



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ  
ΥΠΟΔΟΜΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Ανδρέας Λοΐζος**

---

*Αξιοποίηση της ψευδοεφελκυστικής αντοχής των  
ασύνδετων υλικών οδοστρωμάτων για τον προσδιορισμό  
του μέτρου ελαστικότητάς τους.*

---

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΓΕΩΡΓΙΟΥ Β. ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ**

**ΑΘΗΝΑ, ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2003**



# Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

|                      |   |
|----------------------|---|
| 1. Εισαγωγικά Σχόλια | 2 |
|----------------------|---|

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΣΙΑΣ

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Εισαγωγή                                                                                                   | 5  |
| 2.2. Προσομοιώματα προσδιορισμού της ακαμψίας των υλικών<br>οδοστρωσίας για το σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων | 6  |
| 2.3. Μοντέλο $M_r$ - $\theta$                                                                                   | 7  |
| 2.4. Μοντέλο E-CBR                                                                                              | 11 |
| 2.5. Μοντέλο $E_2$ - $E_3$                                                                                      | 14 |
| 2.6. Μέθοδος μέτρησης CBR στο εργαστήριο                                                                        | 16 |
| 2.7. Μέτρηση CBR εδάφους «επί του έργου»                                                                        | 23 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>. ΨΕΥΔΟΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΩΝ

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| 3.1. Θεωρία ψευδοεφελκυστικής αντοχής αμμοχάλικων | 26 |
|---------------------------------------------------|----|

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ BISAR

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 4.1. Γενικά                                                  | 31 |
| 4.2. Κύριες αρχές του λογισμικού BISAR                       | 32 |
| 4.3. Μεθοδολογία                                             | 33 |
| 4.4. Ανάλυση με τη βοήθεια του λογισμικού πολλαπλών στρώσεων | 37 |
| 4.5. Παρουσίαση αποτελεσμάτων                                | 38 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>. ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SPSS

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 5.1. Βάση δεδομένων                                          | 51 |
| 5.2. Μεθοδολογία                                             | 51 |
| 5.2.1. Ανάπτυξη μαθηματικού προτύπου                         | 52 |
| 5.2.2. Ανάπτυξη μαθηματικού προτύπου Γραμμικής Παλινδρόμησης | 53 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.1. Γενικά                                                                                                                  | 56 |
| 6.2. Ανάλυση αποτελεσμάτων προτύπου Γραμμικής<br>Παλινδρόμησης                                                               | 57 |
| 6.2.1 Εισαγωγή                                                                                                               | 57 |
| 6.2.2 Ανάλυση 1 <sup>ου</sup> προτύπου μέτρου ελαστικότητας αμμοχάλικων                                                      | 58 |
| 6.2.2.1. Η επιρροή του τετραγώνου του μέτρου δυσκαμψίας του<br>ασφαλτομίγματος στο μέτρο ελαστικότητας των<br>αμμοχάλικων    | 60 |
| 6.2.2.2. Η επιρροή του τετραγώνου του μέτρου ελαστικότητας της<br>στρώσης έδρασης στο μέτρο ελαστικότητας των<br>αμμοχάλικων | 61 |
| 6.2.2.3. Η επιρροή του τετραγώνου του πάχους των ασφαλικών<br>στρώσεων στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων               | 62 |

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.2.2.4. Η επιρροή του τετραγώνου του πάχους των αμμοχάλικων στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων                 | 62 |
| 6.3. Ανάλυση 2 <sup>ου</sup> προτύπου μέτρου ελαστικότητας αμμοχάλικων                                               | 63 |
| 6.3.1. Η επιρροή του λογαρίθμου του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων    | 64 |
| 6.3.2. Η επιρροή του λογαρίθμου του μέτρου ελαστικότητας τις στρώσης έδρασης στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων | 65 |
| 6.3.3. Η επιρροή του λογαρίθμου του πάχους των ασφαλικών στρώσεων στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων            | 65 |
| 6.3.4. Η επιρροή του λογαρίθμου του πάχους των αμμοχάλικων στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων                   | 66 |
| 6.4. Ανάλυση 3 <sup>ου</sup> προτύπου μέτρου ελαστικότητας αμμοχάλικων                                               | 66 |
| 6.4.1. Η επιρροή του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων                   | 68 |
| 6.4.2. Η επιρροή του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων                | 68 |
| 6.4.3. Η επιρροή του πάχους των ασφαλικών στρώσεων στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων                           | 69 |
| 6.4.4. Η επιρροή του τετραγώνου του πάχους των αμμοχάλικων στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων                   | 69 |
| 6.5. Ανάλυση 4 <sup>ου</sup> προτύπου μέτρου ελαστικότητας αμμοχάλικων                                               | 70 |
| 6.5.1. Η επιρροή του λογαρίθμου του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων    | 71 |
| 6.5.2. Η επιρροή του λογαρίθμου του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων | 72 |
| 6.5.3. Η επιρροή του λογαρίθμου του πάχους των ασφαλικών στρώσεων στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων            | 72 |
| 6.5.4. Η επιρροή του λογαρίθμου του πάχους των αμμοχάλικων στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων                   | 73 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΣΤΡΟΦΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| 7.1. Εισαγωγή                                          | 75 |
| 7.2. Περιγραφή της συσκευής FWD                        | 76 |
| 7.3. Διαδικασία ανάστροφου υπολογισμού (back analysis) | 81 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup>. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

|                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.1. Εισαγωγή                                                       | 86  |
| 8.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{lin-lin+lin}^2$       | 86  |
| 8.3. Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{log-log}$             | 91  |
| 8.4. Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{meson lin-lin+lin}^2$ | 96  |
| 8.5. Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{meson log-log}$       | 100 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9<sup>ο</sup>. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

|                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9.1. Ερμηνεία αποτελεσμάτων και συμπεράσματα αναφορικά με το στατικό μοντέλο $\text{lin-lin+lin}^2$       | 106 |
| 9.2. Ερμηνεία αποτελεσμάτων και συμπεράσματα αναφορικά με το στατικό μοντέλο $\text{log-log}$             | 107 |
| 9.3. Ερμηνεία αποτελεσμάτων και συμπεράσματα αναφορικά με το στατικό μοντέλο $\text{meson lin-lin+lin}^2$ | 108 |
| 9.4. Ερμηνεία αποτελεσμάτων και συμπεράσματα αναφορικά με το στατικό μοντέλο $\text{meson log-log}$       | 110 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10<sup>ο</sup>. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ

|                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| 10.1. Εισαγωγή                                                         | 113 |
| 10.2. Κασσάνδρα                                                        | 113 |
| 10.2.1. Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{lin-lin+lin}^2$       | 113 |
| 10.2.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{log-log}$             | 115 |
| 10.2.3. Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{meson lin-lin+lin}^2$ | 116 |
| 10.2.4. Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{meson log-log}$       | 117 |

|                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| 10.3. Όλυνθος                                                          | 119 |
| 10.3.1. Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{lin-lin+lin}^2$       | 119 |
| 10.3.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{log-log}$             | 121 |
| 10.3.3. Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{meson lin-lin+lin}^2$ | 123 |
| 10.3.4. Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{meson log-log}$       | 125 |
| 10.4. Αγία Αναστασία                                                   | 127 |
| 10.4.1. Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{lin-lin+lin}^2$       | 127 |
| 10.4.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{log-log}$             | 129 |
| 10.4.3. Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{meson lin-lin+lin}^2$ | 131 |
| 10.4.4. Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{meson log-log}$       | 136 |
| 10.5. Τύρναβος                                                         | 136 |
| 10.5.1. Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{lin-lin+lin}^2$       | 136 |
| 10.5.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{log-log}$             | 137 |
| 10.5.3. Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{meson lin-lin+lin}^2$ | 139 |
| 10.5.4. Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{meson log-log}$       | 140 |
| 10.6. Σχολιασμός αποτελεσμάτων                                         | 142 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11<sup>ο</sup>. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

|                                              |     |
|----------------------------------------------|-----|
| 11.1. Ανακεφαλαίωση                          | 145 |
| 11.1.1. Μοντέλο $\text{lin-lin+lin}^2$       | 146 |
| 11.1.2. Μοντέλο $\text{log-log}$             | 147 |
| 11.1.3. Μοντέλο $\text{meson lin-lin+lin}^2$ | 148 |
| 11.1.4. Μοντέλο $\text{meson log-log}$       | 149 |
| 11.2. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα         | 150 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ                                 | 152 |

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σύμφωνα με τη διεθνή εμπειρία και πρακτική, κατά τον υπολογισμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, η εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας των υλικών οδοστρωσίας (Egr) συνδέεται με το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους έδρασης (Esg), μέσω εμπειρικών συσχετίσεων, οι οποίες βασίζονται κυρίως σε αποτελέσματα δοκιμών της φέρουσας ικανότητας (CBR). Με την παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια ανάπτυξης μιας εναλλακτικής σχέσης του μέτρου ελαστικότητας των υλικών οδοστρωσίας (Egr) με το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους έδρασης (Esg), λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία του οδοστρώματος (πάχη στρώσεων) τα μηχανικά χαρακτηριστικά των επιμέρους στρώσεων, καθώς και την περιορισμένη ικανότητα των υλικών οδοστρωσίας να αναλάβουν εφελκυστικές τάσεις, μετά την κατασκευή του τελικού ασφαλτοτάπητα κυκλοφορίας.

## ABSTRACT

According to the international experience and practices concerning the design of flexible pavements, the estimation of the modulus of elasticity of pavement granular materials (Egr) is correlated empirically with the modulus of elasticity of the subgrade and these empirical relations are based on the California Bearing Ratio (CBR). In the present work, an attempt is undertaken to create an alternative correlation of the modulus of elasticity of pavement granular materials (Egr) with the modulus of elasticity of the subgrade (Esg), taking into account the geometry of the structure (layers thickness), the mechanical characteristics of each layer material and the constrained capacity of the pavement unbound materials to assume the tensile stresses, induced after the construction of the wearing course.



Αθήνα, Απρίλιος 2003

Με την ολοκλήρωση της παρούσης διπλωματικής εργασίας, μου δίνεται η ευκαιρία να ευχαριστήσω τους κ. κ. Καθηγητές της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών και ιδιαίτερα αυτούς του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, του οποίου την κατεύθυνση ακολούθησα.

Θερμές ευχαριστίες στον Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Ανδρέα Λοΐζο, τόσο για την ανάθεση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, όσο και για την ιδιαίτερη πολύτιμη καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Ειλικρινή αισθήματα ευγνωμοσύνης στο Λέκτορα Ε.Μ.Π. κ. Ματθαίο Καρλαύτη για την πολύτιμη συμβολή του.

Τέλος, θα ήθελα θερμά να ευχαριστήσω την επιστημονική συνεργάτιδα του κ. Λοΐζου κα. Χριστίνα Πλατή, καθώς και την κα. Σάντρα Σαμουηλίδη για την αμέριστη βοήθεια και συμπαράστασή τους.

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΧΟΛΙΑ

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών οδοστρωσίας, και συγκεκριμένα για τις Ελληνικές συνθήκες έργων οδοποιίας, των κοκκωδών υλικών βάσεως και υποβάσεως, εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από το πεδίο των επιβαλλόμενων τάσεων και τη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων, η οποία γενικά θεωρείται μη γραμμική [1].

Το μέτρο ελαστικότητας ( resilient modulus ) των υλικών αυτών υπό συνθήκες τριαξονικής θλίψης προσδιορίζεται είτε από αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών, είτε πολύ συχνά αναλυτικά από καταστατικές σχέσεις, οι οποίες βασίζονται στη μη γραμμική θεώρηση συμπεριφοράς των υλικών αυτών.

Η γνώση όμως του μέτρου ελαστικότητας των στρώσεων από ασύνδετα (κοκκώδη) υλικά είναι απολύτως απαραίτητη προκειμένου στην πράξη να διαστασιολογηθεί ένα οδόστρωμα με τις διεθνώς αποδεκτές, αναλυτικές μεθόδους.

Είναι προφανές ότι κατά την εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας των στρώσεων από κοκκώδη υλικά πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι στην πράξη γίνεται συμπίκνωση επιτόπου του κοκκώδους υλικού πάνω σε μία υποκείμενη στρώση από ασθενέστερο υλικό, όπως συνήθως είναι το έδαφος έδρασης ενός οδοστρώματος. Κατ' επέκταση λοιπόν το μέτρο ελαστικότητας των βάσεων και υποβάσεων από ασύνδετο υλικό επηρεάζεται και από το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους πάνω στο οποίο κατασκευάζονται. Εκ τούτου προκύπτει ότι πρέπει να εξαρτάται και από το πάχος της ίδιας της στρώσης βάσης ή υπόβασης από κοκκώδη αδρανή υλικά..

Είναι σαφές λοιπόν ότι το μέτρο ελαστικότητας των κοκκωδών υλικών βάσεως και υποβάσεως κατά τη διαστασιολόγηση ενός οδοστρώματος διαφέρει από το μέτρο ελαστικότητας των ασύνδετων υλικών που προκύπτει μετά την κατασκευή του οδοστρώματος. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υπερδιαστασιολόγηση συνήθως των οδοστρωμάτων, κάτι το οποίο βαίνει εις βάρος της οικονομικότητας του έργου.

Με την παρούσα Διπλωματική Εργασία γίνεται μια προσπάθεια εκτίμησης του μέτρου ελαστικότητας των κοκκωδών υλικών βάσεως και υποβάσεως μετά την κατασκευή του τελικού ασφαλτοτάπητα κυκλοφορίας λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία του οδοστρώματος, καθώς και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των επιμέρους στρώσεων, που θα αποσκοπεί στην πλέον αξιόπιστη ανάλυση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων.

## **Κεφάλαιο 2**

### **Εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών υλικών οδοστρωσίας**

## 2.1 Εισαγωγή

Οι στρώσεις που υπόκεινται των ασφαλικών στρώσεων λέγονται στρώσεις βάσης και οι στρώσεις που κείνται μεταξύ των στρώσεων βάσης και του υπεδάφους (ή γενικά της υποδομής) λέγονται στρώσεις υπόβασης.

Οι στρώσεις βάσης και υπόβασης μπορούν να κατασκευαστούν από θραυστό λίθινο υλικό, από αμμοχάλικα ρευμάτων ή ορυχείων (κοκκώδη υλικά) αυτούσια ή μετά από μερική θραύση, από μίγματα φυσικών κοκκωδών υλικών (γενικά αναφερομένων ως αδρανών υλικών), από σκωρία υψικάμινων, μίγματα εδάφους-αδρανών και αδρανών επεξεργασμένων με τσιμέντο ή ασφατικό υλικό ή άσβεστο.

Από την ανάλυση της καταπόνησης των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, προκύπτει η σπουδαιότητα του ρόλου της κάθε στρώσης, ανάλογα με το μέγεθος της καταπόνησης και η αναγκαίους ιεραρχημένη ποιότητα των ανωτέρω στρώσεων, με τη σειρά:

Επιφανειακή επίστρωση και ενωτική (ασφατικές στρώσεις)

Στρώσεις βάσης

Στρώσεις υπόβασης

Έδαφος.

Η λειτουργία των στρώσεων αυτών είναι να φέρουν και μεταβιβάσουν τελικά στο έδαφος κατανεμημένες τις καταπονήσεις, ώστε να μπορεί αυτό να τις φέρει.

Στην περίπτωση λοιπόν των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, η βάση υπόκειται σε υψηλές καταπονήσεις και πρέπει γι' αυτό να παρουσιάζει μεγάλη αντοχή, ώστε να ανθίσταται στις υψηλές επαναλαμβανόμενες πιέσεις, που τις επιβάλλει η κυκλοφορία.

Αντίθετα η υπόβαση υπόκειται σε μικρότερες καταπονήσεις, γι' αυτό δεν απαιτείται τόσο μεγάλη αντοχή και έτσι μπορεί να κατασκευαστεί από υλικά χαμηλότερης ποιότητας, που μπορούν να βρεθούν κοντά στον τόπο της κατασκευής.

Οι βάσεις και οι υποβάσεις χρησιμοποιούνται στα εύκαμπτα οδοστρώματα για να αυξήσουν τη φέρουσα ικανότητα αυτών, παρέχοντας πρόσθετη ακαμψία στο σύστημα των πολυστρωματικών οδοστρωμάτων, ώστε να έχουμε μεγαλύτερη κατανομή των φορτίων μέσω των στρώσεων και έτσι να επιτυγχάνεται μικρή καταπόνηση του εδάφους. Πρέπει επίσης οι στρώσεις της βάσης και της υπόβασης να

αντέχουν στις καταπονήσεις που υπόκεινται, ανάλογα με τη θέση της κάθε μιας μέσα στο οδόστρωμα, ώστε να μην υποστούν οι ίδιες μόνιμες παραμορφώσεις (μη ανεκτές) και φθορές κατά τη λειτουργία του οδοστρώματος.

Εκτός από αυτές τις πρωταρχικές απαιτήσεις των στρώσεων βάσεων και υποβάσεων, σαν μελών ενός οδοστρώματος, πρέπει επίσης αυτές οι στρώσεις να παρέχουν τη δυνατότητα αποστράγγισης και μια αυξημένη προστασία από τη δράση του παγετού, όπου αυτό είναι απαραίτητο.

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών οδοστρώσας και συγκεκριμένα για τις Ελληνικές συνθήκες έργων οδοποιίας των κοκκωδών υλικών βάσεως και υποβάσεως (ΠΤΠ 0155 και ΠΤΠ 0150) [2] εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από το πεδίο των επιβαλλόμενων τάσεων και τη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων, η οποία γενικά θεωρείται μη γραμμική [1].

Ακόλουθα παρατίθενται μέθοδοι υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας των υλικών οδοστρώσας σύμφωνα με τη διεθνή πρακτική.

## **2.2 Προσομοιώματα προσδιορισμού της ακαμψίας των υλικών οδοστρώσας για το σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων**

Το 1885, ο Boussinesq [3] δημοσίευσε εκφράσεις για τον υπολογισμό των τάσεων και των μετατοπίσεων σε ένα ελαστικό ημιχώρο υπό σημειακή φόρτιση. Η πιο σύνθετη, πολυστρωματική δομή ενός οδοστρώματος εξετάστηκε αργότερα από τον Burmister το 1943, που παρουσίασε μια αναλυτική λύση για τη δομή ενός οδοστρώματος τριών-στρώσεων [4]. Ο Odemark το 1949 παρουσίασε εκφράσεις που επιτρέπουν το μετασχηματισμό από μαθηματική άποψη μιας πολυστρωματικής δομής σε ελαστικό ημιχώρο [5]. Η εμφάνιση του ψηφιακού υπολογιστή δημιούργησε αργότερα τη δυνατότητα υπολογισμού των τάσεων και παραμορφώσεων σε οποιοδήποτε δεδομένο σημείο ενός γραμμικού ελαστικού πολυστρωματικού οδοστρώματος, χρησιμοποιώντας προγράμματα υπολογιστών όπως το BISAR που δημοσιεύονται το 1975 [6]. Τα προγράμματα υπολογιστών με πεπερασμένα στοιχεία επιτρέπουν ακόμη και τον ακριβέστερο υπολογισμό των τάσεων και των

παραμορφώσεων στα οδοστρώματα, λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμική συμπεριφορά των απεριόριστων ασύνδετων υλικών στο οδόστρωμα. Μια αναλυτική δημοσίευση αυτής της μεθόδου γράφτηκε από τον Duncan et al. το 1969 [7].

Για όλες αυτές τις μεθόδους υπολογισμού των τάσεων και παραμορφώσεων στα οδοστρώματα, οι ιδιότητες των υλικών πρέπει να περιγραφούν από κάποια ουσιαστική εξίσωση. Στην απλούστερη περίπτωση, που είναι η γραμμική ελαστική προσέγγιση, απαιτούνται τιμές για το συντελεστή  $\nu$  του Poisson. Για την εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας των ασύνδετων υλικών συχνά χρησιμοποιούνται εμπειρικές συσχετίσεις μεταξύ του  $E$  και του CBR. Η πιο συχνή χρησιμοποιημένη τιμή για το συντελεστή του Poisson είναι  $\nu=0,35$ . Επίσης αξιώνονται σχέσεις μεταξύ των ασύνδετων υλικών της βάσης και της υπόβασης [8].

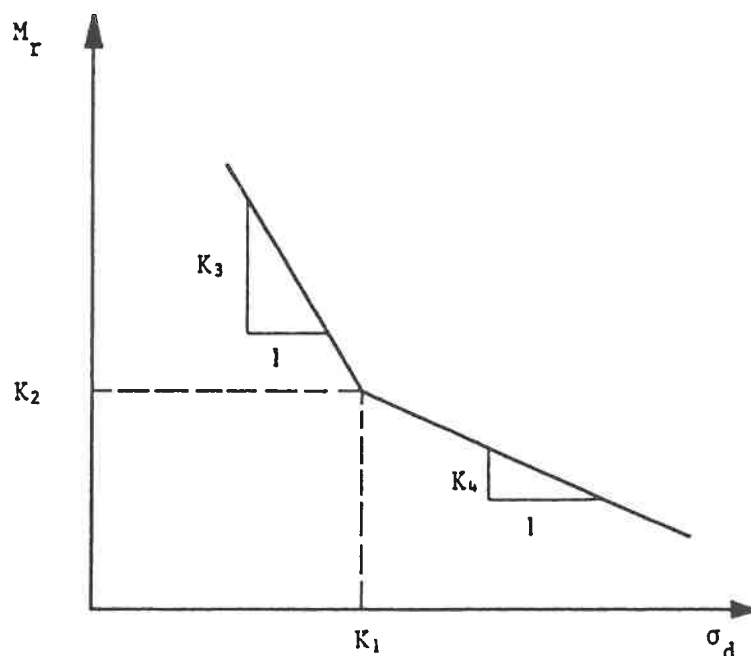
Η διαδεδομένη χρήση της κυκλικής φόρτισης υπό συνθήκες τριαξονικής θλίψεως επιτρέπει στις μέρες μας τον άμεσο προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας των ασύνδετων κοκκωδών υλικών. Έχει αποδειχθεί ότι αυτά τα υλικά δεν παρουσιάζουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Για να αντιμετωπιστεί η μη γραμμική συμπεριφορά, εισήχθη ο όρος «μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης»  $M_r$  ως ο λόγος της επιβαλλόμενης τάσης προς την αναιρέσιμη παραμόρφωση. Σήμερα, το μέτρο ελαστικότητας  $M_r$  χρησιμοποιείται ευρέως σε συνδυασμό με το συντελεστή  $\nu$  του Poisson για να περιγράψει την ελαστική συμπεριφορά των ασύνδετων υλικών.

### 2.3 Μοντέλο $M_r$ - $\theta$

Η παράμετρος που χρησιμοποιείται ευρύτατα σήμερα για να χαρακτηρίσει την ελαστική ακαμψία των αμμοχάλικων και των κοκκωδών υλικών είναι το μέτρο ελαστικότητας  $M_r$ . Εισήχθη από τον Hveem [9], ο οποίος κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η παραμόρφωση τέτοιων υλικών κάτω από παροδική φόρτωση είναι ελαστική, αλλά αυτή η παραμόρφωση επηρεάζεται από παράγοντες που συνήθως δεν συνδέονται με τις ελαστικές ιδιότητες. Επομένως θεώρησε ότι απαιτείται μια ξεχωριστή ορολογία για να περιγράψει την ελαστική συμπεριφορά των αμμοχάλικων και των κοκκωδών υλικών και εισήγαγε τη λέξη «ελαστικότητα», για να περιγράψει τη συμπεριφορά αυτών των υλικών κάτω από τα παροδικά φορτία.



Ο Hveem καθόρισε αρχικά τις ελαστικές ιδιότητες των ασύνδετων υλικών με deflection testing και αργότερα, [10] εισήγαγε το “Resilometer” του για να καθορίσει τις ελαστικές ιδιότητες στο εργαστήριο. Αυτό το Resilometer είναι στην πραγματικότητα ένα κυκλικό φορτίο, έκδοση του Hveem Stabilometer που είχε αναπτυχθεί νωρίτερα. Ο Seed et Al [11] υιοθέτησαν την ορολογία του Hveem για να περιγράψουν τα αποτελέσματα των δοκιμών τριαξονικής θλίψης με κυκλική φόρτιση, καθορίζοντας το μέτρο ελαστικότητας  $M_r$  ως το λόγο της εφαρμοσμένης τάσης προς την προκύπτουσα ανακτήσιμη παραμόρφωση του δείγματος. Τα αποτελέσματα της δοκιμής τους στα αμμοχάλικα έδειξαν ότι το μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων μειώνεται με την τάση σύμφωνα με μια διγραμμική σχέση, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 : Διγραμμική σχέση  $M_r$  και  $\sigma_d$  για αμμοχάλικα [11]

Οι σχέσεις που φαίνονται στο σχήμα μπορούν να εκφραστούν από τους ακόλουθους τύπους [12],[13]:

$$M_r = K_2 + K_3 \cdot (K_1 - \sigma_d) \text{ για } \sigma_d < K_1 \quad (2.1)$$

$$M_r = K_2 + K_4 * (\sigma_d - K_1) \text{ για } \sigma_d > K_1 \quad (2.2)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η διγραμμική σχέση του  $M_r$  σε σχέση με το  $\sigma_d$  στο σχήμα 2.1, αναφέρεται μόνο στην περιοριστική τάση  $\sigma_3$ : μια αύξηση στην περιοριστική τάση θα οδηγήσει σε μια αύξηση στο μέτρο ελαστικότητας.

Για τα κοκκώδη υλικά, ο Monismith et Al [14] επίσης πέτυχαν να αυξήσουν το μέτρο ελαστικότητας με την περιοριστική τάση  $\sigma_3$ . Πρότειναν δε την ακόλουθη σχέση για τα κοκκώδη υλικά:

$$M = K * \sigma_3^n \quad (2.3)$$

όπου

$M_r$  = μέτρο ελαστικότητας

$\sigma_3$  = περιοριστική τάση

$K, n$  = ιδιότητες υλικών

Ο Brown και Pell [15] πρότειναν τη χρήση μιας πιο κατάλληλης τάσης λειτουργίας για να αντιμετωπίσουν το τρισδιάστατο πρόβλημα των κοκκωδών υλικών οδοστρώματων. Έλαβαν τις τιμές ακαμψίας των απεριόριστων κοκκωδών υλικών από τις δοκιμές φορτίων σε οδόστρωμα, πλήρως εξοπλισμένο με όργανα, που είχε χτιστεί σε ένα κοίλωμα δοκιμής. Με τη χάραξη των ληφθεισών τιμών  $M_r$  σε μια διπλή λογαριθμική κλίμακα σε σχέση με την πρώτη τάση που εφαρμόστηκε, βρέθηκε μια ευθύγραμμη σχέση. Η μέθοδος αναπαράστασης τάσης-ακαμψίας για τα απεριόριστα κοκκώδη υλικά έχει γίνει η πλέον τυποποιημένη μέθοδος στη μηχανική των οδοστρώματων. Το σχήμα 2.2 παρουσιάζει μια σχηματική παράσταση της σχέσης, η οποία περιγράφεται από το γνωστό μοντέλο K-θ:

$$M_r = K_1 * \theta^{K_2} \quad (2.4)$$

όπου

$M$  = μέτρο ελαστικότητας

$\theta$  =  $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 2\sigma_3$  (για συνθήκες τριαξονικής δοκιμής)

$K_1, K_2$  = παράμετροι υλικών

Πρέπει να σημειωθεί ότι η εξίσωση 2.4 είναι από μαθητική άποψη ανακριβής, δεδομένου ότι οι διαστάσεις της εξίσωσης δεν μπορούν να αντιστοιχηθούν. Μια σωστή μαθηματική εξίσωση θα μετέτρεπε την παράμετρο πίεσης σε αδιάστατη, διαιρώντας την με μία πίεση αναφοράς  $\theta_0$ , για παράδειγμα, 1kpa. Η εξίσωση 2.4 θα είχε την εξής μορφή:

$$M = K_1 * (\theta / \theta_0)^{K_2} \quad (2.5)$$

όπου

$M_r$  = μέτρο ελαστικότητας (Mpa)

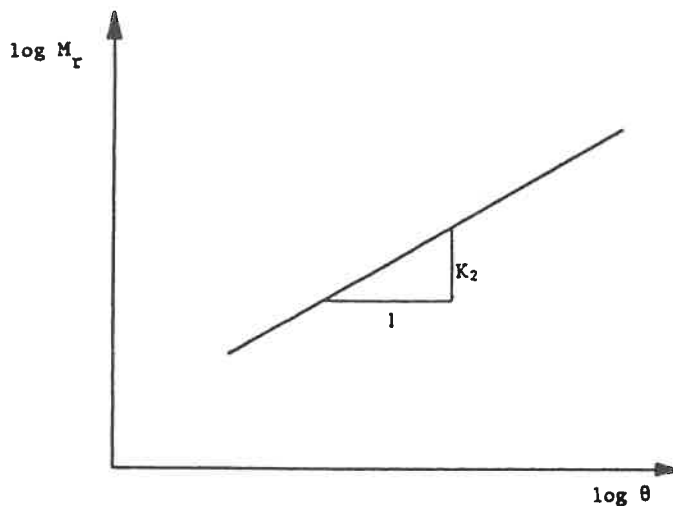
$\theta$  = άθροισμα των κύριων τάσεων (kpa)

$\theta_0$  = τάση αναφοράς = 1 kpa (kpa)

$K_1$  = παράμετρος υλικών (Mpa)

$K_2$  = παράμετρος υλικών (-)

Οι μονάδες για την ακαμψία (MPa) και την τάση (kPa) που χρησιμοποιήθηκαν εδώ επιλέχτηκαν υπό αυτήν τη μορφή, για χάρη της συμμόρφωσης με την πρακτική εφαρμοσμένης μηχανικής.



Σχήμα 2.2 : Κανονική λογαριθμική σχέση  $M_r$  και  $\theta$  για ασύνδετα κοκκώδη υλικά [15]

## 2.4 Μοντέλο E-CBR

Το 1960, ο Heukelom και ο Foster [16] δημοσιεύουν σχέσεις μεταξύ του συντελεστή  $E$  του Young και του CBR των κοκκωδών υλικών. Σε μια θεωρητική ανάλυση, υπολόγισαν τη μετατόπιση κάτω από το CBR-έμβολο χρησιμοποιώντας την εξίσωση Boussinesq για κυκλικό ομοιόμορφο φορτίο σε ένα ελαστικό ημιχώρο. Για αυτήν την πλήρη ελαστική περίπτωση, η CBR-μετατόπιση 0,1 ίντσας (2,54 χιλ.) ταιριάζει με την υπολογισμένη εκτροπή όταν το μέτρο ελαστικότητας ισούται με  $E=1$  CBR ( $E$  σε MPa). Εντούτοις, δεδομένου ότι η CBR-δοκιμή είναι κυρίως πλαστική παραμόρφωση, η πραγματική αξία του συντελεστή πρέπει να είναι αρκετά υψηλότερη. Ο Heukelom και Foster αναγνωρίζουν ότι η αναλογία μεταξύ της πλαστικής και ελαστικής παραμόρφωσης στη δοκιμή CBR ποικίλει αρκετά για διαφορετικά υλικά και επομένως η σχέση μεταξύ του  $E$  και CBR παρουσιάζει ιδιαίτερη ανομοιομορφία.

Συσχετίζοντας πειραματικά στοιχεία του  $E$  και CBR για υλικά ενός ευρέως φάσματος, ο Heukelom και Foster κατέληξαν στην ακόλουθη σχέση:

$$E=11*CBR \quad (2.6)$$

όπου

$E$  = μέτρο ελαστικότητας Young [MPa]

CBR = California Bearing Ratio [%]

Στα πειράματα τους ο συντελεστής 11 ποίκιλε μεταξύ 5 και 20. Πρέπει να σημειωθεί ότι για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων τους ο Heukelom και Foster χρησιμοποίησαν μεθόδους μετάδοσης δονητικού κύματος. Για την δοκιμή των υλικών της υπόβασης, χρησιμοποίησαν έναν βαρύ μηχανικό δονητή και για τα κοκκώδη υλικά της βάσης ένα πολύ ελαφρύ ηλεκτρομαγνητικό δονητή. Η πίεση που εφαρμόστηκε στο στρώμα της βάσης χρησιμοποιώντας τον ελαφρύ δονητή, βεβαίως είναι πολύ χαμηλότερη από τις πιέσεις που προκαλούνται από την πραγματική κυκλοφορία. Δεδομένου ότι τα απεριόριστα ασύνδετα υλικά της βάσης παρουσιάζουν εξάρτηση από την τάση, είναι αμφισβητήσιμο εάν τα εξαγόμενα μέτρα ελαστικότητας αντιπροσωπεύουν την πραγματική ακαμψία των υλικών που ερευνώνται κάτω από την φόρτιση λόγω κυκλοφορίας. Παρά αυτήν την θεμελιώδη ένσταση η εξίσωση 2.6, που στρογγυλεύεται σε  $E=10 \cdot \text{CBR}$ , έχει γίνει σχεδόν αξίωμα στην εφαρμοσμένη μηχανική των οδοστρωμάτων.

Ο Βρετανικός οργανισμός Transport and Road Research Laboratory έχει αναπτύξει μια άλλη σχέση μεταξύ  $E$  και CBR [17]. Ο TRRL βάσισε τη σχέση του σε μια περιεκτική ανάλυση των στοιχείων διάδοσης κυμάτων, αξιοποιώντας μετρήσεις από δοκιμές τριαξονικής θλίψης και επιτόπιες μετρήσεις τάσης-παραμόρφωσης σε πειραματικά οδοστρώματα. Ο TRRL εξίσωση έχει την ακόλουθη μορφή:

$$E=17,6 \cdot (\text{CBR})^{0,64} \quad (2.7)$$

όπου

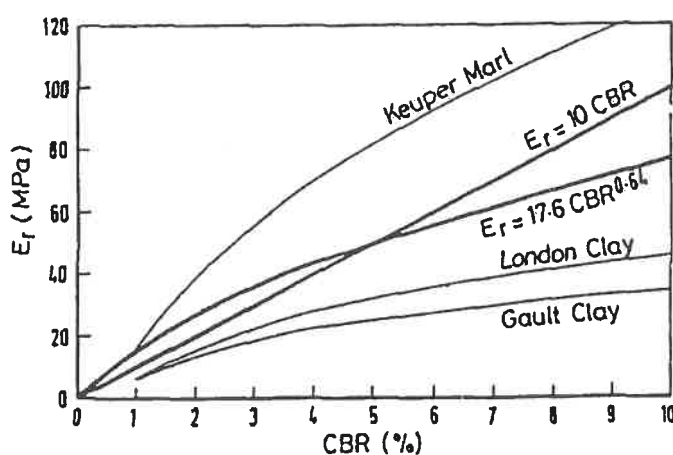
$E$  = μέτρο ελαστικότητας Young [MPa]

CBR = California Bearing Ratio [%]

Πρέπει καλά να σημειωθεί ότι η εξίσωση 2.7, έχει μικρότερη ισχύ και είναι έγκυρη μόνο για  $2\% < \text{CBR} < 12\%$ .

Ο Brown et al [18] έλεγξε την ισχύ της εξίσωσης 2.7 για τρία λεπτά κοκκώδη υλικά με την εκτέλεση τόσο τριαξονικών δοκιμών θλίψης, όσο και δοκιμών CBR. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε διαποτισμένα και μερικώς διαποτισμένα δείγματα, εξάγοντας με αυτόν τον τρόπο την ακαμψία και τις τιμές CBR για κάθε υλικό. Όπως αναμενόταν, η δοκιμή τριαξονικής θλίψης των υλικών παρήγαγε τιμές ακαμψίας εξαρτώμενες από την τάση.

Εάν κάποιος επιθυμεί να χαρακτηρίσει την ελαστική ακαμψία ενός απεριόριστου υλικού με μια ενιαία αξία οπωσδήποτε, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η ελαστική ακαμψία από τη δοκιμή τριαξονικής θλίψης, σε επίπεδο τάσης αντιπροσωπευτικό εκείνου του επιτόπιου. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε από τον Brown et al. Το σχήμα 2.3 παρουσιάζει το μέτρο ελαστικότητας των δειγμάτων σε τάση 40 kPa (που εκφράζεται ως  $E_r$ ) σε συνάρτηση με το CBR, μαζί με τις δύο γνωστές σχέσεις E-CBR. Από αυτά τα αποτελέσματα ο Brown et al. κατέληξε στο συμπέρασμα ότι αυτές οι σχέσεις παρέχουν μια εκτίμηση του αναμενόμενου μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων, παρόλο που η εξίσωση TRRL έχει σωστή μορφή.



Σχήμα 2.3 : Σχέση μεταξύ ακαμψίας και CBR για τάση 40 Kpa [18]

Όπου οι σχέσεις E-CBR παρέχουν μόνο έναν «τραχύ» οδηγό για την ακαμψία των αμμοχάλικων, η χρήση τέτοιων σχέσεων για τα χονδρόκοκκα βαθμολογημένα κοκκώδη υλικά, παραδείγματος χάριν, μιας διαβάθμισης 0/40 χιλ. περιλαμβάνει ακόμα ένα πρόβλημα. Ο προσδιορισμός του CBR για αυτά τα υλικά δεν μπορεί να επιτευχθεί, λόγω του περιορισμένου μεγέθους της φόρμας εμβόλων CBR. Δεδομένου ότι τα χονδροειδή μόρια συμβάλλουν σημαντικά στην ακαμψία, το μέτρο CBR που καθορίζεται, παραδείγματος χάριν, για το υλικό που περνά από το κόσκινο 19 χιλ., μπορεί μόνο να είναι ένα πολύ τραχύ μέτρο της ελαστικής ακαμψίας του υλικού 0/40 χιλ.

## 2.5 Μοντέλο $E_2$ - $E_3$

Η χρήση μιας ενιαίας τιμής του μέτρου ελαστικότητας E για ένα ολόκληρο στρώμα απεριόριστου υλικού θεωρητικά δεν είναι σωστή. Η ακαμψία των κοκκωδών υλικών εξαρτάται από την τάση και δεδομένου ότι η τάση ποικίλλει καθ' όλο το στρώμα, η τιμή του E θα ποικίλλει επίσης. Λαμβάνοντας υπόψη αυτήν την εξάρτηση από την πίεση, απαιτείται πολύ λεπτομερής υπολογιστική εργασία, η οποία δεν είναι βεβαίως αυτή την περίοδο ακόμα κατάλληλη για καθημερινή χρήση. Για πρακτικούς λόγους, μια ενιαία τιμή του μέτρου ελαστικότητας E για ολόκληρη την κοκκώδη βάση μπορεί να χρησιμοποιηθεί, δεδομένου ότι το κύριο δομικό στοιχείο του οδοστρώματος διαμορφώνεται από τις ασφαλτικές στρώσεις.

Στο έγγραφο τους για τις σχέσεις E-CBR ο Heukelom και Foster παρουσιάζουν επίσης από τις μετρήσεις τους ότι η αναλογία του μέτρου ελαστικότητας ενός απεριόριστου στρώματος βάσης  $E_2$  με αυτό του υποκείμενου στρώματος  $E_3$  περιορίζεται σε  $E_2/E_3 < 2,5$  [16]. Η πρακτική εξήγηση που δόθηκε γι' αυτό είναι ότι μια κοκκώδης βάση δεν μπορεί να συμπιεστεί κατάλληλα σε μαλακή υπόβαση και ότι, επομένως, το μέτρο του  $E_2$  της βάσης εξαρτάται κατά ένα μεγάλο μέρος από το μέτρο  $E_3$  της υπόβασης. Σε ένα πιο πρόσφατο έγγραφο, αυτή η πρακτική εξήγηση υποστηρίχτηκε από θεωρητικές εκτιμήσεις [19]. Υπολογίζοντας τις τάσεις στο κατώτερο σημείο του απεριόριστου στρώματος βάσης για αναλογίες  $E_2/E_3$  πάνω από 2,4, βρέθηκαν εφελκυστικές τάσεις υπό την επίδραση του κυλίνδρου συμπίεσης. Η

εμφάνιση εφελκυστικών τάσεων όπως αναμενόταν θα οδηγούσε σε αποσταθεροποίηση του στρώματος βάσεων και έτσι μια μείωση της ακαμψίας, μέχρις ότου οι εφελκυστικές τάσεις δεν ήταν πλέον εμφανείς, κρίθηκε αναγκαία.

Αν και ο πρακτικός συλλογισμός της μη δυνατότητας συμπύκνωσης ενός απεριόριστου στρώματος βάσης σε μια πολύ αδύνατη υπόβαση ισχύει βεβαίως, ο αριθμητικός περιορισμός η αναλογία  $E_2/E_3$  να μην ξεπερνά το 2,5 δεν ισχύει. Τα μέτρα ελαστικότητας της βάσης  $E_2$  που εξάχθηκαν από τον Heukelom και τον Foster προήλθαν από δυναμικές μετρήσεις σε πολύ χαμηλά επίπεδα τάσης και επομένως δεν είναι αντιπροσωπευτικά του μέτρου ελαστικότητας κάτω από συνθήκες κυκλοφορίας. Για τον υπολογισμό των τάσεων στην βάση από κοκκώδη υλικά χρησιμοποίησαν τη γραμμική ελαστική θεωρία, η οποία αποδείχθηκε αργότερα ακατάλληλη για εκείνο τον σκοπό [20].

