύτερη διακύμανση τιμών σε σχέση με τον BDI που διαθέτει σχετικά καλή ομοιογένεια στα 232 στοιχεία του δείγματος.

Ακολουθεί η παρουσίαση στατιστικών μεγεθών του  $D_{1800}$  στον πίνακα 6.3, ο οποίος ως δείκτης αξιολογεί δομικά την στρώση έδρασης του οδοστρώματος.

Η μεταβλητότητα της τάξης του 38.58%, που προκύπτει για το δείκτη  $D_{1800}$  συνιστά ένδειξη ανομοιογένειας για τις συνθήκες του υπεδάφους. Βάσει αυτού, συμπεραίνεται ότι το εύρος στο οποίο διακυμαίνονται οι τιμές είναι σχετικά μεγάλο.

Πίνακας 6.3: Στατιστικά μεγέθη D1800.

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ	D <sub>1800</sub> (μm)
Ελάχιστη τιμή	7.20
Εκατοστημόριο 25%	11.70
Εκατοστημόριο 50%	15.50
Εκατοστημόριο 75%	20.10
Μέγιστη τιμή	40.60
Μέσος όρος	16.70
Τυπική απόκλιση	6.50
<b>Συντελεστής μεταβλητότητας %</b>	<b>38.58%</b>

Τέλος , από τους δείκτες που δίνουν πληροφορία για τη γενική δομική κατάσταση του οδοστρώματος υπολογίστηκαν και παρουσιάζονται τα στατιστικά μεγέθη των D<sub>0</sub>, A<sub>urr</sub> και AREA στον πίνακα 6.4.

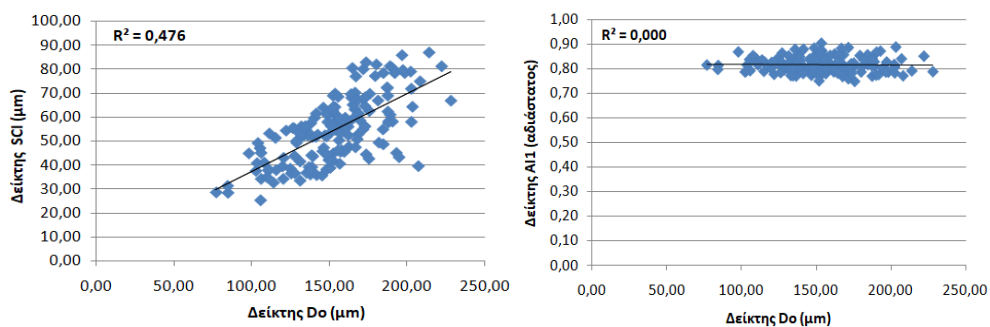
Πίνακας 6.4: Στατιστικά μεγέθη D<sub>0</sub>, A<sub>urr</sub>, AREA.

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ	D <sub>0</sub> (μm)	A <sub>urr</sub> (μm)	AREA (αδιάστατο)
Ελάχιστη τιμή	76.90	112.30	387.00
Εκατοστημόριο 25%	134.50	182.00	442.90
Εκατοστημόριο 50%	153.10	209.40	477.50
Εκατοστημόριο 75%	172.70	240.20	522.10
Μέγιστη τιμή	228.10	240.20	628.80
Μέσος όρος	153.30	214.20	479.80
Τυπική απόκλιση	29.30	46.50	50.40
<b>Συντελεστής μεταβλητότητας %</b>	<b>19.1%</b>	<b>21.7%</b>	<b>10.5%</b>

Σύμφωνα πάλι με τους συντελεστές μεταβλητότητας, φαίνεται οι δείκτες D<sub>0</sub> και A<sub>urr</sub> να έχουν μεγαλύτερη ανομοιογένεια στις τιμές τους από τον δείκτη AREA που αναμένεται να έχει μικρή διακύμανση.

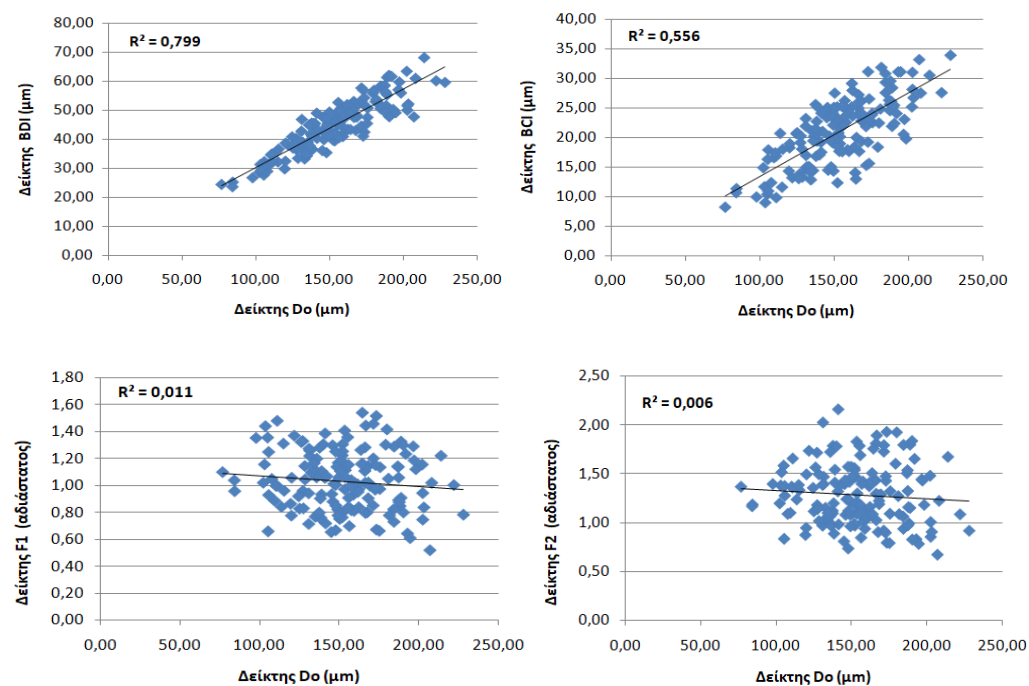
Ο δείκτης Do είναι εκείνος ο οποίος έχει χρησιμοποιηθεί εκτενέστερα για την γενική συμπεριφορά του οδοστρώματος. Έτσι, παρουσιάζονται συσχετίσεις μεταξύ των δομικών δεικτών που παρουσιάστηκαν προηγουμένως με τον δείκτη Do. Όταν υπάρχουν παρατηρήσεις δύο τυχαίων μεταβλητών μπορεί να εκτιμηθεί η συσχέτιση τους ποιοτικά από το διάγραμμα διασποράς (scatter diagram), που είναι η απεικόνιση των σημείων  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1, \dots, 156$ , σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Για να εκφραστεί η συσχέτιση δύο τυχαίων μεταβλητών, χρησιμοποιείται η ποσότητα  $R^2$ . Όσο πλησιέστερα στη μονάδα είναι ο συντελεστής τόσο καλύτερη και η συσχέτιση των μεγεθών που περιγράφει.

Στην εικόνα 6.1 φαίνεται η επίδραση που έχουν οι ασφαλικές στρώσεις στην γενική συμπεριφορά του οδοστρώματος.



Εικόνα 6.1: Συσχετίσεις SCI, AI1 με τον Do.

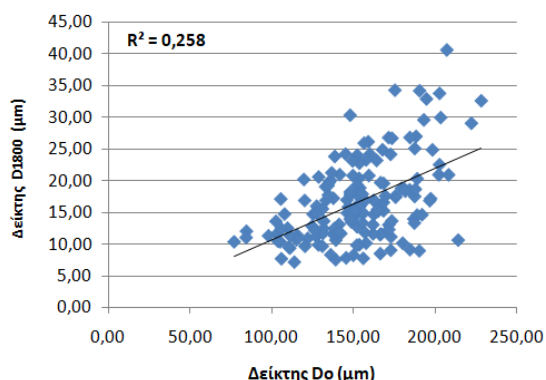
Στην εικόνα 6.2 φαίνεται η επίδραση που έχει η στρώση της βάσης – υπόβασης στην γενική συμπεριφορά του οδοστρώματος.



Εικόνα 6.2: Συσχετίσεις BDI, BCI, F1, F2 με τον Do.



Τέλος, στην εικόνα 6.3 φαίνεται η επίδραση που έχει η στρώση της έδρασης στην γενική συμπεριφορά του οδοστρώματος.



Εικόνα 6.3: Συσχέτιση D1800 με τον D<sub>o</sub>.

Συμπερασματικά, βάσει των  $R^2$  που παρουσιάστηκαν προηγουμένως με μορφή διαγραμμάτων διασποράς φαίνεται στην γενική κατάσταση του οδοστρώματος να επιδρά ο δείκτης BDI που αφορά στην κατάσταση της βάσης-υπόβασης με συσχέτιση  $R^2=0,79$ . Οι υπόλοιποι δομικοί δείκτες παρουσιάζουν χαμηλή εν γένει συσχέτιση με το δείκτη D<sub>o</sub>. Εξ ορισμού όσο πλησιέστερα στη μονάδα βρίσκεται το  $R^2$  τόσο μεγαλύτερη συσχέτιση έχουν δύο μεγέθη μεταξύ τους.

Ωστόσο, όπως έχει ειπωθεί η άμεση ανάλυση συνιστά μια απλοποιημένη διαδικασία δομικής αξιολόγησης. Για την ακριβέστερη αξιολόγηση των αλγορίθμων πρόβλεψης της εντατικής κατάστασης του οδοστρώματος (που αποτελεί το αντικείμενο της εργασίας) απαιτείται κι ένα δεύτερο επίπεδο ανάλυσης προκειμένου να τροφοδοτηθούν οι αλγόριθμοι. Τα αποτελέσματα από το δεύτερο επίπεδο ανάλυσης του οδοστρώματος ακολουθούν στις επόμενες υποενότητες.

## 6.2 Μέτρα δυσκαμψίας

Με βάση τα επιμέρους βήματα του ανάστροφου υπολογισμού όπως περιγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, προκύπτουν τα μέτρα ελαστικότητας για κάθε θέση, όπως ενδεικτικά απεικονίζονται στον πίνακα 6.2:

Πίνακας 6.5: Δείγμα αποτελεσμάτων εξαγωγής του αλγόριθμου EVERCALC.

Station	Load (N)	EAdj(MPa)	E(1)(MPa)	E(2)(MPa)	E(3)(MPa)	RMS Error
A6	50000	4276,9	5094	481	849	7,95
A7	50000	5105,1	6080	367	780	7
A8	50000	12484,4	14735	194	1144	2,61
A9	50000	13689	16157	162	1298	4,2
A10	50000	14088,9	16629	230	1295	4,97
A11	50000	12408,9	14646	115	692	2,71
A12	50000	7927,4	9272	579	540	4,88
A13	50000	15749,5	18422	67	1817	3,88
A14	50000	7751,2	9066	392	572	1,19
A15	50000	6418,5	7440	1046	654	6,81

Ανάμεσα στα 232 σημεία που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις του FWD και υπολογίστηκαν τα μέτρα δυσκαμψίας παρατηρήθηκαν μη ρεαλιστικές τιμές σε ορισμένες θέσεις. Συνολικά, η επισκόπηση των μέτρων δυσκαμψίας για κάθε στρώση παρουσιάζεται στον πίνακα 6.6 μέσω των στατιστικών μεγεθών. Από τον πίνακα προκύπτει ότι τα μέτρα δυσκαμψίας παρουσιάζουν μεγάλο εύρος καθώς και μεγάλη ανομοιογένεια.