Η Shell Pavement Design Manual [8] επίσης χρησιμοποιεί την έννοια των σχέσεων  $E_2/E_3$ . Διατείνεται ότι το μέτρο ελαστικότητας των απεριόριστων στρωμάτων βάσεων και υποβάσεων εξαρτάται από το πάχος τους και το μέτρο ελαστικότητας της υπόβασης, σύμφωνα με τη σχέση που προτάθηκε από τους Dormon και Metcalf:

$$E_2 = k \cdot E_3 \quad \text{με } k = 0.2 \cdot h_2^{0.45} \text{ και } 2 < k < 4 \quad (2.8)$$

όπου

$E_2$  = μέτρο ελαστικότητας βάσης [MPa]

$E_3$  = μέτρο ελαστικότητας υπόβασης [MPa]

$H_2$  = πάχος του στρώματος βάσεων [mm]

Ο Brown και ο Pappin [20] εκτέλεσαν μια μη γραμμική πεπερασμένη ανάλυση στοιχείων από ένα ευρύ φάσμα κατηγοριών οδοστρωμάτων, χρησιμοποιώντας το αποκαλούμενο “counter model” για να περιγράψουν τη μη γραμμική σχέση τάσης-παραμόρφωσης των κοκκωδών υλικών των οδοστρωμάτων. Από αυτήν τη γραμμική ανάλυση, προσδιόρισαν τις τιμές για ένα «ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας  $E_2$ », το οποίο όταν χρησιμοποιείται ως είσοδος στους υπολογισμούς BIST, παρήγαγε τις ίδιες



κρίσιμες τιμές σχεδιασμού, όπως η εφελκυστική τάση της ασφαλικής στρώσης με μη γραμμικούς υπολογισμούς. Οι υπολογισμοί εκτελέστηκαν για ένα ευρύ φάσμα του μέτρου ελαστικότητας της υπόβασης  $E_3$ . Το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας της κοκκώδους βάσης  $E_2$  αποδεικνύεται ότι είναι σταθερό για ένα δεδομένο υλικό βάσης και ως εκ τούτου, δεν εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας της υπόβασης  $E_3$ . χρησιμοποιώντας σταθερό  $E_2$  και μεταβάλλοντας το  $E_3$ , η αναλογία αυτών των δύο παραμέτρων κυμάνθηκε μεταξύ  $1.5 \leq E_2/E_3 \leq 7.5$ , δείχνοντας ότι το εύρος διακύμανσης  $E_2/E_3$  από την εξίσωση 2.10 είναι πάρα πολύ «στενό».

## 2.6 Μέθοδος μέτρησης CBR στο εργαστήριο

### α) Συμπύκνωση δοκιμίου

Το εδαφικό υλικό, αφού κονιορτοποιηθεί (να μην υπάρχουν σβώλοι), θα πρέπει όλο να διέρχεται από το κόσκινο 19.0 mm. Στην περίπτωση που το συγκρατούμενο ποσοστό στο κόσκινο 19.0 mm είναι μεγαλύτερο του 10 %, τότε είναι σκόπιμο να αντικατασταθεί το ποσοστό του χονδρόκοκκου υλικού (διερχόμενο του 50 mm και συγκρατούμενο στο 19 mm) με ισοβαρές υλικό, από το ίδιο εδαφικό υλικό, το οποίο διέρχεται από το κόσκινο 19.0 mm και συγκρατείται στο κόσκινο 4.75 mm. Η αντικατάσταση αυτή κρίνεται αναγκαία για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων στην περίπτωση που τα εδαφικά υλικά είναι χονδρόκοκκα [21].

Επαρκής ποσότητα εδαφικού υλικού, περίπου 35 kg συνολικά, έχοντας τη συγκεκριμένη υγρασία για βέλτιστη συμπύκνωση, όπως καθορίστηκε από τη μέθοδο Proctor, τοποθετείται σε ειδικές κυλινδρικές μεταλλικές μήτρες (διαμέτρου 152.4 mm και ύψους 177.8 mm) και συμπυκνώνεται με κόπανο όμοιο με αυτόν που χρησιμοποιείται κατά την πρότυπη δοκιμή συμπύκνωσης κατά Proctor (βάρος κοπάνου 2.49 kg, κυκλικής διατομής διαμέτρου 50.8 mm και ύψους πτώσεως 304.8 mm). Η συμπύκνωση του δοκιμίου γίνεται σε τρεις ισόπαχες στρώσεις, έτσι ώστε το τελικό πάχος του συμπυκνωμένου εδαφικού δοκιμίου να είναι περίπου 127 mm. Η κάθε στρώση δέχεται έναν ορισμένο αριθμό κτύπων. Ο αριθμός των κτύπων, ο ίδιος για κάθε στρώση, καθορίζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να επιτευχθεί ανά δοκίμιο

πυκνότητα λίγο μικρότερη και λίγο μεγαλύτερη από τη μέγιστη πυκνότητα κατά Proctor. Συνήθως χρησιμοποιούνται 10, 30 και 65 κτύποι για τρία διαφορετικά δοκίμια.

*β) Υδρεμποτισμός*

Μετά τη συμπίκνωση, αφού απομακρυνθεί ο μεταλλικός δακτύλιος προέκτασης, το εδαφικό υλικό που συμπυκνώθηκε επιπεδώνεται με αιχμηρό αντικείμενο (μαχαίρι ή σπάτουλα) στο ύψος της μήτρας. Κατόπιν το εδαφικό δοκίμιο με τη μεταλλική μήτρα αναστρέφεται, επανατοποθετείται και στερεώνεται στην ειδική διάτρητη βάση (στην διεπιφάνεια της διάτρητης βάσης και του εδαφικού δοκιμίου τοποθετείται διηθητικός χάρτης). Μέσα στη μήτρα και επί του συμπυκνωμένου εδαφικού υλικού τοποθετούνται επαρκή δακτυλιοειδή βάρη (συνήθως τρία) για την προσομοίωση του βάρους των υπερκείμενων στρώσεων και όλα μαζί εμβαπτίζονται σε νερό (η στάθμη του νερού είναι πάνω από την επιφάνεια του δοκιμίου κατά 25 mm). Αμέσως επί της μήτρας τοποθετείται ειδικός τρίποδας με μηκυνσιόμετρο, λαμβάνεται η αρχική ένδειξη αυτού και το όλο σύστημα αφήνεται αδιατάρακτο για 96 ώρες. Μετά την πάροδο των 96 ωρών υδρεμποτισμού και αφού ληφθεί η τελική ένδειξη του μηκυνσιόμετρου, το όλο σύστημα απομακρύνεται από το υδρόλουτρο, αφαιρούνται ο τρίποδας και τα βάρη και το δοκίμιο αφήνεται για 15 λεπτά να στραγγίσει. Μετά το πέρας αυτού του χρονικού διαστήματος το συμπυκνωμένο εδαφικό δοκίμιο είναι έτοιμο να υποβληθεί στη δοκιμή καθορισμού του CBR. Από τις μετρήσεις του μηκυνσιόμετρου (αρχική και τελική ένδειξη) καθορίζεται το ποσοστό διόγκωσης του εδαφικού υλικού.

*γ) Επιβολή φορτίου-μέτρηση διείδυσης*

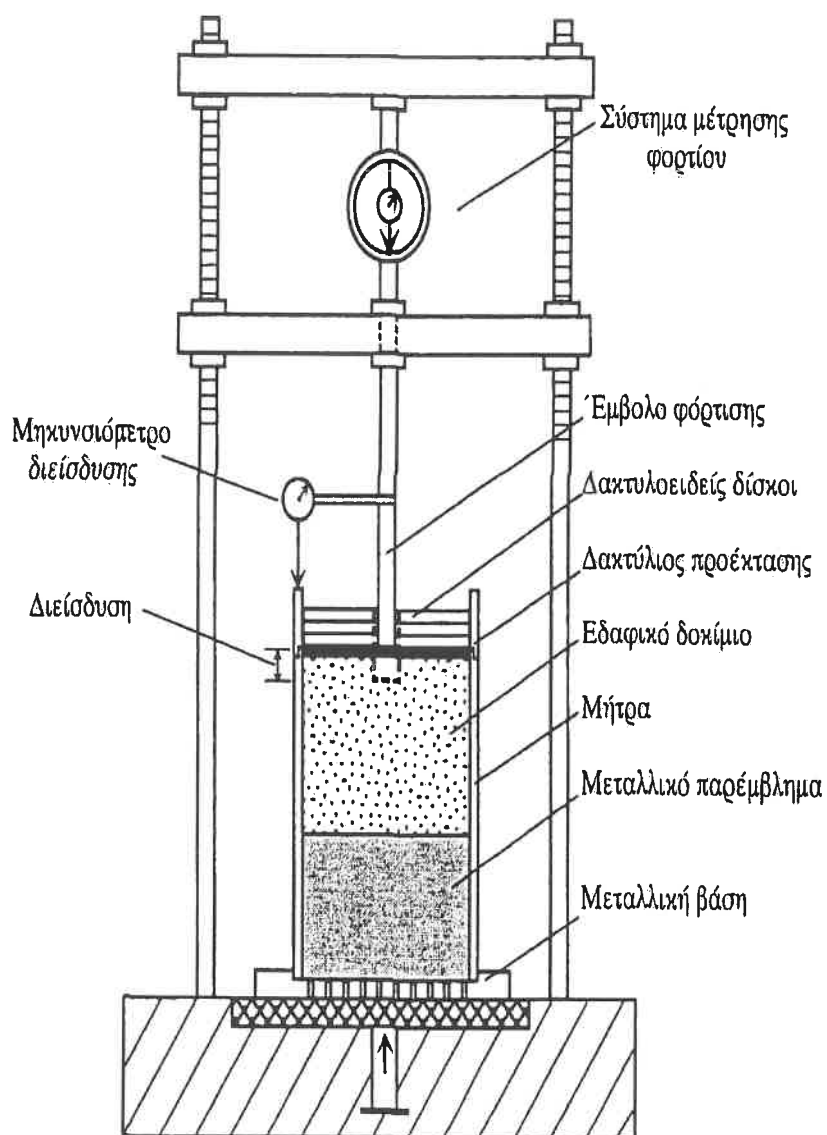
Το συμπυκνωμένο και υγρό εδαφικό δοκίμιο τοποθετείται στη συσκευή CBR αφού προηγουμένως επανατοποθετούν επ' αυτού τα δακτυλιοειδή βάρη (μεταλλικοί δίσκοι 2.26 kgf ο καθένας, με κυκλική οπή διαμέτρου μεγαλύτερης από τη διάμετρο του εμβόλου επιβολής του φορτίου). Η συσκευή επιβάλλει αυστηρά αυξανόμενο

θλιπτικό φορτίο διαμέσου κυλινδρικού εμβόλου (διαμέτρου 49.63 mm), με ταχύτητα διείσδυσης (1.3 mm/min). Το έμβολο διεισδύσεως της συσκευής αφήνεται να έρθει σε επαφή με την επιφάνεια του δοκιμίου, μηδενίζονται οι ενδείξεις των οργάνων μέτρησης της διείσδυσης και του φορτίου και αρχίζει η επιβολή του φορτίου. Σε τακτά διαστήματα βάθους διείσδυσης λαμβάνονται και καταγράφονται οι αντίστοιχες ενδείξεις φορτίου. Η φόρτιση σταματά όταν έχει επιτευχθεί διείσδυση περίπου 8.0 mm. Τυπική διάταξη της συσκευής CBR δίνεται στο σχήμα 2.4.

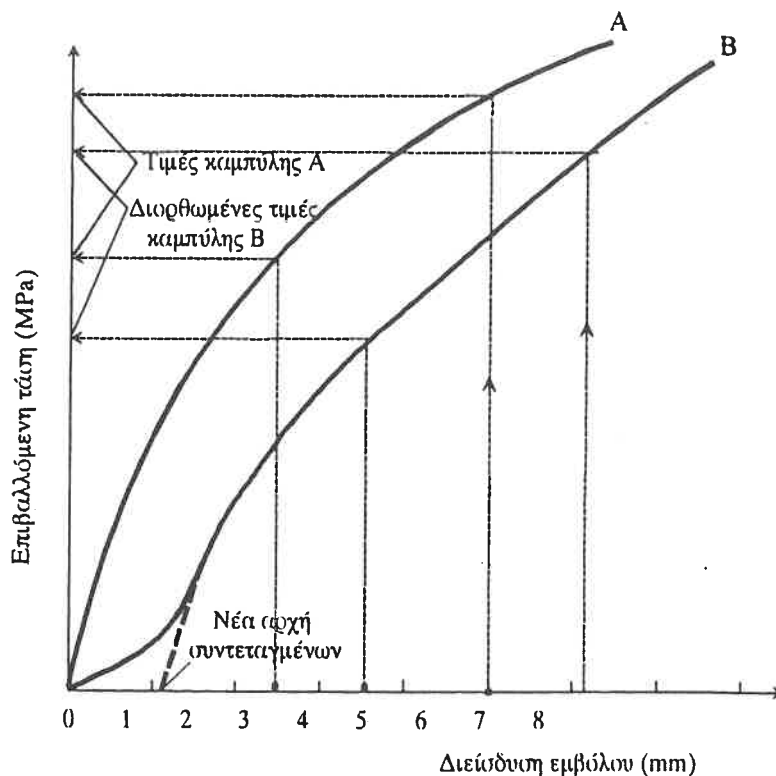
δ) *Υπολογισμός του CBR*

Τα ζεύγη τιμών (διείσδυση εμβόλου και επιβαλλόμενο φορτίο) ή (διείσδυση εμβόλου και επιβαλλόμενη τάση) τοποθετούνται σε γραμμικές συντεταγμένες και λαμβάνεται καμπύλη της μορφής A ή B, Σχήμα 2.5. Οι καμπύλες του σχήματος 2.5 είναι συναρτήσεις της επιβαλλόμενης τάσης, η οποία υπολογίστηκε από τη θεμελιώδη εξίσωση: τάση = φορτίο / επιφάνεια (η επιφάνεια είναι ίση με την επιφάνεια διατομής του εμβόλου, δηλαδή  $1935.2 \text{ mm}^2$ ). Η επιβαλλόμενη τάση είναι ουσιαστικά ίση με την αντίσταση σε διείσδυση.

Εάν επιτευχθεί καμπύλη της μορφής A, δεν απαιτείται καμία διόρθωση αυτής. Εάν επιτευχθεί καμπύλη B, δηλαδή η καμπύλη να είναι κοίλη προς τα πάνω στο αρχικό διάστημα φόρτισης, τότε απαιτείται διόρθωση αυτής. Η διόρθωση της καμπύλης συνίσταται στον επαναπροσδιορισμό της αρχής των συντεταγμένων (δηλαδή το ζεύγος 0,0). Η νέα θέση της αρχής των συντεταγμένων καθορίζεται από το σημείο τομής της προέκτασης του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης με τον άξονα των τεταγμένων, Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.4 : Συσκευή CBR [21]



Σχήμα 2.5 : Διάγραμμα υπολογισμού CBR [21]

Από την καμπύλη A ή την καμπύλη B, μετά τη διόρθωση, καθορίζονται οι επιβαλλόμενες τάσεις για να προκληθεί διείσδυση 2.5mm και 5.0mm αντίστοιχα. Ο Καλιφορνιακός δείκτης CBR υπολογίζεται, σύμφωνα με τον ορισμό που προαναφέρθηκε, από τη σχέση:

$$\text{CBR} = [(\text{τάση για } 2.5 \text{ ή } 5.0\text{mm διείσδυση}) / (6.89 \text{ ή } 10.34)] \times 100 \quad (2.9)$$

όπου 6.89 ή 10.34 η επιβαλλόμενη τάση σε MPa που προκαλεί διείσδυση εμβόλου σε πρότυπο υλικό, μεγέθους 2.5mm ή 5.0mm, αντίστοιχα.

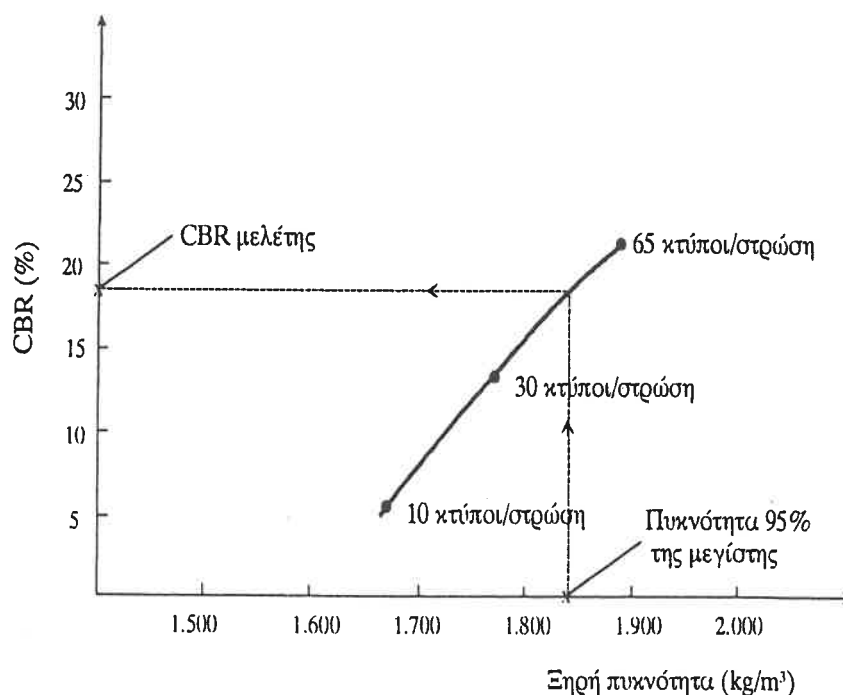
Η τιμή του CBR είναι αυτή που αντιστοιχεί σε διείσδυση 2.5mm, εφ' όσον η τιμή που λαμβάνεται είναι μεγαλύτερη αυτής που αντιστοιχεί σε διείσδυση 5.0 mm. Σε αντίθετη περίπτωση η δοκιμή επαναλαμβάνεται. Εάν η δοκιμή επαλήθευσης δώσει και πάλι το ίδιο αποτέλεσμα τότε και μόνο τότε ως CBR λαμβάνεται η τιμή που αντιστοιχεί σε διείσδυση 5.0mm.

Τα αποτελέσματα εκφράζονται συνήθως, σε ακέραιους αριθμούς εφ' όσον το CBR λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του 10% και με ένα δεκαδικό εφ' όσον το CBR λαμβάνει τιμές μικρότερες του 10%.

Τα ίδια ακριβώς με όλα τα παραπάνω ισχύουν εάν αντί της τάσης χρησιμοποιείται το επιβαλλόμενο φορτίο. Στην περίπτωση όμως αυτή η διαίρεση του επιβαλλόμενου φορτίου θα γινόταν με την τιμή του τυπικού φορτίου 13345N ή 20017 N, που αντιστοιχεί σε διείσδυση 2.5mm ή 5.0mm αντίστοιχα.

ε) *Καθορισμός CBR μελέτης*

Ακολουθώντας την προδιαγραφή, το CBR μελέτης καθορίζεται από τη σχέση CBR και ξηρής πυκνότητας συμπυκνωμένου εδαφικού υλικού. Τα αποτελέσματα των τριών τουλάχιστον δοκιμών που συμπυκνώθηκαν με διαφορετικούς κτύπους και συνεπώς έχουν διαφορετική πυκνότητα, αναπαρίστανται γραφικά όπως στο σχήμα 2.6. Από την καμπύλη που ορίζεται, ως CBR μελέτης λαμβάνεται η τιμή που αντιστοιχεί σε πυκνότητα ίση με το 95% της μέγιστης πυκνότητας κατά Proctor (πρότυπη μέθοδος).



Σχήμα 2.6 : Καθορισμός CBR μελέτης [21]

### ζ) Παραλλαγές στη μέτρηση του CBR

Ορισμένες χώρες δεν ακολουθούν πλήρως την προαναφερθείσα μεθοδολογία μέτρησης του CBR. Οι αποκλίσεις κυρίως εστιάζονται στην υγρασία που χρησιμοποιείται κατά τη συμπίκνωση των δοκιμίων, στη μη υποβολή των δοκιμίων σε υδρεμποτισμό πριν τον έλεγχο της διείσδυσης και στον τρόπο συμπίκνωσης (στατική συμπίκνωση έναντι της δυναμικής συμπίκνωσης).

Η υγρασία συμπίκνωσης στις περιπτώσεις αυτές δεν είναι η βέλτιστη για μέγιστη πυκνότητα, αλλά η υγρασία στην οποία θα βρίσκεται το υπέδαφος κατά την κατασκευή ή κάποια μέση αντιπροσωπευτική υγρασία του εδάφους. Αυτό έχει συνήθως ως επακόλουθο τα δοκίμια να μην υπόκεινται σε υδρεμποτισμό πριν τη δοκιμή διείσδυσης. Η σχεδιαστική τιμή του CBR στην περίπτωση αυτή καθορίζεται από την σχέση CBR και υγρασίας. Ως σχεδιαστική τιμή λαμβάνεται αυτή που αντιστοιχεί στη μέγιστη πιθανή υγρασία στην οποία θα βρεθεί το υπέδαφος καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του οδοστρώματος.

Η χρήση στατικής συμπίκνωσης έναντι της δυναμικής, εκτός του γεγονότος ότι απαιτεί λιγότερη χειρωνακτική δουλειά, έχει το πλεονέκτημα ότι τα δοκίμια μπορούν να συμπτυκνωθούν στην επιθυμητή ξηρή πυκνότητα επακριβώς και δίχως αυτή να χρειαστεί να καθοριστεί με άλλο προκαταρκτικό έλεγχο. Βεβαίως, μειονέκτημα αυτού του τρόπου συμπίκνωσης είναι η πολύ πιθανή ανομοιομορφία της πυκνότητας του δοκιμίου συναρτήσει του βάθους του.

Συνεπώς, οποιαδήποτε μέθοδος συμπίκνωσης και τρόπος καθορισμού της σχεδιαστικής τιμής CBR χρησιμοποιηθεί, θα πρέπει να αναφέρεται ρητά στη μελέτη έτσι ώστε να είναι δυνατός σε μεταγενέστερο χρόνο ο έλεγχος του CBR κατά την κατασκευή του έργου.

## 2.7 Μέτρηση CBR εδάφους «επί του έργου»

Το CBR του συμπυκνωμένου υπεδάφους ή και της εδαφικής στρώσης (υπόβαση και βάση) μπορεί να μετρηθεί και «επί του έργου». Το γεγονός αυτό παρέχει τη δυνατότητα στο μηχανικό να εξάγει γρήγορα αποτελέσματα και συμπεράσματα, δεδομένου ότι για τον καθορισμό του CBR στο εργαστήριο απαιτούνται τουλάχιστον 24 ώρες.

Η συσκευή που χρησιμοποιείται είναι παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται στο εργαστήριο με μόνη τη διαφορά ότι η επιβολή του ρυθμού διείσδυσης γίνεται χειροκίνητα και απαιτείται η χρήση οχήματος (συνήθως) για να επιτευχθεί η αντίδραση για την επιβολή του φορτίου. Όλη η διαδικασία εκτέλεσης της δοκιμής και η εξαγωγή του αποτελέσματος είναι ακριβώς όπως και στο εργαστήριο.

Βασική παρατήρηση μεταξύ των τιμών που λαμβάνονται στο εργαστήριο και «επί του έργου» είναι ότι αυτές πάντοτε διαφέρουν. Λόγω του περιορισμού που επιβάλλει η μεταλλική μήτρα στο εδαφικό υλικό, οι τιμές που λαμβάνονται στο εργαστήριο είναι συνήθως μεγαλύτερες από αυτές που λαμβάνονται «επί του έργου» για τον ίδιο βαθμό συμπύκνωσης και ποσοστό υγρασίας. Οι διαφορές που παρατηρούνται είναι περισσότερο έντονες στα κοκκώδη εδαφικά υλικά. Έτσι λοιπόν ο μηχανικός εκτελώντας εργαστηριακούς και «επί του έργου» ελέγχους θα πρέπει εκ των προτέρων να καθορίσει τη σχέση που υφίσταται μεταξύ εργαστηριακών τιμών και τιμών που λαμβάνονται στο έργο, για το συγκεκριμένο εδαφικό υλικό. Μόνο έτσι θα είναι απόλυτα σίγουρος για τις τιμές που πρέπει να λαμβάνει στο έργο ή στο εργαστήριο. Στον πίνακα 2.1 δίνονται συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ εργαστηριακών και επί του έργου δοκιμών για διάφορα εδαφικά υλικά.

Επίσης, θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο καθορισμός του CBR «επί του έργου» των χονδρόκοκκων εδαφικών υλικών (συγκρατούμενων στο κόσκινο 19.0mm) θα πρέπει να αποφεύγεται, διότι οι διαστάσεις των κόκκων σε σχέση με τη διάμετρο του εμβόλου επηρεάζουν το αποτέλεσμα. Η απομάκρυνση και αντικατάσταση του ποσοστού των χονδρόκοκκων, όπως γίνεται στο εργαστήριο, δεν είναι εφικτή διότι θα διαταραχθεί η συμπύκνωση της στρώσης.



| Τύποι εδαφικών υλικών    | Ξηρή πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> ) | Ποσοστό Υγρασίας (%) | Τιμές CBR (%) |               |
|--------------------------|-------------------------------------|----------------------|---------------|---------------|
|                          |                                     |                      | Εργαστηριακές | Επί του έργου |
| Άργιλος (LL=69, PL=27)   | 1522                                | 24.8                 | 8.9           | 7.9           |
| Άργιλος (59, 23)         | 1538                                | 25.1                 | 3.9           | 3.0           |
| Ιλυώδης άργιλος (37, 23) | 1746                                | 19.5                 | 2.0           | 1.2           |
|                          | 1714                                | 19.0                 | 5.0           | 1.1           |
|                          | 1666                                | 16.1                 | 2.2           | 2.2           |
| Αμμώδης άργιλος (30,18)  | 1522                                | 19.2                 | 2.2           | 3.1           |
| Αργιλώδης άμμος          | 1858                                | 12.2                 | 14            | 7.0           |
|                          | 1826                                | 12.6                 | 10            | 9.0           |
|                          | 1746                                | 10.0                 | 12            | 18.0          |
| Μονόκοκκη άμμος          | 1750                                | 8.0                  | 24            | 7.5           |
| Θραυστή σκωρία           | 2243                                | 4.8                  | 41            | 44            |

Πίνακας 2.1 : Σύγκριση τιμών CBR από εργαστηριακές και επί του έργου δοκιμές [21]

## **Κεφάλαιο 3**

### **Ψευδοεφελκυστική αντοχή αμμοχάλικων**

### 3.1 Θεωρία ψευδοεφελκυστικής αντοχής αμμοχάλικων

Πρόσφατες έρευνες θέτουν σε αμφιβολία την αξιοπιστία ή ακρίβεια της σχέσεως (2.8) ιδιαίτερα ως προς το γεγονός ότι δεν μπορεί να προβλέψει την μείωση του μέτρου ελαστικότητας  $E_{gr}$  για σταθερή πλευρική πίεση και αυξανόμενη κατακόρυφη ανηγμένη παραμόρφωση [22].

Στο πλαίσιο των ανωτέρω προβληματισμών εντάσσεται η παρούσα εργασία, η οποία συμβάλλει στο πρόβλημα με την δημιουργία μιας εναλλακτικής πρότασης ως προς την σχέση (2.8) για την πλέον αξιόπιστη ανάλυση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων.

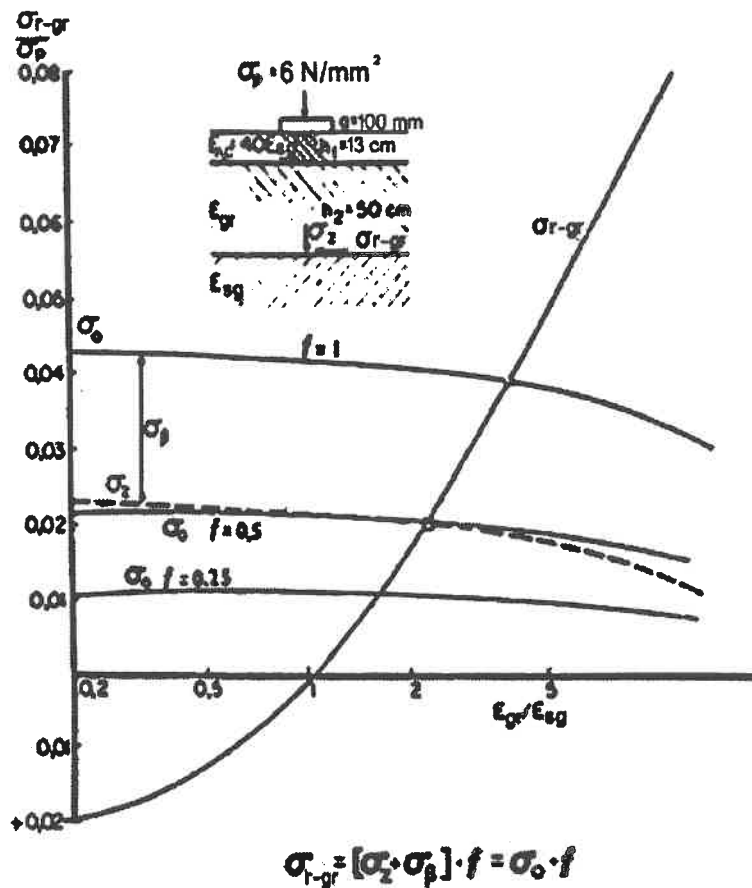
Με την ανάλυση διαφόρων συστημάτων επαλλήλων στρώσεων είναι δυνατόν να διερευνηθεί η επιρροή των διαφόρων παραμέτρων, όπως είναι τα πάχη των στρώσεων ενός οδοστρώματος, τα μέτρα ελαστικότητας των υλικών των αντιστοίχων στρώσεων κ.α., στις αναπτυσσόμενες τάσεις και παραμορφώσεις [1]. Μια τέτοια ανάλυση ευαισθησίας είναι πάρα πολύ χρήσιμη, γιατί διευκολύνει στην απόκτηση μιας καλύτερης εικόνας της εντατικής κατάστασης ενός οδοστρώματος.

Στο σχήμα 3.1 αναλύεται η κατανομή των τάσεων λόγω μιας φόρτισης με τη βοήθεια της θεωρίας των πολλαπλών επάλληλων στρώσεων για μια τυπική διατομή ενός στατικού προτύπου προσομοίωσης της συμπεριφοράς ενός εύκαμπτου οδοστρώματος [1].

Από την γραφική παράσταση προκύπτει σαφώς η επίδραση του μέτρου ελαστικότητας  $E_{gr}$  του ασύνδετου κοκκώδους υλικού και κατ' επέκταση του λόγου  $E_{gr}/E_{sg}$  στις αναπτυσσόμενες οριζόντιες τάσεις ( $\sigma_{r-gr}$ ) στον πυθμένα της δεύτερης στρώσης δηλαδή από αμμοχάλικο. Παρατηρείται ότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις  $\sigma_{r-gr}$  είναι θλιπτικές  $E_{gr} < E_{sg}$ , μηδενίζονται για  $E_{gr} = E_{sg}$  και στη συνέχεια γίνονται εφελκυστικές για  $E_{gr} > E_{sg}$ . Η μεταβολή αυτή έχει μεγάλη σημασία στη μηχανική συμπεριφορά των υλικών που συνθέτουν την δεύτερη στρώση από ασύνδετο κοκκώδες υλικό.

Για συνήθη υλικά της δεύτερης στρώσης (αμμοχάλικου), τα οποία δεν μπορούν να αναλάβουν τις εφελκυστικές τάσεις, όπως προκύπτουν από το σχήμα 3.1, οι τιμές

του μέτρου ελαστικότητας  $E_{gr}$  δεν μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από τις τιμές  $E_{sg}$ , δηλαδή του μέτρου ελαστικότητας του υλικού της εδαφικής στρώσης.



Σχήμα 3.1 : Επίδραση του μέτρου ελαστικότητας  $E_{gr}$  και του λόγου  $E_{gr}/E_{sg}$  στις αναπτυσσόμενες τάσεις  $\sigma_r$

Στην πραγματικότητα όμως το ασύνδετο υλικό μπορεί να αναλάβει μικρές μόνο τάσεις εφελκυσμού, χάρη στις τριβές που αναπτύσσονται λόγω της αλληλοεμπλοκής των κόκκων.

Όταν όμως οι τάσεις εφελκυσμού ( $\sigma_{r-gr}$ ) λάβουν τιμές μεγαλύτερες των τάσεων που μπορούν να αναληφθούν λόγω τριβής ( $\sigma_{tr}$ ), οι οποίες αναπτύσσονται μεταξύ των κόκκων του αμμοχάλικου λόγω του ίδιου βάρους των υπερκείμενων στρώσεων ( $\sigma_b$ ) και των φορτίων των τροχών ( $\sigma_z$ ), τότε η ισορροπία καταλύεται, επέρχεται απομάκρυνση των κόκκων μεταξύ τους και κατά συνέπεια αποσυμπύκνωση των υλικών. Επομένως μειώνεται η φέρουσα ικανότητα των αμμοχάλικων και επέρχεται σταδιακά αστοχία του υλικού με αρνητικές επιπτώσεις στην λειτουργική συμπεριφορά του συνόλου του οδοστρώματος.

Σύμφωνα με παλαιότερες έρευνες όπως αναφέρεται από Ullidtz,[1] και Gerlach et al, [23] είναι σημαντική η συμβολή στην «περιορισμένη» εφελκυστική ικανότητα αυτών των υλικών η αλληλοεμπλοκή των κόκκων λόγω της βέλτιστης συμπύκνωσης τους. Αυτή η κατάσταση δημιουργεί για ένα ικανό διάστημα συμπεριφοράς του υλικού της στρώσης μια «ψευδοεφελκυστική αντοχή» (pseudo tensile strength), η οποία συμβάλλει στην παράταση της ζωής του αμμοχάλικου.[24]

Είναι προφανές ότι ο λόγος και η μεταβολή του  $E_{gr}/E_{sg}$  αποτελεί έναν σημαντικό δείκτη “indicator” χαρακτηρισμού όχι μόνο του απαιτούμενου βαθμού συμπύκνωσης των αντιστοιχών υλικών οδοστρώσις, αλλά και της «περιορισμένης» εφελκυστικής ικανότητας των ασύνδετων υλικών. Ιδιαίτερη σημασία έχει ο λόγος  $E_{gr}/E_{sg}$  που παραμένει μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής και του τελευταίου απαιτούμενου ασφαλοτάπητα κυκλοφορίας. Όσο μεγαλύτερος λόγος μπορεί να επιτευχθεί, τόσο αυξάνει η πιθανότητα παραλαβής από τα κοκκώδη υλικά βάσεων και υποβάσεων, περιορισμένων και «κρίσιμων» για την μηχανική συμπεριφορά τους εφελκυστικών τάσεων, ώστε να παρατείνεται η διάρκεια της ζωής τους σε φάση λειτουργίας της οδού. Η σχέση (2.8) εκφράζει το γεγονός της αύξησης του λόγου του  $E_{gr}/E_{sg}$  με την αύξηση του πάχους  $h_{gr}$  του συνόλου των ασύνδετων κοκκωδών υλικών από αμμοχάλικο ή αναλόγων αυτού του μίγματος υλικών. Στην πράξη όμως δεν είναι εφικτό να επιτευχθεί η επιθυμητή αύξηση του πάχους του αμμοχάλικου (σχέση 2.8).

Σύμφωνα με σχετικές έρευνες που αναφέρονται και σχολιάζονται το πάχος των ασφαλικών στρώσεων, καθώς και οι συνθέσεις των υπερκείμενων ασφαλομιγμάτων επηρεάζουν τουλάχιστον με βάση τα αποτελέσματα αναλυτικών προσομοιώσεων το μέγεθος του λόγου  $E_{gr}/E_{sg}$  [22]. Επομένως είναι διερευνητέο το κατά πόσο θα πρέπει

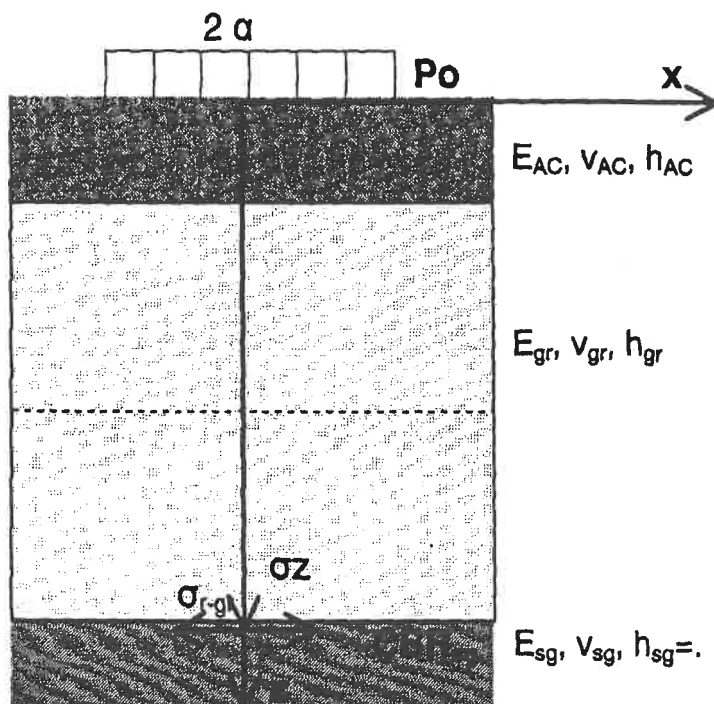
να θεωρείται στο πλαίσιο της διαστασιολόγησης της κατασκευής ενός τυπικού εύκαμπτου οδοστρώματος ως αντιπροσωπευτικός ο λόγος  $E_{gr}/E_{sg}$  που προκύπτει σύμφωνα με τα μέχρι σήμερα ισχύοντα στην πράξη (σχέση 2.8). Είναι ενδεχόμενο να είναι πιο αντιπροσωπευτική μία ρεαλιστικότερη τροποποιημένη σχέση η οποία θα εκφράζει την τιμή του δείκτη ( $E_{gr}/E_{sg}$ ) μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του συνόλου των στρώσεων του οδοστρώματος, δηλαδή και του τελικού ασφαλοτάπητα. Η εναλλακτική σχέση αυτής της συλλογιστικής αναμένεται ότι θα επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους του συνόλου του οδοστρώματος και θα αποτελεί ένα περισσότερο ρεαλιστικό σημείο εκκίνησης για την αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών ενός οδοστρώματος. Στο πλαίσιο αυτό συμβάλλει η παρούσα έρευνα.

## **Κεφάλαιο 4**

### **Μεθοδολογία και επεξεργασία με χρήση λογισμικού BISAR**

## 4.1 Γενικά

Για την εκτίμηση της εφελκυστικής αντοχής των αμμοχάλικων πραγματοποιήθηκε ανάλυση της εντατικής κατάστασης τυπικής για τα ελληνικά δεδομένα, διατομής εύκαμπτου οδοστρώματος αποτελούμενης από τρεις επάλληλες στρώσεις. Δηλαδή συγκεκριμένα την πρώτη στρώση που αναπαριστά τις ενοποιημένες ασφατικές στρώσεις με σταθμισμένο μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτοσκυροδέματος  $E_{AC}$ , πάχους  $h_{AC}$  και λόγο Poisson  $\nu_{AC}$ . Τη δεύτερη στρώση από ενοποιημένα ασύνδετα υλικά (αμμοχάλικα) κατά τις ΠΤΠ 0150 και 0155 με μέτρο ελαστικότητας  $E_{gr}$ , συνολικό πάχος  $h_{gr}$  και λόγο του Poisson  $\nu_{gr}$ . Τη στρώση έδρασης με μέτρο ελαστικότητας  $E_{sg}$ , λόγο του Poisson  $\nu_{sg}$  και απαιτούμενο καλιφορνιακού δείκτη φέρουσας ικανότητας  $CBR_{sg}$ .



Σχήμα 4.1 : Στατικό πρότυπο ανάλυσης οδοστρώματος



Η ανάλυση βασίζεται στη θεωρία των επάλληλων πολλαπλών στρώσεων και πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του αντίστοιχου λογισμικού συστήματος BISAR 3.0 (Bitumen Structural Analysis In Roads) [25], το οποίο θεωρείται από τη σχετική ομάδα εργασίας της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για τον υπολογισμό των οδοστρωμάτων ως το πλέον βαθμονομημένο και αποδεκτό στην πράξη λογισμικό αναφοράς για την ανάλυση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων οδών [26]. Σημειώνεται ότι η αξιοπιστία του υπόψη λογισμικού έχει ελεγχθεί με τη βαθμονόμησή του τόσο σε εργαστηριακές δοκιμές μεγάλης κλίμακας LFT (Large scale Facilities Testing), όσο και κάτω από πραγματικές, επιτόπου (in situ) συνθήκες [26].

## 4.2 Κύριες αρχές του λογισμικού BISAR

Με τη χρήση του λογισμικού BISAR μπορούν να υπολογιστούν οι τάσεις, οι παραμορφώσεις και οι μετατοπίσεις σε ένα ελαστικό πολυστρωματικό σύστημα που καθορίζεται από την ακόλουθη διαμόρφωση και την υλική συμπεριφορά :

1. το σύστημα αποτελείται από οριζόντια στρώματα ομοιόμορφου πάχους που στηρίζεται σε μια ημιάπειρη στρώση
2. τα στρώματα επεκτείνονται απείρως στις οριζόντιες διευθύνσεις
3. το υλικό κάθε στρώματος είναι ομοιογενές και ιστροπικό
4. τα υλικά είναι ελαστικά και έχουν μια γραμμική σχέση τάσης-παραμόρφωσης

Το σύστημα φορτίζεται στην κορυφή από ένα ή περισσότερα κυκλικά φορτία με μια ομοιόμορφη διανομή τάσης. Το πρόγραμμα προσφέρει τη δυνατότητα να υπολογιστεί η επίδραση των καθέτων και οριζόντιων τάσεων και περιλαμβάνει τη δυνατότητα υπολογισμού της επίδρασης της ολίσθησης μεταξύ των στρωμάτων.

Οι υπολογισμοί με το λογισμικό BISAR 3.0 απαιτούν την ακόλουθη εισαγωγή δεδομένων :

1. ο αριθμός στρωμάτων
2. οι συντελεστές Young των στρωμάτων
3. οι συντελεστές Poisson των στρωμάτων
4. το πάχος των στρωμάτων
5. ο αριθμός των φορτίων

6. οι συντεταγμένες της θέσης του κέντρου των φορτίων
7. οι συντεταγμένες των θέσεων για τις οποίες χρησιμοποιείται το λογισμικό BISAR

Το κέντρο των φορτίων, όπως και οι θέσεις στις οποίες οι τάσεις, οι παραμορφώσεις και οι μετατοπίσεις πρέπει να υπολογιστούν δίνονται όπως συντεταγμένες σε ένα σταθερό καρτεσιανό σύστημα. Η επίδραση της ταυτόχρονης δράσης των διάφορων φορτίων είναι το άθροισμα λόγω της δράσης κάθε φορτίου χωριστά. Οι μέγιστες και οι ελάχιστες κύριες τιμές αντιπροσωπεύουν τις μέγιστες και ελάχιστες τάσεις και παραμορφώσεις.

Κάθε πρόγραμμα BISAR 3.0 μπορεί να εξετάσει δέκα ξεχωριστά σύνολα εισαγωγής δεδομένων. Κάθε ενιαίο σύνολο εισαγωγής δεδομένων ορίζεται ως ένα σύστημα. Μέσα σε κάθε σύστημα το πρόγραμμα μπορεί να εξετάσει δέκα στρώματα και δέκα κυκλικά φορτία.

Ο τρόπος να υποδειχθούν οι θέσεις (οι συντεταγμένες στη δομή του στρώματος όπου ζητούνται αποτελέσματα) έχει βελτιωθεί. Για τις θέσεις στη διεπαφή μεταξύ δύο στρωμάτων, το πρόγραμμα προσφέρει την ευκαιρία να επιλεγεί ένα συγκεκριμένο στρώμα ή να επιλεγεί υπολογισμός στην ίδια θέση και για τα δύο στρώματα. Τάσεις, παραμορφώσεις και μετατοπίσεις μπορούν συνήθως να υπολογιστούν σε δέκα θέσεις για κάθε σύστημα. Αυτός ο αριθμός επεκτείνεται όταν επιλέγονται οι θέσεις διεπαφών και για τα δύο στρώματα.

Το λογισμικό σύστημα BISAR είναι βασισμένο σε μονάδες διεθνούς συστήματος SI. Οι μονάδες με τα προθέματά τους επιδεικνύονται στις στήλες εισαγωγής των δεδομένων.

### 4.3 Μεθοδολογία

Το κρίσιμο μέγεθος υπολογισμού για τη συγκεκριμένη διερεύνηση είναι κυρίως η εφελκυστική τάση  $\sigma_{r-gr}$  στον πυθμένα της ενοποιημένης στρώσης από ασύνδετο υλικό. Παράλληλα, υπολογίζεται και η κατακόρυφη τάση  $\sigma_z$  στη διεπιφάνεια μεταξύ αμμοχάλικου και στρώσης έδρασης. Οι τάσεις υπολογίζονται στον άξονα συμμετρίας

του φορτίου ( $\chi=0$ ,  $z=h_{AC}+h_{gr}$ ) έτσι ώστε οι ορθές τάσεις να είναι και κύριες τάσεις, δηλαδή μέγιστες.

Το οδόστρωμα φορτίζεται με συγκεκριμένο κατακόρυφο αξονικό φορτίο των 13 t, το οποίο θεωρείται διεθνώς ως το μέγιστο επιτρεπόμενο αξονικό φορτίο [27]. Σημειώνεται ότι αυτό ισχύει και για τις ελληνικές οδούς [28]. Επιπλέον η φόρτιση του οδοστρώματος γίνεται με το παραπάνω μέγιστο αξονικό φορτίο επί απλού τροχού, συνθήκη η οποία σύμφωνα με τον Ullidtz, επιφέρει μεγαλύτερη καταπόνηση στο οδόστρωμα και κατ' επέκταση αναπτύσσει μεγαλύτερες τάσεις στις στρώσεις από αμμοχάλικο από την συνήθως χρησιμοποιούμενη διάταξη καταπόνησης του διπλού τροχού [1].

Με την παραπάνω θεώρηση επιτυγχάνεται η δυσμενέστερη φόρτιση υπό συνθήκες της κυκλοφορίας και επομένως αναμένεται να εκτιμηθεί η δυσμενέστερη κατάσταση ως προς την εφελκυστική ικανότητα ( $\sigma_{r-gr}$ ) του αμμοχάλικου.

Οι αναπτυσσόμενες λόγω μιας κατακόρυφης φορτίσεως εφελκυστικές τάσεις στα ασύνδετα υλικά αποτελούν κυρίως ένα μέγεθος το οποίο είναι αφενός προϊόν απόκρισης στην καταπόνηση αξονικών φορτίσεων, αφετέρου μία παράμετρος εξαρτώμενη από τα υλικά κατασκευής των στρώσεων του οδοστρώματος [23].

Στην προκειμένη περίπτωση η φόρτιση του με αξονικό φορτίο  $P$  των 13 t επί απλού τροχού αντιστοιχεί σε  $P=6,5$  t και θεωρείται ομοιόμορφα κατανεμημένη σε κυκλική επιφάνεια με διάμετρο 2  $\alpha$  όπου  $\alpha=150$  mm, για ένα μέσο αντιπροσωπευτικό τροχό τυπικού βαρέως οχήματος κυκλοφορίας στις ελληνικές οδούς και με πίεση ίση προς την εσωτερική πίεση  $P_0$  του αεροθαλάμου του ελαστικού [28]. Έτσι η πίεση του επισώτρου υπολογίζεται από τη σχέση :

$$p_0 = P/\alpha^2 \quad \Rightarrow \quad p_0 = 0,92 \text{ N/mm}^2 \quad (4.1)$$

Τα πάχη των επιμέρους στρώσεων θεωρούνται ότι κυμαίνονται σε ένα εύρος διακύμανσης αντιπροσωπευτικό κυρίως για οδοστρώματα μεσαίας και κατά περίπτωση βαρειάς κυκλοφορίας. Συγκεκριμένα λαμβάνονται  $10 < h_{AC} < 25$  cm και

$20 < h_{gr} < 60$  cm, προκειμένου να καλύπτεται ένα ευρύ φάσμα διακύμανσης παραμέτρων για τα υπό κατασκευή οδοστρώματα στην πράξη.

Κατόπιν σχετικής βιβλιογραφικής διερεύνησης [29] προέκυψαν τα μέτρα ελαστικότητας που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό οδοστρωμάτων. Έτσι θεωρήθηκε ως εύρος διακύμανσης για το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος  $1000 < E_{AC} < 6000$  MN/m<sup>2</sup>, το οποίο καλύπτει και τις κλιματολογικές συνθήκες της χώρας μας. Οι τιμές του εύρους διακύμανσης της αντιστοίχου παραμέτρου για το αμμοχάλικο λήφθηκαν από τη διεθνή βιβλιογραφία. Γενικά πάντως γίνονται δεκτές τιμές μέτρου Egr που κυμαίνονται μεταξύ 100 MN/m<sup>2</sup> και 500 MN/m<sup>2</sup>, αν και έχουν προταθεί και τιμές μέχρι και 1000 MN/m<sup>2</sup> όπως προτείνεται από τον Sweere, [30]. Στη συγκεκριμένη ανάλυση λήφθηκε  $200 < E_{gr} < 1000$  MN/m<sup>2</sup>. Για την ελληνική πρακτική θεωρήθηκε αντίστοιχα ότι  $50 < E_{sg} < 20$  MN/m<sup>2</sup>. Σύμφωνα με τη σχέση  $E = 10 \cdot CBR$  ο καλιφορνιακός δείκτης φέρουσας ικανότητας κυμαίνεται έτσι ώστε  $5\% < CBR_{sg} < 20\%$ .

Ο λόγος του Poisson λήφθηκε για τις ενοποιημένες ασφατικές στρώσεις και τη στρώση από ενοποιημένα ασύνδετα υλικά ίσος προς 0,35, ενώ για τη στρώση έδρασης ίσος προς 0,40.

Σύμφωνα με τα παραπάνω δημιουργήθηκε πίνακας εισαγωγής, με βάση τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές του εύρους διακύμανσης τόσο για τα μέτρα ελαστικότητας των στρώσεων όσο και των παχών τους, για τη χρήση του λογισμικού BISAR, τμήμα του οποίου παρατίθεται ακόλουθα:

| System | Eac  | Egr | Esg | hac | hgr |
|--------|------|-----|-----|-----|-----|
| 1      | 1000 | 800 | 200 | 25  | 60  |
| 2      | 1000 | 800 | 200 | 25  | 20  |
| 3      | 1000 | 800 | 200 | 10  | 60  |
| 4      | 1000 | 800 | 200 | 10  | 20  |
| 5      | 1000 | 800 | 50  | 10  | 20  |
| 6      | 1000 | 800 | 50  | 10  | 60  |
| 7      | 1000 | 800 | 50  | 25  | 20  |
| 8      | 1000 | 800 | 50  | 25  | 60  |
| 9      | 1000 | 700 | 200 | 25  | 60  |
| 10     | 1000 | 700 | 200 | 25  | 20  |
| 11     | 1000 | 700 | 200 | 10  | 60  |
| 12     | 1000 | 700 | 200 | 10  | 20  |
| 12     | 1000 | 700 | 50  | 10  | 20  |
| 14     | 1000 | 700 | 50  | 10  | 60  |
| 15     | 1000 | 700 | 50  | 25  | 20  |
| 16     | 1000 | 700 | 50  | 25  | 60  |
| 17     | 1000 | 600 | 200 | 25  | 60  |
| 18     | 1000 | 600 | 200 | 25  | 20  |
| 19     | 1000 | 600 | 200 | 10  | 60  |
| 20     | 1000 | 600 | 200 | 10  | 20  |
| 21     | 1000 | 600 | 50  | 10  | 20  |
| 22     | 1000 | 600 | 50  | 10  | 60  |
| 23     | 1000 | 600 | 50  | 25  | 20  |
| 24     | 1000 | 600 | 50  | 25  | 60  |
| 25     | 1000 | 500 | 200 | 25  | 60  |
| 26     | 1000 | 500 | 200 | 25  | 20  |
| 27     | 1000 | 500 | 200 | 10  | 60  |
| 28     | 1000 | 500 | 200 | 10  | 20  |
| 29     | 1000 | 500 | 50  | 10  | 20  |
| 30     | 1000 | 500 | 50  | 10  | 60  |
| 31     | 1000 | 500 | 50  | 25  | 20  |
| 32     | 1000 | 500 | 50  | 25  | 60  |
| 33     | 1000 | 400 | 200 | 25  | 60  |
| 34     | 1000 | 400 | 200 | 25  | 20  |
| 35     | 1000 | 400 | 200 | 10  | 60  |
| 36     | 1000 | 400 | 200 | 10  | 20  |
| 37     | 1000 | 400 | 50  | 10  | 20  |
| 38     | 1000 | 400 | 50  | 10  | 60  |
| 39     | 1000 | 400 | 50  | 25  | 20  |
| 40     | 1000 | 400 | 50  | 25  | 60  |
| 41     | 1000 | 300 | 200 | 25  | 60  |
| 42     | 1000 | 300 | 200 | 25  | 20  |
| 43     | 1000 | 300 | 200 | 10  | 60  |
| 44     | 1000 | 300 | 200 | 10  | 20  |
| 45     | 1000 | 300 | 50  | 10  | 20  |
| 46     | 1000 | 300 | 50  | 10  | 60  |
| 47     | 1000 | 300 | 50  | 25  | 20  |
| 48     | 1000 | 300 | 50  | 25  | 60  |
| 49     | 1000 | 200 | 200 | 25  | 60  |
| 50     | 1000 | 200 | 200 | 25  | 20  |
| 51     | 1000 | 200 | 200 | 10  | 60  |
| 52     | 1000 | 200 | 200 | 10  | 20  |
| 53     | 1000 | 200 | 50  | 10  | 20  |
| 54     | 1000 | 200 | 50  | 10  | 60  |
| 55     | 1000 | 200 | 50  | 25  | 20  |
| 56     | 1000 | 200 | 50  | 25  | 60  |

Πίνακας 4.1 : Δεδομένα εισαγωγής λογισμικού BISAR

#### 4.4 Ανάλυση με τη βοήθεια του λογισμικού πολλαπλών στρώσεων

Χρησιμοποιώντας τα στοιχεία του προηγούμενου πίνακα εκτιμήθηκε αναλυτικά με τη διαδικασία “trial and error” η εφελκυστική τάση  $\sigma_{r-gr}$  και πιο συγκεκριμένα ο λόγος  $\sigma_r/P_0$ , έτσι ώστε να ισχύουν οι ακόλουθοι περιορισμοί για την αποδοχή της ανάλυσης [25] :

$$\sigma_{r-gr} \leq \lambda^*(\sigma_z + q) \quad (4.2)$$

όπου  $\sigma_{r-gr}$  οι αναπτυσσόμενες τάσεις στον πυθμένα των ασύνδετων κοκκωδών υλικών ( $N/mm^2$ ),  $q=2,2*10^{-2}*h_{AC}$  ( $N/mm^2$ ),  $\sigma_z$  η αντίστοιχη κατακόρυφη τάση ( $N/mm^2$ ) και  $\lambda$  ο συντελεστής ανάλογος προς τον συντελεστή τριβής (λαμβάνεται προσεγγιστικά ίσος με 1).

Εφόσον η τιμή της τάσης  $\sigma_{r-gr}$  προκύψει εφελκυστική και μάλιστα μεγαλύτερη από την τιμή που λαμβάνεται με την εφαρμογή της παραπάνω σχέσης, η στρώση αυτή δε θα μπορέσει να αναλάβει ασφαλώς την τάση αυτή. Επομένως αναμένεται ότι οι κόκκοι θα μετακινηθούν και η στρώση θα αποσυμπυκνωθεί, έτσι ώστε να αναπτύξει μικρότερο μέτρο ελαστικότητας και κατ'επέκταση λόγο  $E_{gr}/E_{sg}$  προκειμένου να επέλθει ισορροπία .

Επιπλέον για την ανάλυση ελήφθη υπόψη και η προϋπόθεση κατά Gerlach et al [23], σύμφωνα με την οποία για θραυστά αμμοχάλικα ,όπως η παρούσα θεώρηση και για συνθήκες περιβάλλοντος ανάλογες με αυτές που θεωρήθηκαν παραπάνω, θα πρέπει να ισχύει ο περιορισμός  $\sigma_{r-gr} \leq 0,1 N/mm^2$  με την ολοκλήρωση της κατασκευής των ασφαλοτάπητων.

Σύμφωνα με τα παραπάνω προέκυψε ότι η ελάχιστη αναπτυσσόμενη εφελκυστική τάση στη διεπιφάνεια  $\sigma_r$ , η οποία πληρεί τους προαναφερθέντες περιορισμούς είναι  $(\sigma_r/P_0)_{\text{επιτρ}}=0,08$  .Το αποτέλεσμα αυτό προέκυψε και για συνθήκες περιβάλλοντος που αντιπροσωπεύουν σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες,

δηλαδή υψηλό μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλομίγματος, καθώς και για συνθήκες ύπαρξης υγρασίας, δηλαδή χαμηλό μέτρο ελαστικότητας των ασύνδετων υλικών.

#### **4.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων**

Ακόλουθα παρατίθενται αποτελέσματα των συστημάτων που επεξεργάστηκε το λογισμικό πρόγραμμα BISAR 3.0 σε μορφή πινάκων. Σε κάθε ένα από αυτούς τους πίνακες είναι εμφανή τόσο τα δεδομένα εισαγωγής (input data) στο λογισμικό BISAR 3.0, όσο και τα αποτελέσματα των τάσεων, παραμορφώσεων και μετατοπίσεων (output data) για κάθε στρώση ξεχωριστά. Λόγω του μεγάλου όγκου των αποτελεσμάτων παραθέτουμε ενδεικτικά μερικούς πίνακες.

System 1

| Structure    |               | Loads                    |                 |             |           |              |               |              |            |                  |          |                       |
|--------------|---------------|--------------------------|-----------------|-------------|-----------|--------------|---------------|--------------|------------|------------------|----------|-----------------------|
| Layer Number | Thickness (m) | Modulus Elasticity (MPa) | Poisson's Ratio | Load Number | Vertical  |              | Horz. (Shear) |              | Radius (m) | X-Coordinate     |          | Shear Angle (Degrees) |
|              |               |                          |                 |             | Load (kN) | Stress (MPa) | Load (kN)     | Stress (MPa) |            | Y-Coordinate (m) | UZ (m)   |                       |
| 1            | 0,25          | 6,00E+03                 | 0,35            | 1           | 6,50E+01  | 9,20E-01     | 0,00E+00      | 0,00E+00     | 1,50E-01   | 0,00E+00         | 0,00E+00 | 0,00E+00              |
| 2            | 0,6           | 8,00E+02                 | 0,35            |             |           |              |               |              |            |                  |          |                       |
| 3            |               | 2,00E+02                 | 0,4             |             |           |              |               |              |            |                  |          |                       |

| Position Number | Layer Number | X-Coordinate |          | Y-Coordinate | Depth (m) | Stress (MPa) |          |           | Strain   |          |           | Displacement (μm) |          |          |
|-----------------|--------------|--------------|----------|--------------|-----------|--------------|----------|-----------|----------|----------|-----------|-------------------|----------|----------|
|                 |              |              |          |              |           | XX           | YY       | ZZ        | XX       | YY       | ZZ        | UX                | UY       | UZ       |
| 1               | 1            | 0,00E+00     | 0,00E+00 | 0,00E+00     | 2,50E-01  | 5,70E-01     | 5,70E-01 | -1,51E-01 | 7,06E+01 | 7,06E+01 | -9,17E+01 | 0,00E+00          | 0,00E+00 | 1,60E+02 |
| 2               | 2            | 0,00E+00     | 0,00E+00 | 0,00E+00     | 2,50E-01  | 5,53E-03     | 5,53E-03 | -1,51E-01 | 7,06E+01 | 7,06E+01 | -1,94E+02 | 0,00E+00          | 0,00E+00 | 1,60E+02 |
| 3               | 2            | 0,00E+00     | 0,00E+00 | 0,00E+00     | 8,50E-01  | 3,31E-02     | 3,31E-02 | -1,61E-02 | 3,40E+01 | 3,40E+01 | -4,91E+01 | 0,00E+00          | 0,00E+00 | 1,10E+02 |
| 4               | 3            | 0,00E+00     | 0,00E+00 | 0,00E+00     | 8,50E-01  | 5,76E-04     | 5,76E-04 | -1,61E-02 | 3,40E+01 | 3,40E+01 | -8,29E+01 | 0,00E+00          | 0,00E+00 | 1,10E+02 |

Πίνακας 4.2 : Αποτελέσματα χρήσης λογισμικού BISAR



System 2

| Structure    |               |                          |                 | Loads       |           |              |               |              |              |            |                  |                  |                       |
|--------------|---------------|--------------------------|-----------------|-------------|-----------|--------------|---------------|--------------|--------------|------------|------------------|------------------|-----------------------|
| Layer Number | Thickness (m) | Modulus Elasticity (MPa) | Poisson's Ratio | Vertical    |           |              | Horz. (Shear) |              |              | Radius (m) | X-Coordinate (m) | Y-Coordinate (m) | Shear Angle (Degrees) |
|              |               |                          |                 | Load Number | Load (kN) | Stress (MPa) | Load          | Stress (MPa) | Stress (MPa) |            |                  |                  |                       |
| 1            | 0,25          | 6,00E+03                 | 0,35            | 1           | 6,50E+01  | 9,20E-01     | 0,00E+00      | 0,00E+00     | 1,50E-01     | 0,00E+00   | 0,00E+00         | 0,00E+00         |                       |
| 2            | 0,2           | 8,00E+02                 | 0,35            |             |           |              |               |              |              |            |                  |                  |                       |
| 3            |               | 2,00E+02                 | 0,4             |             |           |              |               |              |              |            |                  |                  |                       |

| Position Number | Layer Number | X-Coordinate |          | Y-Coordinate |          | Depth (m) | Stress XX (MPa) |          | Stress YY (MPa) |          | Stress ZZ (MPa) |          | Strain XX $\mu$ strain |          | Strain YY $\mu$ strain |           | Strain ZZ $\mu$ strain |          | Displacement UX ( $\mu$ m) |          | Displacement UY ( $\mu$ m) |          | Displacement UZ ( $\mu$ m) |       |
|-----------------|--------------|--------------|----------|--------------|----------|-----------|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|----------|------------------------|----------|------------------------|-----------|------------------------|----------|----------------------------|----------|----------------------------|----------|----------------------------|-------|
|                 |              | (m)          | (m)      | (m)          | (m)      |           | (MPa)           | (MPa)    | (MPa)           | (MPa)    | (MPa)           | (MPa)    | (MPa)                  | (MPa)    | (MPa)                  | (MPa)     | (MPa)                  | (MPa)    | (MPa)                      | (MPa)    | (MPa)                      | (MPa)    | (MPa)                      | (MPa) |
| 1               | 1            | 0,00E+00     | 0,00E+00 | 2,50E-01     | 6,82E-01 | 6,82E-01  | 6,82E-01        | 6,82E-01 | -1,24E-01       | 8,11E+01 | 8,11E+01        | 8,11E+01 | -1,00E+02              | 8,11E+01 | -1,84E+02              | -1,18E+02 | 0,00E+00               | 0,00E+00 | 0,00E+00                   | 0,00E+00 | 2,03E+02                   | 2,03E+02 | 2,03E+02                   |       |
| 2               | 2            | 0,00E+00     | 0,00E+00 | 2,50E-01     | 3,30E-02 | 3,30E-02  | 3,30E-02        | 3,30E-02 | -1,24E-01       | 8,11E+01 | 8,11E+01        | 8,11E+01 | -1,84E+02              | 8,11E+01 | -1,84E+02              | -1,18E+02 | 0,00E+00               | 0,00E+00 | 0,00E+00                   | 0,00E+00 | 2,03E+02                   | 2,03E+02 | 2,03E+02                   |       |
| 3               | 2            | 0,00E+00     | 0,00E+00 | 4,50E-01     | 7,81E-02 | 7,81E-02  | 7,81E-02        | 7,81E-02 | -3,95E-02       | 8,07E+01 | 8,07E+01        | 8,07E+01 | -1,18E+02              | 8,07E+01 | -1,18E+02              | -1,18E+02 | 0,00E+00               | 0,00E+00 | 0,00E+00                   | 0,00E+00 | 1,77E+02                   | 1,77E+02 | 1,77E+02                   |       |
| 4               | 3            | 0,00E+00     | 0,00E+00 | 4,50E-01     | 5,90E-04 | 5,90E-04  | 5,90E-04        | 5,90E-04 | -3,95E-02       | 8,07E+01 | 8,07E+01        | 8,07E+01 | -2,00E+02              | 8,07E+01 | -2,00E+02              | -2,00E+02 | 0,00E+00               | 0,00E+00 | 0,00E+00                   | 0,00E+00 | 1,77E+02                   | 1,77E+02 | 1,77E+02                   |       |

Πίνακας 4.3 : Αποτελέσματα χρήσης λογισμικού BISAR

System 3

| Structure    |               | Loads                    |                 |             |           |              |               |              |          |            |                  |                  |                       |
|--------------|---------------|--------------------------|-----------------|-------------|-----------|--------------|---------------|--------------|----------|------------|------------------|------------------|-----------------------|
| Layer Number | Thickness (m) | Modulus Elasticity (MPa) | Poisson's Ratio | Vertical    |           |              | Horz. (Shear) |              |          | Radius (m) | X-Coordinate (m) | Y-Coordinate (m) | Shear Angle (Degrees) |
|              |               |                          |                 | Load Number | Load (kN) | Stress (MPa) | Load (kN)     | Stress (MPa) |          |            |                  |                  |                       |
| 1            | 0,1           | 6,00E+03                 | 0,35            | 1           | 6,50E+01  | 9,20E-01     | 0,00E+00      | 0,00E+00     | 1,50E-01 | 0,00E+00   | 0,00E+00         | 0,00E+00         |                       |
| 2            | 0,6           | 8,00E+02                 | 0,35            |             |           |              |               |              |          |            |                  |                  |                       |
| 3            |               | 2,00E+02                 | 0,4             |             |           |              |               |              |          |            |                  |                  |                       |

| Position Number | Layer Number | X-Coordinate (m) |          | Y-Coordinate (m) |          | Depth (m) | Stress (MPa) |           |           | Strain (μstrain) |          |           | Displacement (μm) |          |          |
|-----------------|--------------|------------------|----------|------------------|----------|-----------|--------------|-----------|-----------|------------------|----------|-----------|-------------------|----------|----------|
|                 |              |                  |          |                  |          |           | XX           | YY        | ZZ        | XX               | YY       | ZZ        | UX                | UY       | UZ       |
| 1               | 1            | 0,00E+00         | 0,00E+00 | 0,00E+00         | 1,00E-01 | 1,17E+00  | 1,17E+00     | 1,17E+00  | -4,99E-01 | 1,56E+02         | 1,56E+02 | -2,20E+02 | 0,00E+00          | 0,00E+00 | 2,68E+02 |
| 2               | 2            | 0,00E+00         | 0,00E+00 | 0,00E+00         | 1,00E-01 | -7,67E-02 | -7,67E-02    | -7,67E-02 | -4,99E-01 | 1,56E+02         | 1,56E+02 | -5,56E+02 | 0,00E+00          | 0,00E+00 | 2,68E+02 |
| 3               | 2            | 0,00E+00         | 0,00E+00 | 0,00E+00         | 7,00E-01 | 5,91E-02  | 5,91E-02     | 5,91E-02  | -2,84E-02 | 6,05E+01         | 6,05E+01 | -8,72E+01 | 0,00E+00          | 0,00E+00 | 1,44E+02 |
| 4               | 3            | 0,00E+00         | 0,00E+00 | 0,00E+00         | 7,00E-01 | 1,23E-03  | 1,23E-03     | 1,23E-03  | -2,84E-02 | 6,05E+01         | 6,05E+01 | -1,47E+02 | 0,00E+00          | 0,00E+00 | 1,44E+02 |

Πίνακας 4.4 : Αποτελέσματα χρήσης λογισμικού BISAR

System 4



| Structure    |               | Loads                    |                 |             |           |              |               |              |            |                       |                  |
|--------------|---------------|--------------------------|-----------------|-------------|-----------|--------------|---------------|--------------|------------|-----------------------|------------------|
| Layer Number | Thickness (m) | Modulus Elasticity (MPa) | Poisson's Ratio | Vertical    |           |              | Horz. (Shear) |              |            | Shear Angle (Degrees) |                  |
|              |               |                          |                 | Load Number | Load (kN) | Stress (MPa) | Load (kN)     | Stress (MPa) | Radius (m) | X-Coordinate (m)      | Y-Coordinate (m) |
| 1            | 0,1           | 6,00E+03                 | 0,35            | 1           | 6,50E+01  | 9,20E-01     | 0,00E+00      | 0,00E+00     | 1,50E-01   | 0,00E+00              | 0,00E+00         |
| 2            | 0,2           | 8,00E+02                 | 0,35            |             |           |              |               |              |            |                       |                  |
| 3            |               | 2,00E+02                 | 0,4             |             |           |              |               |              |            |                       |                  |

| Position Number | Layer Number | X-Coordinate |          | Y-Coordinate |           | Depth (m) | Stress   |              |              | Strain       |          |          | Displacement |  |  |
|-----------------|--------------|--------------|----------|--------------|-----------|-----------|----------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|--------------|--|--|
|                 |              | Layer        | Number   | XX (MPa)     | YY (MPa)  |           | ZZ (MPa) | XX (μstrain) | YY (μstrain) | ZZ (μstrain) | UX (μm)  | UY (μm)  | UZ (μm)      |  |  |
| 1               | 1            | 0,00E+00     | 0,00E+00 | 1,37E+00     | 1,37E+00  | -4,57E-01 | 1,75E+02 | 1,75E+02     | -2,36E+02    | 0,00E+00     | 0,00E+00 | 3,68E+02 |              |  |  |
| 2               | 2            | 0,00E+00     | 0,00E+00 | -3,05E-02    | -3,05E-02 | -4,57E-01 | 1,75E+02 | 1,75E+02     | -5,44E+02    | 0,00E+00     | 0,00E+00 | 3,68E+02 |              |  |  |
| 3               | 2            | 0,00E+00     | 0,00E+00 | 2,09E-01     | 2,09E-01  | -1,08E-01 | 2,17E+02 | 2,17E+02     | -3,18E+02    | 0,00E+00     | 0,00E+00 | 2,93E+02 |              |  |  |

Πίνακας 4.5 : Αποτελέσματα χρήσης λογισμικού BISAR

System 5

| Structure    |               |                          |                 | Loads       |           |              |               |              |          |            |                  |                  |                       |
|--------------|---------------|--------------------------|-----------------|-------------|-----------|--------------|---------------|--------------|----------|------------|------------------|------------------|-----------------------|
| Layer Number | Thickness (m) | Modulus Elasticity (MPa) | Poisson's Ratio | Vertical    |           |              | Horz. (Shear) |              |          | Radius (m) | X-Coordinate (m) | Y-Coordinate (m) | Shear Angle (Degrees) |
|              |               |                          |                 | Load Number | Load (kN) | Stress (MPa) | Load (kN)     | Stress (MPa) |          |            |                  |                  |                       |
| 1            | 0,1           | 6,00E+03                 | 0,35            | 1           | 6,50E+01  | 9,20E-01     | 0,00E+00      | 0,00E+00     | 0,00E+00 | 1,50E-01   | 0,00E+00         | 0,00E+00         | 0,00E+00              |
| 2            | 0,2           | 8,00E+02                 | 0,35            |             |           |              |               |              |          |            |                  |                  |                       |
| 3            |               | 5,00E+01                 | 0,4             |             |           |              |               |              |          |            |                  |                  |                       |

| Position Number | Layer Number | X-Coordinate |          | Y-Coordinate |          | Depth (m) | Stress   |          |           | Strain          |                 |                 | Displacement  |               |               |
|-----------------|--------------|--------------|----------|--------------|----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|
|                 |              | Number       | (m)      | Number       | (m)      |           | XX (MPa) | YY (MPa) | ZZ (MPa)  | XX $\mu$ strain | YY $\mu$ strain | ZZ $\mu$ strain | UX ( $\mu$ m) | UY ( $\mu$ m) | UZ ( $\mu$ m) |
| 1               | 1            | 1            | 0,00E+00 | 0,00E+00     | 1,00E-01 | 1,56E+00  | 1,56E+00 | 1,56E+00 | -4,25E-01 | 1,94E+02        | 1,94E+02        | -2,53E+02       | 0,00E+00      | 0,00E+00      | 8,50E+02      |
| 2               | 2            | 2            | 0,00E+00 | 0,00E+00     | 1,00E-01 | 9,95E-03  | 9,95E-03 | 9,95E-03 | -4,25E-01 | 1,94E+02        | 1,94E+02        | -5,40E+02       | 0,00E+00      | 0,00E+00      | 8,50E+02      |
| 3               | 2            | 2            | 0,00E+00 | 0,00E+00     | 3,00E-01 | 4,26E-01  | 4,26E-01 | 4,26E-01 | -4,87E-02 | 3,68E+02        | 3,68E+02        | -4,34E+02       | 0,00E+00      | 0,00E+00      | 7,70E+02      |

Πίνακας 4.6 : Αποτελέσματα χρήσης λογισμικού BISAR

System 6

| Structure    |               |                          |                 | Loads       |           |              |               |              |          |            |                  |                  |                       |
|--------------|---------------|--------------------------|-----------------|-------------|-----------|--------------|---------------|--------------|----------|------------|------------------|------------------|-----------------------|
| Layer Number | Thickness (m) | Modulus Elasticity (MPa) | Poisson's Ratio | Vertical    |           |              | Horz. (Shear) |              |          | Radius (m) | X-Coordinate (m) | Y-Coordinate (m) | Shear Angle (Degrees) |
|              |               |                          |                 | Load Number | Load (kN) | Stress (MPa) | Load (kN)     | Stress (MPa) |          |            |                  |                  |                       |
| 1            | 0,1           | 6,00E+03                 | 0,35            | 1           | 6,50E+01  | 9,20E-01     | 0,00E+00      | 0,00E+00     | 1,50E-01 | 0,00E+00   | 0,00E+00         | 0,00E+00         |                       |
| 2            | 0,6           | 8,00E+02                 | 0,35            |             |           |              |               |              |          |            |                  |                  |                       |
| 3            |               | 5,00E+01                 | 0,4             |             |           |              |               |              |          |            |                  |                  |                       |

| Position Number | Layer Number | X-Coordinate (m) |          | Y-Coordinate (m) |          | Depth (m) | Stress    |           |           | Strain       |              |              | Displacement |          |          |
|-----------------|--------------|------------------|----------|------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|
|                 |              |                  |          |                  |          |           | XX (MPa)  | YY (MPa)  | ZZ (MPa)  | XX (μstrain) | YY (μstrain) | ZZ (μstrain) | UX (μm)      | UY (μm)  | UZ (μm)  |
| 1               | 1            | 0,00E+00         | 0,00E+00 | 0,00E+00         | 1,00E-01 | 1,14E+00  | 1,14E+00  | 1,14E+00  | -4,96E-01 | 1,52E+02     | 1,52E+02     | -2,15E+02    | 0,00E+00     | 0,00E+00 | 4,87E+02 |
| 2               | 2            | 0,00E+00         | 0,00E+00 | 0,00E+00         | 1,00E-01 | -7,99E-02 | -7,99E-02 | -7,99E-02 | -4,96E-01 | 1,52E+02     | 1,52E+02     | -5,50E+02    | 0,00E+00     | 0,00E+00 | 4,87E+02 |
| 3               | 2            | 0,00E+00         | 0,00E+00 | 0,00E+00         | 7,00E-01 | 1,13E-01  | 1,13E-01  | -1,21E-02 | -1,21E-02 | 9,71E+01     | 9,71E+01     | -1,14E+02    | 0,00E+00     | 0,00E+00 | 3,62E+02 |
| 4               | 3            | 0,00E+00         | 0,00E+00 | 0,00E+00         | 7,00E-01 | 3,17E-05  | 3,17E-05  | -1,21E-02 | -1,21E-02 | 9,71E+01     | 9,71E+01     | -2,42E+02    | 0,00E+00     | 0,00E+00 | 3,62E+02 |

Πίνακας 4.7 : Αποτελέσματα χρήσης λογισμικού BISAR

System 7

| Structure    |               | Loads                    |                 |                                      |           |              |            |                  |                       |          |          |
|--------------|---------------|--------------------------|-----------------|--------------------------------------|-----------|--------------|------------|------------------|-----------------------|----------|----------|
| Layer Number | Thickness (m) | Modulus Elasticity (MPa) | Poisson's Ratio | Vertical Horz. (Shear) Horz. (Shear) |           |              |            |                  | Shear Angle (Degrees) |          |          |
|              |               |                          |                 | Load Number                          | Load (kN) | Stress (MPa) | Radius (m) | X-Coordinate (m) | Y-Coordinate (m)      | UX (μm)  | UZ (μm)  |
| 1            | 0,25          | 6,00E+03                 | 0,35            | 1                                    | 6,50E+01  | 9,20E-01     | 0,00E+00   | 0,00E+00         | 0,00E+00              | 0,00E+00 | 0,00E+00 |
| 2            | 0,2           | 8,00E+02                 | 0,35            |                                      |           |              |            |                  |                       |          |          |
| 3            |               | 5,00E+01                 | 0,4             |                                      |           |              |            |                  |                       |          |          |

| Position Number | Layer Number | X-Coordinate Y-Coordinate |          | Depth (m) | Stress (MPa) |           |           | Strain (μstrain) |          |           | Displacement (μm) |          |          |
|-----------------|--------------|---------------------------|----------|-----------|--------------|-----------|-----------|------------------|----------|-----------|-------------------|----------|----------|
|                 |              | (m)                       | (m)      |           | XX           | YY        | ZZ        | XX               | YY       | ZZ        | UX                | UY       | UZ       |
| 1               | 1            | 0,00E+00                  | 0,00E+00 | 2,50E-01  | 8,32E-01     | 8,32E-01  | -1,03E-01 | 9,62E+01         | 9,62E+01 | -1,14E+02 | 0,00E+00          | 0,00E+00 | 4,95E+02 |
| 2               | 2            | 0,00E+00                  | 0,00E+00 | 2,50E-01  | 6,27E-02     | 6,27E-02  | -1,03E-01 | 9,62E+01         | 9,62E+01 | -1,84E+02 | 0,00E+00          | 0,00E+00 | 4,95E+02 |
| 3               | 2            | 0,00E+00                  | 0,00E+00 | 4,50E-01  | 1,51E-01     | 1,51E-01  | -1,75E-02 | 1,30E+02         | 1,30E+02 | -1,54E+02 | 0,00E+00          | 0,00E+00 | 4,66E+02 |
| 4               | 3            | 0,00E+00                  | 0,00E+00 | 4,50E-01  | -8,24E-04    | -8,17E-04 | -1,75E-02 | 1,30E+02         | 1,30E+02 | -3,37E+02 | 0,00E+00          | 0,00E+00 | 4,66E+02 |

Πίνακας 4.8 : Αποτελέσματα χρήσης λογισμικού BISAR

System 8

| Structure Loads |               |                          |                 |             |           |              |               |            |                       |
|-----------------|---------------|--------------------------|-----------------|-------------|-----------|--------------|---------------|------------|-----------------------|
| Layer Number    | Thickness (m) | Modulus Elasticity (MPa) | Poisson's Ratio | Vertical    |           |              | Horz. (Shear) |            |                       |
|                 |               |                          |                 | Load Number | Load (kN) | Stress (MPa) | Stress (MPa)  | Radius (m) | Shear Angle (Degrees) |
| 1               | 0,25          | 6,00E+03                 | 0,35            | 1           | 6,50E+01  | 9,20E-01     | 0,00E+00      | 1,50E-01   | 0,00E+00              |
| 2               | 0,6           | 8,00E+02                 | 0,35            |             |           |              |               |            |                       |
| 3               |               | 5,00E+01                 | 0,4             |             |           |              |               |            |                       |

| Position Number | Layer Number | X-Coordinate |          | Y-Coordinate | Depth (m) | Stress    |           |                        | Stress ZZ (MPa) | Strain                 |                        | Displacement  |               |               |
|-----------------|--------------|--------------|----------|--------------|-----------|-----------|-----------|------------------------|-----------------|------------------------|------------------------|---------------|---------------|---------------|
|                 |              | (m)          | (m)      |              |           | XX (MPa)  | YY (MPa)  | Strain XX $\mu$ strain |                 | Strain YY $\mu$ strain | Strain ZZ $\mu$ strain | UX ( $\mu$ m) | UY ( $\mu$ m) | UZ ( $\mu$ m) |
| 1               | 1            | 0,00E+00     | 0,00E+00 | 2,50E-01     | 5,90E-01  | 5,90E-01  | 5,90E-01  | -1,47E-01              | 7,25E+01        | 7,25E+01               | -9,33E+01              | 0,00E+00      | 0,00E+00      | 3,33E+02      |
| 2               | 2            | 0,00E+00     | 0,00E+00 | 2,50E-01     | 9,99E-03  | 9,99E-03  | 9,99E-03  | -1,47E-01              | 7,25E+01        | 7,25E+01               | -1,93E+02              | 0,00E+00      | 0,00E+00      | 3,33E+02      |
| 3               | 2            | 0,00E+00     | 0,00E+00 | 8,50E-01     | 6,44E-02  | 6,44E-02  | 6,44E-02  | -6,99E-03              | 5,54E+01        | 5,54E+01               | -6,51E+01              | 0,00E+00      | 0,00E+00      | 2,82E+02      |
| 4               | 3            | 0,00E+00     | 0,00E+00 | 8,50E-01     | -4,06E-05 | -4,14E-05 | -6,99E-03 | -6,99E-03              | 5,54E+01        | 5,54E+01               | -1,39E+02              | 0,00E+00      | 0,00E+00      | 2,82E+02      |

Πίνακας 4.9 : Αποτελέσματα χρήσης λογισμικού BISAR

Από το output data του λογισμικού BISAR 3.0 λήφθηκαν οι τάσεις στον πυθμένα της ενοποιημένης στρώσης από ασύνδετο υλικό και υπολογίστηκαν οι λόγοι  $\sigma_r/P_0$ . Εν συνεχεία συγκρίθηκαν με το  $(\sigma_r/P_0)_{\text{επιτρ}}=0,08$  και όσοι από αυτούς δεν πληρούσαν αυτόν τον περιορισμό αποκλείστηκαν.