Πίνακας 6.6: Στατιστικά μεγέθη E κάθε στρώσης όπως προέκυψαν από τον αλγόριθμο Evercalc.

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ	E1 <sub>ADJ</sub> (MPa)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)
Ελάχιστη τιμή	2943	2808	67	193
Εκατοστημόριο_25%	5440	5526	222	445
Εκατοστημόριο_50%	6856	8123	361	613
Εκατοστημόριο_75%	9530	11952	621	851
Μέγιστη τιμή	25375	28725	3000	2180
Μέσος όρος	8019	9370	545	692

<b>ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ</b>	<b>E1<sub>ADJ</sub> (MPa)</b>	<b>E1 (MPa)</b>	<b>E2 (MPa)</b>	<b>E3 (MPa)</b>
Τυπική απόκλιση	3828	5003	517	356
<b>Συντελεστής Μεταβλητότητας %</b>	<b>48%</b>	<b>53%</b>	<b>95%</b>	<b>51%</b>

Είναι φανερό ότι οι τιμές των E1, E1<sub>ADJ</sub>, E2 και E3 έχουν μεγάλη μεταβλητότητα και άρα τα δείγματα είναι αρκετά ανομοιογενή. Μάλιστα η μεγαλύτερη διακύμανση παρατηρείται στις τιμές των μέτρων δυσκαμψίας της βάσης – υπόβασης (E2).

Κατά συνέπεια προκύπτει η ανάγκη περιορισμού του αρχικού δείγματος προκειμένου να υπάρχουν ρεαλιστικές τιμές στα μέτρα δυσκαμψίας και να μπορεί να αξιολογηθεί με περισσότερη αξιοπιστία η χρησιμότητα των αλγορίθμων πρόβλεψης. Για το σκοπό αυτό, επιλέχθηκαν οριακές τιμές για τα μέτρα ελαστικότητας που παρουσιάζονται στον πίνακα 6.7. Τα όρια αυτά προκύπτουν βάσει συναφούς εμπειρίας αναφορικά με τη συμπεριφορά των υλικών.

Πίνακας 6.7: Τελικά όρια μέτρων δυσκαμψίας για κάθε στρώση (MPa).

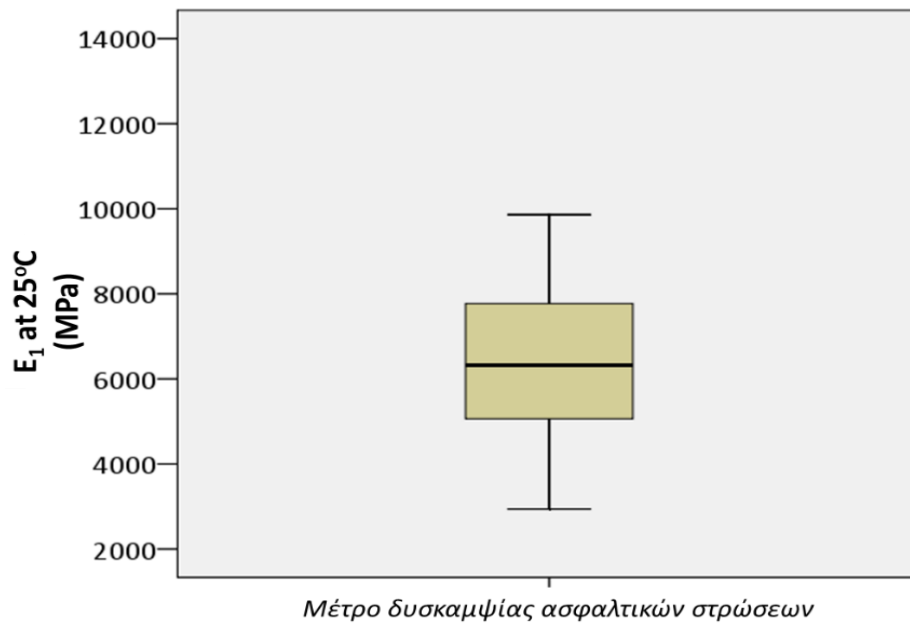
<b>E1<sub>adj</sub> (MPa)</b>	<b>E2 (MPa)</b>	<b>E3 (MPa)</b>
<b>&lt;10.000</b>	<b>&lt; 1.500</b>	<b>&lt;1.000</b>

Συμπερασματικά, προκύπτουν 156 σημεία από τα 232, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στο επόμενο βήμα των αναλύσεων της εντατικής κατάστασης του οδοστρώματος. Δηλαδή θα γίνει 67% χρήση των στοιχείων που δόθηκαν αρχικά (156/232=0,67).

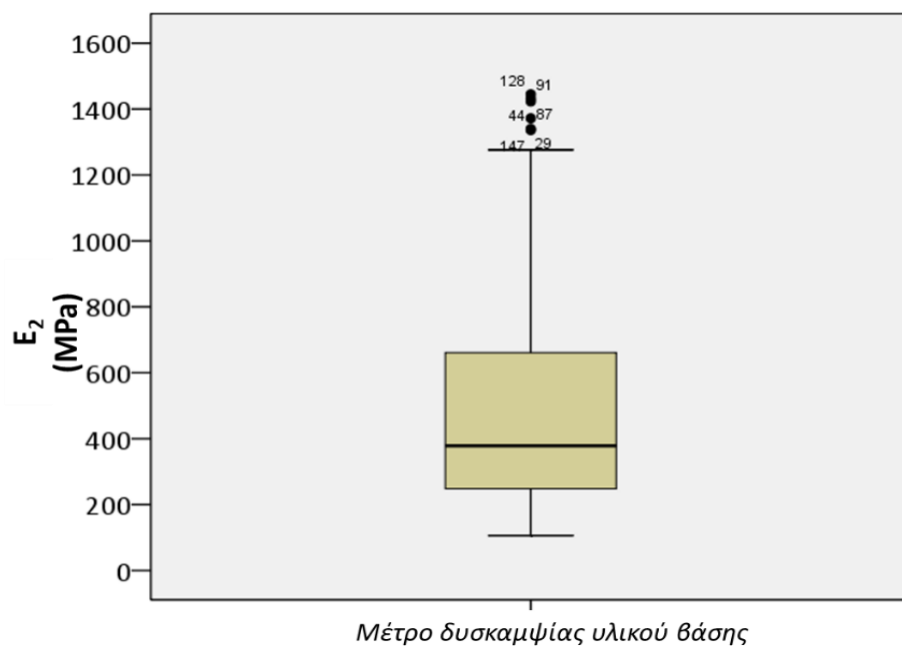
Έπειτα από τη προηγούμενη ανάλυση τα μέτρα δυσκαμψίας κάθε στρώσεις των 156 σημείων απεικονίζονται στα διαγράμματα των επόμενων εικόνων με τη μορφή θηκογραμμάτων (ή boxplots). Για την παρουσίαση των κυριότερων χαρακτηριστικών των μέτρων δυσκαμψίας λοιπόν γίνονται περιγραφικά στατιστικά γραφήματα "Boxplots" ή "Θηκογράμματα", που αποτελούν μια μέθοδο για την απεικόνιση ομάδων αριθμητικών δεδομένων μέσω των τεταρτητόμων τους (Φουσκάκης, 2019). Για την κατασκευή τους, αρχικά, επισημαίνονται για τα δεδομένα που έχουμε, η πρώτη και η τρίτη τεταρτητόμος  $x_{1/4}$ ,  $x_{3/4}$  και η διάμεσος. Στη συνέχεια κατασκευάζεται ένα ορθογώνιο με κάτω βάση το  $x_{1/4}$  και άνω βάση το  $x_{3/4}$ . Η

διαγώνιος του δείγματος αντιστοιχεί στο μέσο του ορθογωνίου. Το μήκος των βάσεων του ορθογωνίου λαμβάνεται αυθαίρετα.

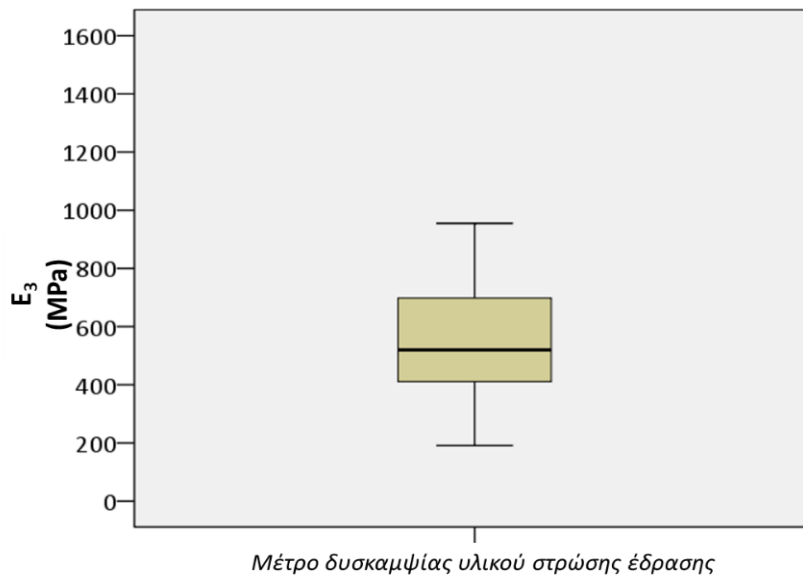
Έτσι, στις εικόνες 6.4-6.6 παρουσιάζονται τα θηκογράμματα για τα μέτρα δυσκαμψίας των ασφαλτικών στρώσεων, της βάσης - υπόβασης και της στρώσης έδρασης.



Εικόνα 6.4: Θηκογράμμα παρουσίασης μέτρου δυσκαμψίας ασφαλτικών στρώσεων με αναγωγή στους 25°C.



Εικόνα 6.5: Θηκογράμμα παρουσίασης μέτρου δυσκαμψίας ενιαίας στρώσης βάσης υπόβασης.



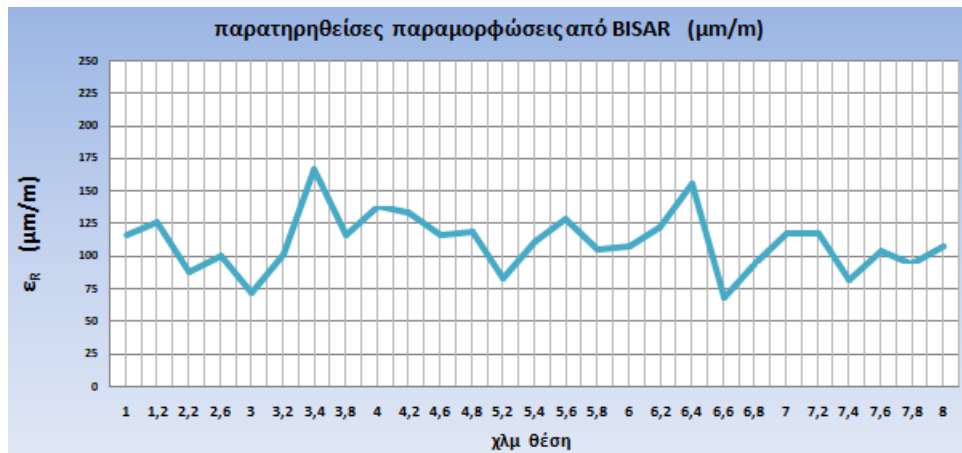
Εικόνα 6.6: Θηκόγραμμα παρουσίασης μέτρου δυσκαμψίας στρώσης έδρασης.

### 6.3 Παραμορφώσεις

Προκειμένου στη συνέχεια να εξάγουμε συμπεράσματα για την αξιολόγηση αλγορίθμων πρόβλεψης των κρίσιμων παραμορφώσεων του πειραματικού οδοστρώματος, γίνεται εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο αναφορικά με τον προσδιορισμό των παραμορφώσεων με τη θεωρία πολλαπλών ελαστικών στρώσεων. Βάσει αυτής υπολογίζονται οι παραμορφώσεις στις κρίσιμες θέσεις αστοχίας του υπόψη οδοστρώματος.

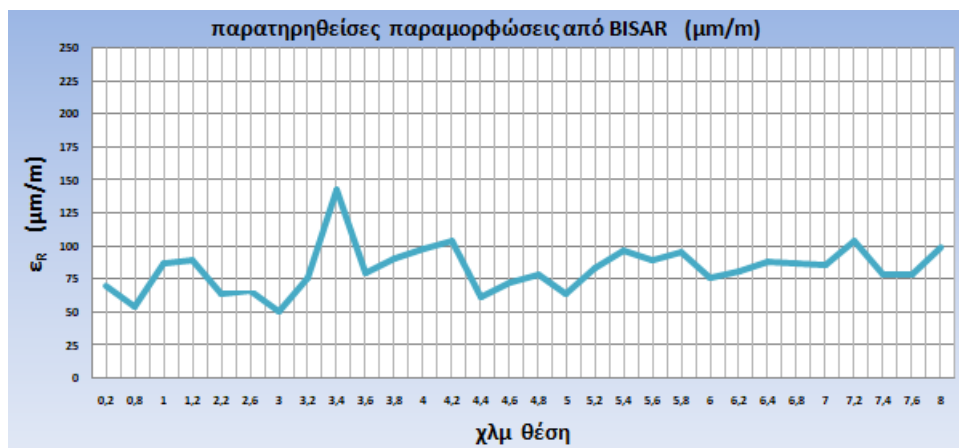
Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των παραμορφώσεων θα γίνει αρχικά με τη μορφή κατά μήκος διαγραμμάτων στα οποία φαίνεται η εξέλιξη του μεγέθους ανά θέση και ανά συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασίας. Η κωδικοποίηση των στοιχείων, που αντλήθηκαν από το εργαστήριο οδοποιίας του ΕΜΠ, πραγματοποιήθηκε ανάλογα με την κατεύθυνση στην οποία ανήκουν τα σημεία. Πιο συγκεκριμένα, οι ομάδες σημείων Α, Β, C βρίσκονται στην μια κατεύθυνση ενώ οι ομάδες D, E και F στην άλλη. Ακόμα, σημειώνεται ότι οι ομάδες Α-D, Β-E, C-F μετρήθηκαν τον πρώτο, δεύτερο και τρίτο χρόνο αντίστοιχα.

Έτσι στην εικόνα 6.7 παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις  $\epsilon_R$  οι οποίες αφορούν την ομάδα σημείων Α, με μέγιστη τιμή 166.70 ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) και ελάχιστη τιμή 67.70 ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) και με εύρος θερμοκρασίας από 21.1°C έως 23.9°C.



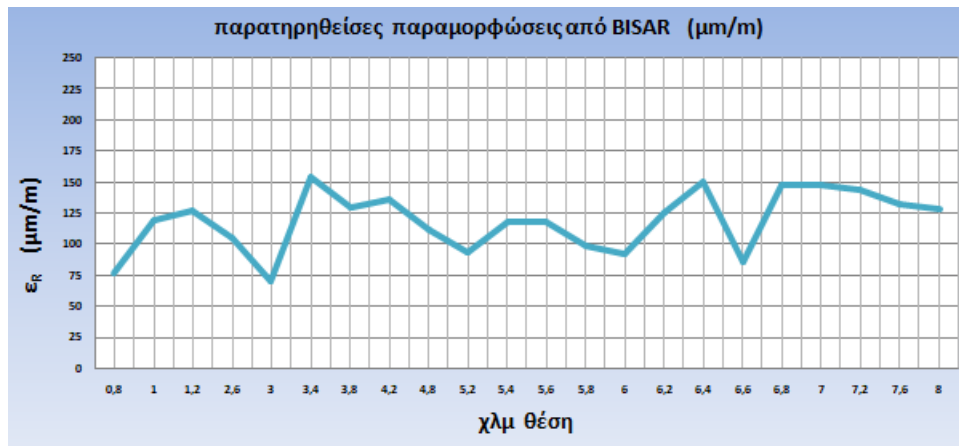
Εικόνα 6.7: Παραμορφώσεις από το λογισμικό BISR για την ομάδα σημείων Α.

Στην εικόνα 6.8 παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις  $\epsilon_R$  οι οποίες αφορούν την ομάδα σημείων Β με εύρος θερμοκρασίας από 13.4° C έως 17.3 ° C και μέγιστη τιμή 142.30 (μm/m) και ελάχιστη τιμή 54.40 (μm/m).



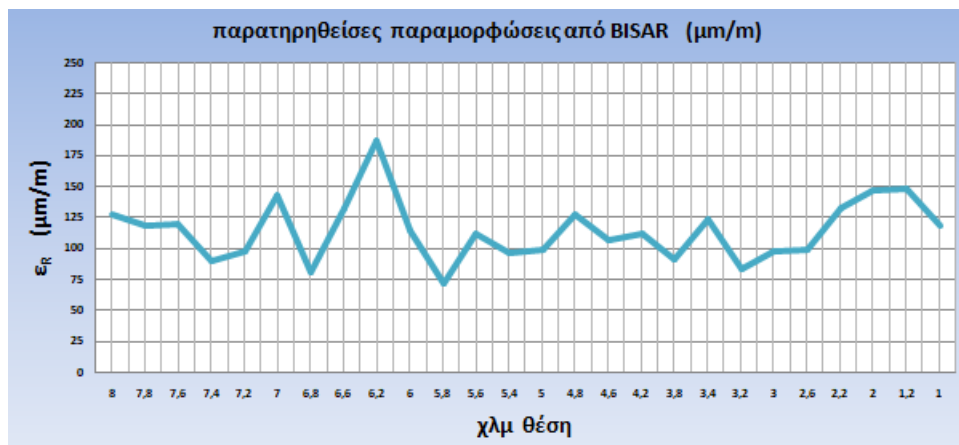
Εικόνα 6.8: Παραμορφώσεις από το λογισμικό BISR για την ομάδα σημείων Β.

Στην εικόνα 6.9 παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις  $\epsilon_R$  οι οποίες αφορούν την ομάδα σημείων C με εύρος θερμοκρασίας από 28.50° C έως 30.0° C και με μέγιστη τιμή 154.60 (μm/m) και ελάχιστη τιμή 69.60 (μm/m).



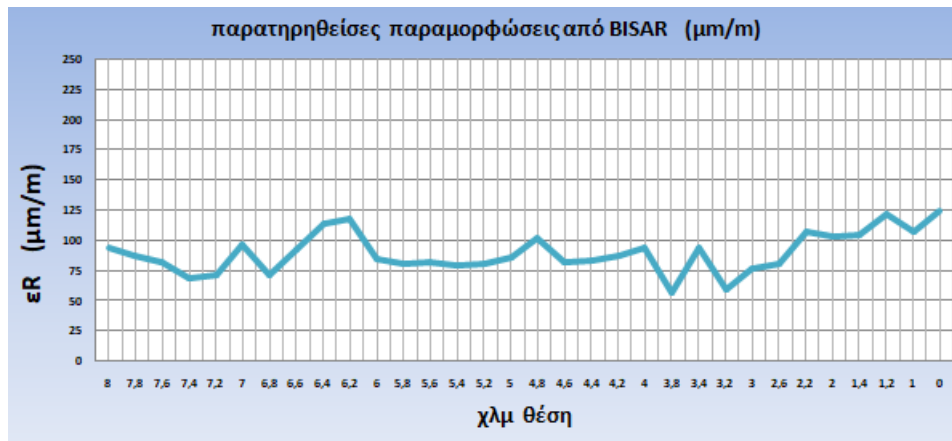
Εικόνα 6.9: Παραμορφώσεις από το λογισμικό BISAR για την ομάδα σημείων C.

Στην εικόνα 6.10 παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις  $\epsilon_R$  οι οποίες αφορούν την ομάδα σημείων D με εύρος θερμοκρασίας από  $23.70^\circ\text{C}$  έως  $24.10^\circ\text{C}$  και με μέγιστη τιμή  $186.60$  ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) και ελάχιστη τιμή  $70.90$  ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ).



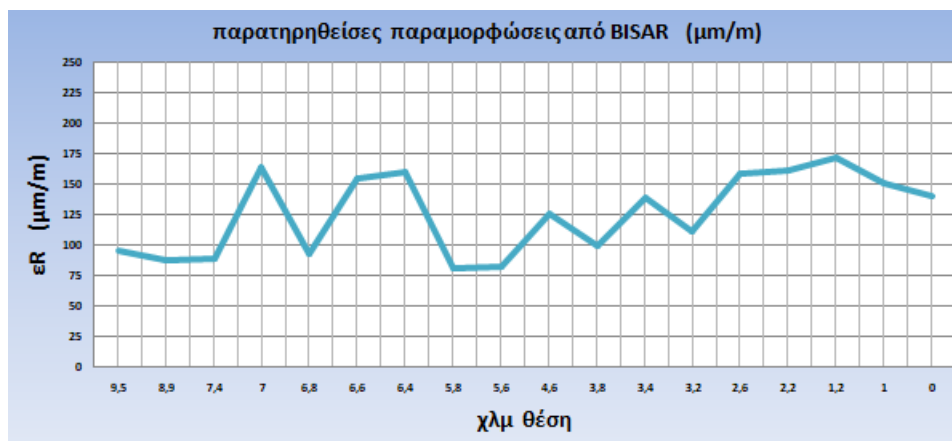
Εικόνα 6.10: Παραμορφώσεις από το λογισμικό BISAR για την ομάδα σημείων D.

Στην εικόνα 6.11 παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις  $\epsilon_R$  οι οποίες αφορούν την ομάδα σημείων E με εύρος θερμοκρασίας από  $18.40^\circ\text{C}$  έως  $18.80^\circ\text{C}$  και με μέγιστη τιμή  $125.10$  ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) και ελάχιστη τιμή  $57.30$  ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ).



Εικόνα 6.11: Παραμορφώσεις από το λογισμικό BIZAR για την ομάδα σημείων E.

Στην εικόνα 6.12 παρουσιάζονται οι παραμορφώσεις  $\epsilon_R$  οι οποίες αφορούν την ομάδα σημείων F με εύρος θερμοκρασίας από  $24^\circ\text{C}$  έως  $32^\circ\text{C}$  και με μέγιστη τιμή  $172.50$  ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) και ελάχιστη τιμή  $80.30$  ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ).



Εικόνα 6.12: Παραμορφώσεις από το λογισμικό BIZAR για την ομάδα σημείων F.

Οι τιμές οι οποίες προέκυψαν από την θεωρία πολλαπλών ελαστικών στρώσεων και παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα διαγράμματα, θα συμβάλλουν στην συγκριτική ανάλυση τους με τις προβλεπόμενες παραμορφώσεις των αλγορίθμων. Τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στις επόμενες υπό-ενότητες.