Ακόλουθα παρατίθεται ενδεικτικός πίνακας των συστημάτων του πίνακα 4.1 και των εξαγόμενων λόγων τους  $\sigma_r/P_0$ , όπου με κυανό χρώμα διακρίνονται τα συστήματα που δεν πληρούν τον περιορισμό  $\sigma_r/P_0 \leq 0,08$ .



| System | Eac  | Egr | Esg | hac | hgr | $\sigma_{r-gr}$ | $\sigma_r/P_0$ |
|--------|------|-----|-----|-----|-----|-----------------|----------------|
| 1      | 1000 | 800 | 200 | 25  | 60  | 4,58E-02        | 4,98E-02       |
| 2      | 1000 | 800 | 200 | 25  | 20  | 1,44E-01        | 1,57E-01       |
| 3      | 1000 | 800 | 200 | 10  | 60  | 6,72E-02        | 7,31E-02       |
| 4      | 1000 | 800 | 200 | 10  | 20  | 2,80E-01        | 3,05E-01       |
| 5      | 1000 | 800 | 50  | 10  | 20  | 5,88E-01        | 6,39E-01       |
| 6      | 1000 | 800 | 50  | 10  | 60  | 1,33E-01        | 1,45E-01       |
| 7      | 1000 | 800 | 50  | 25  | 20  | 2,90E-01        | 3,15E-01       |
| 8      | 1000 | 800 | 50  | 25  | 60  | 9,02E-02        | 9,81E-02       |
| 9      | 1000 | 700 | 200 | 25  | 60  | 1,257E-01       | 1,37E-01       |
| 10     | 1000 | 700 | 200 | 25  | 20  | 6,007E-02       | 6,53E-02       |
| 11     | 1000 | 700 | 200 | 10  | 60  | 2,468E-01       | 2,68E-01       |
| 12     | 1000 | 700 | 200 | 10  | 20  | 5,490E-01       | 5,97E-01       |
| 12     | 1000 | 700 | 50  | 10  | 20  | 1,257E-01       | 1,37E-01       |
| 14     | 1000 | 700 | 50  | 10  | 60  | 2,668E-01       | 2,90E-01       |
| 15     | 1000 | 700 | 50  | 25  | 20  | 8,448E-02       | 9,18E-02       |
| 16     | 1000 | 700 | 50  | 25  | 60  | 4,059E-02       | 4,41E-02       |
| 17     | 1000 | 600 | 200 | 25  | 60  | 3,477E-02       | 3,78E-02       |
| 18     | 1000 | 600 | 200 | 25  | 20  | 1,058E-01       | 1,15E-01       |
| 19     | 1000 | 600 | 200 | 10  | 60  | 5,203E-02       | 5,66E-02       |
| 20     | 1000 | 600 | 200 | 10  | 20  | 2,100E-01       | 2,28E-01       |
| 21     | 1000 | 600 | 50  | 10  | 20  | 5,050E-01       | 5,49E-01       |
| 22     | 1000 | 600 | 50  | 10  | 60  | 1,174E-01       | 1,28E-01       |
| 23     | 1000 | 600 | 50  | 25  | 20  | 2,414E-01       | 2,62E-01       |
| 24     | 1000 | 600 | 50  | 25  | 60  | 7,800E-02       | 8,48E-02       |
| 25     | 1000 | 500 | 200 | 25  | 60  | 2,823E-02       | 3,07E-02       |
| 26     | 1000 | 500 | 200 | 25  | 20  | 8,393E-02       | 9,12E-02       |
| 27     | 1000 | 500 | 200 | 10  | 60  | 4,286E-02       | 4,66E-02       |
| 28     | 1000 | 500 | 200 | 10  | 20  | 1,689E-01       | 1,84E-01       |
| 29     | 1000 | 500 | 50  | 10  | 20  | 4,547E-01       | 4,94E-01       |
| 30     | 1000 | 500 | 50  | 10  | 60  | 1,077E-01       | 1,17E-01       |
| 31     | 1000 | 500 | 50  | 25  | 20  | 2,127E-01       | 2,31E-01       |
| 32     | 1000 | 500 | 50  | 25  | 60  | 7,055E-02       | 7,67E-02       |
| 33     | 1000 | 400 | 200 | 25  | 60  | 2,080E-02       | 2,26E-02       |
| 34     | 1000 | 400 | 200 | 25  | 20  | 5,987E-02       | 6,51E-02       |
| 35     | 1000 | 400 | 200 | 10  | 60  | 3,224E-02       | 3,50E-02       |
| 36     | 1000 | 400 | 200 | 10  | 20  | 1,225E-01       | 1,33E-01       |
| 37     | 1000 | 400 | 50  | 10  | 20  | 3,956E-01       | 4,30E-01       |
| 38     | 1000 | 400 | 50  | 10  | 60  | 9,600E-02       | 1,04E-01       |
| 39     | 1000 | 400 | 50  | 25  | 20  | 1,798E-01       | 1,95E-01       |
| 40     | 1000 | 400 | 50  | 25  | 60  | 6,172E-02       | 6,71E-02       |
| 41     | 1000 | 300 | 200 | 25  | 60  | 1,222E-02       | 1,33E-02       |
| 42     | 1000 | 300 | 200 | 25  | 20  | 3,331E-02       | 3,62E-02       |
| 43     | 1000 | 300 | 200 | 10  | 60  | 1,963E-02       | 2,13E-02       |
| 44     | 1000 | 300 | 200 | 10  | 20  | 6,909E-02       | 7,51E-02       |
| 45     | 1000 | 300 | 50  | 10  | 20  | 3,231E-01       | 3,51E-01       |
| 46     | 1000 | 300 | 50  | 10  | 60  | 8,125E-02       | 8,83E-02       |
| 47     | 1000 | 300 | 50  | 25  | 20  | 1,409E-01       | 1,53E-01       |
| 48     | 1000 | 300 | 50  | 25  | 60  | 5,079E-02       | 5,52E-02       |
| 49     | 1000 | 200 | 200 | 25  | 60  | 2,28E-01        | 2,48E-01       |
| 50     | 1000 | 200 | 200 | 25  | 20  | 6,11E-02        | 6,64E-02       |
| 51     | 1000 | 200 | 200 | 10  | 60  | 9,35E-02        | 1,02E-01       |
| 52     | 1000 | 200 | 200 | 10  | 20  | 3,63E-02        | 3,95E-02       |
| 53     | 1000 | 200 | 50  | 10  | 20  | 7,31E-03        | 7,94E-03       |
| 54     | 1000 | 200 | 50  | 10  | 60  | 4,25E-03        | 4,62E-03       |
| 55     | 1000 | 200 | 50  | 25  | 20  | 4,43E-03        | 4,81E-03       |
| 56     | 1000 | 200 | 50  | 25  | 60  | 2,25E-03        | 2,45E-03       |

Πίνακας 4.10 : Αποτελέσματα εφελκυστικών τάσεων λογισμικού BISAR

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα από τη χρήση του λογισμικού BISAR ,όπως παρουσιάζονται ενδεικτικά στον πίνακα 4.10,συγκρίθηκαν οι λόγοι  $\sigma_r/P_0$  των συστημάτων εισαγωγής με το λόγο  $(\sigma_r/P_0)_{\text{επιτρ.}}=0,08$  και εν συνεχεία όσα πληρούσαν αυτόν τον περιορισμό χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του αλγόριθμου εκτίμησης του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων, με χρήση μαθηματικής, στατιστικής και πολυπαραμετρικής ανάλυσης, όπως θα αναπτυχθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

## **Κεφάλαιο 5**

### **Βάση δεδομένων και μεθοδολογία λογισμικού SPSS**

## 5.1 Βάση δεδομένων

Η βάση δεδομένων δομήθηκε σε περιβάλλον EXCEL και περιλαμβάνει δύο βασικές κατηγορίες στοιχείων :

- Τα μέτρα ελαστικότητας των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος και τα αντίστοιχα πάχη τους
- Τις μέσες τιμές των μέτρων ελαστικότητας και των αντίστοιχων παχών του οδοστρώματος

## 5.2 Μεθοδολογία

Στο προηγούμενο υποκεφάλαιο περιγράφηκε η βάση δεδομένων η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της επιρροής των διαφόρων παραγόντων στην εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζεται το μεθοδολογικό πλαίσιο εκείνο μέσα στο οποίο θα κινηθεί η αξιολόγηση. Στο πρώτο μέρος παρατίθενται ορισμένες βασικές έννοιες οι οποίες είναι αναγκαίες για την κατανόηση της στατιστικής θεωρίας. Στο δεύτερο μέρος δίνεται μια αναλυτικότερη περιγραφή του μαθηματικού προτύπου που θα χρησιμοποιηθεί.

Μέτρηση θεωρείται κάθε εμπειρική διαδικασία κατά την οποία αντιστοιχίζεται μια σειρά συμβόλων για να αντιπροσωπεύσει μια σειρά παρατηρήσεων, αντικειμένων ή γεγονότων. Η αντιστοίχιση αυτή διέπεται από ορισμένους κανόνες. Οι αριθμοί είναι μόνο μια μορφή αυτών των συμβόλων, επειδή όμως ένα μαθηματικό σύστημα έχει ορισμένες χρήσιμες ιδιότητες, οι εμπειρικές πράξεις είναι στενά συνδεδεμένες με τις μαθηματικές στη διαδικασία μέτρησης. Συνεπώς, πολύ συχνά η σειρά των αριθμών χρησιμοποιείται ως πρότυπο για την αναπαράσταση του εμπειρικού κόσμου.

Η τιμή την οποία μπορούν να λάβουν οι αριθμοί που χρησιμοποιούνται σε μια μέτρηση είναι τυχαία, με την έννοια ότι η τιμή αυτή εξαρτάται από το αποτέλεσμα της

μέτρησης και μόνο μετά την μέτρηση γίνεται γνωστή. Για να περιγραφεί αυτή η τιμή χρησιμοποιείται ο όρος τυχαία μεταβλητή, ένας από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους όρους στις φυσικές επιστήμες. Αναφέρεται στα χαρακτηριστικά ή στις ιδιότητες εκείνες, στις οποίες ξεχωριστά άτομα ή αντικείμενα διαφέρουν μεταξύ τους.

Έτσι προκύπτουν δύο κατηγορίες μεταβλητών: οι ποσοτικές, οι οποίες μπορούν να μετρηθούν ποσοτικά και οι ποιοτικές, οι οποίες μετρούνται ποιοτικά. Οι ποσοτικές μεταβλητές μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: τις Συνεχείς και τις Διακριτές. Οι Συνεχείς μεταβλητές μπορούν να λάβουν οποιαδήποτε τιμή στην ευθεία των πραγματικών αριθμών ή σε διάστημα αυτής και η κατανομή τους είναι συνεχής. Οι Διακριτές μεταβλητές έχουν πεπερασμένο πλήθος δυνατών τιμών και η κατανομή τους είναι διακριτή.

### **5.2.1 Ανάπτυξη μαθηματικού προτύπου**

Ένα από τα μεγαλύτερα πεδία έρευνας για τον Πολιτικό Μηχανικό αποτελεί η επεξήγηση φαινομένων και η διατύπωση προβλέψεων με βάση γνωστές και προϋπάρχουσες συνθήκες. Για τον σκοπό αυτό απαιτείται ο ορισμός δύο διαφορετικών τύπων μεταβλητών : της εξαρτημένης και της ανεξάρτητης μεταβλητής. Εξαρτημένη μεταβλητή ( dependent variable ) ονομάζεται η μεταβλητή της οποίας η συγκεκριμένη διαμόρφωση γίνεται να προβλεφθεί. Μια μεταβλητή η οποία χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της εξαρτημένης μεταβλητής, ονομάζεται ανεξάρτητη μεταβλητή ( independent variable ) . Ο ρόλος της στατιστικής προτυποποίησης είναι να προσδιοριστεί αν μια ανεξάρτητη μεταβλητή ή συνδυασμός ανεξάρτητων μεταβλητών, προκάλεσε ή όχι κάποια αλλαγή στην εξαρτημένη μεταβλητή. Έτσι, είναι αναγκαίο η επιλεγμένη εξαρτημένη μεταβλητή να είναι στον επιθυμητό βαθμό ευαίσθητη στις επιδράσεις της ανεξάρτητης μεταβλητής, αξιόπιστη στη μέτρησή της και έγκυρη αναφορικά με το φαινόμενο το οποίο μελετάται.

Επομένως, μόνο όταν αναπτύσσεται μια συστηματική σχέση ανάμεσα στις μεταβλητές είναι δυνατό να προβλεφθούν συστηματικά οι τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής με βάση τα γνωστά επίπεδα της ανεξάρτητης. Για την περιγραφή αυτής

της σχέσης η οποία αναπτύσσεται ανάμεσα σε μια εξαρτημένη μεταβλητή και σε ορισμένες ανεξάρτητες μεταβλητές δημιουργείται ένα μαθηματικό πρότυπο ( mathematical model ). Η ανάπτυξη ενός μαθηματικού προτύπου είναι μια στατιστική διαδικασία η οποία συμβάλλει στην ανάπτυξη εξισώσεων που περιγράφουν αυτή τη σχέση.

Βέβαια, είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση στη μαθηματική μορφή της παραπάνω εξίσωσης, ανάλογα με το αν η εξαρτημένη μεταβλητή είναι συνεχής ή διακριτή. Είναι σαφές ότι σε κάθε περίπτωση ακολουθείται διαφορετική διαδικασία προκειμένου να βρεθεί η ακριβής μορφή της σχέσης αυτής. Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία οι μεταβλητές που επιλέχθηκαν να εξεταστούν είναι συνεχείς.

### 5.2.2 Ανάπτυξη μαθηματικού προτύπου Γραμμικής Παλινδρόμησης

Στην Γραμμική Παλινδρόμηση ( Linear Regression ) η εξαρτημένη μεταβλητή πρέπει να είναι συνεχής. Λόγω της φύσης των επιλεγμένων ανεξάρτητων μεταβλητών χρησιμοποιείται το πρότυπο της Γραμμικής Παλινδρόμησης, η οποία είναι και η πιο διαδεδομένη μέθοδος, για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Το πρότυπο της Γραμμικής Παλινδρόμησης αναπτύσσεται ως εξής :

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \dots b_iX_i + \varepsilon \quad (5.1)$$

Όπου  $y$  είναι η εξαρτημένη μεταβλητή ( όπως έχει προαναφερθεί ),  $X_i$  είναι οι διάφορες ανεξάρτητες μεταβλητές των οποίων η επιρροή στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων θα αξιολογηθεί ( μέτρο δυσκαμψίας ασφαλομίγματος, μέτρο ελαστικότητας στρώσης έδρασης, κ.λ.π. ),  $b_i$  είναι οι συντελεστές των ανεξάρτητων μεταβλητών, οι οποίοι καταδεικνύουν τόσο το μέγεθος όσο και την κατεύθυνση της επιρροής των ανεξάρτητων μεταβλητών στην εξαρτημένη και τέλος το  $\varepsilon$  είναι ο όρος σφάλματος.

Πρέπει να σημειωθεί ότι για τον προσδιορισμό της συνάρτησης εκτίμησης του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων χρησιμοποιήθηκαν διάφορα πρότυπα Γραμμικής Παλινδρόμησης, από τα οποία προέκυψαν τα ακριβέστερα. Στα πρότυπα αυτά οι συντελεστές των ανεξάρτητων μεταβλητών  $b_i$  δείχνουν τη μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων σε σχέση με τη μεταβολή της εκάστοτε ανεξάρτητης μεταβλητής.

## **Κεφάλαιο 6**

### **Στατιστική ανάλυση και ανάπτυξη στατιστικών μοντέλων**



## 6.1 Γενικά

Το παρόν κεφάλαιο της Διπλωματικής Εργασίας διαπραγματεύεται την στατιστική επεξεργασία των δεδομένων που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 5. Ειδικότερα, σκοπός είναι η διερεύνηση και ποσοτικοποίηση του βαθμού συσχέτισης μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων και των μέτρων δυσκαμψίας ασφαλομίγματος, μέτρων ελαστικότητας στρώσης έδρασης, παχών ασφαλικών στρώσεων και παχών στρώσεων αμμοχάλικων. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, προκειμένου να υλοποιηθεί η διερεύνηση αυτή, συγκεντρώθηκε μια εκτενής και ολοκληρωμένη βάση δεδομένων που περιέχει στοιχεία για μεσαία και κατά περίπτωση βαρειάς κυκλοφορίας οδοστρώματα. Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με βάση τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 5. Η υλοποίηση της επεξεργασίας έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού SPSS (Version 11.0 ).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, επιλέχθηκαν να εξεταστούν οι παρακάτω εξαρτημένες μεταβλητές :

1. το μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων
2. η μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων

Για τις ανεξάρτητες αυτές μεταβλητές αναζητήθηκε ένα πρότυπο *Γραμμικής Παλινδρόμησης* το οποίο να δίνει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τη σχέση μεταξύ της εξαρτημένης μεταβλητής και των χρησιμοποιούμενων ανεξάρτητων μεταβλητών. Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας και αναλύεται η επιρροή των χρησιμοποιούμενων ανεξάρτητων μεταβλητών στις εξαρτημένες.

## 6.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων προτύπου Γραμμικής Παλινδρόμησης

### 6.2.1 Εισαγωγή

Το μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων αποτελεί την εξαρτημένη μεταβλητή της βάσης δεδομένων για την οποία έγινε στατιστική επεξεργασία. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων αποτελεί μια *Συνεχή* μεταβλητή. Σύμφωνα με την υπάρχουσα διεθνή βιβλιογραφία το πρότυπο που ενδείκνυται για την περίπτωση αυτή και με βάση το οποίο έγινε η στατιστική επεξεργασία και ανάλυση, είναι το Πρότυπο της *Γραμμικής Παλινδρόμησης*. Έπειτα από πλήθος δοκιμών και συνδυασμών ανεξάρτητων μεταβλητών, η ανάλυση οδήγησε στην επιλογή των τελικών προτύπων.

Από την επεξεργασία των στοιχείων προκύπτουν ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Για να μπορέσουν όμως να γίνουν αποδεκτά, πρέπει να υποστούν τον κατάλληλο στατιστικό έλεγχο. Έτσι, στην προκειμένη περίπτωση και για το σύνολο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, ο έλεγχος γίνεται σύμφωνα με το κριτήριο-*t* του Student (*t-ratio*). Στη συνέχεια ακολουθεί ο πίνακας 5.1, στον οποίο απεικονίζονται οι 'κρίσιμες τιμές ( *critical values* ) που πρέπει να λαμβάνει το κριτήριο - *t* για να είναι στατιστικά σημαντικός ο συντελεστής ο οποίος υπολογίζεται από το επιλεγμένο πρότυπο παλινδρόμησης. Στην περίπτωση που ισχύει αυτό, η ανεξάρτητη μεταβλητή έχει σημαντική επιρροή στην εξαρτημένη.

| Βαθμοί<br>Ελευθερίας<br><br><i>ν</i> | Επίπεδο εμπιστοσύνης |       |       |       |       |
|--------------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
|                                      | 0,9                  | 0,95  | 0,975 | 0,99  | 0,995 |
| 60                                   | 1,296                | 1,671 | 2     | 2,39  | 2,66  |
| 120                                  | 1,289                | 1,658 | 1,98  | 2,358 | 2,617 |
| $\infty$                             | 1,282                | 1,645 | 1,96  | 2,326 | 2,576 |

Πίνακας 6.1 : Κρίσιμες τιμές ελέγχου με βάση το κριτήριο-*t* του Student

Για παράδειγμα, σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 6.1, εάν η απόλυτη τιμή του κριτηρίου- $t$  ενός συντελεστή είναι μικρότερη από την τιμή 1,282, τότε η παράμετρος στην οποία γίνεται ο έλεγχος δεν είναι στατιστικά σημαντική για επίπεδο εμπιστοσύνης 90 %. Αντίστοιχα συνεπάγεται πως η ανεξάρτητη αυτή μεταβλητή δεν επηρεάζει την εξαρτημένη, που στην προκειμένη περίπτωση είναι το μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Εάν η απόλυτη τιμή του κριτηρίου- $t$  είναι στο διάστημα τιμών [ 1,282, 1,645 ], τότε η παράμετρος η οποία ελέγχεται είναι στατιστικά σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 90 %. Εάν η απόλυτη τιμή του κριτηρίου- $t$  βρίσκεται στο διάστημα τιμών [ 1,645, 1,960 ], τότε η παράμετρος στην οποία γίνεται ο έλεγχος είναι στατιστικά σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 95 %. Εάν η απόλυτη τιμή του κριτηρίου- $t$  είναι στο διάστημα τιμών [ 1,960, 2,326 ], τότε η παράμετρος στην οποία γίνεται ο έλεγχος είναι στατιστικά σημαντική για επίπεδο εμπιστοσύνης 97,5 % . Τέλος, εάν η απόλυτη τιμή του κριτηρίου- $t$  είναι μεγαλύτερη από την τιμή 2,326, τότε η παράμετρος στην οποία γίνεται ο έλεγχος είναι στατιστικά σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 99 %. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται και στη συνέχεια στα υποκεφάλαια που ακολουθούν.

### 6.2.2 *Ανάλυση του προτύπου μέτρου ελαστικότητας αμμοχάλικων*

Η στατιστική επεξεργασία για το μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων με τη μέθοδο της *Γραμμικής Παλινδρόμησης* κατέληξε, ύστερα από σειρά ελέγχων, στη δημιουργία των τελικών προτύπων. Το πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε είναι το  $\ln y = \ln x + \ln^2 x$  και στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζεται ο συντελεστής συσχέτισης αυτού του μοντέλου.

| <i>Model Summary</i> |                                                |          |                   |                            |
|----------------------|------------------------------------------------|----------|-------------------|----------------------------|
| Model                | R                                              | R Square | Adjusted R Square | Std. Error of the Estimate |
| 1                    | 0,36456                                        | 0,1329   | 0,06620164        | 192,6904291                |
| a                    | Predictors: (Constant), HGR2, EAC2, HAC2, ESG2 |          |                   |                            |
| b                    | Dependent Variable: EGR                        |          |                   |                            |

Πίνακας 6.2 : Συντελεστής συσχέτισης

Ο πίνακας αυτός δείχνει ότι ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$  του μοντέλου αυτού είναι 0,133.

Ακόλουθα παρατίθεται ο Πίνακας 6.3, ο οποίος αποτελείται από έξι στήλες. Στην πρώτη, εμφανίζονται οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προτύπου. Οι μεταβλητές αυτές προέκυψαν ύστερα από την στατιστική επεξεργασία ως οι στατιστικά σημαντικές από το σύνολο των ανεξάρτητων μεταβλητών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση στατιστικά σημαντικές εμφανίζονται οι  $EAC^2$ ,  $ESG^2$ ,  $HAC^2$  και  $HGR^2$ .

Στη δεύτερη στήλη παρουσιάζονται οι συντελεστές των ανεξάρτητων μεταβλητών. Εκείνο που ενδιαφέρει είναι το πρόσημο των συντελεστών. Δηλαδή, αν ο συντελεστής έχει θετικό πρόσημο, η αύξηση στην τιμή της ανεξάρτητης μεταβλητής προκαλεί αύξηση στην τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής ( και το αντίστροφο για αρνητικό πρόσημο ). Εν προκειμένω όλες οι ανεξάρτητες μεταβλητές έχουν θετική επιρροή στη μεταβολή της τιμής της εξαρτημένης μεταβλητής.

Στην τρίτη στήλη παρουσιάζονται τα standard errors για κάθε μία από τις στατιστικά σημαντικές ανεξάρτητες μεταβλητές.

Στην τέταρτη στήλη παρουσιάζονται οι συντελεστές Beta για κάθε μία από τις ανεξάρτητες μεταβλητές και οι οποίοι χαρακτηρίζουν το βαθμό επιρροής της εκάστοτε μεταβλητής στη μεταβολή της τιμής της εξαρτημένης μεταβλητής. Συγκεκριμένα, η ανεξάρτητη μεταβλητή  $HGR^2$  επηρεάζει σε σημαντικότερο βαθμό από οποιαδήποτε άλλη την τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής, δεδομένου ότι ο συντελεστής της 0,317 είναι μεγαλύτερος από τους υπόλοιπους.

Στην πέμπτη στήλη παρουσιάζονται οι τιμές του κριτηρίου-t (t-ratio). Η τιμή αυτή συγκρίνεται με τις τιμές του Πίνακα 5.1 και κατά συνέπεια προκύπτει το στατιστικό επίπεδο σημαντικότητας για κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή.

Στην έκτη στήλη παρουσιάζονται οι συντελεστές p value. για κάθε μία από τις ανεξάρτητες μεταβλητές.

| <i>Coefficients</i>         |            |                             |            |                           |             |
|-----------------------------|------------|-----------------------------|------------|---------------------------|-------------|
| Model                       |            | Unstandardized Coefficients |            | Standardized Coefficients |             |
|                             |            | B                           | Std. Error | Beta                      | t Sig.      |
| 1                           | (Constant) | 131,904                     | 112,162    |                           | 1,176 0,245 |
|                             | EAC2       | 1,179E-06                   | 0          | 0,103                     | 0,792 0,432 |
|                             | ESG2       | 2,843 E-03                  | 0,002      | 0,247                     | 1,773 0,082 |
|                             | HAC2       | 0,174                       | 0,107      | 0,22                      | 1,623 0,111 |
|                             | HGR2       | 4,362 E-02                  | 0,019      | 0,317                     | 2,332 0,024 |
| a. Dependent Variable : EGR |            |                             |            |                           |             |

Πίνακας 6.3 : Αποτελέσματα προτύπου Γραμμικής Παλινδρόμησης

Από το μοντέλο αυτό εξάγεται η ακόλουθη σχέση που συνδέει την εξαρτημένη με τις εξαρτημένες μεταβλητές :

$$Egr = 131,904 + 1,179E-06*Eac^2 + 2,843E-03*Esg^2 + 0,174 * hac^2 + 4,362 E-02*hgr^2 \quad (6.1)$$

6.2.2.1 Η επιρροή του τετραγώνου του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων

Όπως παρατηρείται από τα στοιχεία του Πίνακα 6.3, η αύξηση στην τιμή του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Πιο συγκεκριμένα , αύξηση του μέτρου

δυσκαμψίας του ασφαλομίγματος κατά 10 % επιφέρει αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων κατά  $1,179 \cdot 10^{-5} \%$ . Διαπιστώνει κανείς δηλαδή ότι η μεταβολή στην τιμή του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλομίγματος δεν επιφέρει σημαντικές μεταβολές στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Αυτό εξάλλου αποδεικνύεται και από τον συντελεστή Beta ο οποίος είναι ο μικρότερος από κάθε άλλη ανεξάρτητη μεταβλητή. Όσον αφορά το συντελεστή student-t, διαπιστώνεται με βάση τις τιμές του Πίνακα 6.1, ότι το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλομίγματος δεν είναι στατιστικά σημαντική παράμετρος για επίπεδο εμπιστοσύνης 90 %, δεδομένου ότι  $0,792 < 1,296$ .

6.2.2.2 *Η επιρροή του τετραγώνου του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων*

Όπως παρατηρείται από τα στοιχεία του Πίνακα 6.3, η αύξηση στην τιμή του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Πιο συγκεκριμένα, αύξηση του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης κατά 10 % επιφέρει αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων κατά  $2,843 \cdot 10^{-2} \%$ . Διαπιστώνει κανείς δηλαδή ότι η μεταβολή στην τιμή του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης επιφέρει σημαντικές μεταβολές στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Αυτό εξάλλου αποδεικνύεται και από τον συντελεστή Beta ο οποίος είναι σημαντικός σε σχέση με τις άλλες ανεξάρτητες μεταβλητές. Όσον αφορά το συντελεστή student-t, διαπιστώνεται με βάση τις τιμές του Πίνακα 6.1, ότι το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης είναι στατιστικά σημαντική παράμετρος για επίπεδο εμπιστοσύνης 95 %, δεδομένου ότι η απόλυτη τιμή 1,773 βρίσκεται στο διάστημα τιμών [ 1,671,2 ].

6.2.2.3 *Η επιρροή του τετραγώνου του πάχους των ασφαλικών στρώσεων στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων*

Όπως παρατηρείται από τα στοιχεία του Πίνακα 6.3, η αύξηση στην τιμή του πάχους των ασφαλικών στρώσεων έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Πιο συγκεκριμένα, αύξηση του πάχους των ασφαλικών στρώσεων κατά 10 % επιφέρει αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων κατά 1,74 %. Διαπιστώνει κανείς δηλαδή ότι η μεταβολή στην τιμή του πάχους των ασφαλικών στρώσεων επιφέρει αρκετά σημαντικές μεταβολές στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Αυτό εξάλλου αποδεικνύεται και από τον συντελεστή Beta ο οποίος είναι σημαντικός. Όσον αφορά το συντελεστή student-t, διαπιστώνεται με βάση τις τιμές του Πίνακα 6.1, ότι το πάχος των ασφαλικών στρώσεων είναι στατιστικά σημαντική παράμετρος για επίπεδο εμπιστοσύνης 90 %, δεδομένου ότι η απόλυτη τιμή 1,623 βρίσκεται στο διάστημα τιμών [ 1,296, 1,671 ].

6.2.2.4 *Η επιρροή του τετραγώνου του πάχους των αμμοχάλικων στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων*

Όπως παρατηρείται από τα στοιχεία του Πίνακα 6.3, η αύξηση στην τιμή του πάχους των αμμοχάλικων έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Πιο συγκεκριμένα, αύξηση του πάχους των αμμοχάλικων κατά 10 % επιφέρει αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων κατά  $4,362 \cdot 10^{-1} \%$ . Διαπιστώνει κανείς δηλαδή ότι η μεταβολή στην τιμή του πάχους των αμμοχάλικων επιφέρει σημαντικές μεταβολές στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Αυτό εξάλλου αποδεικνύεται και από τον συντελεστή Beta ο οποίος είναι ο μεγαλύτερος από κάθε άλλη ανεξάρτητη μεταβλητή. Όσον αφορά το συντελεστή student-t, διαπιστώνεται με βάση τις τιμές του Πίνακα 6.1, ότι το πάχος των αμμοχάλικων είναι στατιστικά σημαντική

παράμετρος για επίπεδο εμπιστοσύνης 97,5 %, δεδομένου ότι η απόλυτη τιμή 2,332 βρίσκεται στο διάστημα τιμών [ 2, 2,39 ].

### 6.3 Ανάλυση 2<sup>ου</sup> προτύπου μέτρου ελαστικότητας αμμοχάλικων

Το πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε είναι το log-log και στον Πίνακα 6.4 παρουσιάζεται ο συντελεστής συσχέτισης αυτού του μοντέλου.

| <i>Model Summary</i> |                                                |          |                   |                            |
|----------------------|------------------------------------------------|----------|-------------------|----------------------------|
| Model                | R                                              | R Square | Adjusted R Square | Std. Error of the Estimate |
| 1                    | 0,37824                                        | 0,14307  | 0,077148773       | 0,199523215                |
| a                    | Predictors: (Constant), LHGR, LEAC, LHAC, LESG |          |                   |                            |
| b                    | Dependent Variable: LEGR                       |          |                   |                            |

Πίνακας 6.4 : Συντελεστής συσχέτισης

Ακόλουθα παρατίθεται ο Πίνακας 6.5, ο οποίος αποτελείται από έξι στήλες. Στην πρώτη, εμφανίζονται οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προτύπου. Οι μεταβλητές αυτές προέκυψαν ύστερα από την στατιστική επεξεργασία ως οι στατιστικά σημαντικές από το σύνολο των ανεξάρτητων μεταβλητών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση στατιστικά σημαντικές εμφανίζονται οι LEAC, LESG, LHAC και LHGR .



| <i>Coefficients</i>         |                             |            |                           |       |       |
|-----------------------------|-----------------------------|------------|---------------------------|-------|-------|
| Model                       | Unstandardized Coefficients |            | Standardized Coefficients |       |       |
|                             | B                           | Std. Error | Beta                      | t     | Sig.  |
| 1 (Constant)                | 1,154                       | 0,518      |                           | 2,228 | 0,03  |
| LEAC                        | 5,394 E-02                  | 0,069      | 0,101                     | 0,778 | 0,44  |
| LESG                        | 0,195                       | 0,103      | 0,261                     | 1,885 | 0,065 |
| LHAC                        | 0,261                       | 0,146      | 0,241                     | 1,788 | 0,08  |
| LHGR                        | 0,309                       | 0,13       | 0,321                     | 2,376 | 0,021 |
| a Dependent Variable : LEGR |                             |            |                           |       |       |

Πίνακας 6.5 : Αποτελέσματα προτύπου Γραμμικής Παλινδρόμησης

Από το μοντέλο αυτό εξάγεται η ακόλουθη σχέση που συνδέει την εξαρτημένη με τις ανεξάρτητες μεταβλητές :

$$Egr = 10*(1,154 + 5,394 E-02*LEac + 0,195*LEsg + 0,261*Lhac + 0,309*Lhgr) \quad (6.2)$$

### 6.3.1 Η επιρροή του λογαρίθμου του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων

Όπως παρατηρείται από τα στοιχεία του Πίνακα 6.5, η αύξηση στην τιμή του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Πιο συγκεκριμένα , αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος κατά 10 % επιφέρει αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων κατά  $5,394*10^{-1}$  %. Διαπιστώνει κανείς δηλαδή ότι η μεταβολή στην τιμή του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος δεν επιφέρει σημαντικές μεταβολές στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Αυτό εξάλλου αποδεικνύεται και από τον συντελεστή Beta ο οποίος είναι ο μικρότερος από κάθε άλλη ανεξάρτητη μεταβλητή. Όσον αφορά το συντελεστή student-t, διαπιστώνεται με βάση τις τιμές του Πίνακα 6.1, ότι το μέτρο δυσκαμψίας του

ασφαλομίγματος δεν είναι στατιστικά σημαντική παράμετρος για επίπεδο εμπιστοσύνης 90 %, δεδομένου ότι  $0,778 < 1,296$ .

### **6.3.2 Η επιρροή του λογαρίθμου του μέτρου ελαστικότητας τις στρώσης έδρασης στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων**

Όπως παρατηρείται από τα στοιχεία του Πίνακα 6.5, η αύξηση στην τιμή του μέτρου ελαστικότητας τις στρώσης έδρασης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Πιο συγκεκριμένα, αύξηση του μέτρου ελαστικότητας τις στρώσης έδρασης κατά 10 % επιφέρει αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων κατά 1,95 %. Διαπιστώνει κανείς δηλαδή ότι η μεταβολή στην τιμή του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης επιφέρει σημαντικές μεταβολές στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Αυτό εξάλλου αποδεικνύεται και από τον συντελεστή Beta ο οποίος είναι σημαντικός σε σχέση με τις άλλες ανεξάρτητες μεταβλητές. Όσον αφορά το συντελεστή student-t, διαπιστώνεται με βάση τις τιμές του Πίνακα 6.1, ότι το μέτρο ελαστικότητας τις στρώσης έδρασης είναι στατιστικά σημαντική παράμετρος για επίπεδο εμπιστοσύνης 95 %, δεδομένου ότι η απόλυτη τιμή 1,885 βρίσκεται στο διάστημα τιμών [ 1,671,2 ].

### **6.3.3 Η επιρροή του λογαρίθμου του πάχους των ασφαλικών στρώσεων στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων**

Όπως παρατηρείται από τα στοιχεία του Πίνακα 6.5, η αύξηση στην τιμή του πάχους των ασφαλικών στρώσεων έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Πιο συγκεκριμένα, αύξηση του πάχους των ασφαλικών στρώσεων κατά 10 % επιφέρει αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων κατά 2,61 %. Διαπιστώνει κανείς δηλαδή ότι η μεταβολή στην τιμή του πάχους των ασφαλικών στρώσεων επιφέρει αρκετά σημαντικές μεταβολές στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Αυτό εξάλλου αποδεικνύεται και από τον συντελεστή Beta ο οποίος είναι σημαντικός. Όσον αφορά το συντελεστή student-t, διαπιστώνεται με βάση τις τιμές του Πίνακα 6.1,

ότι το πάχος των ασφαλικών στρώσεων είναι στατιστικά σημαντική παράμετρος για επίπεδο εμπιστοσύνης 95 %, δεδομένου ότι η απόλυτη τιμή 1,788 βρίσκεται στο διάστημα τιμών [ 1,671,2 ].

#### **6.3.4 Η επιρροή του λογαρίθμου του πάχους των αμμοχάλικων στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων**

Όπως παρατηρείται από τα στοιχεία του Πίνακα 6.5, η αύξηση στην τιμή του πάχους των αμμοχάλικων έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Πιο συγκεκριμένα, αύξηση του πάχους των αμμοχάλικων κατά 10 % επιφέρει αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων κατά 3,09 %. Διαπιστώνει κανείς δηλαδή ότι η μεταβολή στην τιμή του πάχους των αμμοχάλικων επιφέρει σημαντικές μεταβολές στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Αυτό εξάλλου αποδεικνύεται και από τον συντελεστή Beta ο οποίος είναι ο μεγαλύτερος από κάθε άλλη ανεξάρτητη μεταβλητή. Όσον αφορά το συντελεστή student-t, διαπιστώνεται με βάση τις τιμές του Πίνακα 6.1, ότι το πάχος των αμμοχάλικων είναι στατιστικά σημαντική παράμετρος για επίπεδο εμπιστοσύνης 97,5 %, δεδομένου ότι η απόλυτη τιμή 2,376 βρίσκεται στο διάστημα τιμών [ 2, 2,39 ].

#### **6.4 Ανάλυση 3<sup>ου</sup> προτύπου μέτρου ελαστικότητας αμμοχάλικων**

Το πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε είναι το  $\ln - \ln + \ln^2$  με τις μέσες τιμές της εξαρτημένης και των ανεξάρτητων μεταβλητών και στον Πίνακα 6.6 παρουσιάζεται ο συντελεστής συσχέτισης αυτού του μοντέλου.

| <i>Model Summary</i> |                                             |          |                   |                            |
|----------------------|---------------------------------------------|----------|-------------------|----------------------------|
| Model                | R                                           | R Square | Adjusted R Square | Std. Error of the Estimate |
| 1                    | 0,94773                                     | 0,89818  | 0,69455241        | 119,3910419                |
| a                    | Predictors: (Constant), HGR2, HAC, EAC, ESG |          |                   |                            |
| b                    | Dependent Variable: EGR                     |          |                   |                            |

Πίνακας 6.6 : Συντελεστής συσχέτισης

Ο πίνακας δείχνει ότι ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$  του μοντέλου αυτού είναι 0,898, ιδιαίτερα σημαντικός σε σχέση με το συντελεστή που εξάχθηκε από το ίδιο μοντέλο για τις συνεχείς τιμές ( κεφ.: 6.2 ).

Ακόλουθα παρατίθεται ο Πίνακας 6.7, ο οποίος αποτελείται από έξι στήλες. Στην πρώτη, εμφανίζονται οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προτύπου. Οι μεταβλητές αυτές προέκυψαν ύστερα από την στατιστική επεξεργασία ως οι στατιστικά σημαντικές από το σύνολο των ανεξάρτητων μεταβλητών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση στατιστικά σημαντικές εμφανίζονται οι EAC, ESG, HAC και HGR<sup>2</sup>.

| <i>Coefficients</i> |                             |            |                           |        |       |
|---------------------|-----------------------------|------------|---------------------------|--------|-------|
| Model               | Unstandardized Coefficients |            | Standardized Coefficients |        |       |
|                     | B                           | Std. Error | Beta                      | t      | Sig.  |
| 1 ( Constant )      | -2142,993                   | 971,575    |                           | -2,206 | 0,158 |
| EAC                 | 0,346                       | 0,172      | 0,496                     | 2,013  | 0,182 |
| ESG                 | -3,08                       | 7,264      | -0,167                    | -0,424 | 0,713 |
| HAC                 | 38,953                      | 32,661     | 0,281                     | 1,193  | 0,355 |
| HGR2                | 0,348                       | 0,173      | 0,767                     | 2,009  | 0,182 |
| a                   | Dependent Variable: EGR     |            |                           |        |       |

Πίνακας 6.7 : Αποτελέσματα προτύπου Γραμμικής Παλινδρόμησης

Από το μοντέλο αυτό εξάγεται η ακόλουθη σχέση που συνδέει την εξαρτημένη με τις ανεξάρτητες μεταβλητές :

$$Egr = - 2142,993 + 0,346*Eac - 3,08*Esg + 38,953*hac + 0,348*hgr^2 \quad (6.3)$$

#### 6.4.1 *Η επιρροή του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλομίγματος στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων*

Όπως παρατηρείται από τα στοιχεία του Πίνακα 6.7, η αύξηση στην τιμή του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλομίγματος έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Πιο συγκεκριμένα , αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλομίγματος κατά 10 % επιφέρει αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων κατά 3,46 %. Διαπιστώνει κανείς δηλαδή ότι η μεταβολή στην τιμή του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλομίγματος επιφέρει σημαντικές μεταβολές στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Αυτό εξάλλου αποδεικνύεται και από τον συντελεστή Beta ο οποίος είναι ιδιαίτερα σημαντικός σε σχέση με τις υπόλοιπες ανεξάρτητες μεταβλητές. Όσον αφορά το συντελεστή student-t, διαπιστώνεται με βάση τις τιμές του Πίνακα 6.1, ότι το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλομίγματος είναι στατιστικά σημαντική παράμετρος για επίπεδο εμπιστοσύνης 97,5%, δεδομένου ότι η απόλυτη τιμή 2,013 βρίσκεται στο διάστημα τιμών [ 2, 2,39 ].

#### 6.4.2 *Η επιρροή του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων*

Όπως παρατηρείται από τα στοιχεία του Πίνακα 6.7, η αύξηση στην τιμή του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Πιο συγκεκριμένα , αύξηση του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης κατά 10 % επιφέρει μείωση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων κατά 30,8 %. Διαπιστώνει κανείς δηλαδή ότι η

μεταβολή στην τιμή του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης δεν επιφέρει σημαντικές μεταβολές στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Αυτό εξάλλου αποδεικνύεται και από τον συντελεστή Beta ο οποίος είναι ο μικρότερος σε σχέση με τις άλλες ανεξάρτητες μεταβλητές. Όσον αφορά το συντελεστή student-t, διαπιστώνεται με βάση τις τιμές του Πίνακα 6.1, ότι το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης δεν είναι στατιστικά σημαντική παράμετρος για επίπεδο εμπιστοσύνης 90 %, δεδομένου ότι  $0,424 < 1,296$ .