## 6.4 Αξιολόγηση υφιστάμενων αλγορίθμων πρόβλεψης των παραμορφώσεων

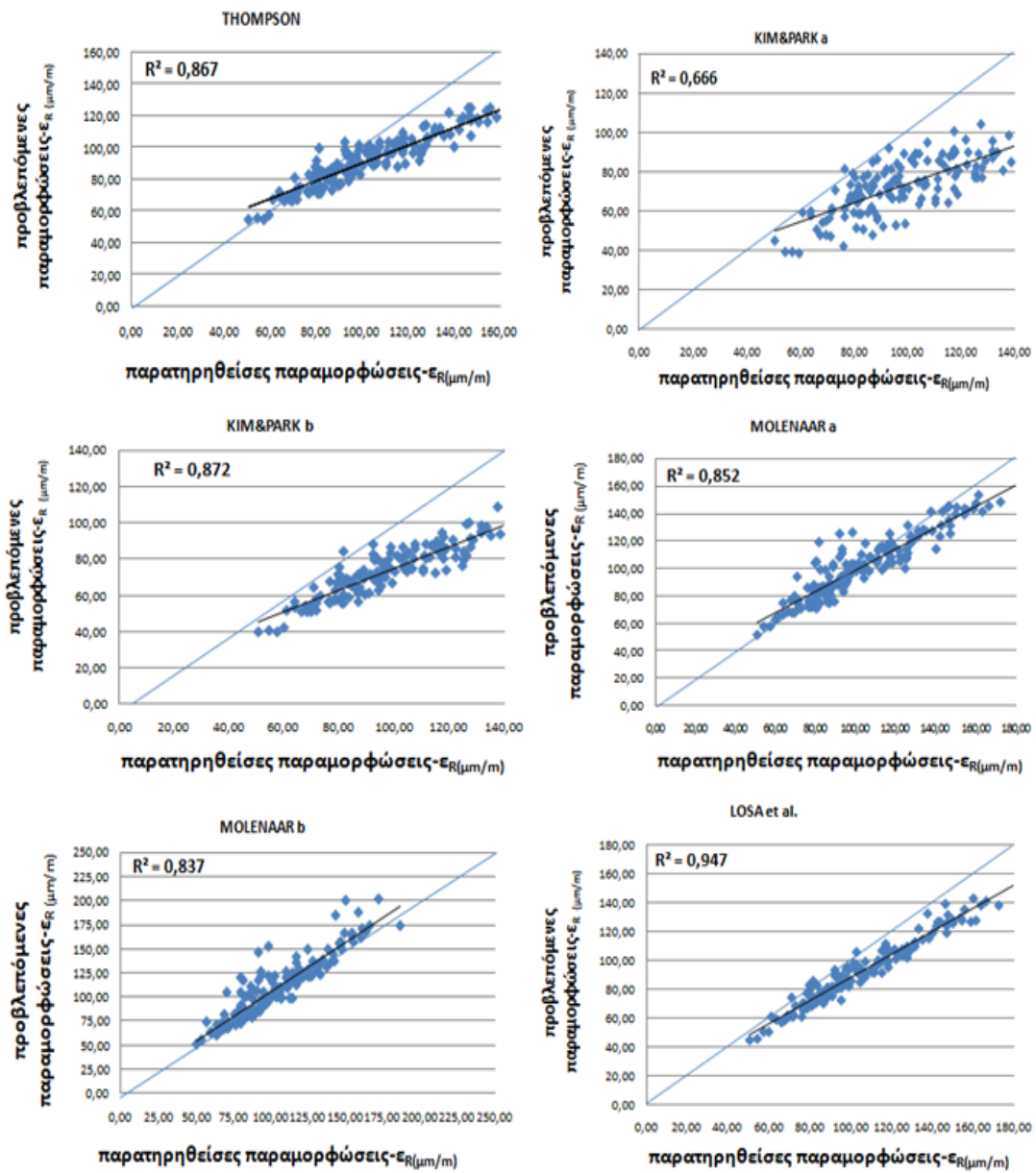
### 6.4.1 Συγκριτική αξιολόγηση προβλεπόμενων παραμορφώσεων

Κατά τα βήματα που έχουν προηγηθεί έχουν προσδιοριστεί οι παραμορφώσεις με βάση τα επιτόπου στοιχεία με τη θεωρία πολλαπλών ελαστικών στρώσεων. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής οι τιμές αυτές εφεξής θα χαρακτηρίζονται με τον όρο παρατηρηθείσες παραμορφώσεις (ή observed) για να ξεχωρίζουν από τις προβλεπόμενες (predicted) μέσω των αλγορίθμων.

Τα πρότυπα πρόβλεψης που έχουν παρουσιαστεί κατά την βιβλιογραφική ανασκόπηση συσχετίζονται με συντελεστές, διαφορετικούς δομικούς δείκτες, πάχη στρώσεων και υποχωρήσεις. Αυτά τα μεγέθη που εμπλέκονται στις μαθηματικές σχέσεις των αλγορίθμων είναι οι δείκτες δομικής αξιολόγησης SCI, BDI, BCI και AUPP, τα πάχη στρώσεων βάσης - υπόβασης H2 και των ασφαλικών H1 καθώς και οι υποχωρήσεις D<sub>900</sub> και D<sub>1800</sub>.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ παρατηρηθεισών και προβλεπόμενων παραμορφώσεων με μορφή διαγραμμάτων διασποράς ώστε να διαπιστωθούν οι συσχετίσεις μεταξύ τους. Για να εκφραστεί η συσχέτιση των δύο τυχαίων μεταβλητών, χρησιμοποιείται και πάλι ο συντελεστής συσχέτισης R<sup>2</sup>. Όπως έχει αναφερθεί, όσο πλησιέστερα στη μονάδα βρίσκεται το R<sup>2</sup> τόσο καλύτερη συσχέτιση εξασφαλίζεται μεταξύ των δύο δειγμάτων των παραμορφώσεων.

Ακολουθεί η εικόνα 6.13 και ο πίνακας 6.8 στα οποία παρουσιάζονται οι συσχετίσεις μεταξύ των παραμορφώσεων "observed" και "predicted" για κάθε ένα από τα πρότυπα πρόβλεψης της βιβλιογραφίας. Παρατηρούνται με μία πρώτη επισκόπηση, σχετικά ικανοποιητικές συσχετίσεις μεταξύ των μεγεθών, ωστόσο δεν θα αποτελέσουν κριτήρια χρησιμότητας των αλγορίθμων. Η συσχέτιση R<sup>2</sup> δεν είναι πάντα κατάλληλος δείκτης καλής προσαρμογής ενός προτύπου και δεν προκύπτει από αυτήν συμπέρασμα για το σφάλμα πρόβλεψης (Φουσκάκης, 2019). Η χρησιμότητα των αλγορίθμων θα ελεγχθεί με τον υπολογισμό και την παρουσίαση των ποσοστιαίων σφαλμάτων αργότερα.



Εικόνα 6.13: Συσχετίσεις μεταξύ προβλεπόμενων και παρατηρηθεισών παραμορφώσεων για κάθε αλγόριθμο.

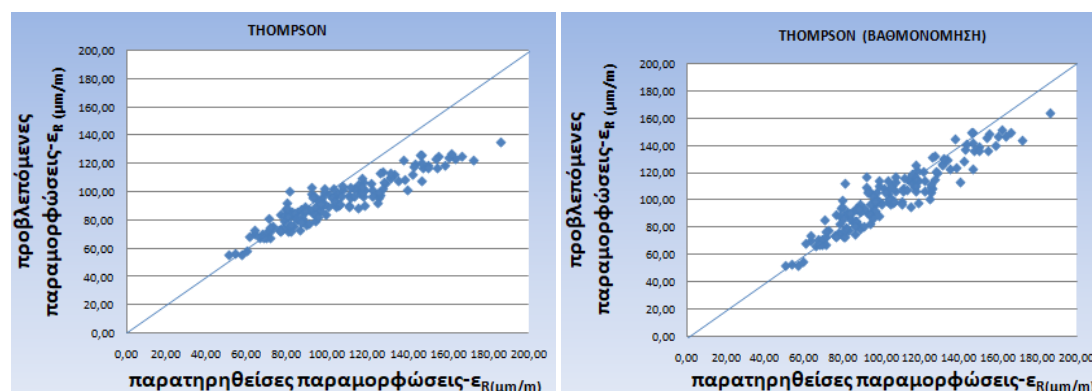
Για την παρούσα εργασία, θεωρείται ότι επιτυγχάνεται ικανοποιητική συσχέτιση όταν το  $R^2$  είναι μεγαλύτερο του 0,7 .

Πίνακας 6.8: Πίνακας συσχετίσεων προβλεπόμενων και παρατηρηθεισών παραμορφώσεων.

Συσχετιζόμενα μεγέθη $\epsilon_{Rpred} - \epsilon_{Robs}$	$R^2$	
Thompson (1998)	0,867	✓
Kim & Park (2002 a)	0,667	?
Kim & Park (2002 b)	0,872	✓
Molenaar (2006 a)	0,852	✓
Molenaar (2006 b)	0,837	✓
Losa et al. (2008)	0,947	✓

Στη συνέχεια, μετά την εφαρμογή των αλγορίθμων και την πραγματοποίηση εκ νέου βαθμονόμησης οι συντελεστές έχουν αλλάξει και ως αποτέλεσμα της διαδικασίας της βελτιστοποίησης παρατηρούνται μικρότερα ποσοστιαία σφάλματα RMSPE%. Αυτό υποδηλώνει και ικανοποιητικότερη χρησιμότητα των βαθμονομημένων προτύπων για το υπόψη πειραματικό οδόστρωμα. Με τη συμβολή και πάλι διαγραμμάτων διασποράς (scatter diagram), θα παρουσιαστούν για κάθε βαθμονομημένο αλγόριθμο πρόβλεψης της βιβλιογραφίας οι τιμές των παρατηρηθεισών και προβλεπόμενων παραμορφώσεων (εικόνες 6.14 έως 6.19).

Το πρότυπο του Thompson (1998), που χαρακτηρίζεται από μια απλή εξίσωση που εμπεριέχει μόνο την παράμετρο του δείκτη Aurr, έπειτα από τη βαθμονόμησή του επιτυγχάνει ποσοστιαίο σφάλμα μικρότερο του 10% (εικόνα 6.14 και πίνακας 6.9).



Εικόνα 6.14: Παραμορφώσεις πριν και μετά τη βελτιστοποίηση για το πρότυπο Thompson (1998).

Πίνακας 6.9: RMSPE% πριν και μετά τη βελτιστοποίηση για Thompson (1998).

THOMPSON (1998)	ΑΡΧΙΚΑ	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ
RMSPE %	13.58	9.57

Η διαφορά αυτή στα ποσοστιαία σφάλματα επιφέρει αριθμητική διαφορά και στους συντελεστές του βαθμονομημένου αλγόριθμου Thompson(πίνακας 6.10).

Πίνακας 6.10: Συντελεστές πριν και μετά τη βελτιστοποίηση για Thompson (1998).