#### **6.4.3 Η επιρροή του πάχους των ασφαλικών στρώσεων στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων**

Όπως παρατηρείται από τα στοιχεία του Πίνακα 6.7, η αύξηση στην τιμή του πάχους των ασφαλικών στρώσεων έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Πιο συγκεκριμένα, αύξηση του πάχους των ασφαλικών στρώσεων κατά 10 % επιφέρει αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων κατά 389,53 %. Διαπιστώνει κανείς δηλαδή ότι η μεταβολή στην τιμή του πάχους των ασφαλικών στρώσεων επιφέρει αρκετά σημαντικές μεταβολές στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Αυτό εξάλλου αποδεικνύεται και από τον συντελεστή Beta ο οποίος είναι αρκετά σημαντικός. Όσον αφορά το συντελεστή student-t, διαπιστώνεται με βάση τις τιμές του Πίνακα 6.1, ότι το πάχος των ασφαλικών στρώσεων δεν είναι στατιστικά σημαντική παράμετρος για επίπεδο εμπιστοσύνης 90 %, δεδομένου ότι  $1,193 < 1,296$ .

#### **6.4.4 Η επιρροή του τετραγώνου του πάχους των αμμοχάλικων στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων**

Όπως παρατηρείται από τα στοιχεία του Πίνακα 6.7, η αύξηση στην τιμή του πάχους των αμμοχάλικων έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Πιο συγκεκριμένα, αύξηση του πάχους των αμμοχάλικων κατά 10 % επιφέρει αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων κατά 3,48 %. Διαπιστώνει κανείς δηλαδή ότι η μεταβολή στην τιμή

του πάχους των αμμοχάλικων επιφέρει σημαντικές μεταβολές στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Αυτό εξάλλου αποδεικνύεται και από τον συντελεστή Beta ο οποίος είναι ο μεγαλύτερος από κάθε άλλη ανεξάρτητη μεταβλητή. Όσον αφορά το συντελεστή student-t, διαπιστώνεται με βάση τις τιμές του Πίνακα 6.1, ότι το πάχος των αμμοχάλικων είναι στατιστικά σημαντική παράμετρος για επίπεδο εμπιστοσύνης 97,5 %, δεδομένου ότι η απόλυτη τιμή 2,009 βρίσκεται στο διάστημα τιμών [ 2, 2,39 ].

### 6.5 Ανάλυση 4<sup>ου</sup> προτύπου μέτρου ελαστικότητας αμμοχάλικων

Το πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε είναι το log-log με τις μέσες όμως τιμές της εξαρτημένης και των ανεξάρτητων μεταβλητών και στον Πίνακα 6.8 παρουσιάζεται ο συντελεστής συσχέτισης αυτού του μοντέλου.

| <i>Model Summary</i> |                                                |          |                   |                            |
|----------------------|------------------------------------------------|----------|-------------------|----------------------------|
| Model                | R                                              | R Square | Adjusted R Square | Std. Error of the Estimate |
| 1                    | 0,97199                                        | 0,94477  | 0,834306311       | 0,087190506                |
| a                    | Predictors: (Constant), LHGR, LHAC, LEAC, LESG |          |                   |                            |
| b                    | Dependent Variable: LEGR                       |          |                   |                            |

Πίνακας 6.8 : Συντελεστής συσχέτισης

Ο πίνακας αυτός δείχνει ότι ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$  του μοντέλου αυτού είναι 0,945, ιδιαίτερα σημαντικός σε σχέση με το συντελεστή που εξάχθηκε από το ίδιο μοντέλο για τις συνεχείς τιμές ( κεφ.: 6.3 ).

Ακόλουθα παρατίθεται ο Πίνακας 6.9, ο οποίος αποτελείται από έξι στήλες. Στην πρώτη, εμφανίζονται οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προτύπου. Οι μεταβλητές αυτές προέκυψαν ύστερα από την στατιστική επεξεργασία ως οι στατιστικά σημαντικές από το σύνολο των ανεξάρτητων μεταβλητών. Στη

συγκεκριμένη περίπτωση στατιστικά σημαντικές εμφανίζονται οι LEAC, LESG, LHAC και LHGR .

| <i>Coefficients</i>        |                             |            |                           |        |       |
|----------------------------|-----------------------------|------------|---------------------------|--------|-------|
| Model                      | Unstandardized Coefficients |            | Standardized Coefficients |        |       |
|                            | B                           | Std. Error | Beta                      | t      | Sig.  |
| 1 ( Constant )             | -8,945                      | 2,749      |                           | -3,254 | 0,083 |
| LEAC                       | 1,885                       | 0,801      | 0,429                     | 2,354  | 0,143 |
| LESG                       | -0,368                      | 1,374      | -0,08                     | -0,268 | 0,814 |
| LHAC                       | 2,017                       | 0,896      | 0,395                     | 2,251  | 0,153 |
| LHGR                       | 1,994                       | 0,858      | 0,673                     | 2,324  | 0,146 |
| a Dependent Variable: LEGR |                             |            |                           |        |       |

Πίνακας 6.9 : Αποτελέσματα προτύπου Γραμμικής Παλινδρόμησης

Από το μοντέλο αυτό εξάγεται η ακόλουθη σχέση που συνδέει την εξαρτημένη με τις ανεξάρτητες μεταβλητές :

$$Egr = 10 * (- 8,945 + 1,885 * LEac - 0,368 * LEsg + 2,017 * Lhac + 1,994 * Lhgr) \quad (6.4)$$

#### 6.5.1 Η επιρροή του λογαρίθμου του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων

Όπως παρατηρείται από τα στοιχεία του Πίνακα 6.9, η αύξηση στην τιμή του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Πιο συγκεκριμένα , αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος κατά 10 % επιφέρει αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων κατά 18,85 %. Διαπιστώνει κανείς δηλαδή ότι η μεταβολή στην τιμή του μέτρου δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος επιφέρει



σημαντικές μεταβολές στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Αυτό εξάλλου αποδεικνύεται και από τον συντελεστή Beta ο οποίος είναι ιδιαίτερα σημαντικός σε σχέση με τις υπόλοιπες ανεξάρτητες μεταβλητές. Όσον αφορά το συντελεστή student-t, διαπιστώνεται με βάση τις τιμές του Πίνακα 6.1, ότι το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλομίγματος είναι στατιστικά σημαντική παράμετρος για επίπεδο εμπιστοσύνης 97,5 %, δεδομένου ότι η απόλυτη τιμή 2,354 βρίσκεται στο διάστημα τιμών [ 2, 2,39 ].

#### **6.5.2 Η επιρροή του λογαρίθμου του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων**

Όπως παρατηρείται από τα στοιχεία του Πίνακα 6.9, η αύξηση στην τιμή του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Πιο συγκεκριμένα , αύξηση του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης κατά 10 % επιφέρει μείωση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων κατά 3,68 %. Διαπιστώνει κανείς δηλαδή ότι η μεταβολή στην τιμή του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης δεν επιφέρει σημαντικές μεταβολές στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Αυτό εξάλλου αποδεικνύεται και από τον συντελεστή Beta ο οποίος είναι ο μικρότερος σε σχέση με τις άλλες ανεξάρτητες μεταβλητές. Όσον αφορά το συντελεστή student-t, διαπιστώνεται με βάση τις τιμές του Πίνακα 6.1, ότι το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης δεν είναι στατιστικά σημαντική παράμετρος για επίπεδο εμπιστοσύνης 90 %, δεδομένου ότι  $0,268 < 1,296$ .

#### **6.5.3 Η επιρροή του λογαρίθμου του πάχους των ασφαλικών στρώσεων στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων**

Όπως παρατηρείται από τα στοιχεία του Πίνακα 6.9, η αύξηση στην τιμή του πάχους των ασφαλικών στρώσεων έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Πιο συγκεκριμένα , αύξηση του πάχους των ασφαλικών στρώσεων κατά 10 % επιφέρει αύξηση του μέτρου ελαστικότητας

των αμμοχάλικων κατά 20,17 %. Διαπιστώνει κανείς δηλαδή ότι η μεταβολή στην τιμή του πάχους των ασφαλικών στρώσεων επιφέρει αρκετά σημαντικές μεταβολές στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Αυτό εξάλλου αποδεικνύεται και από τον συντελεστή Beta ο οποίος είναι σημαντικός. Όσον αφορά το συντελεστή student-t, διαπιστώνεται με βάση τις τιμές του Πίνακα 6.1, ότι το πάχος των ασφαλικών στρώσεων είναι στατιστικά σημαντική παράμετρος για επίπεδο εμπιστοσύνης 97,5 %, δεδομένου ότι η απόλυτη τιμή 2,251 βρίσκεται στο διάστημα τιμών [ 2, 2,39 ].

#### **6.5.4 Η επιρροή του λογαρίθμου του πάχους των αμμοχάλικων στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων**

Όπως παρατηρείται από τα στοιχεία του Πίνακα 6.9, η αύξηση στην τιμή του πάχους των αμμοχάλικων έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Πιο συγκεκριμένα , αύξηση του πάχους των αμμοχάλικων κατά 10 % επιφέρει αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων κατά 19,94 %. Διαπιστώνει κανείς δηλαδή ότι η μεταβολή στην τιμή του πάχους των αμμοχάλικων επιφέρει σημαντικές μεταβολές στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων. Αυτό εξάλλου αποδεικνύεται και από τον συντελεστή Beta ο οποίος είναι ο μεγαλύτερος από κάθε άλλη ανεξάρτητη μεταβλητή. Όσον αφορά το συντελεστή student-t, διαπιστώνεται με βάση τις τιμές του Πίνακα 6.1, ότι το πάχος των αμμοχάλικων είναι στατιστικά σημαντική παράμετρος για επίπεδο εμπιστοσύνης 97,5 %, δεδομένου ότι η απόλυτη τιμή 2,324 βρίσκεται στο διάστημα τιμών [ 2, 2,39 ].

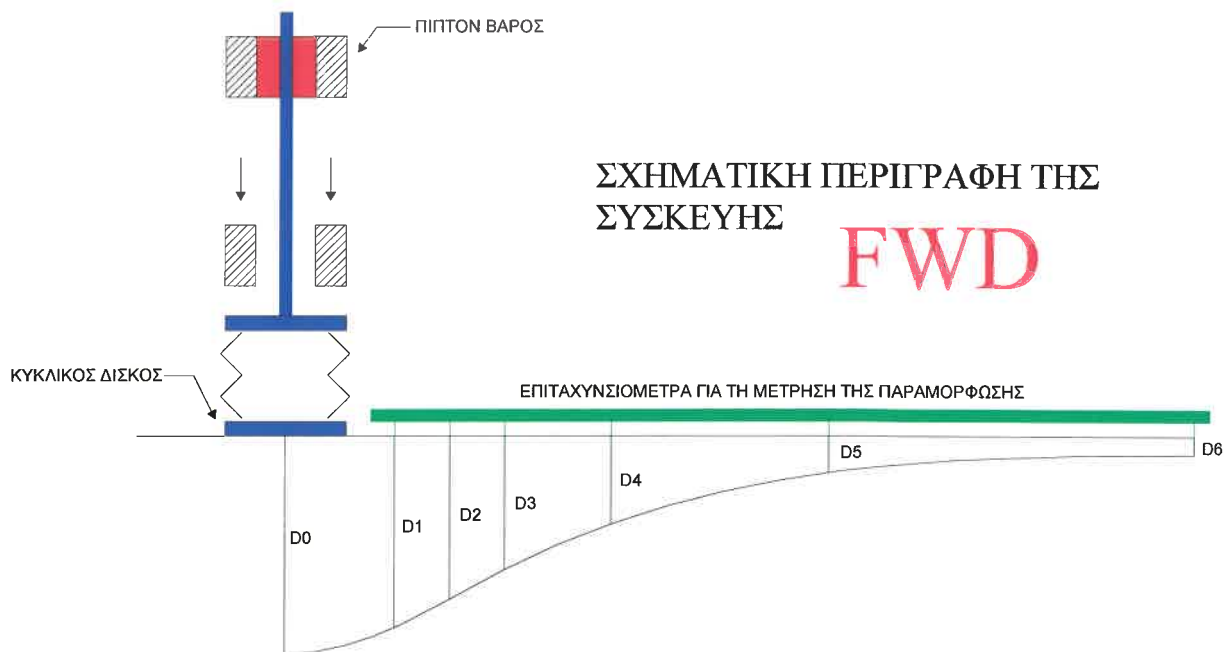
## **Κεφάλαιο 7**

### **Μεθοδολογία ανάστροφου υπολογισμού**

## 7.1 Εισαγωγή

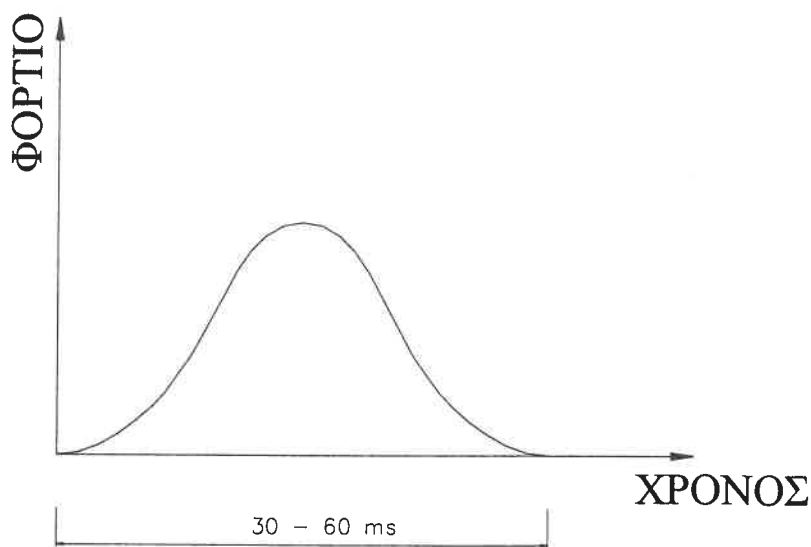
Στο στάδιο αυτό κρίθηκε σκόπιμη η συλλογή επί τόπου μετρήσεων για την αξιολόγηση των εξαγόμενων, με τη συμβολή της πολυπαραμετρικής στατιστικής ανάλυσης, μοντέλων που συνδέουν το μέτρο ελαστικότητας των ασύνδετων υλικών με το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία του Κ.Ε.Δ.Ε (Κέντρο Ελέγχου Δημοσίων Έργων) από δοκιμές FWD σε τμήματα μη κυκλοφορημένων ασφαλοτάπητων της Αττικής Οδού. Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να ευχαριστήσω τους υπεύθυνους της Αττικής Οδού για την πολύτιμη βοήθειά τους και την άψογη συνεργασία μας. Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις από την τράπεζα δεδομένων του Ε.Μ.Π. σε οδοστρώματα συντήρησης. Συγκεκριμένα, συλλέχθηκαν αποτελέσματα από δοκιμές με HWD (Heavy Weight Deflectometer). Ακόλουθα, για την επεξεργασία των ελαστικών υποχωρήσεων (deflections) από τις δοκιμές FWD και HWD, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του ανάστροφου υπολογισμού, που περιγράφεται στη συνέχεια.

## 7.2 Περιγραφή της συσκευής FWD



Σχήμα 7.1: Σκαρίφημα του συμβατικού FWD [31]

Η συσκευή FWD αποτελείται από ένα βάρος που αφήνεται να πέσει κάθετα (falling weight) υπό την επίδραση της βαρύτητας (σχήμα 7.1). Το βάρος αυτό πέφτοντας προσκρούει σε ειδικά σχεδιασμένες επιφάνειες και δημιουργεί μια παλμική φόρτιση που μεταβιβάζεται σε ένα κυκλικό δίσκο ο οποίος βρίσκεται σε επαφή με το οδόστρωμα. Με αυτό τον τρόπο η συσκευή επιβάλλει στο οδόστρωμα τη φόρτιση που παρουσιάζεται στο σχήμα 7.2. Η φόρτιση αυτή του οδοστρώματος, η οποία διαρκεί συνήθως 30 – 60 ms (ανάλογα με τη συσκευή και το υλικό που επιβάλλεται η φόρτιση), προσομοιάζει πολύ καλά την πραγματική φόρτιση του οδοστρώματος από τη διέλευση ενός άξονα οχήματος (η φόρτιση λόγω της διέλευσης φορτηγού με ταχύτητα 50 km/h διαρκεί περίπου 20 ms). Η αξιολόγηση αυτή προσομοίωση της πραγματικής φόρτισης του οδοστρώματος είναι και το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτών των συσκευών που έχει ως αποτέλεσμα την ευρεία εφαρμογή τους διεθνώς [31].



Σχήμα 7.2 [31]

Η μέγιστη δύναμη που μπορεί να ασκηθεί από το FWD [32] είναι ίση με:

$$F = \sqrt{2Mghk} \quad (7.1)$$

όπου

M: η μάζα που αφήνεται να πέσει

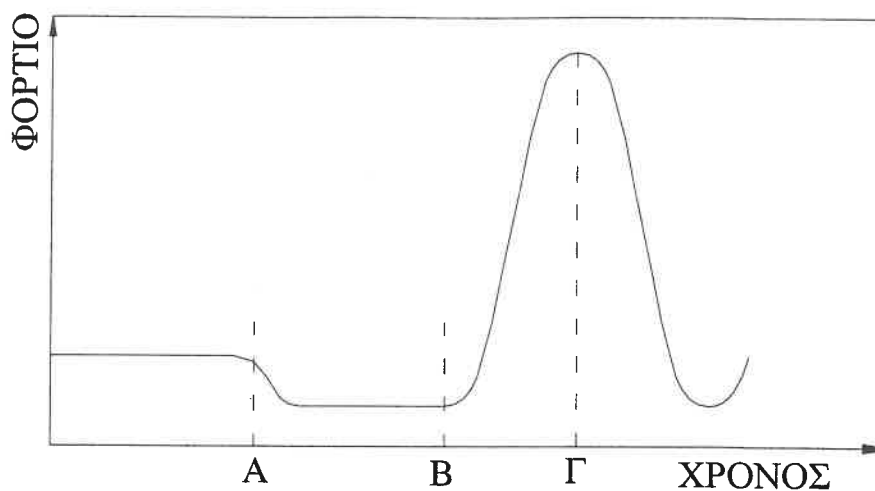
g: η επιτάχυνση της βαρύτητας

h: το ύψος πτώσης

k: σταθερά που εξαρτάται από την παραμόρφωση.

Όπως είναι προφανές, η δύναμη μπορεί να μεταβληθεί αλλάζοντας κάποιον από τους παράγοντες της εξίσωσης (7.1). Ο πιο συνηθισμένος τρόπος είναι η μεταβολή του ύψους πτώσης.

Ένα μικρό μειονέκτημα της συσκευής, είναι ότι δεν μπορεί να αποφευχθεί ένα μικρό στατικό φορτίο που επιβάλλει στο σημείο μέτρησης, έτσι ώστε η πλάκα να έχει πλήρη επαφή. Το γεγονός αυτό έχει κάποια επίπτωση στα αποτελέσματα. Όπως, όμως, δείχνει το σχήμα 7.3, το στατικό αυτό φορτίο είναι αμελητέο σε σχέση με το δυναμικό που προκαλείται, έτσι και η επίπτωση στα τελικά αποτελέσματα είναι αμελητέα.



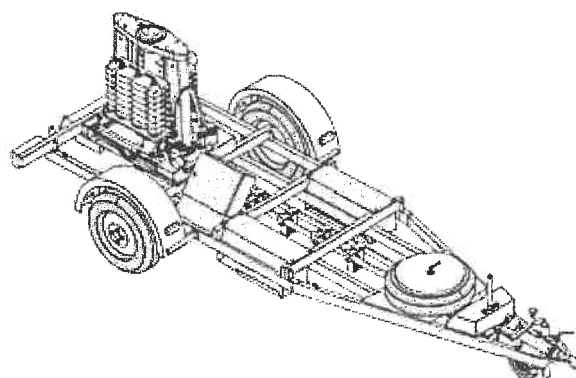
A: Χρόνος που το πέπτον βάρος απελευθερώνεται

B: Χρόνος που το βάρος αποκτά επαφή με την πλάκα

Γ: Χρόνος που εκδηλώνεται το μέγιστο φορτίο

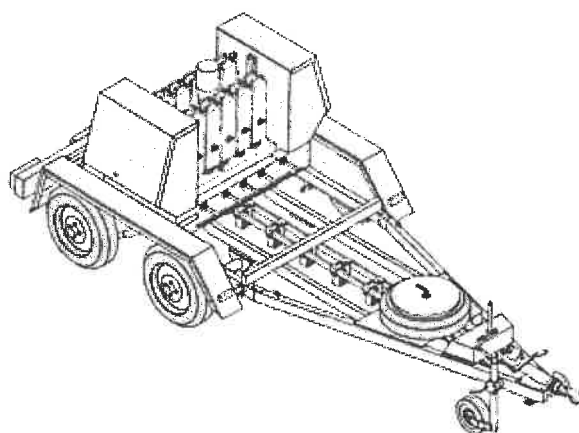
Σχήμα 7.3: Σχέση στατικού – δυναμικού φορτίου στο FWD [31]

Η δύναμη που παράγεται από έναν κανονικό τύπο FWD (σχήμα 7.4) για εργασίες σε αυτοκινητόδρομο κυμαίνεται ανάμεσα στα 4 και στα 107kN, αν και υπάρχει μια βαρύτερη έκδοσή του, η οποία χρησιμοποιήθηκε και στις μετρήσεις των οδοστρωμάτων συντήρησης, το βαρύ παραμορφωσίμετρο πέπτοντος βάρους (Heavy Weight Deflectometer – σχήμα 7.5), το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε οδοστρώματα αεροδρομίων, αλλά και σε οδοστρώματα από σκυρόδεμα, με δύναμη που φτάνει τα 245kN [33].



Σχήμα 7.4: Συμβατικός τύπος FWD (σκαρίφημα)

([www.dynatest.com/hardware/fwd\\_hwd.htm](http://www.dynatest.com/hardware/fwd_hwd.htm))



Σχήμα 7.5: Heavy Weight Deflectometer (σκαρίφημα)

([www.dynatest.com/hardware/fwd\\_hwd.htm](http://www.dynatest.com/hardware/fwd_hwd.htm))

Κατά τη διάρκεια της φόρτισης που προκαλεί το FWD στο οδόστρωμα καταγράφονται οι μέγιστες ελαστικές υποχωρήσεις  $D_i$ , κάτω από το φορτίο και σε ορισμένες αποστάσεις από αυτό (εξαρτάται από τη συσκευή)- (σχήμα 7.1).

Έχοντας έτσι τις μετρημένες από τη συσκευή ελαστικές υποχωρήσεις σε μια διατομή του οδοστρώματος, τα πάχη των στρώσεων από την σχετική επί τόπου λήψη πυρήνων (καρότων) καθώς και τις τιμές του λόγου του Poisson κάθε στρώσης, υπολογίζουμε (ανάστροφος υπολογισμός) τα μέτρα ελαστικότητας των υλικών των στρώσεων και κατά συνέπεια τη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος στη συγκεκριμένη διατομή, χρησιμοποιώντας το κατάλληλο λογισμικό.

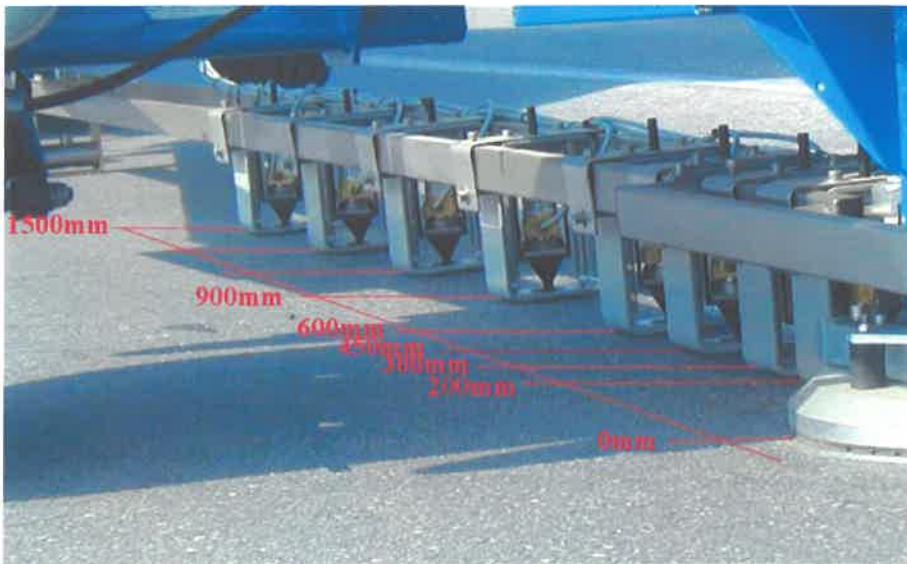
Οι συσκευές τύπου FWD, μετά την πτώση του βάρους, έχοντας τοποθετημένα γεωφώνα στον άξονα του φορτίου, αλλά και σε διάφορες αποστάσεις από αυτό, ουσιαστικά μετρούν την ασκούμενη τάση και την ελαστική υποχώρηση που αυτή προκαλεί στις συγκεκριμένες θέσεις. Το Heavy Weight Deflectometer που χρησιμοποιήθηκε στα οδοστρώματα συντήρησης συγκεκριμένα δίνει τα εξής στοιχεία:

| Surface<br>Temp | Air<br>Temp | Stress<br>(kPa) | Deflections in microns at distance (mm) |     |     |     |     |     |      |
|-----------------|-------------|-----------------|-----------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
|                 |             |                 | 0                                       | 200 | 300 | 450 | 600 | 900 | 1500 |

Πίνακας 7.1: Αποστάσεις γεωφώνων HWD



Δηλαδή, τις θερμοκρασίες αέρα και επιφάνειας της ασφαλτικής στρώσης, την ασκούμενη τάση και τις ελαστικές υποχωρήσεις στον άξονα του φορτίου και σε αποστάσεις 200, 300, 450, 600, 900 και 1500mm από αυτόν.

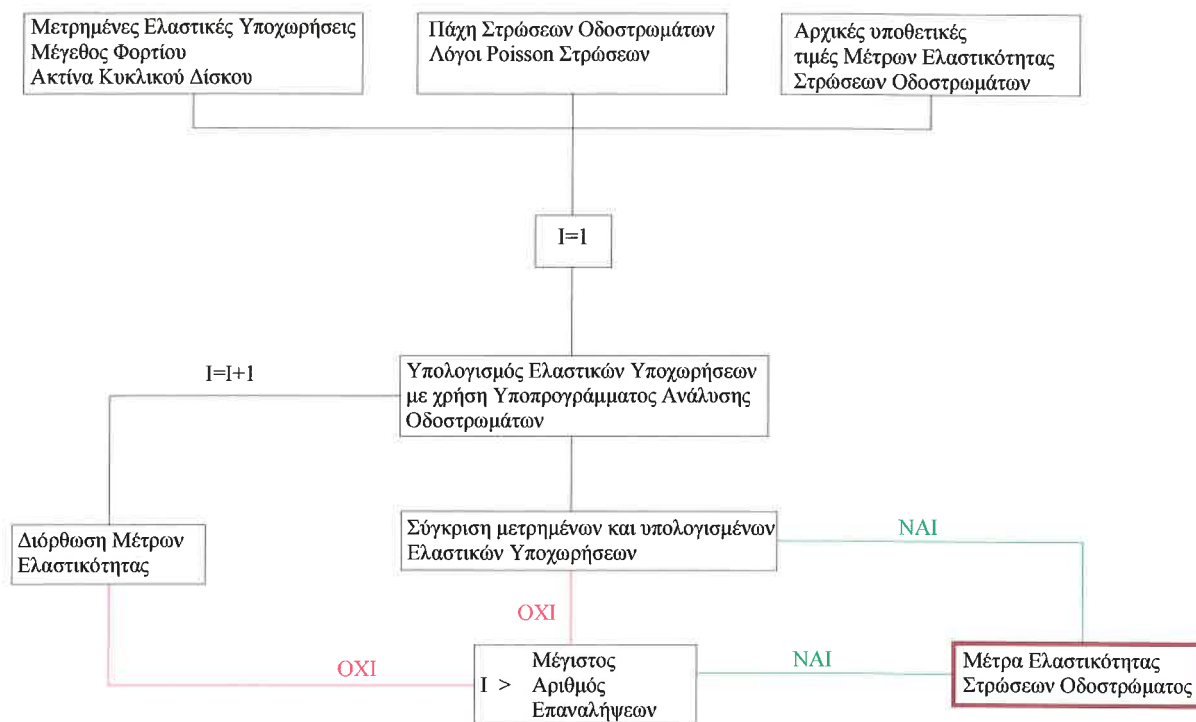


Σχήμα 7.6: Διάταξη αισθητήρων του HWD

Τα δεδομένα αυτά στη συνέχεια μπορούν να φανούν χρήσιμα σε πληθώρα αναλύσεων και στην εύρεση αρκετών χαρακτηριστικών του οδοστρώματος, ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε μελέτης. Στην παρούσα μελέτη, θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια τα πάχη των ασφαλτικών και στρώσεων αμμοχάλικων, καθώς και τα μέτρα ελαστικότητας των στρώσεων του οδοστρώματος, τα οποία προκύπτουν από την **ανάστροφη ανάλυση**.

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

Οι προσπάθειες για τη δημιουργία αξιόπιστων μεθόδων ανάστροφου υπολογισμού δρομολογούνται από το 1973 με τη δημιουργία νομογραφημάτων υπολογισμού μέτρων ελαστικότητας για οδοστρώματα δύο στρώσεων και φθάνουν σήμερα στις ευρέως εφαρμοζόμενες μεθόδους που χρησιμοποιούνται από διάφορα λογισμικά ηλεκτρονικών υπολογιστών [34]. Οι μέθοδοι αυτές αποτελούν προγράμματα ανάστροφου υπολογισμού τα οποία έχουν αναπτυχθεί κυρίως σε Ευρώπη και Αμερική. Ο αντικειμενικός σκοπός όλων αυτών των μεθόδων είναι η όσο το δυνατό καλύτερη προσέγγιση των μετρημένων από τη συσκευή FWD ελαστικών υποχωρήσεων. Δηλαδή, υπολογίζονται εκείνα τα μέτρα ελαστικότητας των επιμέρους στρώσεων για τα οποία οι ελαστικές υποχωρήσεις του οδοστρώματος προσεγγίζουν τις μετρημένες υποχωρήσεις. Διεθνώς έχουν αναπτυχθεί δύο κύριες και αντιπροσωπευτικές κατηγορίες μεθόδων ανάστροφου υπολογισμού, εκείνες που προσεγγίζουν τις μετρημένες υποχωρήσεις με διαδοχικούς κύκλους υπολογισμών (σχήμα 7.7) και εκείνες που για την προσέγγιση χρησιμοποιούν βάση δεδομένων.



Σχήμα 7.7: Διάγραμμα ροής μεθόδου ανάστροφου υπολογισμού με διαδοχικούς κύκλους [33]

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, βασίζεται στη μέθοδο των διαδοχικών κύκλων υπολογισμού και είναι συγκεκριμένα το πρόγραμμα MODCOMP3 [33], που αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ. Τα δεδομένα που απαιτεί το λογισμικό αυτό είναι οι μετρημένες από το FWD ελαστικές υποχωρήσεις (στον άξονα του φορτίου και σε αποστάσεις από αυτό – σχήμα 7.6.), τα πάχη των στρώσεων, οι λόγοι Poisson κάθε στρώσης και οι αρχικές υποθετικές τιμές (initial values) των μέτρων ελαστικότητας των στρώσεων του υπό εξέταση οδοστρώματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι η επιλογή των αρχικών τιμών των μέτρων ελαστικότητας της κάθε στρώσης δεν επηρεάζει καθόλου τα τελικά εξαγόμενα αποτελέσματα [35] όταν υπάρχει καλή προσέγγιση της μετρημένης κατανομής των ελαστικών υποχωρήσεων.

Με βάση όλα τα παραπάνω δεδομένα υπολογίζονται ανάστροφα οι ελαστικές υποχωρήσεις του οδοστρώματος στα σημεία στα οποία έχουν πραγματοποιηθεί μετρήσεις. Αυτές οι υποχωρήσεις αντιστοιχούν στη διατομή του οδοστρώματος που εξετάζεται, έχοντας όμως λάβει υπόψη υποθετικές τιμές των μέτρων ελαστικότητας.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η διαφορά των υπολογισμένων από τις μετρημένες υποχωρήσεις. Αν η διαφορά τους είναι μεγαλύτερη από ένα όριο  $\alpha$ , το οποίο προκαθορίζεται από το χρήστη, διορθώνονται τα αρχικά υποθετικά μέτρα ελαστικότητας βάσει του λόγου μετρημένης προς υπολογισμένη υποχώρηση.

Έπειτα, για τα διορθωμένα μέτρα ελαστικότητας πραγματοποιείται ένας νέος κύκλος υπολογισμών. Οι διαδοχικοί κύκλοι σταματούν όταν η διαφορά μετρημένων και υπολογισμένων υποχωρήσεων γίνει μικρότερη από το προκαθορισμένο όριο  $\alpha$ , οπότε και τα μέτρα ελαστικότητας που αντιστοιχούν σε αυτές τις τιμές μπορούν να θεωρηθούν ως τα τελικά του ανάστροφου υπολογισμού.

Ένα αξιοσημείωτο στάδιο της παραπάνω διαδικασίας, που επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια των εξαγόμενων αποτελεσμάτων, είναι ο έλεγχος με τον οποίο βρίσκεται αν η κατανομή των υπολογισμένων υποχωρήσεων προσεγγίζει την αντίστοιχη των μετρημένων. Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται συνήθως με μια μορφή συγκριτικής διαφοράς που δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{d_{\text{υπολ.}i} - d_{\text{μετρημ.}i}}{d_{\text{μετρημ.}i}} \times 100\% < \alpha \quad (7.2)$$

όπου  $n$  ο αριθμός των αισθητήρων της συσκευής.

Όταν ισχύει η παραπάνω σχέση, θεωρείται ότι η προσέγγιση έχει πραγματοποιηθεί λαμβάνοντας τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Από το γεγονός αυτό φαίνεται η μεγάλη σημασία του ορίου  $\alpha$ . Όσο πιο μικρή τιμή λαμβάνει, τόσο περισσότερη ακρίβεια υπάρχει στα εξαγόμενα αποτελέσματα. Η διεθνής εμπειρία έχει δείξει ότι όταν η τιμή του ορίου είναι μικρότερη ή ίση του 0,1%, τότε τα εξαγόμενα αποτελέσματα θεωρούνται αξιόπιστα [33].

Για τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού των επιτόπου μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το στατικό πρότυπο των τριών επάλληλων στρώσεων του σχήματος

4.1. Τα πάχη των στρώσεων λήφθηκαν από το μητρώο του έργου και έχουν εύρος διακύμανσης  $19 < h_{AC} < 21$  cm και  $25 < h_{gr} < 60$  cm για τις ασφαλικές στρώσεις και τις ενοποιημένες στρώσεις από ασύνδετα υλικά αντίστοιχα Παράλληλα, έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές :

1. Επειδή η διατομή της κατασκευής είναι πολυστρωματική, για λόγους συμβατότητας, μετατρέπεται στο ισοδύναμο στατικό πρότυπο των τριών επάλληλων στρώσεων.
2. Το μείγμα των ασφαλικών θεωρείται ομοειδές με αυτό που χρησιμοποιήθηκε κατά την επεξεργασία του λογισμικού των επάλληλων στρώσεων.

Τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού, όσον αφορά τα μέτρα ελαστικότητας, προέκυψαν εκτός ορίων των αντίστοιχων εύρων διακύμανσης που χρησιμοποιήθηκαν κατά την αναλυτική διαδικασία με το λογισμικό BISAR. Η διαφοροποίηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων ενδεχομένως μπορεί να οφείλεται σε: α) θέματα τεχνικής συσκευής, β) θέματα διαδικασίας μέτρησης, γ) παραδοχές λογισμικού ανάστροφου υπολογισμού.

Προκειμένου να ελεγχθεί η ικανότητα ψευδοεφελκυστικής αντοχής των αμμοχάλικων, τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού των επιτόπου μετρήσεων επεξεργάστηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού επάλληλων και προέκυψε ότι οι λόγοι τους  $\sigma_r/P_0$  ικανοποιούν τον περιορισμό  $\sigma_r/P_0 \leq 0,08$ .

Τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού θα χρησιμοποιηθούν για στατιστική επεξεργασία στο επόμενο κεφάλαιο, με σκοπό την αξιολόγηση των εξαγόμενων από την πολυπαραμετρική ανάλυση μοντέλων. Έχει ενδιαφέρον να εξεταστεί κατά πόσο τα μέτρα ελαστικότητας των ασύνδετων υλικών που προσδιορίζονται με τη βοήθεια των στατιστικών μοντέλων, προσεγγίζουν με ακρίβεια τα μέτρα ελαστικότητας των αμμοχάλικων που προκύπτουν από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού (back analysis). Ιδιαίτερη σημασία όμως, έχει η σύγκρισή τους με τα μέτρα ελαστικότητας που υπολογίζει η σχέση 2.8 των Dormon και Metcalf και αποτελεί αρχή κατά τη διαστασιολόγηση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων.

## **Κεφάλαιο 8**

### **Στατιστική επεξεργασία επιτόπου μετρήσεων**

## 8.1 Εισαγωγή

Ο σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι διπλός. Πρώτον, μέσω των 4 στατιστικών μοντέλων της πολυπαραμετρικής ανάλυσης εξάγεται το μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων, καθώς επίσης γίνεται χρήση της υπάρχουσας σχέσης των Dormon και Metcalf για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων.

Δεύτερον, τα εξαγόμενα αποτελέσματα των 2 περιπτώσεων συγκρίνονται με τα μέτρα ελαστικότητας που προκύπτουν από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού (back analysis) και παρουσιάζονται υπό τη μορφή των ακόλουθων γραφημάτων :

1. Ραβδόγραμμα
2. Διασποράς

## 8.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{lin-lin+lin}^2$

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού των επιτόπου μετρήσεων του Κ.Ε.Δ.Ε., θεωρούμε σαν δεδομένα εισαγωγής (input data) στο μοντέλο μας τα ακόλουθα :

1. Μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλτομίγματος (MN/m<sup>2</sup>)
2. Μέτρο ελαστικότητας στρώσης έδρασης (MN/m<sup>2</sup>)
3. Πάχος ασφατικής στρώσης (cm)
4. Πάχος στρώσης ασύνδετων υλικών (cm)

Υπενθίζεται ότι η εξίσωση που περιγράφει το μοντέλο  $\text{lin-lin+lin}^2$  έχει την ακόλουθη μορφή :

$$Egr = 131,904 + 1,179E-06*Eac^2 + 2,843E-03*Esg^2 + 0,174 * hac^2 + 4,362 E-02*hgr^2 \quad (8.1)$$

Με βάση τα παραπάνω προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα :

| <i>Model lin-lin+lin2</i> |           |
|---------------------------|-----------|
| A/A                       | Egr-model |
| 1                         | 2579,1    |
| 2                         | 3178,9    |
| 3                         | 1780,5    |
| 4                         | 3643,9    |
| 5                         | 2260,1    |
| 6                         | 1337,8    |
| 7                         | 2673,1    |
| 8                         | 3952,4    |
| 9                         | 4523      |
| 10                        | 5444,8    |
| 11                        | 4619,9    |
| 12                        | 2270,9    |
| 13                        | 1944,9    |
| 14                        | 1933,6    |
| 15                        | 2385,4    |
| 16                        | 5835,2    |
| 17                        | 5953,7    |
| 18                        | 4528,2    |
| 19                        | 4632,4    |

Πίνακας 8.1 : Μέτρα ελαστικότητας μοντέλου *lin-lin+lin2*

Παρατηρείται ότι τα εξαγόμενα μέτρα ελαστικότητας με τη βοήθεια του στατιστικού μοντέλου *lin-lin+lin<sup>2</sup>* εμφανίζουν πολύ υψηλές τιμές, γεγονός που ενδεχομένως μπορεί να οφείλεται στις υψηλές τιμές του μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης λόγω ύπαρξης στρώσεων αποστράγγισης; στη διατομή της κατασκευής και θα ήταν σκόπιμη περαιτέρω διερεύνηση, η οποία δεν εντάσσεται στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων με τη βοήθεια της εξίσωσης Dormon και Metcalf χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα δεδομένα από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού :

1. Μέτρο ελαστικότητας στρώσης έδρασης (MN/m<sup>2</sup>)
2. Πάχος στρώσης ασύνδετων υλικών (mm)



Υπενθυμίζεται ότι η εξίσωση των Dormon και Metcalf έχει την ακόλουθη μορφή :

$$E_{gr} = 0,2 * E_{sg} * h_{gr}^{0,45} \quad (\text{mm}) \quad (8.2)$$

Με βάση τα παραπάνω προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα :

| <i>Model lin-lin+lin2</i> |            |
|---------------------------|------------|
| A/A                       | Egr-Dormon |
| 1                         | 2588       |
| 2                         | 2392,2     |
| 3                         | 1682       |
| 4                         | 2567,4     |
| 5                         | 2782,3     |
| 6                         | 1449,2     |
| 7                         | 2171,5     |
| 8                         | 2687,3     |
| 9                         | 4233,9     |
| 10                        | 3215,2     |
| 11                        | 4305,1     |
| 12                        | 1950,7     |
| 13                        | 2529,7     |
| 14                        | 1778       |
| 15                        | 2899,7     |
| 16                        | 3335,2     |
| 17                        | 4150,4     |
| 18                        | 3557,4     |
| 19                        | 3587,1     |

Πίνακας 8.2 : Μέτρα ελαστικότητας εξίσωσης Dormon-Metcalf

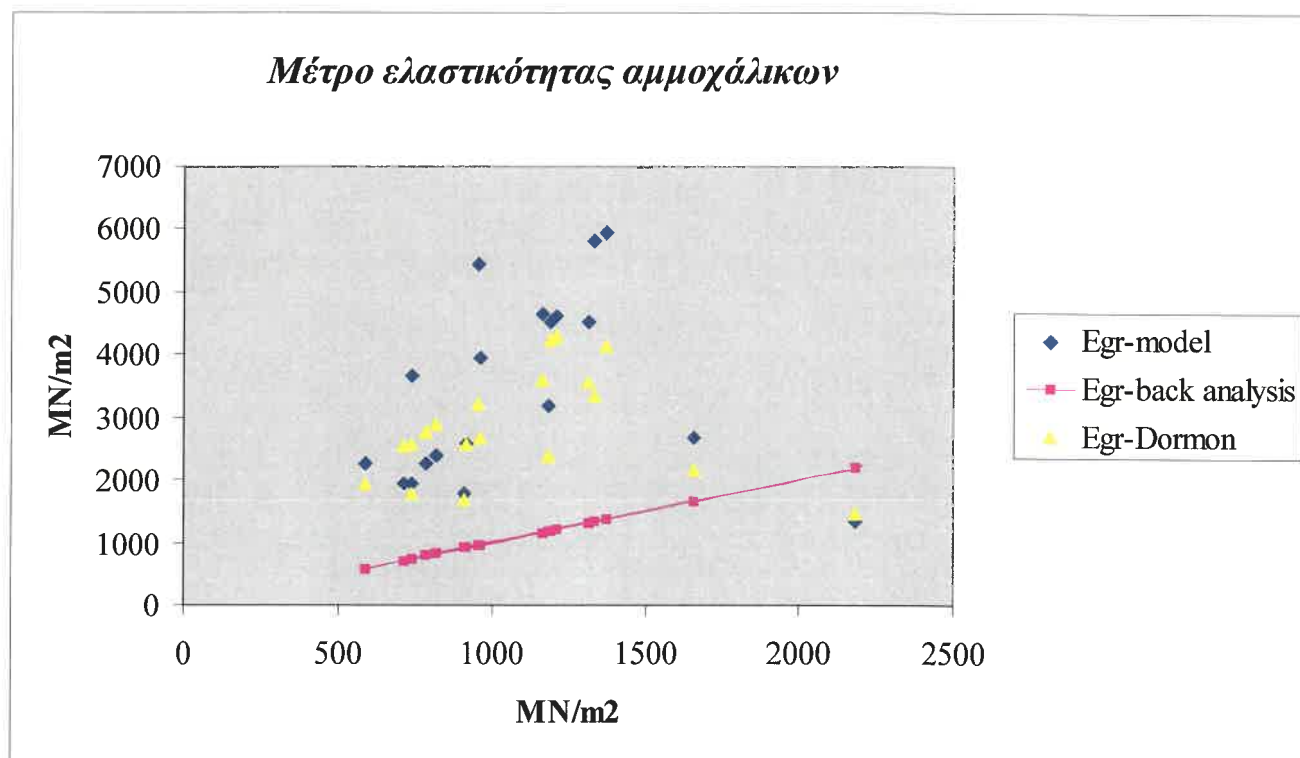
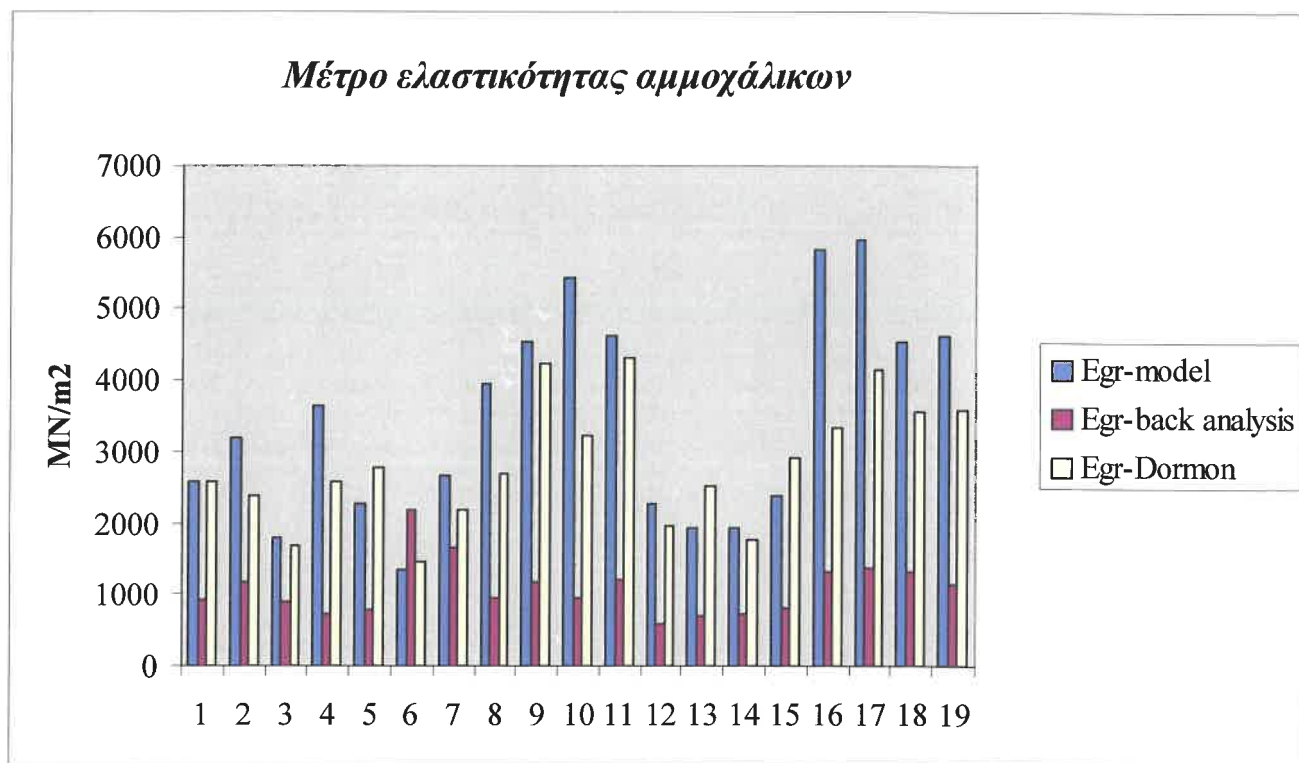
Δεδομένου ότι τα εξαγόμενα, μέσω της εξίσωσης των Dormon-Metcalf, μέτρα ελαστικότητας αμμοχάλικων εμφανίζουν πολύ υψηλές τιμές, τα μέτρα ελαστικότητας της στρώσης έδρασης από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού, που χρησιμοποιήθηκαν σαν δεδομένα εισαγωγής, εμφανίζονται παρακάτω.

Για να δοθεί μια πιο σαφής εικόνα των εξαγόμενων αποτελεσμάτων κρίνεται σκόπιμη η παρουσίασή τους σε ένα συνοπτικό πίνακα (8.3), βάσει του οποίου θα παρουσιαστούν τα ραβδογράμματα και τα διαγράμματα διασποράς .

| <i>Model lin-lin+lin<sup>2</sup></i> |           |                   |            |
|--------------------------------------|-----------|-------------------|------------|
| A/A                                  | Egr-model | Egr-back analysis | Egr-Dormon |
| 1                                    | 2579,1    | 912               | 2588       |
| 2                                    | 3178,9    | 1180              | 2392,2     |
| 3                                    | 1780,5    | 909               | 1682       |
| 4                                    | 3643,9    | 737               | 2567,4     |
| 5                                    | 2260,1    | 782               | 2782,3     |
| 6                                    | 1337,8    | 2180              | 1449,2     |
| 7                                    | 2673,1    | 1660              | 2171,5     |
| 8                                    | 3952,4    | 962               | 2687,3     |
| 9                                    | 4523      | 1190              | 4233,9     |
| 10                                   | 5444,8    | 953               | 3215,2     |
| 11                                   | 4619,9    | 1210              | 4305,1     |
| 12                                   | 2270,9    | 586               | 1950,7     |
| 13                                   | 1944,9    | 711               | 2529,7     |
| 14                                   | 1933,6    | 735               | 1778       |
| 15                                   | 2385,4    | 815               | 2899,7     |
| 16                                   | 5835,2    | 1330              | 3335,2     |
| 17                                   | 5953,7    | 1370              | 4150,4     |
| 18                                   | 4528,2    | 1310              | 3557,4     |
| 19                                   | 4632,4    | 1160              | 3587,1     |

Πίνακας 8.3 : Συνοπτικός πίνακας μέτρων ελαστικότητας μοντέλου  $lin-lin+lin^2$

Για τη βέλτιστη παρουσίαση και αξιολόγηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων κρίθηκε σκόπιμη η χρήση ραβδογραμμάτων και διαγραμμάτων διασποράς, έτσι ώστε να διαφαίνεται καθαρά το ποσοστό λάθους ή ακόμα καλύτερα η απόκλιση των εκτιμώμενων (με κάθε ένα από τα δύο μοντέλα : μοντέλο  $lin-lin+lin^2$ - εξίσωση Dormon-Metcalf) από τα πραγματικά μέτρα ελαστικότητας που προσδιορίζει η μέθοδος του ανάστροφου υπολογισμού (back analysis). Η προαναφερθείσα παρουσίαση λαμβάνει χώρα στα σχήματα 8.1 και 8.2 που ακολουθούν :



### 8.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου log-log

Καταρχήν, υπενθίζεται ότι η εξίσωση που περιγράφει το μοντέλο log-log έχει την ακόλουθη μορφή :

$$Egr = 10^{*(1,154 + 5,394 \cdot 10^{-2} \cdot LEac + 0,195 \cdot LEsg + 0,261 \cdot Lhac + 0,309 \cdot Lhgr)} \quad (8.3)$$

Χρησιμοποιώντας την ίδια ακριβώς διαδικασία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία του προηγούμενου μοντέλου καταλήγουμε στα ακόλουθα αποτελέσματα, όσον αφορά τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας των ασύνδετων υλικών :

| <i>Model log-log</i> |           |
|----------------------|-----------|
| A/A                  | Egr-model |
| 1                    | 595,2     |
| 2                    | 538,9     |
| 3                    | 494,4     |
| 4                    | 537,4     |
| 5                    | 662,8     |
| 6                    | 471       |
| 7                    | 515,8     |
| 8                    | 541,9     |
| 9                    | 716,4     |
| 10                   | 556,2     |
| 11                   | 712,6     |
| 12                   | 509,6     |
| 13                   | 649,2     |
| 14                   | 498,8     |
| 15                   | 665,4     |
| 16                   | 560,5     |
| 17                   | 648,6     |
| 18                   | 635,7     |
| 19                   | 640       |

Πίνακας 8.4 : Μέτρα ελαστικότητας μοντέλου log-log

Εν συνεχεία, χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα δεδομένα εισαγωγής από τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού, προσδιορίζονται τα μέτρα ελαστικότητας από την εξίσωση των Dormon και Metcalf (8.2) .Στον πίνακα 8.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού όσον αφορά τα μέτρα ελαστικότητας της στρώσης έδρασης.

| A/A | Esg  |
|-----|------|
| 1   | 873  |
| 2   | 997  |
| 3   | 701  |
| 4   | 1070 |
| 5   | 782  |
| 6   | 604  |
| 7   | 905  |
| 8   | 1120 |
| 9   | 1190 |
| 10  | 1340 |
| 11  | 1210 |
| 12  | 813  |
| 13  | 711  |
| 14  | 741  |
| 15  | 815  |
| 16  | 1390 |
| 17  | 1400 |
| 18  | 1200 |
| 19  | 1210 |

Πίνακας 8.5 : Αποτελέσματα μέτρου ελαστικότητας στρώσης έδρασης

| <i>Model log-log</i> |            |
|----------------------|------------|
| A/A                  | Egr-Dormon |
| 1                    | 2588       |
| 2                    | 2392,2     |
| 3                    | 1682       |
| 4                    | 2567,4     |
| 5                    | 2782,3     |
| 6                    | 1449,2     |
| 7                    | 2171,5     |
| 8                    | 2687,3     |
| 9                    | 4233,9     |
| 10                   | 3215,2     |
| 11                   | 4305,1     |
| 12                   | 1950,7     |
| 13                   | 2529,7     |
| 14                   | 1778       |
| 15                   | 2899,7     |
| 16                   | 3335,2     |
| 17                   | 4150,3     |
| 18                   | 3557,4     |
| 19                   | 3587,1     |

Πίνακας 8.6 : Μέτρα ελαστικότητας εξίσωσης Dormon-Metcalf

Στον επόμενο πίνακα (8.7) παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το στατιστικό μοντέλο log-log, από την εξίσωση των Dormon και Metcalf, καθώς επίσης και τα μέτρα ελαστικότητας από τη διαδικασία της back analysis.

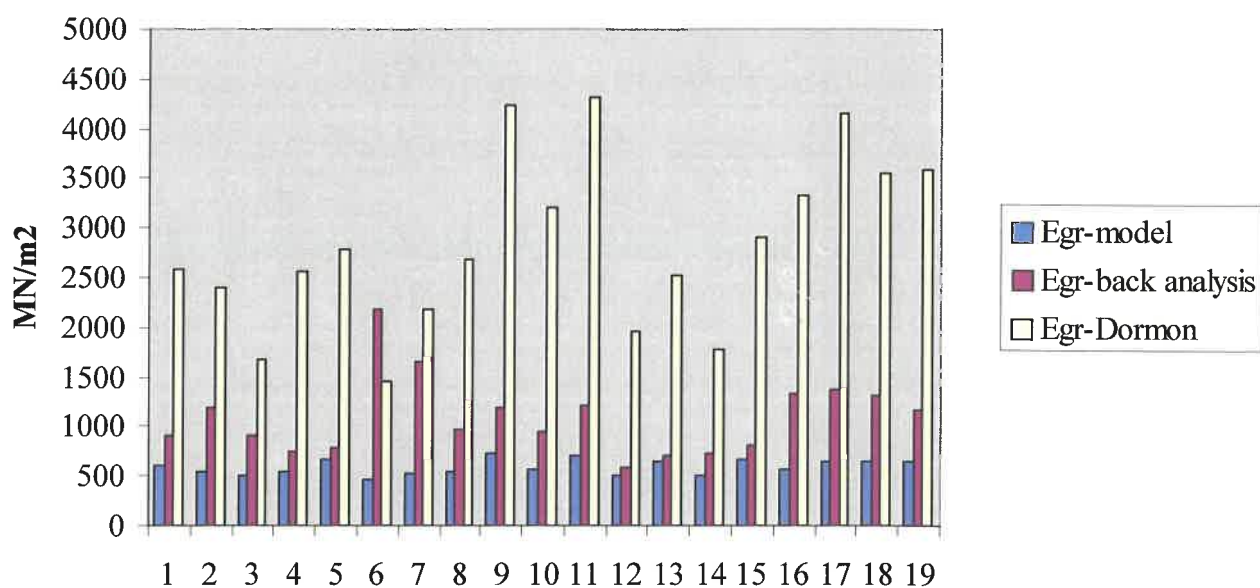
| <i>Model log-log</i> |           |                   |            |
|----------------------|-----------|-------------------|------------|
| A/A                  | Egr-model | Egr-back analysis | Egr-Dormon |
| 1                    | 595,2     | 912               | 2588       |
| 2                    | 538,9     | 1180              | 2392,2     |
| 3                    | 494,4     | 909               | 1682       |
| 4                    | 537,4     | 737               | 2567,4     |
| 5                    | 662,8     | 782               | 2782,3     |
| 6                    | 471       | 2180              | 1449,2     |
| 7                    | 515,8     | 1660              | 2171,5     |
| 8                    | 541,9     | 962               | 2687,3     |
| 9                    | 716,4     | 1190              | 4233,9     |
| 10                   | 556,2     | 953               | 3215,2     |
| 11                   | 712,6     | 1210              | 4305,1     |
| 12                   | 509,6     | 586               | 1950,7     |
| 13                   | 649,2     | 711               | 2529,7     |
| 14                   | 498,8     | 735               | 1778       |
| 15                   | 665,4     | 815               | 2899,7     |
| 16                   | 560,5     | 1330              | 3335,2     |
| 17                   | 648,6     | 1370              | 4150,3     |
| 18                   | 635,7     | 1310              | 3557,4     |
| 19                   | 640       | 1160              | 3587,1     |

Πίνακας 8.7 : Συνοπτικός πίνακας μέτρων ελαστικότητας μοντέλου log-log

Παρατηρείται ότι αν εξαιρεθούν τα αποτελέσματα των μέτρων ελαστικότητας των αμμοχάλικων του ανάστροφου υπολογισμού που εμφανίζουν υψηλές τιμές ( εκτός ορίων διακύμανσης αντιστοίχων κατά την αναλυτική διαδικασία επάλληλων στρώσεων ), καθώς και τα αντίστοιχα εξαγόμενα με τη συμβολή του στατιστικού προτύπου και μέσω της εξίσωσης Dormon-Metcalf, το στατιστικό μας μοντέλο εξακολουθεί να εμφανίζει πολύ καλύτερη προσέγγιση στα μέτρα ελαστικότητας αμμοχάλικων που προσδιορίζονται από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού, συγκριτικά με τα αντίστοιχα εξαγόμενα από την εξίσωση των Dormon-Metcalf.

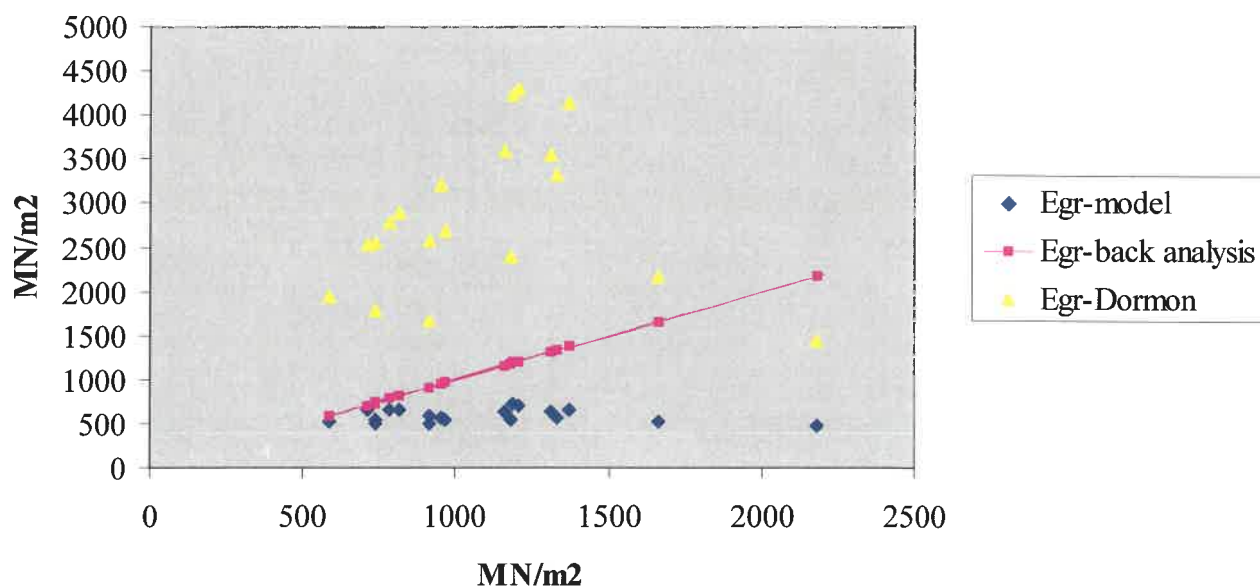
Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων του πίνακα 8.7 πραγματοποιείται με τη βοήθεια του ραβδογράμματος (σχήμα 8.3) και του διαγράμματος διασποράς (σχήμα 8.4).

### Μέτρο ελαστικότητας αμμοχάλικων



Σχήμα 8.3 : Ραβδόγραμμα αποτελεσμάτων μοντέλου log-log

### Μέτρο ελαστικότητας αμμοχάλικων



Σχήμα 8.4 : Διάγραμμα διασποράς αποτελεσμάτων μοντέλου log-log



#### 8.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου meson lin-lin+lin<sup>2</sup>

Καταρχήν, υπενθίζεται ότι η εξίσωση που περιγράφει το μοντέλο meson lin-lin+lin<sup>2</sup> έχει την ακόλουθη μορφή :

$$Egr = - 2142,993 + 0,346*Eac - 3,08*Esg + 38,953*hac + 0,348*hgr^2 \quad (8.4)$$

Χρησιμοποιώντας την ίδια ακριβώς διαδικασία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των προηγούμενων μοντέλων καταλήγουμε στα ακόλουθα αποτελέσματα, όσον αφορά τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας των ασύνδετων υλικών :

| <i>Model meson lin-lin+lin2</i> |           |
|---------------------------------|-----------|
| A/A                             | Egr-model |
| 1                               | 340,3     |
| 2                               | -732,1    |
| 3                               | 703,7     |
| 4                               | -363,6    |
| 5                               | 1593,4    |
| 6                               | -218,9    |
| 7                               | -443,6    |
| 8                               | -552,6    |
| 9                               | 25,3      |
| 10                              | -1852,6   |
| 11                              | -600,3    |
| 12                              | 462,6     |
| 13                              | 1639      |
| 14                              | 442,1     |
| 15                              | 1180,3    |
| 16                              | -1972     |
| 17                              | -1711,9   |
| 18                              | -390,1    |
| 19                              | -5,7      |

Πίνακας 8.8 : Μέτρα ελαστικότητας μοντέλου meson lin-lin+lin<sup>2</sup>

Από τον πίνακα 8.8 παρατηρούνται αρνητικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων, οι οποίες δεν φυσική ερμηνεία και συνακόλουθα δεν τίθενται θέμα σύγκρισής τους με τα εξαγόμενα αποτελέσματα από την εξίσωση των Dormon-Metcalf.

Εν συνεχεία, χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα δεδομένα εισαγωγής από τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού, προσδιορίζονται τα μέτρα ελαστικότητας από την εξίσωση των Dormon και Metcalf (8.2) .

| <b>Model meson lin-lin+lin2</b> |            |
|---------------------------------|------------|
| A/A                             | Egr-Dormon |
| 1                               | 2588       |
| 2                               | 2392,2     |
| 3                               | 1682       |
| 4                               | 2567,4     |
| 5                               | 2782,3     |
| 6                               | 1449,2     |
| 7                               | 2171,5     |
| 8                               | 2687,3     |
| 9                               | 4233,9     |
| 10                              | 3215,2     |
| 11                              | 4305,1     |
| 12                              | 1950,7     |
| 13                              | 2529,7     |
| 14                              | 1778       |
| 15                              | 2899,7     |
| 16                              | 3335,2     |
| 17                              | 4150,3     |
| 18                              | 3557,4     |
| 19                              | 3587,1     |

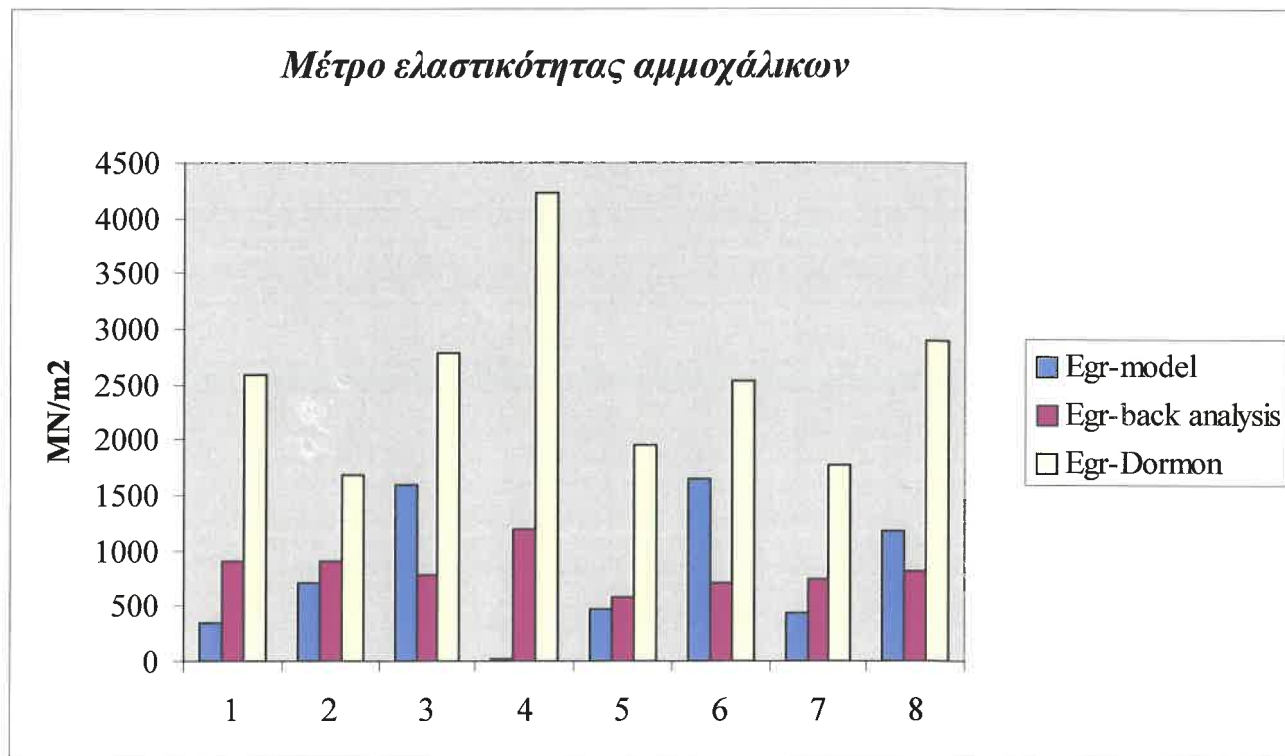
Πίνακας 8.9 : Μέτρα ελαστικότητας εξίσωσης Dormon-Metcalf

Στον επόμενο πίνακα (8.10) παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το στατιστικό μοντέλο meson lin-lin+lin<sup>2</sup>, από την εξίσωση των Dormon και Metcalf, καθώς επίσης και τα μέτρα ελαστικότητας από τη διαδικασία της back analysis.

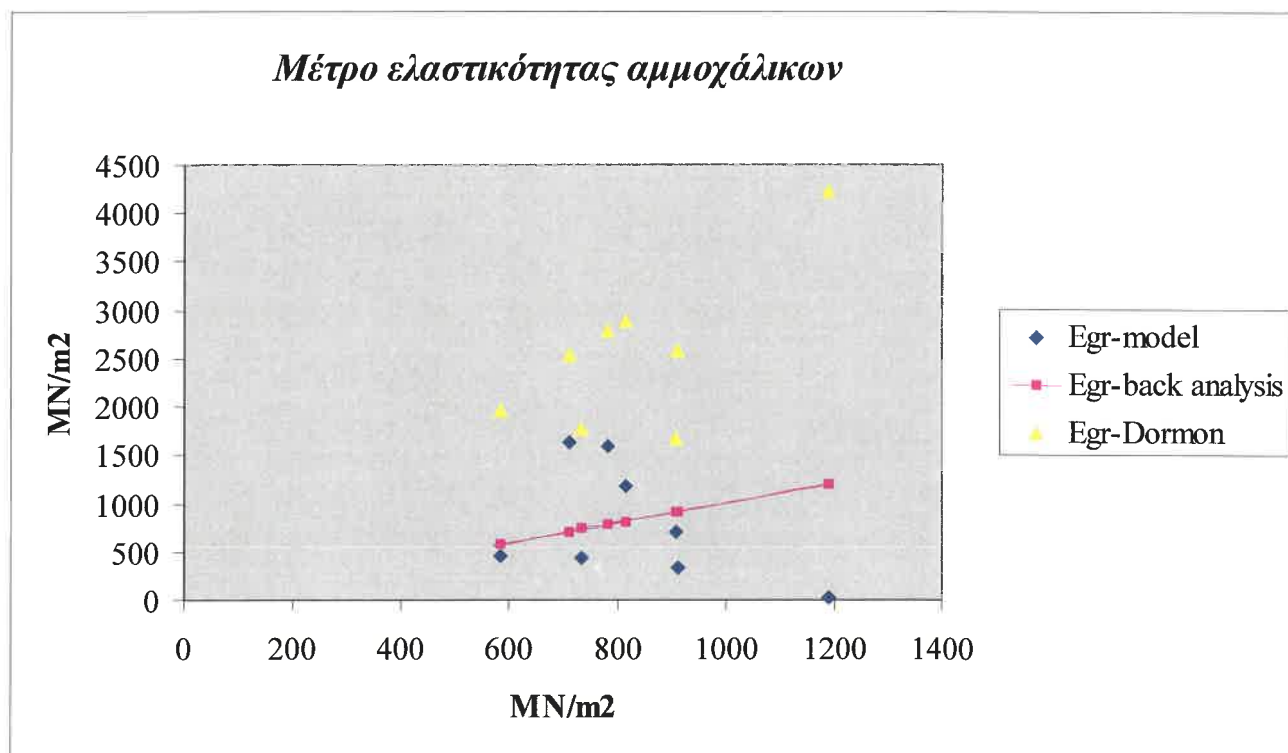
| <i>Model meson lin-lin+lin2</i> |           |                   |            |
|---------------------------------|-----------|-------------------|------------|
| A/A                             | Egr-model | Egr-back analysis | Egr-Dormon |
| 1                               | 340,3     | 912               | 2588       |
| 2                               | -732,1    | 1180              | 2392,2     |
| 3                               | 703,7     | 909               | 1682       |
| 4                               | -363,6    | 737               | 2567,4     |
| 5                               | 1593,4    | 782               | 2782,3     |
| 6                               | -218,9    | 2180              | 1449,2     |
| 7                               | -443,6    | 1660              | 2171,5     |
| 8                               | -552,6    | 962               | 2687,3     |
| 9                               | 25,3      | 1190              | 4233,9     |
| 10                              | -1852,6   | 953               | 3215,2     |
| 11                              | -600,3    | 1210              | 4305,1     |
| 12                              | 462,6     | 586               | 1950,7     |
| 13                              | 1639      | 711               | 2529,7     |
| 14                              | 442,1     | 735               | 1778       |
| 15                              | 1180,3    | 815               | 2899,7     |
| 16                              | -1972     | 1330              | 3335,2     |
| 17                              | -1711,9   | 1370              | 4150,3     |
| 18                              | -390,1    | 1310              | 3557,4     |
| 19                              | -5,7      | 1160              | 3587,1     |

Πίνακας 8.10 : Συνοπτικός πίνακας μέτρων ελαστικότητας μοντέλου *meson lin-lin+lin<sup>2</sup>*

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων του πίνακα 8.10 πραγματοποιείται με τη βοήθεια του ραβδογράμματος (σχήμα 8.5) και του διαγράμματος διασποράς (σχήμα 8.6).



Σχήμα 8.5 : Ραβδόγραμμα αποτελεσμάτων μοντέλου  $meson\ lin-lin+lin^2$



Σχήμα 8.6 : Διάγραμμα διασποράς αποτελεσμάτων μοντέλου  $meson\ lin-lin+lin^2$

## 8.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου meson log-log

Καταρχήν, υπενθίζεται ότι η εξίσωση που περιγράφει το μοντέλο meson log-log έχει την ακόλουθη μορφή :

$$Egr = 10^{(- 8,945 + 1,885*LEac - 0,368*LEsg + 2,017*Lhac + 1,994*Lhgr)} \quad (8.5)$$

Χρησιμοποιώντας την ίδια ακριβώς διαδικασία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των προηγούμενων μοντέλων καταλήγουμε στα ακόλουθα αποτελέσματα, όσον αφορά τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας των ασύνδετων υλικών :

| <i>Model meson log-log</i> |           |
|----------------------------|-----------|
| A/A                        | Egr-model |
| 1                          | 2394,6    |
| 2                          | 876,2     |
| 3                          | 1104,2    |
| 4                          | 975,7     |
| 5                          | 6374,4    |
| 6                          | 592,7     |
| 7                          | 776,1     |
| 8                          | 944,3     |
| 9                          | 4715,3    |
| 10                         | 647,1     |
| 11                         | 3474      |
| 12                         | 1096,7    |
| 13                         | 6092,7    |
| 14                         | 1013,2    |
| 15                         | 5420,1    |
| 16                         | 650,5     |
| 17                         | 1613,2    |
| 18                         | 2425,9    |
| 19                         | 2894,5    |

Πίνακας 8.11 : Μέτρα ελαστικότητας μοντέλου meson log-log

Εν συνεχεία, χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα δεδομένα εισαγωγής από τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού (πίνακας 8.5), προσδιορίζονται τα μέτρα ελαστικότητας από την εξίσωση των Dormon και Metcalf (8.2) .

| <i>Model meson log-log</i> |            |
|----------------------------|------------|
| A/A                        | Egr-Dormon |
| 1                          | 2588       |
| 2                          | 2392,2     |
| 3                          | 1682       |
| 4                          | 2567,4     |
| 5                          | 2782,3     |
| 6                          | 1449,2     |
| 7                          | 2171,5     |
| 8                          | 2687,3     |
| 9                          | 4233,9     |
| 10                         | 3215,2     |
| 11                         | 4305,1     |
| 12                         | 1950,7     |
| 13                         | 2529,7     |
| 14                         | 1778       |
| 15                         | 2899,7     |
| 16                         | 3335,2     |
| 17                         | 4150,3     |
| 18                         | 3557,4     |
| 19                         | 3587,1     |

Πίνακας 8.12 : Μέτρα ελαστικότητας εξίσωσης Dormon-Metcalf

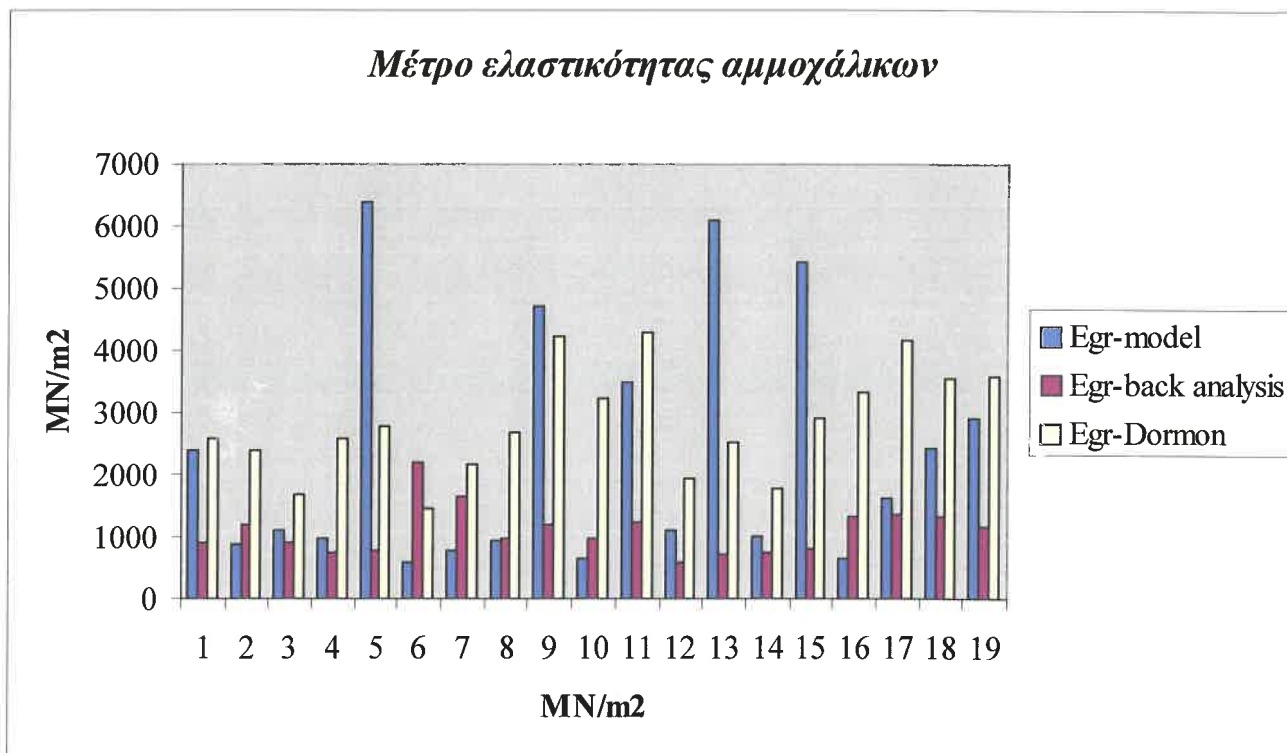
Στον επόμενο πίνακα (8.13) παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το στατιστικό μοντέλο meson log-log, από την εξίσωση των Dormon και Metcalf, καθώς επίσης και τα μέτρα ελαστικότητας από τη διαδικασία της back analysis.

| <i>Model meson log-log</i> |           |                   |            |
|----------------------------|-----------|-------------------|------------|
| A/A                        | Egr-model | Egr-back analysis | Egr-Dormon |
| 1                          | 2394,6    | 912               | 2588       |
| 2                          | 876,2     | 1180              | 2392,2     |
| 3                          | 1104,2    | 909               | 1682       |
| 4                          | 975,7     | 737               | 2567,4     |
| 5                          | 6374,4    | 782               | 2782,3     |
| 6                          | 592,7     | 2180              | 1449,2     |
| 7                          | 776,1     | 1660              | 2171,5     |
| 8                          | 944,3     | 962               | 2687,3     |
| 9                          | 4715,3    | 1190              | 4233,9     |
| 10                         | 647,1     | 953               | 3215,2     |
| 11                         | 3474      | 1210              | 4305,1     |
| 12                         | 1096,7    | 586               | 1950,7     |
| 13                         | 6092,7    | 711               | 2529,7     |
| 14                         | 1013,2    | 735               | 1778       |
| 15                         | 5420,1    | 815               | 2899,7     |
| 16                         | 650,5     | 1330              | 3335,2     |
| 17                         | 1613,2    | 1370              | 4150,3     |
| 18                         | 2425,9    | 1310              | 3557,4     |
| 19                         | 2894,5    | 1160              | 3587,1     |

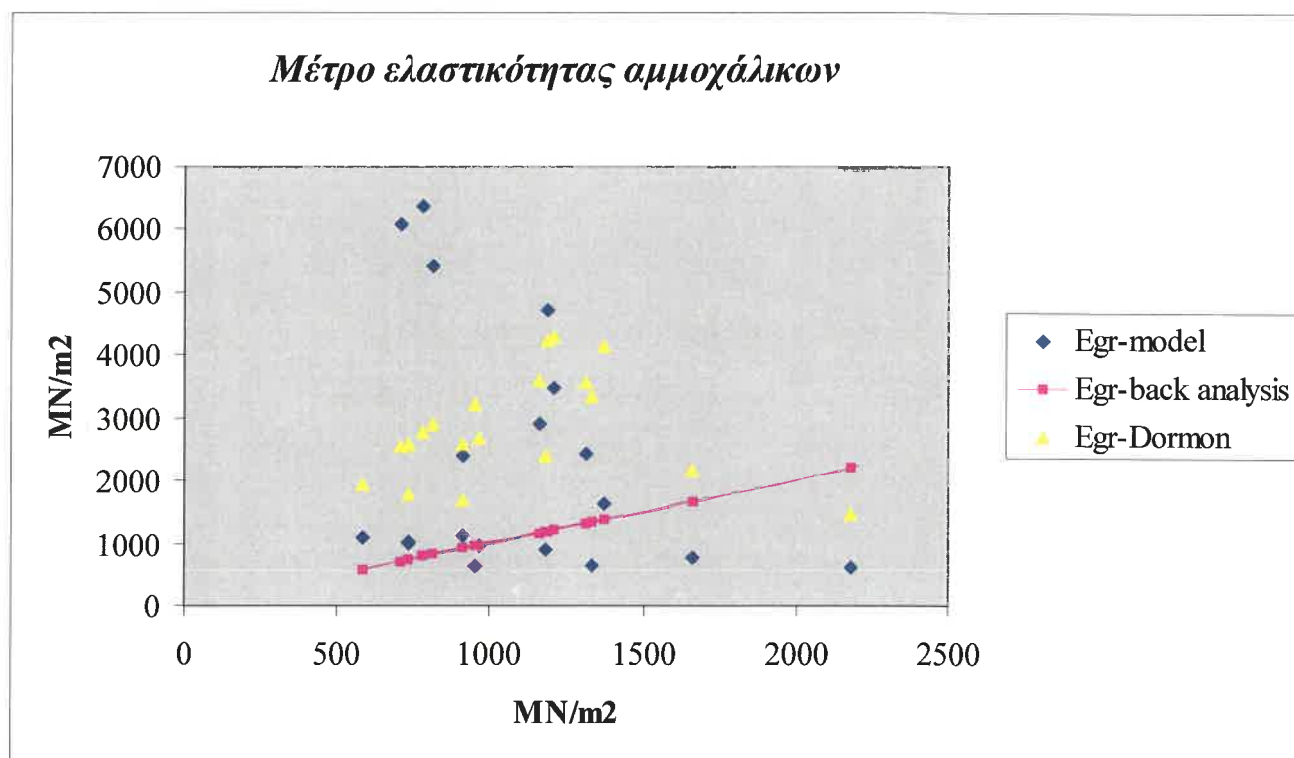
Πίνακας 8.13 : Συνοπτικός πίνακας μέτρων ελαστικότητας μοντέλου *meson log-log*

Παρατηρείται ότι αν εξαιρεθούν τα αποτελέσματα των μέτρων ελαστικότητας των αμμοχάλικων του ανάστροφου υπολογισμού που εμφανίζουν υψηλές τιμές ( εκτός ορίων διακύμανσης αντιστοίχων κατά την αναλυτική διαδικασία επάλληλων στρώσεων ), καθώς και τα αντίστοιχα εξαγόμενα με τη συμβολή του στατιστικού προτύπου και μέσω της εξίσωσης Dormon-Metcalf, το στατιστικό μας μοντέλο εξακολουθεί να εμφανίζει πολύ καλύτερη προσέγγιση στα μέτρα ελαστικότητας αμμοχάλικων που προσδιορίζονται από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού, συγκριτικά με τα αντίστοιχα εξαγόμενα από την εξίσωση των Dormon-Metcalf.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων του πίνακα 8.13 πραγματοποιείται με τη βοήθεια του ραβδογράμματος (σχήμα 8.7) και του διαγράμματος διασποράς (σχήμα 8.8).