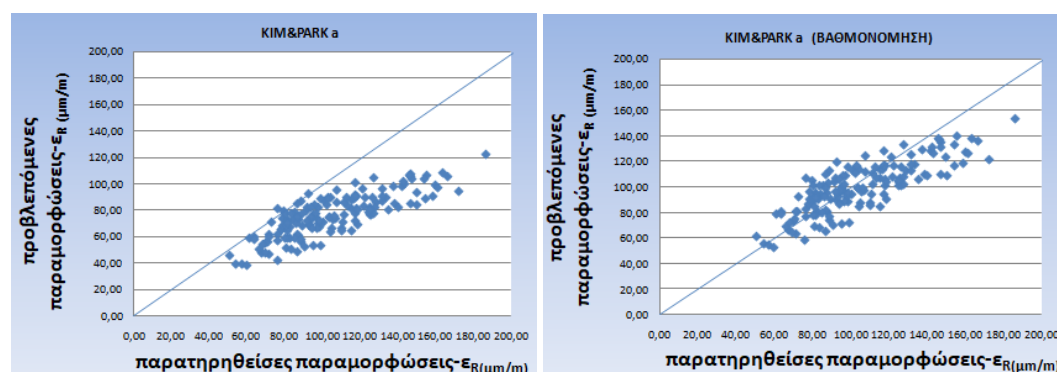
THOMPSON (1998)	ΑΡΧΙΚΑ	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ
C1	0.821	1.058	Aupp
C2	1.058	1.029	ΣΤΑΘΕΡΑ

Αναφορικά με τη συσχέτιση μεταξύ των παραμορφώσεων και του AUPP του βαθμονομημένου Thompson (1998) παρατηρείται όπως αναμένεται (λόγω μοναδικής παραμέτρου)  $R^2$  πολύ κοντά στη μονάδα (πίνακας 6.11).

Πίνακας 6.11: Συσχέτιση  $\epsilon$ -AUPP για Thompson (1998).

$R^2$	$\epsilon$ - AUPP
THOMPSON (1998)	0.99

Στον επόμενο αλγόριθμο, των Kim&Park (2002a) παρατηρείται αρκετά μεγάλη διασπορά μεταξύ των παραμορφώσεων και αναμένεται αρκετά μεγαλύτερο ποσοστιαίο σφάλμα σε σχέση με πριν (εικόνα 6.15).



Εικόνα 6.15: Παραμορφώσεις πριν και μετά τη βελτιστοποίηση για το πρότυπο Kim&Park (2002a).

Η παρουσίαση του ποσοστιαίου σφάλματος για το εν λόγω πρότυπο πραγματοποιείται στον πίνακα 6.12 .

Πίνακας 6.12: RMSPE% πριν και μετά τη βελτιστοποίηση για Kim&Park (2002a).

<b>KIM&amp;PARK (2002a)</b>	<b>ΑΡΧΙΚΑ</b>	<b>ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ</b>
<b>RMSPE %</b>	28.33	15.07

Έπειτα από αυτή τη βαθμονόμηση η μεταβολή των συντελεστών έχει ως εξής (πίνακας 6.13) :

Πίνακας 6.13: Συντελεστές πριν και μετά τη βελτιστοποίηση για Kim&Park (2002a).

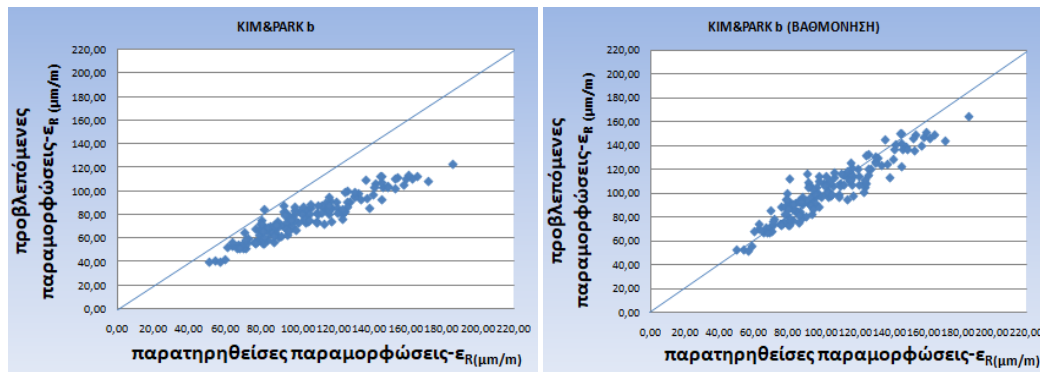
<b>KIM&amp;PARK (2002a)</b>	<b>ΑΡΧΙΚΑ</b>	<b>ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ</b>	<b>ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ</b>
<b>C1</b>	1.089	1.004	BDI
<b>C2</b>	0.259	0.075	H1
<b>C3</b>	1.409	1.693	ΣΤΑΘΕΡΑ

Ακολουθως, για τον βαθμονομημένο αλγόριθμο Kim&Park (2002a) παρατηρείται καλή συσχέτιση μεταξύ παραμορφώσεων και δείκτη BDI ενώ παρατηρείται μηδενική συσχέτιση με το ύψος των ασφαλικών H<sub>1</sub> όπως φαίνεται και στον πίνακα 6.14.

Πίνακας 6.14: Συσχετίσεις ε-παραμέτρων για Kim&Park (2002a).

<b>R<sup>2</sup></b>	<b>ε- BDI</b>	<b>ε- H1</b>
<b>KIM&amp;PARK (2002a)</b>	0.99	0.00

Ωστόσο, το επόμενο πρότυπο των Kim&Park (2002b), το οποίο έχει την ίδια μορφή ως προς τις παραμέτρους με τον αλγόριθμο του Thompson (1998), φαίνεται να μην αποτελεί μια ικανοποιητική βαθμονόμηση του τελευταίου για το πειραματικό οδόστρωμα, καθώς διαθέτει αρκετά μεγάλο ποσοστιαίο σφάλμα (πίνακας 6.15) και η διασπορά μεταξύ των  $\epsilon_R$  είναι επίσης μεγάλη (εικόνα 6.16). Με την εκ νέου βαθμονόμηση το σφάλμα γίνεται μικρότερο από 10%.



Εικόνα 6.16: Παραμορφώσεις πριν και μετά τη βελτιστοποίηση για το πρότυπο Kim&Park (2002b).

Πίνακας 6.15: RMSPE% πριν και μετά τη βελτιστοποίηση για Kim&Park (2002b)

KIM&PARK (2002 b)	ΑΡΧΙΚΑ	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ
RMSPE %	25.95	9.57

Η σημαντική αυτή διαφορά μεταξύ των δύο ποσοστιαίων σφαλμάτων πριν και μετά την εκ νέου βαθμονόμηση του Kim&Park (2002b) επιφέρει και αλλαγές στους συντελεστές του βελτιστοποιημένου αλγόριθμου (πίνακας 6.16).

Πίνακας 6.16: Συντελεστές πριν και μετά τη βελτιστοποίηση για Kim&Park (2002b).

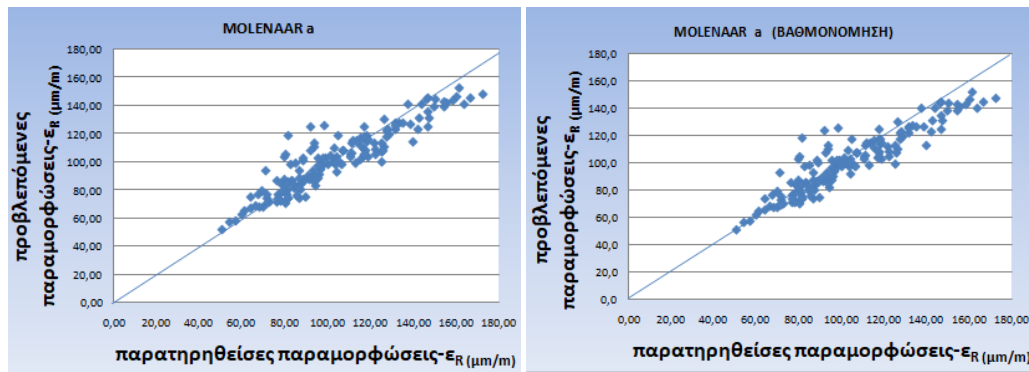
KIM&PARK (2002 b)	ΑΡΧΙΚΑ	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ
C1	1.034	1.058	Aupp
C2	1.059	1.029	ΣΤΑΘΕΡΑ

Όπως αναμένεται το βαθμονομημένο πρότυπο του Thompson ταυτίζεται με το βαθμονομημένο πρότυπο του Kim&Park (2002b) και ανάλογα διαθέτει πολύ ικανοποιητική συσχέτιση μεταξύ  $\epsilon_R$  και AUPP ίση με 0.99 (πίνακας 6.17).

Πίνακας 6.17: Συσχέτιση  $\epsilon$ -AUPP για Kim&Park (2002b).

R <sup>2</sup>	$\epsilon$ - AUPP
Kim&Park (2002 b)	0.99

Ο αλγόριθμος Molenaar (2006a), διαθέτει εξ αρχής καλή εφαρμογή για το υπό διερεύνηση οδόστρωμα. Έτσι, δεν επιτυγχάνεται σημαντική μείωση του ποσοστιαίου σφάλματος μετά την βαθμονόμηση του όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 6.17.



Εικόνα 6.17: Παραμορφώσεις πριν και μετά τη βελτιστοποίηση για το πρότυπο Molenaar (2006a).

Όπως παρατηρούμε από τα διαγράμματα της προηγούμενης εικόνας η μεταβολή των παραμορφώσεων μετά τη βαθμονόμηση δεν είναι εμφανής για τον υπόψη αλγόριθμο και η μεταβολή του ποσοστιαίου σφάλματος που παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα 6.18 είναι μικρή.

Πίνακας 6.18: RMSPE% πριν και μετά τη βελτιστοποίηση για Molenaar (2006a).

MOLENAAR (2006a)	ΑΡΧΙΚΑ	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ
RMSPE %	10.70	10.68

Όπως είναι αναμενόμενο, την μικρή μεταβολή του ποσοστιαίου σφάλματος ακολουθεί και η μεταβολή των συντελεστών του βαθμονομημένου αλγόριθμου Molenaar(2006a) (πίνακας 6.19).

Πίνακας 6.19: Συντελεστές πριν και μετά τη βελτιστοποίηση για Molenaar (2006a).

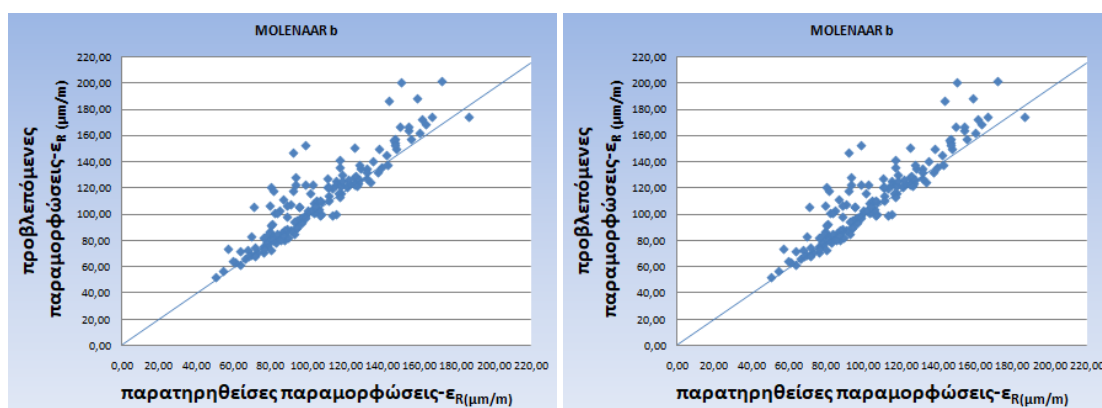
MOLENAAR (2006a)	ΑΡΧΙΚΑ	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ
C1	0.481	0.465	ΣΤΑΘΕΡΑ
C2	0.881	0.889	SCI

Ακολούθως για το εν λόγω βαθμονομημένο πρότυπο πρόβλεψης παρατίθεται ο πίνακας 6.20 στον οποίο παρουσιάζονται οι συσχετίσεις των προβλεπόμενων παραμορφώσεων με τα μεγέθη των παραμέτρων που συνδυάζει. Στην προκειμένη περίπτωση επιτυγχάνεται πολύ καλή συσχέτιση του  $\epsilon_R$  με τον δείκτη SCI .