Σχήμα 8.7 : Ραβδόγραμμα αποτελεσμάτων μοντέλου *meson log-log*



Σχήμα 8.8 : Διάγραμμα διασποράς αποτελεσμάτων μοντέλου *meson log-log*



Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παραπάνω στατιστικής επεξεργασίας. Συγκεκριμένα αναλύεται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων κάθε προτύπου, για το συγκεκριμένο δείγμα μετρήσεων, σε σχέση με τις τιμές του ανάστροφου υπολογισμού. Επιπρόσθετα, συγκρίνονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που εξάγονται από τα στατιστικά πρότυπα με τα αποτελέσματα που προσδιορίζονται από την εξίσωση των Dormon-Metcalf.

## **Κεφάλαιο 9**

### **Συμπεράσματα στατιστικής επεξεργασίας**

### 9.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων και συμπεράσματα αναφορικά με το μοντέλο $\text{lin-lin+lin}^2$

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 6, το στατιστικό μοντέλο  $\text{lin-lin+lin}^2$  εμφανίζει συντελεστή συσχέτισης  $R^2 = 0,1329$ . Παράλληλα, οι ανεξάρτητες μεταβλητές ( $EAC^2, Esg^2, hAC^2, hgr^2$ ) είναι στατιστικά σημαντικές για επίπεδο εμπιστοσύνης πάνω από 90%, εκτός από το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλομίγματος. Αξίζει επίσης να μνημονεύσουμε ότι όλοι οι συντελεστές των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι θετικοί, οπότε οποιαδήποτε αύξησή τους επιφέρει αύξηση στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων.

Από την παρουσίαση των αποτελεσμάτων του στατιστικού μοντέλου  $\text{lin-lin+lin}^2$  στο προηγούμενο κεφάλαιο προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα. Ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων με τη συμβολή του στατιστικού μοντέλου  $\text{lin-lin+lin}^2$  καταλήγει σε αποτελέσματα με αρκετά μεγάλη απόκλιση από τις τιμές των μέτρων ελαστικότητας που συνάγονται από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού των επιτόπου μετρήσεων. Συγκεκριμένα το στατιστικό μας μοντέλο εμφανίζει μέσο σφάλμα πρόβλεψης 216,44 %.

Στον αντίποδα, ο προσδιορισμός των μέτρων ελαστικότητας των αμμοχάλικων μέσω της εξίσωσης των Dormon-Metcalf καταλήγει σε αποτελέσματα με μικρότερη απόκλιση από αυτά του στατιστικού μοντέλου. Συγκεκριμένα η εξίσωση 2.8 εμφανίζει μέσο σφάλμα πρόβλεψης 160,03 %.

Από τη σύγκριση μεταξύ τους προκύπτει ότι σε σύνολο 19 μετρήσεων το στατιστικό μοντέλο προσεγγίζει καλύτερα τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού σε 4 μόνο περιπτώσεις, εν αντιθέσει με την εξίσωση των Dormon-Metcalf που υπερτερεί στις υπόλοιπες 15. Αυτό εξάλλου εύκολα αποδεικνύεται και από τα διαγράμματα 8.1 και 8.2, όπου τα αποτελέσματα της εξίσωσης των Dormon-Metcalf παρουσιάζουν καλύτερη ομοιομορφία και διασπορά.

Συμπερασματικά λοιπόν καταλήγουμε, ότι το συγκεκριμένο στατιστικό μοντέλο δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό, εφόσον δεν εκτιμά με καλή προσέγγιση το μέτρο ελαστικότητας αναφοράς των αμμοχάλικων, όπως εξάλλου μας προδιέθετε

και ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$  του μοντέλου, ο οποίος δεν είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικός στο συγκεκριμένο στάδιο. Εξάλλου εμφανίζει σημαντικό μέσο σφάλμα πρόβλεψης του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων και μάλιστα μεγαλύτερο από αυτό της εξίσωσης των Dormon-Metcalf.

## 9.2 Ερμηνεία αποτελεσμάτων και συμπεράσματα αναφορικά με το μοντέλο log-log

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 6, το στατιστικό μοντέλο log-log εμφανίζει συντελεστή συσχέτισης  $R^2 = 0,14307$ . Παράλληλα, οι ανεξάρτητες μεταβλητές (LEAC, LEsg, LhAC, Lhgr) είναι στατιστικά σημαντικές για επίπεδο εμπιστοσύνης πάνω από 90%, εκτός από το μέτρο δυσκαμψίας του ασφαλομίγματος. Αξίζει επίσης να μνημονεύσουμε ότι όλοι οι συντελεστές των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι θετικοί, οπότε οποιαδήποτε αύξησή τους επιφέρει αύξηση στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων.

Από την παρουσίαση των αποτελεσμάτων του στατιστικού μοντέλου log-log στο προηγούμενο κεφάλαιο προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα. Ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων με τη συμβολή του στατιστικού μοντέλου log-log καταλήγει σε αποτελέσματα με καλή προσέγγιση στις τιμές των μέτρων ελαστικότητας που συνάγονται από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού των επιτόπου μετρήσεων. Συγκεκριμένα το στατιστικό μας μοντέλο εμφανίζει μέσο σφάλμα πρόβλεψης 46,11 %.

Στον αντίποδα, ο προσδιορισμός των μέτρων ελαστικότητας των αμμοχάλικων μέσω της εξίσωσης των Dormon-Metcalf καταλήγει σε αποτελέσματα με μεγάλη απόκλιση από αυτά του ανάστροφου υπολογισμού. Συγκεκριμένα η εξίσωση 2.8 εμφανίζει μέσο σφάλμα πρόβλεψης 160,03 %.

Από τη σύγκριση μεταξύ τους προκύπτει ότι σε σύνολο 19 μετρήσεων το στατιστικό μοντέλο προσεγγίζει καλύτερα τα αποτελέσματα της back analysis σε 17 περιπτώσεις, εν αντιθέσει με την εξίσωση των Dormon-Metcalf που υπερτερεί στις υπόλοιπες 2. Αυτό εξάλλου εύκολα αποδεικνύεται και από τα διαγράμματα 8.3 και

8.4, όπου τα αποτελέσματα του στατιστικού μοντέλου παρουσιάζουν πολύ καλύτερη ομοιομορφία και διασπορά. Αξίζει επίσης να μνημονεύσουμε ότι ακόμα και στην περίπτωση που εξαιρεθούν τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού που λαμβάνουν υψηλές τιμές, ασύμβατες με τις αντίστοιχες που λήφθηκαν κατά την αναλυτική διαδικασία του λογισμικού επάλληλων στρώσεων, το στατιστικό μοντέλο log-log εμφανίζει αποτελέσματα πολύ πιο αξιόπιστα από τα αντίστοιχα της εξίσωσης Dormon-Metcalf.

Συμπερασματικά λοιπόν καταλήγουμε, ότι το συγκεκριμένο στατιστικό μοντέλο εμφανίζεται ιδιαίτερα αποτελεσματικό, δεδομένου ότι όχι μόνο καταλήγει σε καλύτερα αποτελέσματα από την εξίσωση των Dormon-Metcalf, αλλά και με ικανοποιητική προσέγγιση στις πλείστες των περιπτώσεων, το μέτρο ελαστικότητας αναφοράς των αμμοχάλικων. Είναι ενδεικτικό ότι το μέσο σφάλμα πρόβλεψης του στατιστικού μοντέλου είναι εξαιρετικά χαμηλό σε αντίθεση με το αντίστοιχο της εξίσωσης των Dormon-Metcalf που είναι ιδιαίτερα υψηλό. Παρόλο λοιπόν που ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$  του μοντέλου δεν είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικός στο συγκεκριμένο στάδιο και θα μας προδιέθετε για μη αξιόπιστα αποτελέσματα, εν τούτοις αποδεικνύεται ότι το παρόν στατιστικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων και συνακόλουθα για τη διαστασιολόγηση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων.

### 9.3 Ερμηνεία αποτελεσμάτων και συμπεράσματα αναφορικά με το μοντέλο meson lin-lin+lin<sup>2</sup>

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 6, το στατιστικό μοντέλο meson lin-lin+lin<sup>2</sup> εμφανίζει συντελεστή συσχέτισης  $R^2 = 0,89818$ . Παράλληλα, οι ανεξάρτητες μεταβλητές (EAC, Esg, hAC, hgr<sup>2</sup>) είναι στατιστικά σημαντικές για επίπεδο εμπιστοσύνης πάνω από 90%, εκτός από το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης και το πάχος της ασφαλικής στρώσης. Αξίζει επίσης να μνημονεύσουμε ότι όλοι οι συντελεστές των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι θετικοί, οπότε οποιαδήποτε αύξησή τους επιφέρει αύξηση στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων, εκτός από

το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης που εμφανίζει αρνητικό συντελεστή και επομένως μείωση στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων.

Από την παρουσίαση των αποτελεσμάτων του στατιστικού μοντέλου  $\text{meson lin-lin+lin}^2$  στο προηγούμενο κεφάλαιο προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα. Ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων με τη συμβολή του στατιστικού μοντέλου  $\text{meson lin-lin+lin}^2$  καταλήγει σε διαφορούμενα αποτελέσματα, καθώς σε αρκετές περιπτώσεις εμφανίζει ικανοποιητική προσέγγιση, σε σχέση με τις τιμές των μέτρων ελαστικότητας που συνάγονται από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού των επιτόπου μετρήσεων, ενώ στις υπόλοιπες απολήγει σε αρνητικές τιμές των μέτρων ελαστικότητας των αμμοχάλικων, κάτι το οποίο δεν έχει φυσική ερμηνεία. Συγκεκριμένα το στατιστικό μας μοντέλο εμφανίζει μέσο σφάλμα πρόβλεψης 111,87 %.

Στον αντίποδα, ο προσδιορισμός των μέτρων ελαστικότητας των αμμοχάλικων μέσω της εξίσωσης των Dormon-Metcalf καταλήγει σε αποτελέσματα με μεγάλη απόκλιση από αυτά της back analysis . Συγκεκριμένα η εξίσωση 2.8 εμφανίζει μέσο σφάλμα πρόβλεψης 160,03 %.

Από τη σύγκριση μεταξύ τους προκύπτει ότι σε σύνολο 19 μετρήσεων το στατιστικό μοντέλο προσεγγίζει καλύτερα τα αποτελέσματα της back analysis σε 8 περιπτώσεις (στις υπόλοιπες προκύπτουν αρνητικές τιμές), εν αντιθέσει με την εξίσωση των Dormon-Metcalf που υπερτερεί στις υπόλοιπες 11. Από τα διαγράμματα 8.5 και 8.6 προκύπτει ότι για τις 8 προαναφερθείσες περιπτώσεις το στατιστικό μοντέλο  $\text{meson lin-lin+lin}^2$  παρουσιάζει καλύτερη ομοιομορφία και διασπορά. Αξίζει επίσης να μνημονεύσουμε ότι ακόμα και στην περίπτωση που εξαιρεθούν τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού που λαμβάνουν υψηλές τιμές, ασύμβατες με τις αντίστοιχες που λήφθηκαν κατά την αναλυτική διαδικασία του λογισμικού επάλληλων στρώσεων, το στατιστικό μοντέλο  $\text{meson log-log}$  εμφανίζει αποτελέσματα πολύ πιο αξιόπιστα από τα αντίστοιχα της εξίσωσης Dormon-Metcalf.

Συμπερασματικά λοιπόν καταλήγουμε, ότι το συγκεκριμένο στατιστικό μοντέλο δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό, εφόσον καταλήγει και σε αρνητικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων, παρόλο που ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$  του μοντέλου είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικός στο συγκεκριμένο στάδιο. Παρόλα

αυτά όμως αξίζει να αναφερθεί ότι μέσο σφάλμα πρόβλεψης του στατιστικού μοντέλου είναι σαφώς μικρότερο από το αντίστοιχο της εξίσωσης των Dormon-Metcalf

#### 9.4 Ερμηνεία αποτελεσμάτων και συμπεράσματα αναφορικά με το μοντέλο meson log-log

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5, το στατιστικό μοντέλο meson log-log εμφανίζει συντελεστή συσχέτισης  $R^2 = 0,94477$ . Παράλληλα, οι ανεξάρτητες μεταβλητές (LEAC, LEsg, LhAC, Lhgr) είναι στατιστικά σημαντικές για επίπεδο εμπιστοσύνης πάνω από 90%, εκτός από το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης. Αξίζει επίσης να μνημονεύσουμε ότι όλοι οι συντελεστές των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι θετικοί, οπότε οποιαδήποτε αύξησή τους επιφέρει αύξηση στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων, εκτός από το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης που εμφανίζει αρνητικό συντελεστή και επομένως μείωση στο μέτρο ελαστικότητας των αμμοχάλικων.

Από την παρουσίαση των αποτελεσμάτων του στατιστικού μοντέλου meson log-log στο προηγούμενο κεφάλαιο προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα. Ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων με τη συμβολή του στατιστικού μοντέλου meson log-log καταλήγει σε αποτελέσματα με καλή προσέγγιση στις τιμές των μέτρων ελαστικότητας που συνάγονται από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού των επιτόπου μετρήσεων. Συγκεκριμένα το στατιστικό μας μοντέλο εμφανίζει μέσο σφάλμα πρόβλεψης 113,04%.

Στον αντίποδα, ο προσδιορισμός των μέτρων ελαστικότητας των αμμοχάλικων μέσω της εξίσωσης των Dormon-Metcalf καταλήγει σε αποτελέσματα με μεγάλη απόκλιση από αυτά της back analysis. Συγκεκριμένα η εξίσωση 2.8 εμφανίζει μέσο σφάλμα πρόβλεψης 160,03 %.

Από τη σύγκριση μεταξύ τους προκύπτει ότι σε σύνολο 19 μετρήσεων το στατιστικό μοντέλο προσεγγίζει καλύτερα τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού σε 13 περιπτώσεις, εν αντιθέσει με την εξίσωση των Dormon-Metcalf που υπερτερεί στις υπόλοιπες 6. Αυτό εξάλλου εύκολα αποδεικνύεται και από τα

διαγράμματα 8.7 και 8.8, όπου τα αποτελέσματα του στατιστικού μοντέλου παρουσιάζουν πολύ καλύτερη ομοιομορφία και διασπορά.

Συμπερασματικά λοιπόν καταλήγουμε, ότι το συγκεκριμένο στατιστικό μοντέλο είναι αρκετά αποτελεσματικό, δεδομένου ότι όχι μόνο εκτιμά με καλύτερα αποτελέσματα από την εξίσωση των Dormon-Metcalf, αλλά και με ικανοποιητική προσέγγιση στις πλείστες των περιπτώσεων, το μέτρο ελαστικότητας αναφοράς των αμμοχάλικων. Στο συγκεκριμένο μοντέλο δηλαδή, ο ιδιαίτερα σημαντικός συντελεστής συσχέτισης  $R^2$  συνάδει με τα ενθαρρυντικά εξαγόμενα αποτελέσματα και συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων και συνακόλουθα για τη διαστασιολόγηση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Είναι ενδεικτικό ότι το μέσο σφάλμα πρόβλεψης του στατιστικού μοντέλου είναι σαφώς μικρότερο από το αντίστοιχο της εξίσωσης των Dormon-Metcalf.



## **Κεφάλαιο 10**

### **Στατιστική επεξεργασία οδοστρωμάτων υπό κυκλοφορία**

## 10.1 Εισαγωγή

Η αξιολόγηση και επεξεργασία των 4 στατιστικών μοντέλων της πολυπαραμετρικής στατιστικής ανάλυσης επεκτάθηκε περαιτέρω και σε οδοστρώματα οδών εν λειτουργία. Για το σκοπό αυτό συλλέχθηκαν αποτελέσματα HWD testing από την τράπεζα δεδομένων του Ε.Μ.Π., τα οποία επεξεργάστηκαν με τη μέθοδο του ανάστροφου υπολογισμού (back analysis). Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι κατά τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού χρησιμοποιήθηκαν οι παραδοχές του κεφαλαίου 7. Συγκεκριμένα, η στατιστική επεξεργασία των στατιστικών προτύπων περιλαμβάνει μετρήσεις για τις ακόλουθες περιοχές :

1. Κασσάνδρα
2. Όλυνθος
3. Αγ. Αναστασία
4. Τύρναβος

## 10.2 Κασσάνδρα

### 10.2.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{lin-lin+lin}^2$

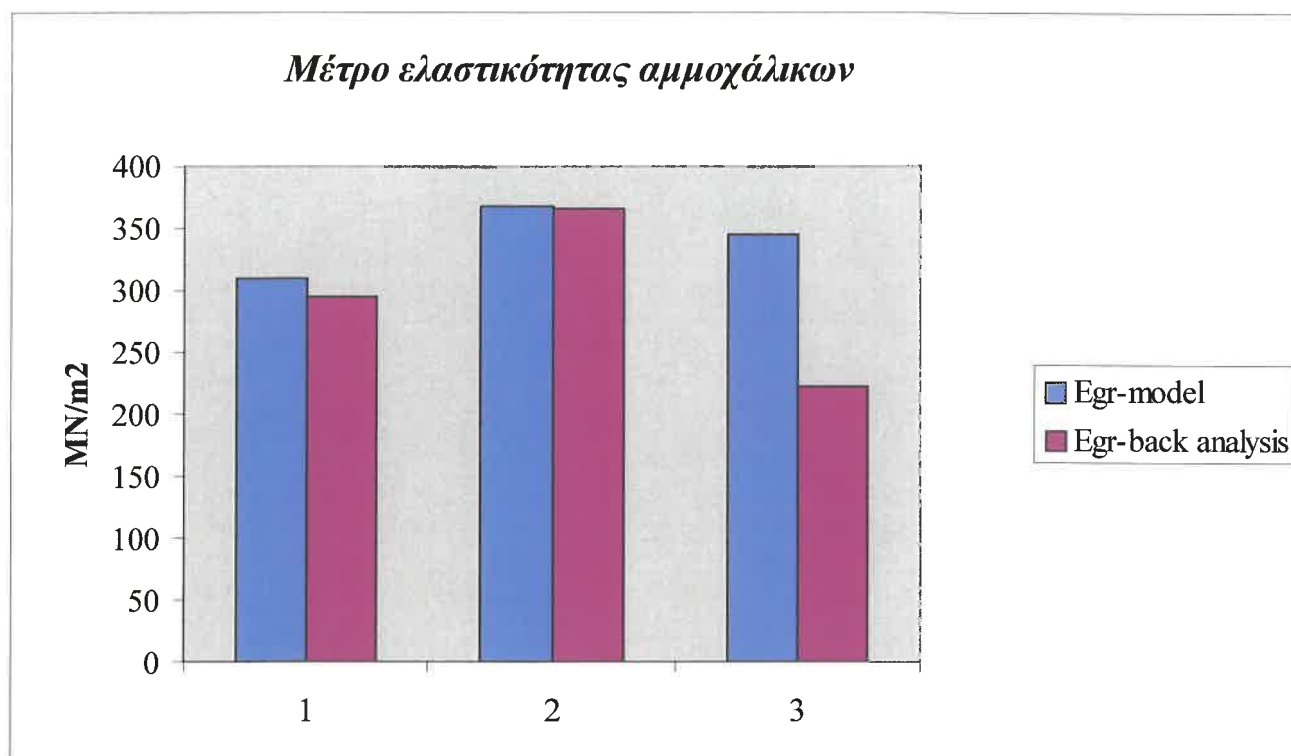
Στον ακόλουθο πίνακα εμφανίζονται τόσο τα μέτρα ελαστικότητας των αμμοχάλικων που προέκυψαν από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού, όσο και τα εκτιμώμενα με τη βοήθεια του στατιστικού μοντέλου  $\text{lin-lin+lin}^2$ .

| A/A | Egr-model | Egr-back analysis |
|-----|-----------|-------------------|
| 1   | 309,3     | 295               |
| 2   | 368,1     | 366               |
| 3   | 345,6     | 222               |

*Πίνακας 10.1 : Μέτρα ελαστικότητας αμμοχάλικων*

Παρατηρείται ότι τα εξαγόμενα αποτελέσματα, με τη βοήθεια του στατιστικού μοντέλου  $\text{lin-lin}+\text{lin}^2$ , προσεγγίζουν με πολύ μεγάλη ακρίβεια τα αντίστοιχα που συνάγονται από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού.

Για τη βέλτιστη παρουσίαση και αξιολόγηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων κρίθηκε σκόπιμη η χρήση ραβδογράμματος, έτσι ώστε να διαφαίνεται καθαρά το ποσοστό λάθους ή ακόμα καλύτερα η απόκλιση των εκτιμώμενων από το μοντέλο  $\text{lin-lin}+\text{lin}^2$  σε σχέση με τα μέτρα ελαστικότητας αναφοράς που προσδιορίζει η μέθοδος του ανάστροφου υπολογισμού (back analysis). Η προαναφερθείσα παρουσίαση λαμβάνει χώρα στο σχήμα 10.1 που ακολουθεί :



Σχήμα 10.1 : Ραβδόγραμμα αποτελεσμάτων μοντέλου  $\text{lin-lin}+\text{lin}^2$

### 10.2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου log-log

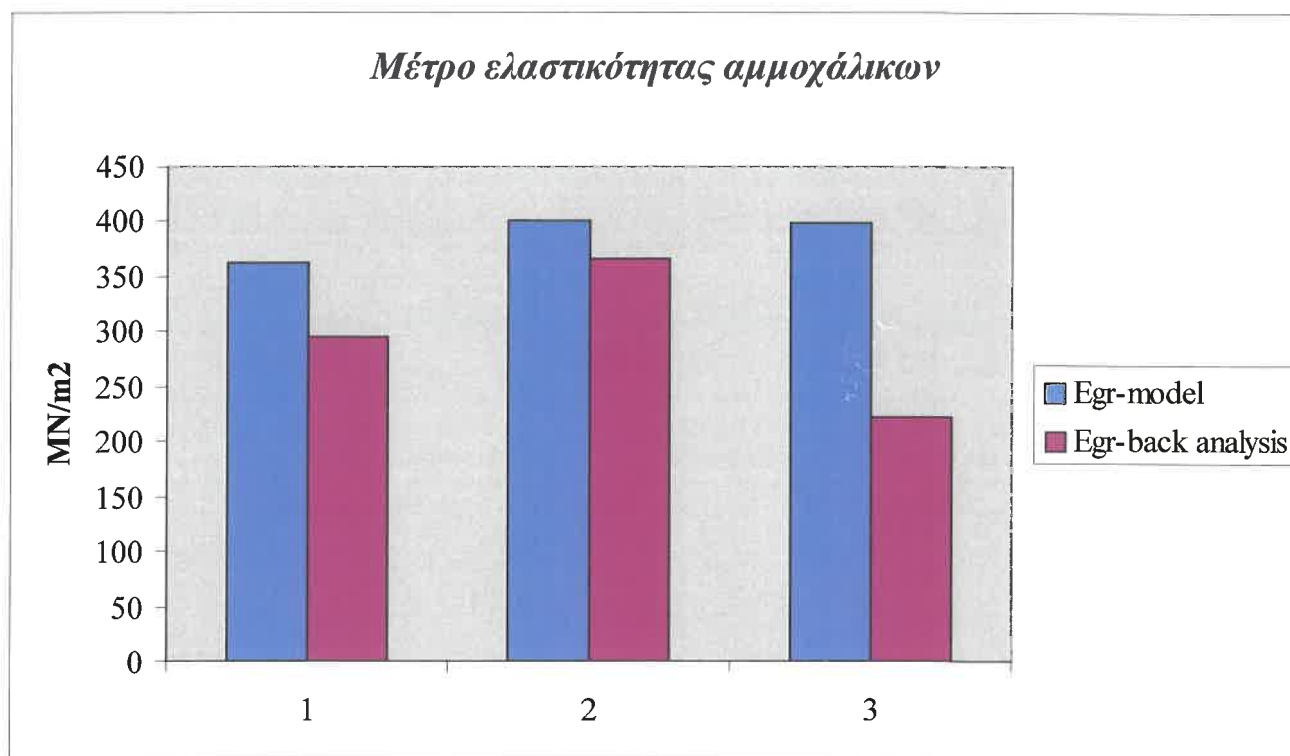
Στον ακόλουθο πίνακα εμφανίζονται τόσο τα μέτρα ελαστικότητας των αμμοχάλικων που προέκυψαν από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού, όσο και τα εκτιμώμενα με τη βοήθεια του στατιστικού μοντέλου log-log.

| A/A | Egr-model | Egr-back analysis |
|-----|-----------|-------------------|
| 1   | 362,1     | 295               |
| 2   | 400       | 366               |
| 3   | 399,5     | 222               |

*Πίνακας 10.2 : Μέτρα ελαστικότητας αμμοχάλικων*

Παρατηρείται ότι τα εξαγόμενα αποτελέσματα, με τη βοήθεια του στατιστικού μοντέλου log-log, προσεγγίζουν με μεγάλη ακρίβεια τα αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας που συνάγονται από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού

Για τη βέλτιστη παρουσίαση και αξιολόγηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων κρίθηκε σκόπιμη η χρήση ραβδογράμματος, έτσι ώστε να διαφαίνεται καθαρά το ποσοστό λάθους ή ακόμα καλύτερα η απόκλιση των εκτιμώμενων από το μοντέλο log-log σε σχέση με τα πραγματικά μέτρα ελαστικότητας που προσδιορίζει η μέθοδος του ανάστροφου υπολογισμού (back analysis). Η προαναφερθείσα παρουσίαση λαμβάνει χώρα στο σχήμα 10.2 που ακολουθεί :



Σχήμα 10.2 : Ραβδόγραμμα αποτελεσμάτων μοντέλου *log-log*

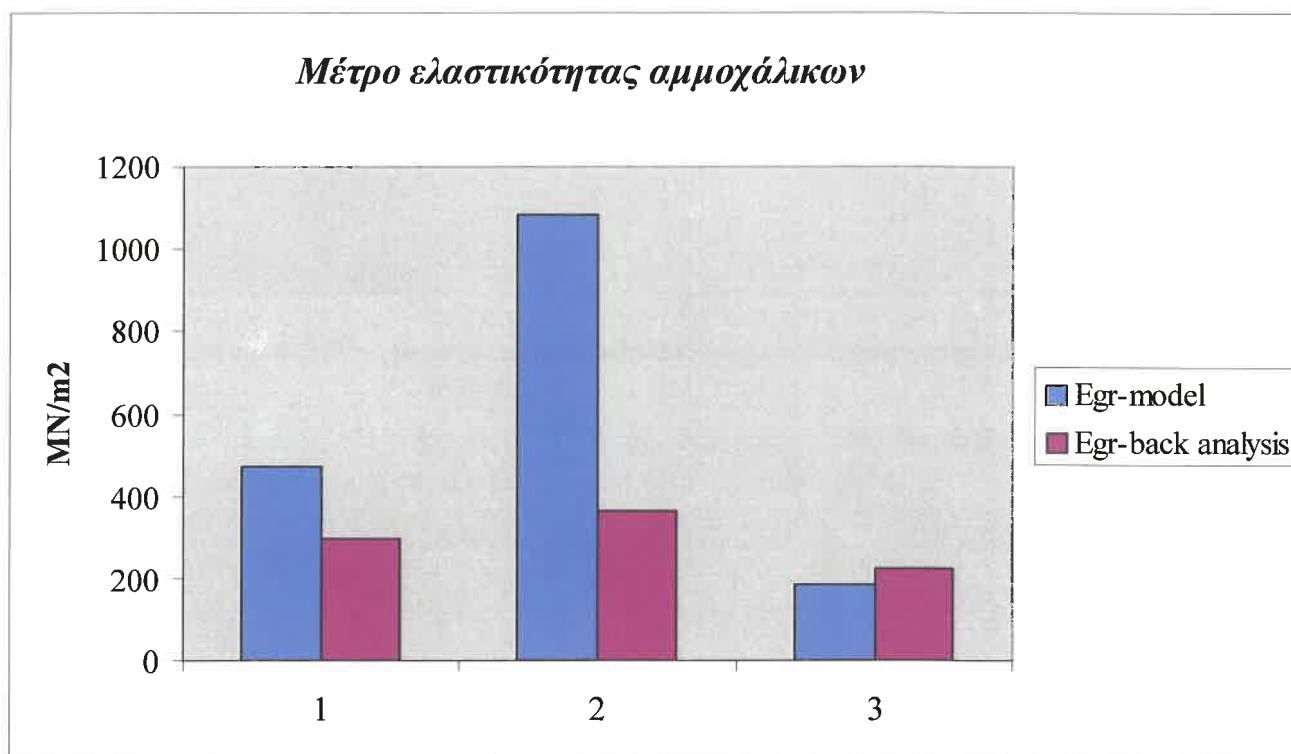
### 10.2.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου *meson lin-lin+lin<sup>2</sup>*

Στον ακόλουθο πίνακα εμφανίζονται τόσο τα μέτρα ελαστικότητας των αμμοχάλικων που προέκυψαν από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού, όσο και τα εκτιμώμενα με τη βοήθεια του στατιστικού μοντέλου *meson lin-lin+lin<sup>2</sup>*.

| A/A | Egr-model | Egr-back analysis |
|-----|-----------|-------------------|
| 1   | 472       | 295               |
| 2   | 1081,8    | 366               |
| 3   | 183,2     | 222               |

Πίνακας 10.3 : Μέτρα ελαστικότητας αμμοχάλικων

Για τη βέλτιστη παρουσίαση και αξιολόγηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων κρίθηκε σκόπιμη η χρήση ραβδόγραμματος, έτσι ώστε να διαφαίνεται καθαρά το ποσοστό λάθους ή ακόμα καλύτερα η απόκλιση των εκτιμώμενων από το μοντέλο  $\text{meson lin-lin+lin}^2$  σε σχέση με τα πραγματικά μέτρα ελαστικότητας που προσδιορίζει η μέθοδος του ανάστροφου υπολογισμού (back analysis). Η προαναφερθείσα παρουσίαση λαμβάνει χώρα στο σχήμα 10.3 που ακολουθεί :



Σχήμα 10.3: Ραβδόγραμμα αποτελεσμάτων μοντέλου  $\text{meson lin-lin+lin}^2$

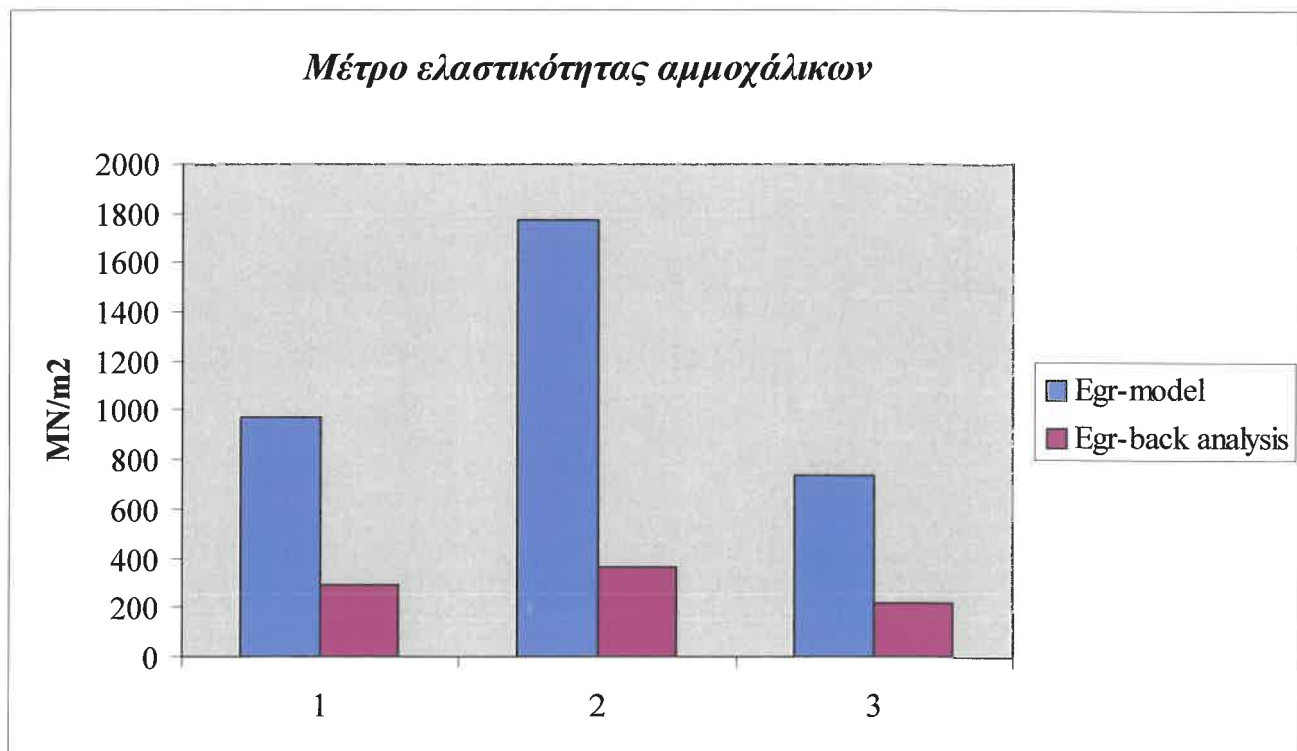
#### 10.2.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{meson log-log}$

Στον ακόλουθο πίνακα εμφανίζονται τόσο τα μέτρα ελαστικότητας των αμμοχάλικων που προέκυψαν από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού, όσο και τα εκτιμώμενα με τη βοήθεια του στατιστικού μοντέλου  $\text{meson log-log}$ .

| A/A | Egr-model | Egr-back analysis |
|-----|-----------|-------------------|
| 1   | 971,8     | 295               |
| 2   | 1775,5    | 366               |
| 3   | 737,9     | 222               |

**Πίνακας 10.4 : Μέτρα ελαστικότητας αμμοχάλικων**

Για τη βέλτιστη παρουσίαση και αξιολόγηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων κρίθηκε σκόπιμη η χρήση ραβδογράμματος, έτσι ώστε να διαφαίνεται καθαρά το ποσοστό λάθους ή ακόμα καλύτερα η απόκλιση των εκτιμώμενων από το μοντέλο meson log-log σε σχέση με τα μέτρα ελαστικότητας αναφοράς που προσδιορίζει η μέθοδος του ανάστροφου υπολογισμού (back analysis). Η προαναφερθείσα παρουσίαση λαμβάνει χώρα στο σχήμα 10.4 που ακολουθεί :



**Σχήμα 10.4 : Ραβδόγραμμα αποτελεσμάτων μοντέλου meson log-log**

### 10.3 Όλυνθος

#### 10.3.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{lin-lin+lin}^2$

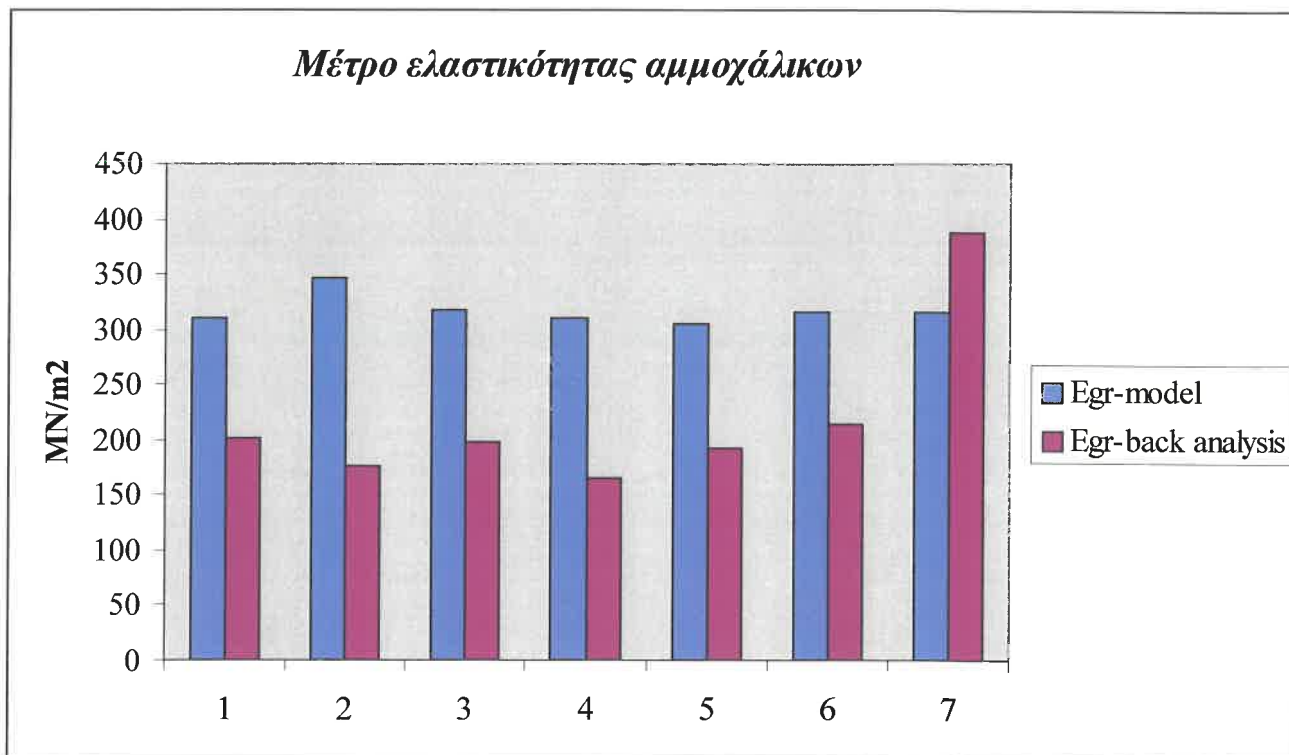
Στον ακόλουθο πίνακα εμφανίζονται τόσο τα μέτρα ελαστικότητας των αμμοχάλικων που προέκυψαν από τη διαδικασία της back analysis, όσο και τα εκτιμώμενα με τη βοήθεια του στατιστικού μοντέλου  $\text{lin-lin+lin}^2$ .

| A/A | Egr-model | Egr-back analysis |
|-----|-----------|-------------------|
| 1   | 311       | 202               |
| 2   | 346       | 176               |
| 3   | 317,3     | 197               |
| 4   | 309,7     | 166               |
| 5   | 305,4     | 193               |
| 6   | 315,6     | 215               |
| 7   | 315,3     | 389               |

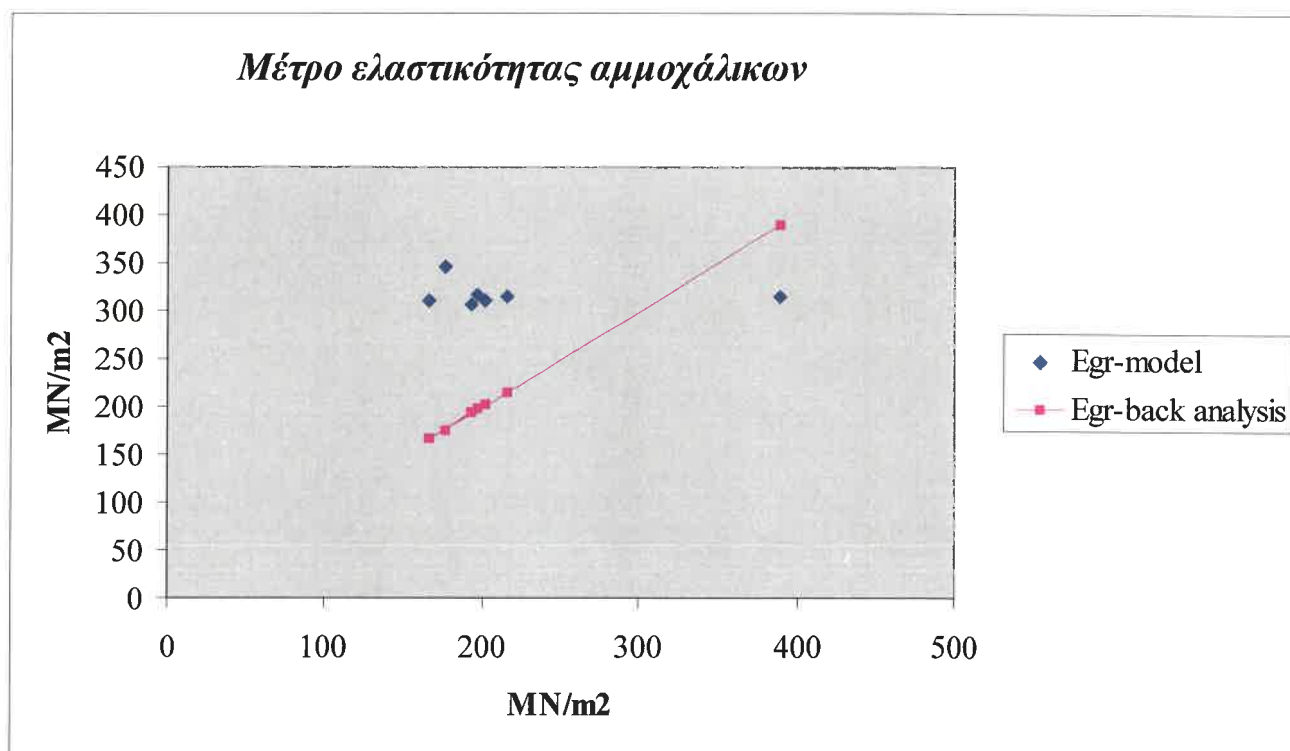
**Πίνακας 10.5 : Μέτρα ελαστικότητας αμμοχάλικων**

Για τη βέλτιστη παρουσίαση και αξιολόγηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων κρίθηκε σκόπιμη η χρήση ραβδογραμμάτων και διαγραμμάτων διασποράς, έτσι ώστε να διαφαίνεται καθαρά το ποσοστό λάθους ή ακόμα καλύτερα η απόκλιση των εκτιμώμενων από το μοντέλο  $\text{lin-lin+lin}^2$  σε σχέση με τα μέτρα ελαστικότητας αναφοράς που προσδιορίζει η μέθοδος του ανάστροφου υπολογισμού (back analysis). Η προαναφερθείσα παρουσίαση λαμβάνει χώρα στα σχήματα 10.5 και 10.6 που ακολουθούν :





Σχήμα 10.5 : Ραβδόγραμμα αποτελεσμάτων μοντέλου  $lin-lin+lin^2$



Σχήμα 10.6 : Διάγραμμα διασποράς αποτελεσμάτων μοντέλου  $lin-lin+lin^2$

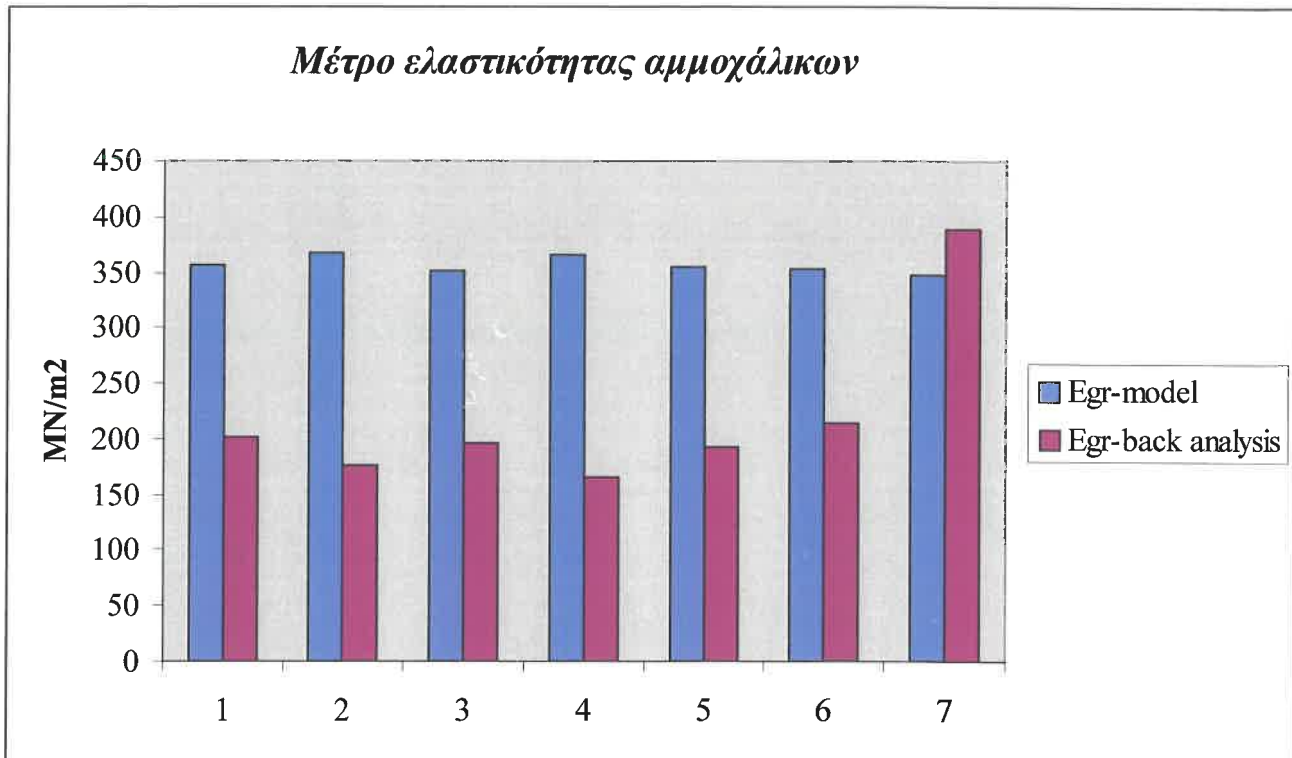
### 10.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου log-log

Στον ακόλουθο πίνακα εμφανίζονται τόσο τα μέτρα ελαστικότητας των αμμοχάλικων που προέκυψαν από τη διαδικασία της back analysis, όσο και τα εκτιμώμενα με τη βοήθεια του στατιστικού μοντέλου log-log.