Πίνακας 6.20: Συσχέτιση  $\varepsilon$ -SCI για Molenaar (2006a).

$R^2$	$\varepsilon$ - SCI
<b>MOLENAAR (2006a)</b>	0.99

Έπεται η παρουσίαση των παραμορφώσεων ανάλογα με πριν ,για το δεύτερο κριτήριο του Molenaar κατά τη βαθμονόμηση του οποίου παρατηρείται εμφανέστερη μεταβολή του σφάλματος (εικόνα 6.21 και πίνακας 6.18).



Εικόνα 6.18: Παραμορφώσεις πριν και μετά τη βελτιστοποίηση για το πρότυπο Molenaar (2006b).

Πίνακας 6.21: RMSPE% πριν και μετά τη βελτιστοποίηση για Molenaar (2006b).

<b>MOLENAAR (2006b)</b>	<b>ΑΡΧΙΚΑ</b>	<b>ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ</b>
<b>RMSPE %</b>	13.75	7.75

Όπως αναμένεται η μεταβολή του ποσοστιαίου σφάλματος προκαλεί μεταβολή των συντελεστών του βαθμονομημένου αλγόριθμου Molenaar (2006b) (πίνακας 6.22).



Πίνακας 6.22: Συντελεστές πριν και μετά τη βελτιστοποίηση για Molenaar (2006b).

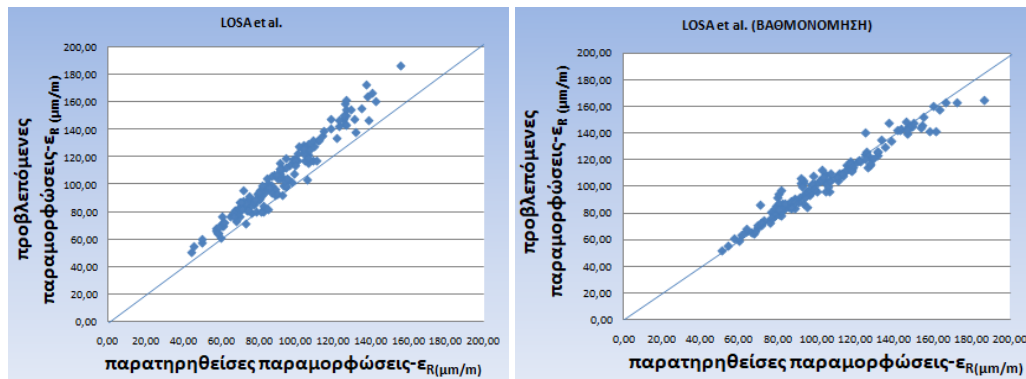
<b>MOLENAAR (2006b)</b>	<b>ΑΡΧΙΚΑ</b>	<b>ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ</b>	<b>ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ</b>
<b>C1</b>	-1.068	-0.322	H1
<b>C2</b>	0.562	0.264	D1800
<b>C3</b>	0.032	-0.048	SCI
<b>C4</b>	0.475	0.436	BDI
<b>C5</b>	1.156	0.838	BCI
<b>C6</b>	-0.683	-0.249	ΣΤΑΘΕΡΑ

Οι συσχετίσεις μεταξύ των παραμορφώσεων του αλγόριθμου Molenaar (2006b) και των παραμέτρων που περιέχει, μετά την βελτιστοποίηση των συντελεστών, ακολουθούν στον πίνακα 6.23 στον οποίο παρατηρείται αρκετά καλή συσχέτιση του  $\epsilon_R$  με τον δείκτη των ασφαλικών SCI και κακή συσχέτιση με τις υπόλοιπες παραμέτρους.

Πίνακας 6.23: Συσχετίσεις  $\epsilon$ -παραμέτρων για Molenaar (2006b).

<b>R<sup>2</sup></b>	<b><math>\epsilon</math>- SCI</b>	<b><math>\epsilon</math>- BDI</b>	<b><math>\epsilon</math>- BCI</b>	<b><math>\epsilon</math>- H1</b>	<b><math>\epsilon</math>-D<sub>1800</sub></b>
<b>MOLENAAR (2006 b)</b>	0.93	0.74	0.01	0.00	0.00

Στον τελευταίο αλγόριθμο πρόβλεψης των Losa et al. (2008) η διασπορά των υπολογισμένων και προβλεπόμενων παραμορφώσεων δεν είναι μεγάλη (εικόνα 6.19).



Εικόνα 6.19: Παραμορφώσεις πριν και μετά τη βελτιστοποίηση για το πρότυπο Losa et al. (2008).

Για αυτό το λόγο προκύπτει σχετικά μικρό αρχικό ποσοστιαίο σφάλμα ίσο με 13,48% το οποίο όμως βελτιώνεται ακόμα περισσότερο έπειτα από βαθμονόμηση σε 5,57% (πίνακας 6.24).

Πίνακας 6.24: RMSPE% πριν και μετά τη βελτιστοποίηση για Losa et al.(2008).

LOSA et al. 2008	ΑΡΧΙΚΑ	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ
RMSPE %	13.48	5.57

Συνέπεια της βαθμονόμησης και της μείωσης του ποσοστιαίου σφάλματος είναι η μεταβολή των συντελεστών του μοντέλου πριν και μετά από αυτήν (πίνακα 6.25).

Πίνακας 6.25: Συντελεστές πριν και μετά τη βελτιστοποίηση για Losa et al.(2008).

LOSA et al. (2008)	ΑΡΧΙΚΑ	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ
C1	0.378	0.434	H1
C2	0.108	0.004	H2
C3	-0.242	-0.458	D900
C4	0.08	0.289	D1800
C5	0.446	0.342	SCI
C6	0.735	0.826	BDI
C7	-0.869	-0.566	ΣΤΑΘΕΡΑ

Αναφορικά με τη νέα μορφή του αλγόριθμου Losa et al. (2008) , οι παραμορφώσεις διαθέτουν ικανοποιητική συσχέτιση με τις παραμέτρους SCI και BDI ενώ παρατηρείται μηδενική συσχέτιση με τα πάχη των ασφαλτικών στρώσεων και της βάσης – υπόβασης καθώς και με τις υποχωρήσεις D<sub>900</sub>, D<sub>1800</sub> ( πίνακας 6.26).

Πίνακας 6.26: Συσχετίσεις ε-παραμέτρων για Losa et al. (2008).

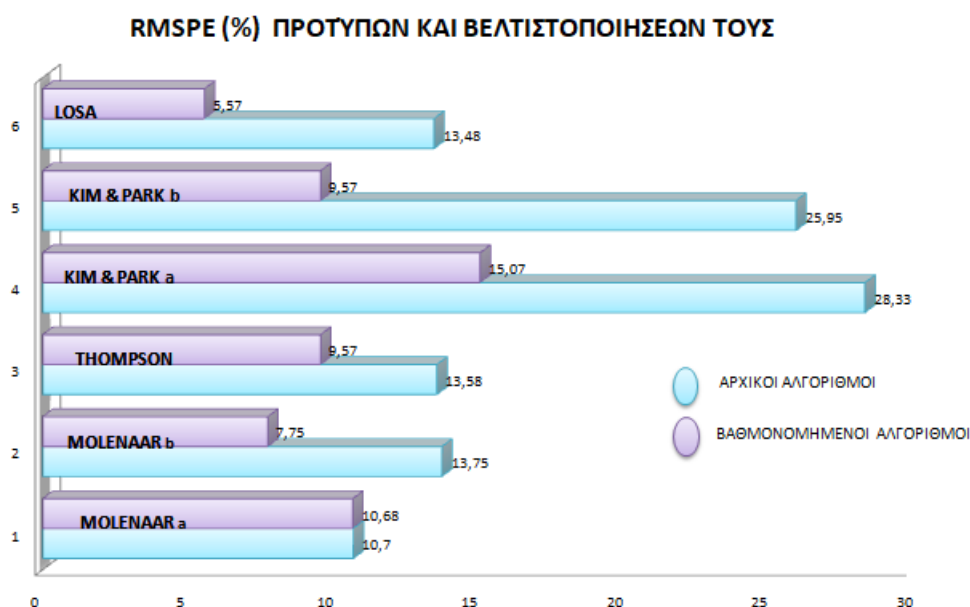
R <sup>2</sup>	ε- SCI	ε- BDI	ε- H1	ε- H2	ε- D <sub>900</sub>	ε-D <sub>1800</sub>
LOSA et al.(2008)	0.87	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00

Συνολικά, εξαιρουμένου του κριτηρίου Molenaar (2006 a), παρατηρούνται με την εκ νέου βαθμονόμηση των αλγορίθμων σημαντικές αλλαγές στα ποσοστιαία σφάλματα. Οι αλλαγές αυτές στη προκειμένη περίπτωση του πειραματικού οδοστρώματος υποδηλώνουν καλύτερη δυνατότητα εφαρμογής των αλγορίθμων πρόβλεψης γεγονός που τους καθιστά περισσότερο χρήσιμους.

#### 6.4.2 Σύνοψη

Σε ένα γενικότερο πλαίσιο παρατηρήσεων, παρουσιάζεται συγκεντρωτικά στο επόμενο διάγραμμα της εικόνας 6.20 μια σύγκριση μεταξύ των ποσοστιαίων σφαλμάτων κάθε αλγόριθμου πρόβλεψης πριν και μετά τη βαθμονόμηση του.

Η ύπαρξη αλγορίθμων πρόβλεψης ( $\epsilon_R$ ) όπως έχει αναφερθεί δεν υποδηλώνει ταυτόχρονα τη δυνατότητα καθολικής εφαρμογής τους, καθώς η δημιουργία τους στηρίζεται σε μελέτες οδοστρωμάτων τα οποία ενδέχεται να διαθέτουν εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά από το πειραματικό οδόστρωμα. Αυτό είναι περισσότερο εμφανές από το ότι οι βαθμονομημένοι αλγόριθμοι δίνουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα με μικρότερα σφάλματα για το υπόψη οδόστρωμα.



Εικόνα 6.20: Σύγκριση RMSPE% προτύπων και βελτιστοποιήσεων τους.

Ωστόσο, εκτός από το κριτήριο ελέγχου των σφαλμάτων των αλγορίθμων για την αξιολόγηση της χρησιμότητά τους, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που είναι

αναγκαίο να αναφερθούν και να ληφθούν υπόψη. Ανάμεσα στους υφιστάμενους αλγόριθμους, παρατηρούνται άλλοτε απλές μορφές εξισώσεων άλλοτε συνθετότερες οι οποίες ενδεχομένως να διαθέτουν και μεγαλύτερη ακρίβεια. Βέβαια, το πλεονέκτημα αυτό ενδέχεται να αντισταθμίζεται από το χρόνο και το υπολογιστικό κόστος ανάλυσης που απαιτούνται για να προκύψουν οι παράμετροι αυτοί. Ενδεικτικά αναφέρονται τα πάχη των στρώσεων (που απαιτούν μετρήσεις με GPR και ανάλυση στοιχείων ή εκτεταμένη πυρηνοληψία που είναι πρακτικά αδύνατη).

## 6.5 Εισαγωγή νέου αλγορίθμου

Όπως ήδη έχει αναφερθεί ένας επιπρόσθετος στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση ενσωμάτωσης της θερμοκρασίας των ασφαλικών στρώσεων σε πρότυπο πρόβλεψης παραμόρφωσης στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων. Η ιδέα της προσαρμογής του συγκεκριμένου μεγέθους, προκύπτει και από την ανάγκη να εξοικονομείται πολύτιμος χρόνος καθώς με δεδομένο εισόδο στον αλγόριθμο τη θερμοκρασία αποφεύγονται αναγκαίες διορθώσεις των δεικτών όπως είναι ο SCI<sub>300</sub> και ο D<sub>0</sub> (δηλαδή δεν πραγματοποιείται υπολογισμός και διόρθωση TNF, τύπος 3.2) και δίνεται η δυνατότητα άμεσης εποπτείας των προβλεπόμενων παραμορφώσεων μέσω αντιστοίχισης τους στην εκάστοτε μετρημένη θερμοκρασία.

Έπειτα από δοκιμές για συσχετίσεις των παραμορφώσεων με επιμέρους μεταβλητές (δομικούς δείκτες, υποχωρήσεις) προέκυψε ο εξής αλγόριθμος :

$$\log \varepsilon_R = 0.604 * \log SCI + 0.422 * \log BDI + 0.049 * \log D_{1800} - 0.074 * \log T + 0.288 \quad (6.1)$$

Ο συνδυασμός που οδηγεί σε μικρότερο ποσοστιαίο σφάλμα όπως θα φανεί και στη συνέχεια είναι ο συνδυασμός των παραμέτρων SCI, BDI, D1800 και T με τη συμβολή της βελτιστοποίησης των παραμέτρων με τη μέθοδο ελαχιστοποίησης του ποσοστιαίου σφάλματος. Παρατηρείται, επίσης, ότι στον νέο αλγόριθμο δεν υπάρχουν ως παράμετροι τα πάχη των στρώσεων του οδοστρώματος για να μπορεί να υπάρχει αμεσότητα στη χρήση του αλγορίθμου.

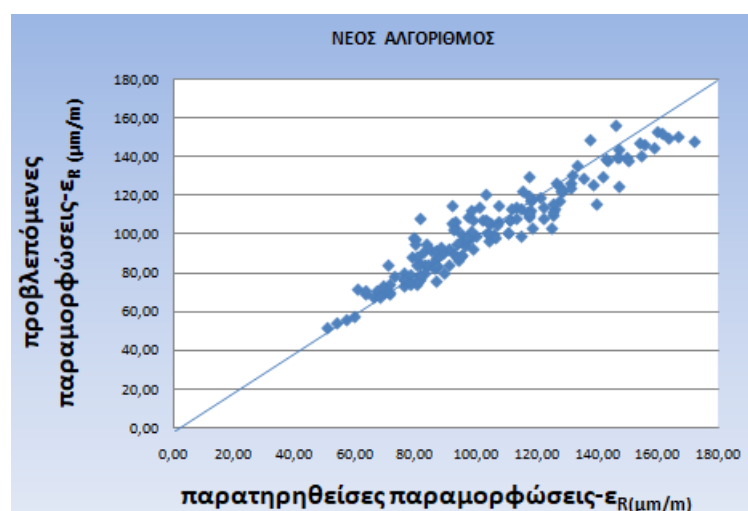
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συσχετίσεων μεταξύ των παραμορφώσεων  $\varepsilon_R$  του νέου αλγορίθμου πρόβλεψης και των παραμέτρων που το αποτελούν (πίνακας 6.27).

Πίνακας 6.27: Συσχετίσεις ε-παραμέτρων για το νέο πρότυπο.

$R^2$	$\epsilon_R$ -SCI	$\epsilon_R$ -BDI	$\epsilon_R$ -D1800	$\epsilon_R$ -T
<b>ΝΕΟ ΠΡΟΤΥΠΟ</b>	0.95	0.76	0.01	0.35

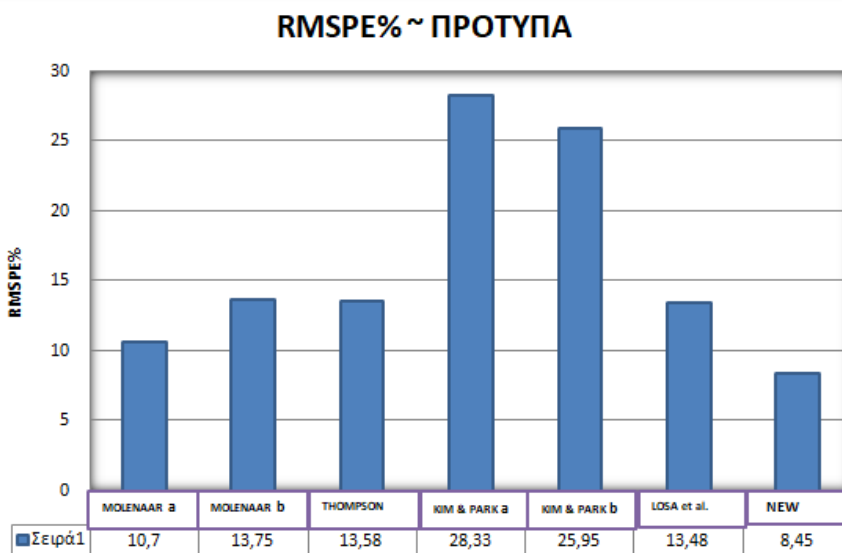
Σύμφωνα με τα παραπάνω ο συντελεστής SCI (για τα ασφαλτικά) εμφανίζει πολύ καλή συσχέτιση με τις παραμορφώσεις όπως επίσης καλή συσχέτιση εμφανίζει ο συντελεστής BDI (για την βάση-υπόβαση). Κακή συσχέτιση εμφανίζει η θερμοκρασία T ενώ ο D1800 εμφανίζει μηδενική συσχέτιση.

Η διασπορά των προβλεπόμενων παραμορφώσεων με το νέο αλγόριθμο και αυτών που προέκυψαν από τη θεωρία πολλαπλών ελαστικών στρώσεων δεν είναι μεγάλη γεγονός που οδηγεί και σε μικρό ποσοστιαίο σφάλμα RMSPE% όπως φαίνονται στην εικόνα 6.21.



Εικόνα 6.21: Διασπορά παραμορφώσεων για το προσαρμοσμένο στη θερμοκρασία πρότυπο.

Το ποσοστιαίο σφάλμα το οποίο υπολογίστηκε ανέρχεται στο 8.45% και η προσαρμογή του νέου αλγορίθμου θεωρείται ικανοποιητική. Μάλιστα παρατηρείται ότι πρόκειται για το χαμηλότερο ποσοστιαίο σφάλμα ανάμεσα στους υφιστάμενους αλγόριθμους της βιβλιογραφίας (πριν αυτοί βαθμονομηθούν) όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.22.



Εικόνα 6.22: Σύγκριση RMSPE% μεταξύ όλων των προτύπων.

Αναφορικά με τον έλεγχο t-test με διάστημα εμπιστοσύνης 95% (σημαντικότητα 0.05) που διεξάγεται λόγω των διαφοροποιήσεων που παρατηρούνται στα ζεύγη των παρατηρηθεισών και προβλεπόμενων παραμορφώσεων  $\epsilon_R$ , προκύπτει ότι οι διαφορές μεταξύ αυτών των μεγεθών δεν είναι στατιστικά σημαντικές και ότι υπάρχει στατιστική σημαντικότητα των ανεξάρτητων μεταβλητών ( $\epsilon_R$ ) που ελέγχουν θετικά την καταλληλότητα του νέου αλγόριθμου.

Πιο αναλυτικά ,με την ανάλυση δεδομένων σε υπολογιστικό φύλλο, τα δύο δείγματα ορίζονται ως εξής (πίνακας 6.28) :

Μεταβλητή (M1) : παραμορφώσεις  $\epsilon_R$  από MLET ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )

Μεταβλητή (M2): παραμορφώσεις  $\epsilon_R$  από τον νέο αλγόριθμο ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )

Πίνακας 6.28: Στοιχεία ελέγχου t-test

Στατιστικά μεγέθη	Μεταβλητή M1 - $\epsilon_R$ (MLET) $\mu\text{m}/\text{m}$	Μεταβλητή M2 - $\epsilon_R$ (αλγόριθμο) $\mu\text{m}/\text{m}$
Μέσος	104,5897436	102,400535
Διακύμανση	753,4407974	565,6069504
Μέγεθος δείγματος	156	156
Διάμεση διακύμανση	659,5238739	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	310	

Με δεδομένα τα παραπάνω, το υπολογιστικό φύλλο είχε ως αποτέλεσμα :

$t_{stat} = 0.753$  και  $t_{crit} = 1.968$  (για την δίπλευρη κατανομή)

Αξιοποιούνται τα αποτελέσματα της δίπλευρης κατανομής κατά την οποία δεν γνωρίζουμε εάν εξαρχής έχουν στατιστική διαφορά τα δύο δείγματα. Από τα αποτελέσματα όπως παρουσιάστηκαν παραπάνω προκύπτει ότι  $|t_{stat}| < t_{crit}$ , γεγονός που καθιστά τα δείγματα να μην έχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές και οι παραμορφώσεις να ελέγχουν θετικά την καταλληλότητα του νέου προτύπου.

Τέλος, υπενθυμίζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στο κεφάλαιο αυτό μέσω του πίνακα 6.29 στον οποίο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα ποσοστιαία σφάλματα κάθε αλγορίθμου πριν και μετά τη βαθμονόμηση τους καθώς υπενθυμίζονται και οι παράμετροι που περιέχουν.

Πίνακας 6.29: Συγκεντρωτικός πίνακας RMSPE% και παράμετροι αλγορίθμων.

RMSPE (%)	ΑΡΧΙΚΑ	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ
MOLENAAR (2006a)	10,70%	10,68%	SCI
MOLENAAR (2006b)	13,75%	7,75%	H1 ,D1800,SCI,BDI,BCI
THOMPSON (1998)	13,58%	9,57%	AUPP
KIM&PARK (2002a)	28,33%	15,07%	BDI , H1
KIM&PARK (2002b)	25,95%	9,57%	AUPP
LOSA et al. (2008)	13,48%	5,57%	H1,H2,D900,D1800,SCI,BDI
ΝΕΟ	8,45%		SCI,BDI,D1800,T

Ακολουθούν στο επόμενο κεφάλαιο τα συμπεράσματα για την αξιολόγηση των αλγορίθμων πρόβλεψης του μεγέθους  $\epsilon_R$  λαμβάνοντας τα αποτελέσματα της πειραματικής διερεύνησης.

## 7. Συμπεράσματα και προτάσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως αντικείμενο τη διερεύνηση χρησιμότητας αλγόριθμων πρόβλεψης της κρίσιμης παραμόρφωσης στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων με στόχο τη δομική αξιολόγηση υφιστάμενων ασφαλικών οδοστρωμάτων σε αντικατάσταση των χρονοβόρων διαδικασιών του ανάστροφου υπολογισμού και των αναλύσεων εντατικής κατάστασης. Υπό το πρίσμα αυτό, διερευνήθηκαν ζητήματα προσαρμογής διαθέσιμων αλγορίθμων (που προέκυψαν από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση) σε στοιχεία συλλογής με μη καταστρεπτικά συστήματα του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ που αφορούν υφιστάμενο πειραματικό οδόστρωμα. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση δημιουργίας ενός νέου προτύπου πρόβλεψης.

Από την επεξεργασία των στοιχείων που συλλέχθηκαν με το FWD και τις συναφείς αναλύσεις πρώτου και δεύτερου επιπέδου εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα για το υπόψη οδόστρωμα.

Από τη στατιστική ανάλυση και τον προσδιορισμό των ποσοστιαίων σφαλμάτων των αλγορίθμων της βιβλιογραφικής ανασκόπησης προέκυψε μία πρωταρχική εικόνα για την αξιολόγηση της χρησιμότητας τους. Πιο συγκεκριμένα, οι αλγόριθμοι Molenaar (2006 a), Molenaar (2006 b), Thompson (1998) και Losa et al. (2008) φαίνεται να διαθέτουν ικανοποιητική χρησιμότητα με τα αντίστοιχα σφάλματα να κυμαίνονται από 10.70% έως 13.80%. Από την άλλη πλευρά, οι αλγόριθμοι των Kim&Park (2002 a&b) εμφάνισαν μικρή χρησιμότητα καθώς τα ποσοστιαία σφάλματα τους για το υπόψη οδόστρωμα φτάνουν τις τιμές 25.95% και 28.33% αντίστοιχα, οι οποίες θεωρούνται μεγάλες.

Ωστόσο, επειδή η δημιουργία αυτών των αλγορίθμων στηρίζεται σε στοιχεία συλλογής από μετρήσεις πεδίου και από αναλύσεις εντατικής κατάστασης ασφαλικών οδοστρωμάτων με διαφορετικά υλικά και διαφορετικές συνθήκες, κρίθηκε αναγκαία η εκ νέου βαθμονόμηση τους με σκοπό τη βέλτιστη προσαρμογή τους στο υπόψη οδόστρωμα. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε, με βάση την ελαχιστοποίηση της τάξης μεγέθους των ποσοστιαίων σφαλμάτων και κατέστησε τους αλγόριθμους περισσότερο αξιόπιστους, καθώς τα βαθμονομημένα πρότυπα της βιβλιογραφίας ανεξάρτητα από την αρχική τους εφαρμογή επιτυγχάνουν καλύτερη προσαρμογή στο πειραματικό οδόστρωμα με τα ποσοστιαία σφάλματα να κυμαίνονται από 5.57% έως και 15.07%. Έτσι, ακόμα και οι βελτιστοποιημένες μορφές των εξισώσεων που στην αρχική τους μορφή δεν είχαν καλή εφαρμογή (Kim&Park 2002 a&b), τελικά προσαρμόζονται σε ικανοποιητικό βαθμό.



Κατά την αξιολόγηση των αλγορίθμων πρόβλεψης των  $\epsilon_R$  εκτός από στατιστικές αναλύσεις κρίνεται σκόπιμο να λαμβάνονται υπόψη και ζητήματα που άπτονται σε θέματα μηχανικής κατά την επιτόπου δομική αξιολόγηση υφιστάμενων οδοστρωμάτων. Τα πρότυπα που περιλαμβάνουν περισσότερες παραμέτρους αν και πιο ακριβή ενδέχεται να είναι λιγότερο εύχρηστα (Molenaar 2002b και Losa et al. 2008). Κυρίως αυτό που καθιστά λιγότερο εύχρηστους τέτοιους αλγόριθμους είναι η θεώρηση παραμέτρων, η γνώση των οποίων εμπεριέχει αυξημένες απαιτήσεις σε χρόνο και κόστος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα πάχη των στρώσεων. Ο προσδιορισμός των παχών απαιτεί εκτεταμένη πυρηνοληψία, η οποία είναι πρακτικά αδύνατη ή εναλλακτικά απαιτεί μετρήσεις με GPR και συναφείς αναλύσεις των στοιχείων συλλογής οι οποίες προϋποθέτουν επιπλέον χρόνο και εξειδικευμένη εμπειρία.

Κατόπιν τούτων, δημιουργήθηκε ένας νέος αλγόριθμος πρόβλεψης των  $\epsilon_R$  ο οποίος συνδυάζει κυρίως στοιχεία συλλογής με το FWD (δηλαδή υποχωρήσεις και δομικούς δείκτες) με έμφαση στις συχνότερες σε χρήση παραμέτρους από τους αλγόριθμους της βιβλιογραφίας, ενώ δεν συμπεριλαμβάνει τα πάχη των στρώσεων. Επιπλέον, γίνεται εισαγωγή της θερμοκρασίας των ασφατικών στρώσεων προκειμένου να μπορεί να αντιστοιχηθεί η προβλεπόμενη παραμόρφωση στην εκάστοτε μετρημένη θερμοκρασία στο πεδίο. Αξίζει να σημειωθεί ότι, η θερμοκρασία καταγράφεται άμεσα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων και δεν απαιτεί κάποια προεργασία όπως συμβαίνει με τα πάχη των στρώσεων που περιλαμβάνονται στους υφιστάμενους αλγόριθμους.

Πέρα από την πρακτικότητα του νέου αλγορίθμου, παρατηρήθηκε μικρό ποσοστιαίο σφάλμα κατά την ανάλυση των προβλεπόμενων παραμορφώσεων, γεγονός που τον καθιστά άμεσα εφαρμόσιμο για το πειραματικό οδόστρωμα. Μάλιστα, το RMSPE% του νέου προτύπου ήταν της τάξης του 8.45% που είναι μικρότερο από τα υπόλοιπα ποσοστιαία σφάλματα των υφιστάμενων αλγορίθμων της βιβλιογραφίας.

Τέλος, στο πλαίσιο περαιτέρω έρευνας αναφορικά με τους αλγόριθμους πρόβλεψης της εντατικής κατάστασης των οδοστρωμάτων, προτείνεται η διερεύνηση προσαρμογής μοντέλων υπολογισμού των παραμορφώσεων σε ενιαία θερμοκρασία αναφοράς καθώς και η επέκταση του ελέγχου προσαρμογής των αλγορίθμων σε άλλα οδικά τμήματα με διαφορετικές διατομές, διαφορετικά υλικά καθώς και διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

## 8. Βιβλιογραφία

**AASHTO, 1993.** Guide for Design for Pavement Structures. American Association of the State Highway and Transportation Officials: Washington, DC.

**Bitumen Business Group SHELL, May 1998,** User Manual Bisar 3.0.

**Boussinesq, J. (1885).** Applications des Potentiels a L'Etude de l'Equilibre et du Movement des Solides Elastiques. Gauthier Villars, Paris.

**Burmister, D. 1944.** The theory of stresses and displacements in layered systems and applications to the design of airport runways. *Transportation Research Board: Highway Research Board Proceedings.*

**Burmister, D. 1945.** The general theory of stresses and displacements in layered systems I, II, III. *Journal of Applied Physics.*

**Donovan, P. & Tutumluer, E., 2009.** Falling Weight Deflectometer Testing to Determine Relative Damage in Asphalt Pavement Unbound Aggregate Layers. *Journal of the Transportation Research Board, Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2104, Issue: 1, p. 12–23.

**Horak, E., Emery, S. & Maina, J., 2015.** Review of Falling Weight Deflectometer Deflection Benchmark Analysis on Roads and Airfields. Suncity South Africa, Proceeding in the: Asphalt Pavements Southern African (CAPSA).

**Hu et al., 2015.** Nondestructive field assessment of flexible pavement and foundation layers, Iowa State University , p.69-74.

**Icenogle & Kabir, 2013.** Evaluation of Non-Destructive Technologies for Construction Quality Control of HMA and PCC Pavements in Louisiana, LTRC Project No. 09-5C SIO No. 30000153.

**Meier & J. Rix, 2004.** Backcalculation of Flexible Pavement Moduli From Dynamic Deflection Basins Using Artificial Neural Networks, TRANSPORTATION RESEARCH RECORD 1473.

**M. Losa , R. Bacci & P. Leandri, 2008.** A Statistical Model for Prediction of Critical Strains in Pavements from Deflection Measurements, Road Materials and Pavement Design, EATA 2008:p.373 to 396.

**Molenaar, A., 2006.** Structural Evaluation and Strengthening of Flexible Pavements Using Deflection Measurements and Visual Condition Surveys. Structural Design of Pavements. CT 4860 (Part IV).

**Pan, Sangghaleh, Molavi, Zhao and Yi, 2012.** An Efficient and Accurate Genetic Algorithm for Backcalculation of Flexible Pavement Layer Moduli, Department of Civil Engineering The University of Akron, FHWA/OH-2012/18.

**Park, H. & Kim, R. Y., 2002.** Use of FWD multi-load data for pavement strength estimation, North Carolina State University Raleigh, NC: Department of Civil Engineering.

**Pekcan, Tutumluer, Ghaboussi, 2009.** Nondestructive Pavement Evaluation Using Finite Element Analysis Based Soft Computing Models, USDOT Region V Regional University Transportation Center Final Report, NEXTRANS Project No 010IY01.

**Pierce, L. M., Bruinsma, J. E., Smith, K. D. & Wade, M. J., 2017.** Using Falling Weight Deflectometer Data with Mechanistic-Empirical Design and Analysis, Volume III: Guidelines for Deflection Testing, Analysis and Interpretation, Georgetown Pike, USA: U.S. Department of Transportation.

**Solanki, Gundalia et al., 2014,** Structural evaluation of flexible pavements using falling weight deflectometer, Trends in Transport Engineering and Applications, 2,1, p.1-5 & 8-9.

**Turkiyyah, 2005.** Washington State Department of Transportation EVERSERIES USER'S GUIDE Pavement Analysis Computer Software and Case Studies. INFORMATION AND CHAPTERS IN SUPPORT OF THE BACKCALCULATION TOOL. WA.RD 586.1.

**Yoder & Witczak, 1975.** Αρχές Σχεδιασμού Οδοστρωμάτων. Δεύτερη Έκδοση: Μόσχος Γκιούρδας.

**Καβαδάς, Μ. Ι., 2009.** Στοιχεία εδαφομηχανικής. Αθήνα: Εκδόσεις Συμεών.

**Λοΐζος, Α., 2012.** Η προστασία των Οδοστρωμάτων ως σύγχρονη Αντίληψη στην Οδοποιία, Πανελλήνιο συνέδριο οδοποιίας: Βιβλιοθήκη Τ.Ε.Ε.

**Λοΐζος, Α. & Πλατή, Χ., 2018.** Σύστημα παρακολούθησης και διαχείρισης οδοστρωμάτων, Οδοστρώματα Οδών και Αεροδρομίων, Σημειώσεις μαθήματος, Τόμος: Β, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

**Links:**

*European Asphalt Pavement Association, 2019.*

Available at: [www.eapa.org/whatis-asphalt/](http://www.eapa.org/whatis-asphalt/)

*Pavement interactive, 2019.*

Available at: [www.beta.pavementinteractive.org/reference-desk/pavementmanagement/pavement-evaluation/fwd-area-parameter/](http://www.beta.pavementinteractive.org/reference-desk/pavementmanagement/pavement-evaluation/fwd-area-parameter/)

*Ανάλυση Παλινδρόμησης, 2019*

Available at: [www.math.ntua.gr/~fouskakis/Data\\_Analysis/07.pdf](http://www.math.ntua.gr/~fouskakis/Data_Analysis/07.pdf)