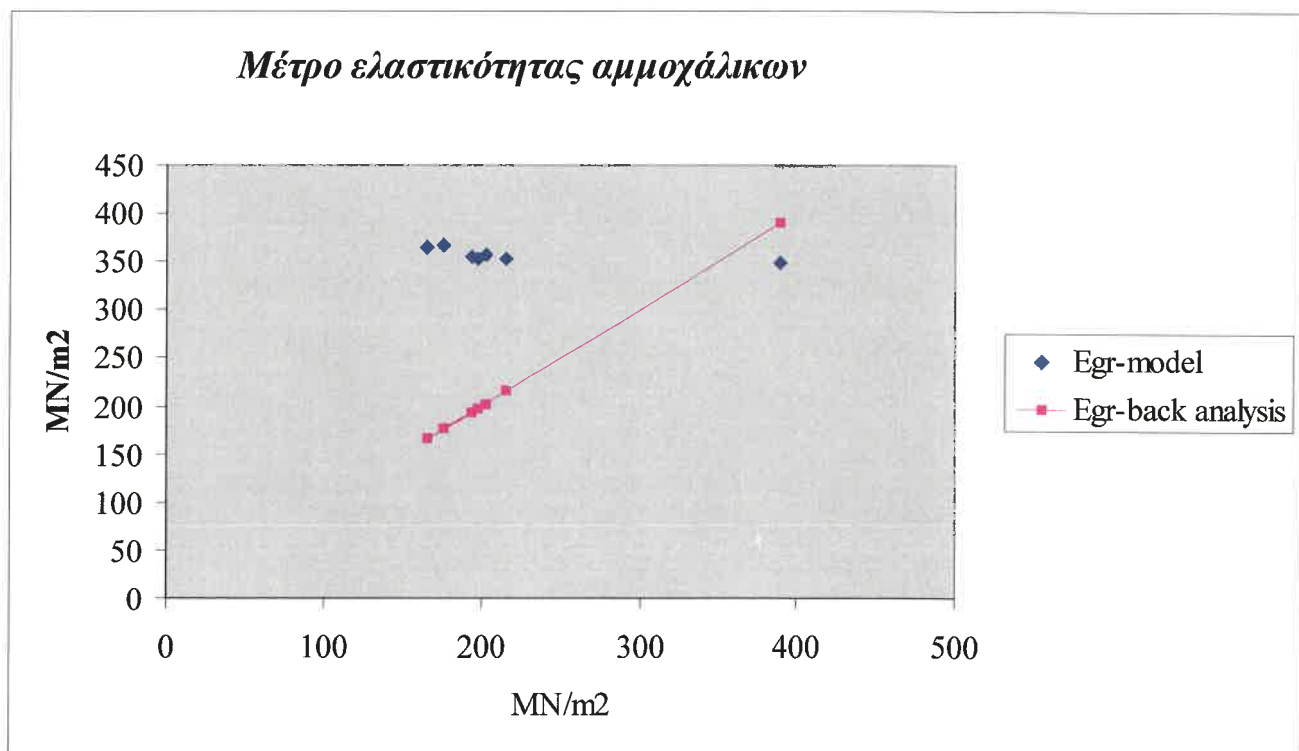
| A/A | Egr-model | Egr-back analysis |
|-----|-----------|-------------------|
| 1   | 357       | 202               |
| 2   | 366,4     | 176               |
| 3   | 351,9     | 197               |
| 4   | 365,8     | 166               |
| 5   | 354,5     | 193               |
| 6   | 352,6     | 215               |
| 7   | 347,8     | 389               |

Πίνακας 10.6 : Μέτρα ελαστικότητας αμμοχάλικων

Για τη βέλτιστη παρουσίαση και αξιολόγηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων κρίθηκε σκόπιμη η χρήση ραβδογραμμάτων και διαγραμμάτων διασποράς, έτσι ώστε να διαφαίνεται καθαρά το ποσοστό λάθους ή ακόμα καλύτερα η απόκλιση των εκτιμώμενων από το μοντέλο log-log σε σχέση με τα μέτρα ελαστικότητας αναφοράς που προσδιορίζει η μέθοδος του ανάστροφου υπολογισμού (back analysis). Η προαναφερθείσα παρουσίαση λαμβάνει χώρα στα σχήματα 10.7 και 10.8 που ακολουθούν :



Σχήμα 10.7 : Ραβδόγραμμα αποτελεσμάτων μοντέλου log-log



Σχήμα 10.8: Διάγραμμα διασποράς αποτελεσμάτων μοντέλου log-log

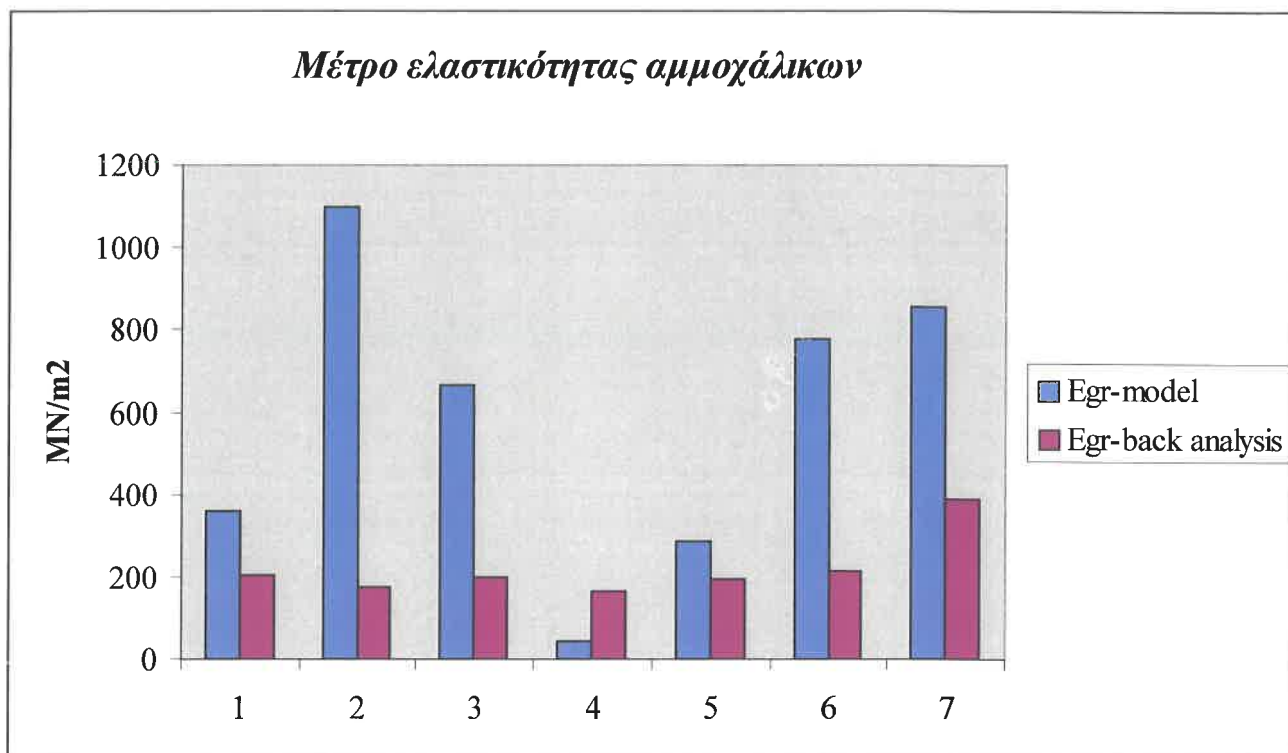
### 10.3.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $meson\ lin-lin+lin^2$

Στον ακόλουθο πίνακα εμφανίζονται τόσο τα μέτρα ελαστικότητας των αμμοχάλικων που προέκυψαν από τη διαδικασία της back analysis, όσο και τα εκτιμώμενα με τη βοήθεια του στατιστικού μοντέλου  $meson\ lin-lin+lin^2$ .

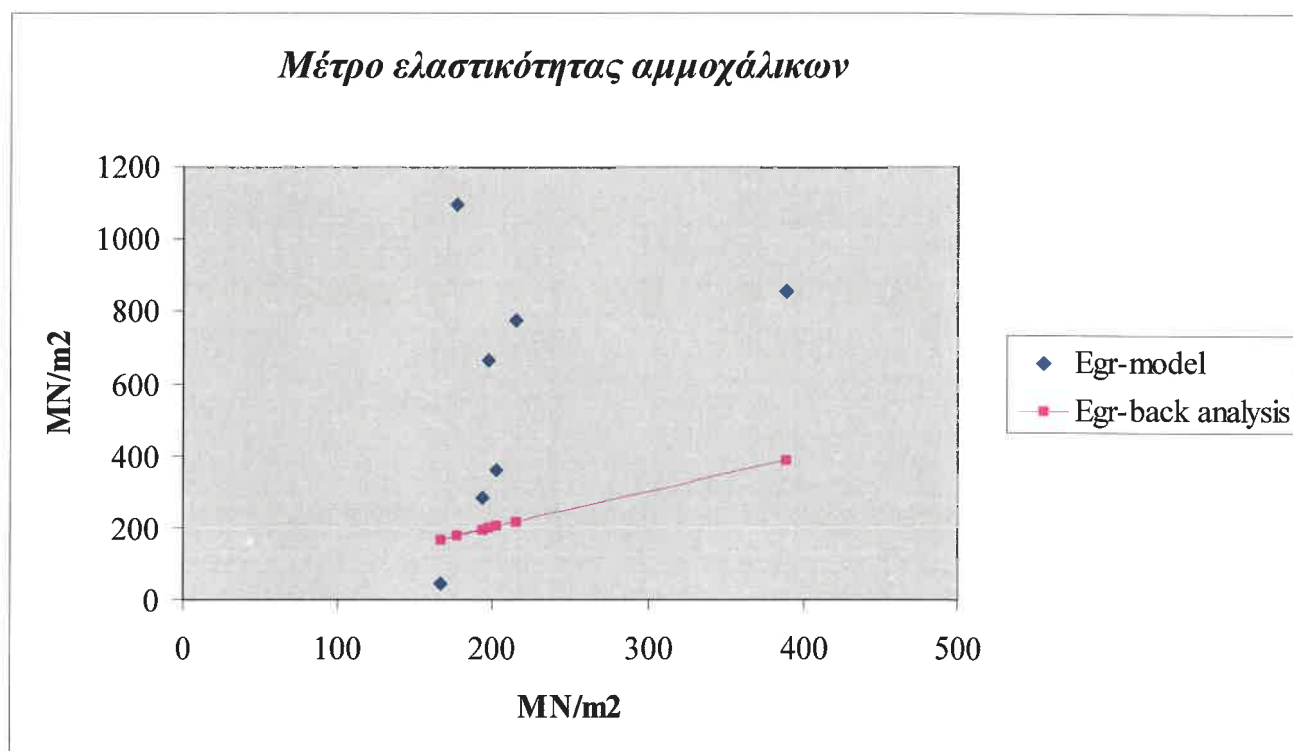
| A/A | Egr-model | Egr-back analysis |
|-----|-----------|-------------------|
| 1   | 361,1     | 202               |
| 2   | 1097,6    | 176               |
| 3   | 663,9     | 197               |
| 4   | 45,6      | 166               |
| 5   | 284,5     | 193               |
| 6   | 775,4     | 215               |
| 7   | 856,9     | 389               |

Πίνακας 10.7 : Μέτρα ελαστικότητας αμμοχάλικων

Για τη βέλτιστη παρουσίαση και αξιολόγηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων κρίθηκε σκόπιμη η χρήση ραβδογραμμάτων και διαγραμμάτων διασποράς, έτσι ώστε να διαφαίνεται καθαρά το ποσοστό λάθους ή ακόμα καλύτερα η απόκλιση των εκτιμώμενων από το μοντέλο  $meson\ lin-lin+lin^2$  σε σχέση με τα μέτρα ελαστικότητας αναφοράς που προσδιορίζει η μέθοδος του ανάστροφου υπολογισμού (back analysis). Η προαναφερθείσα παρουσίαση λαμβάνει χώρα στα σχήματα 10.9 και 10.10 που ακολουθούν :



Σχήμα 10.9 : Ραβδόγραμμα αποτελεσμάτων μοντέλου *meson lin-lin+lin<sup>2</sup>*



Σχήμα 10.10 : Διάγραμμα διασποράς αποτελεσμάτων μοντέλου *meson lin-lin+lin<sup>2</sup>*

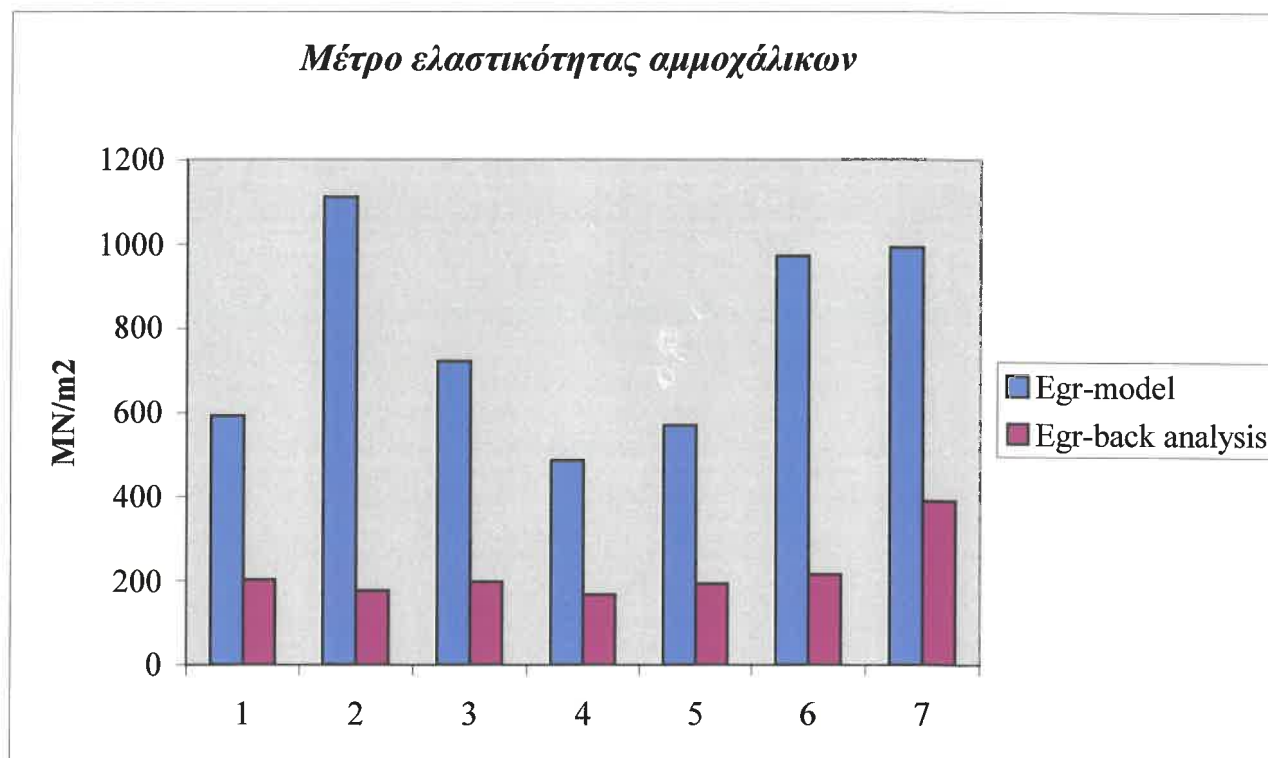
#### 10.3.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου meson log-log

Στον ακόλουθο πίνακα εμφανίζονται τόσο τα μέτρα ελαστικότητας των αμμοχάλικων που προέκυψαν από τη διαδικασία της back analysis, όσο και τα εκτιμώμενα με τη βοήθεια του στατιστικού μοντέλου meson log-log.

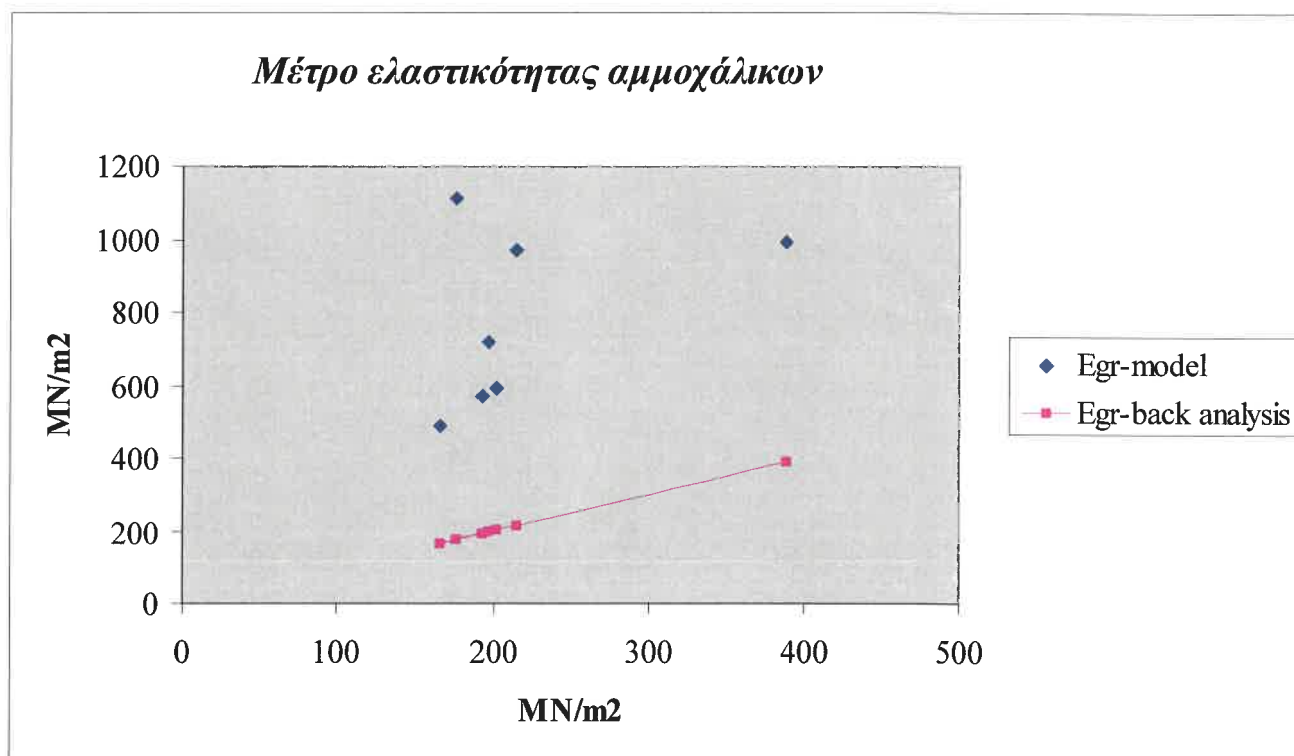
| A/A | Egr-model | Egr-back analysis |
|-----|-----------|-------------------|
| 1   | 591,4     | 202               |
| 2   | 1110,9    | 176               |
| 3   | 720,4     | 197               |
| 4   | 485,1     | 166               |
| 5   | 567,8     | 193               |
| 6   | 971,1     | 215               |
| 7   | 991,9     | 389               |

Πίνακας 10.8 : Μέτρα ελαστικότητας αμμοχάλικων

Για τη βέλτιστη παρουσίαση και αξιολόγηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων κρίθηκε σκόπιμη η χρήση ραβδογραμμάτων και διαγραμμάτων διασποράς, έτσι ώστε να διαφαίνεται καθαρά το ποσοστό λάθους ή ακόμα καλύτερα η απόκλιση των εκτιμώμενων από το μοντέλο log-log σε σχέση με τα μέτρα ελαστικότητας αναφοράς που προσδιορίζει η μέθοδος του ανάστροφου υπολογισμού (back analysis). Η προαναφερθείσα παρουσίαση λαμβάνει χώρα στα σχήματα 10.11 και 10.12 που ακολουθούν :



Σχήμα 10.11 : Ραβδόγραμμα αποτελεσμάτων μοντέλου *meson log-log*



Σχήμα 10.12 : Διάγραμμα διασποράς αποτελεσμάτων μοντέλου *meson log-log*

## 10.4 Αγ. Αναστασία

### 10.4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{lin-lin+lin}^2$

Στον ακόλουθο πίνακα εμφανίζονται τόσο τα μέτρα ελαστικότητας των αμμοχάλικων που προέκυψαν από τη διαδικασία της back analysis, όσο και τα εκτιμώμενα με τη βοήθεια του στατιστικού μοντέλου  $\text{lin-lin+lin}^2$ .

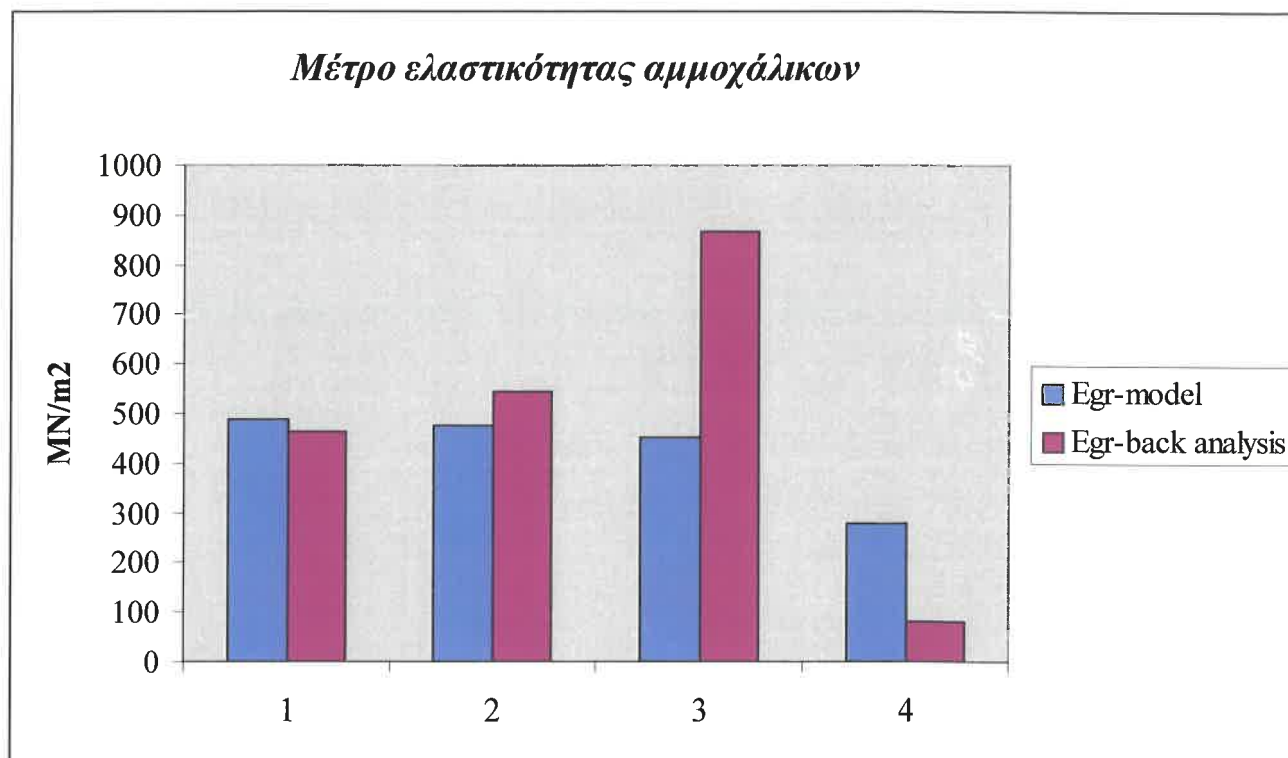
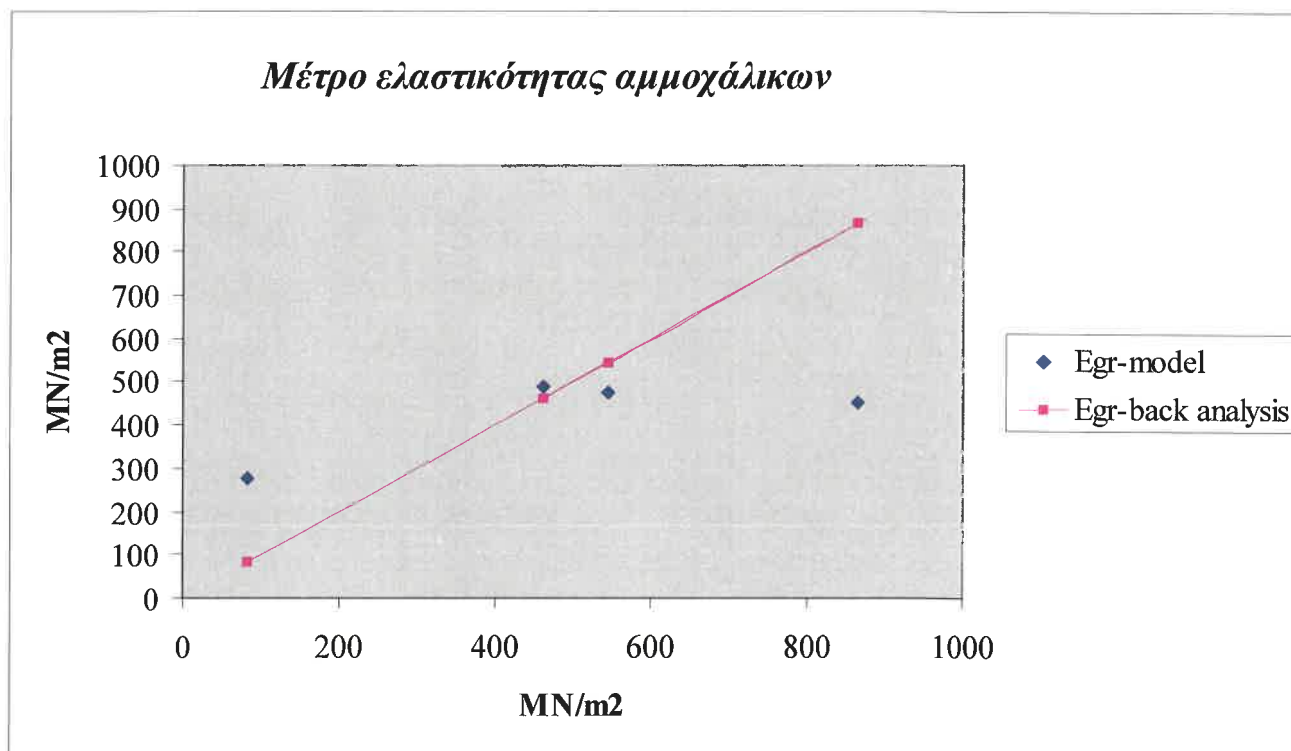
| A/A | Egr-model | Egr-back analysis |
|-----|-----------|-------------------|
| 1   | 488,7     | 463               |
| 2   | 474,6     | 546               |
| 3   | 451,7     | 865               |
| 4   | 278,3     | 81                |

Πίνακας 10.9 : Μέτρα ελαστικότητας αμμοχάλικων

Παρατηρείται ότι τα εξαγόμενα αποτελέσματα, με τη βοήθεια του στατιστικού μοντέλου  $\text{lin-lin+lin}^2$ , προσεγγίζουν με πολύ μεγάλη ακρίβεια τα αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας που συνάγονται από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού.

Για τη βέλτιστη παρουσίαση και αξιολόγηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων κρίθηκε σκόπιμη η χρήση ραβδογραμμάτων και διαγραμμάτων διασποράς, έτσι ώστε να διαφαίνεται καθαρά το ποσοστό λάθους ή ακόμα καλύτερα η απόκλιση των εκτιμώμενων από το μοντέλο  $\text{lin-lin+lin}^2$  σε σχέση με τα μέτρα ελαστικότητας αναφοράς που προσδιορίζει η μέθοδος του ανάστροφου υπολογισμού (back analysis). Η προαναφερθείσα παρουσίαση λαμβάνει χώρα στα σχήματα 10.13 και 10.14 που ακολουθούν :



Σχήμα 10.13: Ραβδόγραμμα αποτελεσμάτων μοντέλου  $lin-lin+lin^2$ Σχήμα 10.14 : Διάγραμμα διασποράς αποτελεσμάτων μοντέλου  $lin-lin+lin^2$

### 10.4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου log-log

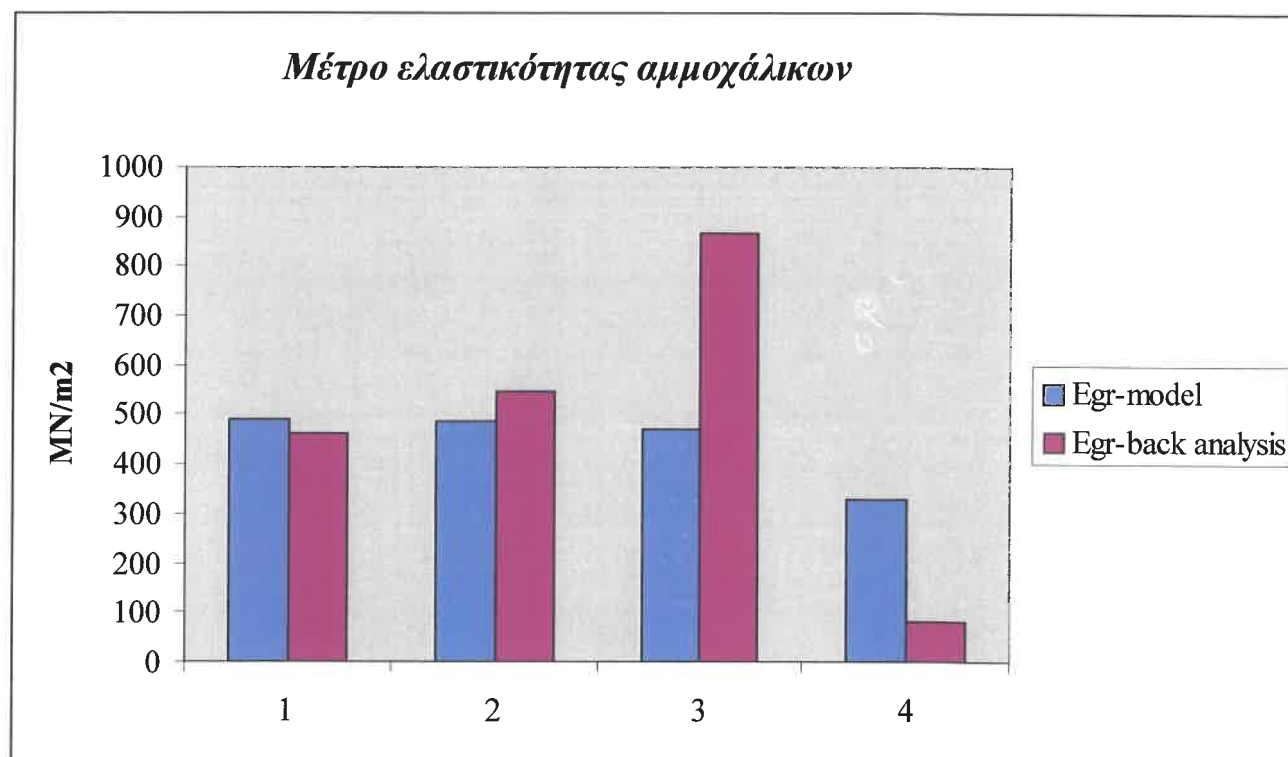
Στον ακόλουθο πίνακα εμφανίζονται τόσο τα μέτρα ελαστικότητας των αμμοχάλικων που προέκυψαν από τη διαδικασία της back analysis, όσο και τα εκτιμώμενα με τη βοήθεια του στατιστικού μοντέλου log-log.

| A/A | Egr-model | Egr-back analysis |
|-----|-----------|-------------------|
| 1   | 491,19798 | 463               |
| 2   | 484,19873 | 546               |
| 3   | 470,39516 | 865               |
| 4   | 327,68084 | 81                |

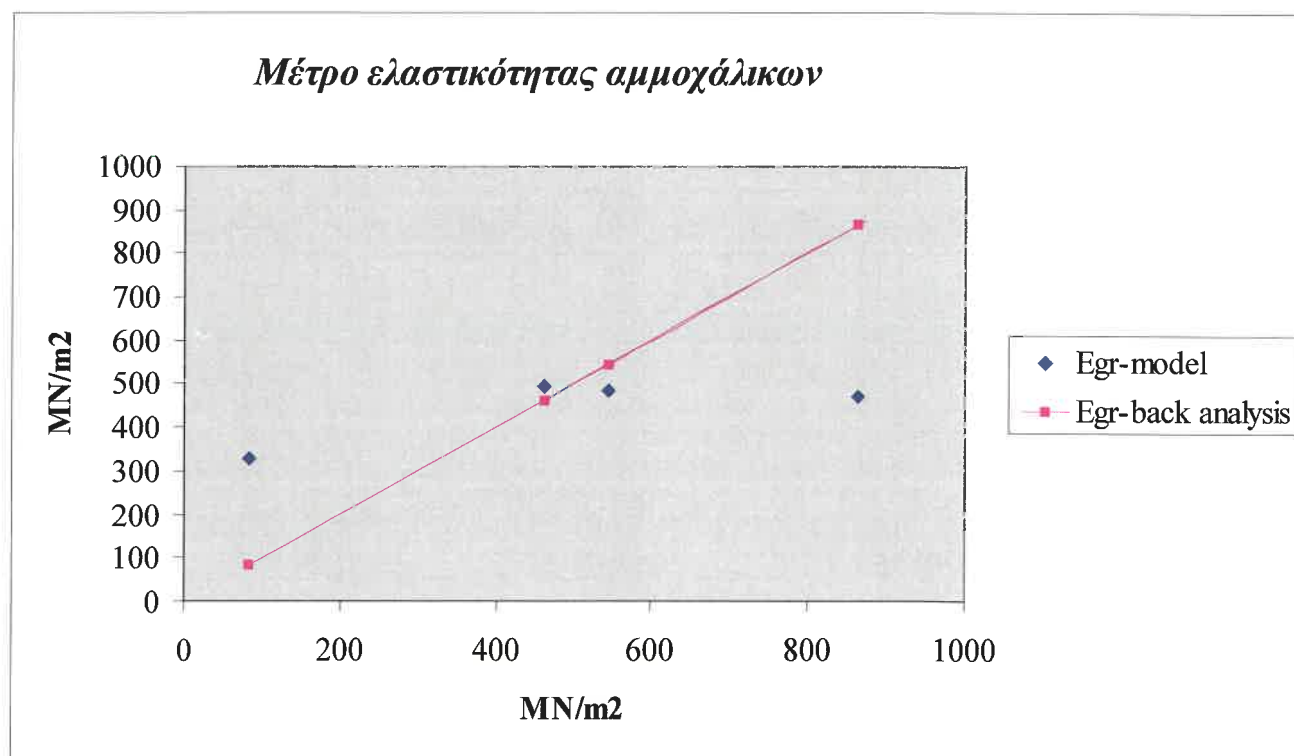
Πίνακας 10.10 : Μέτρα ελαστικότητας αμμοχάλικων

Παρατηρείται ότι τα εξαγόμενα αποτελέσματα, με τη βοήθεια του στατιστικού μοντέλου log-log , προσεγγίζουν με πολύ μεγάλη ακρίβεια τα αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας που συνάγονται από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού

Για τη βέλτιστη παρουσίαση και αξιολόγηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων κρίθηκε σκόπιμη η χρήση ραβδογραμμάτων και διαγραμμάτων διασποράς, έτσι ώστε να διαφαίνεται καθαρά το ποσοστό λάθους ή ακόμα καλύτερα η απόκλιση των εκτιμώμενων από το μοντέλο log-log σε σχέση με τα μέτρα ελαστικότητας αναφοράς που προσδιορίζει η μέθοδος του ανάστροφου υπολογισμού (back analysis). Η προαναφερθείσα παρουσίαση λαμβάνει χώρα στα σχήματα 10.15 και 10.16 που ακολουθούν :



Σχήμα 10.15 : Ραβδόγραμμα αποτελεσμάτων μοντέλου log-log



Σχήμα 10.16 : Διάγραμμα διασποράς αποτελεσμάτων μοντέλου log-log

#### 10.4.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου meson $\text{lin-lin}+\text{lin}^2$

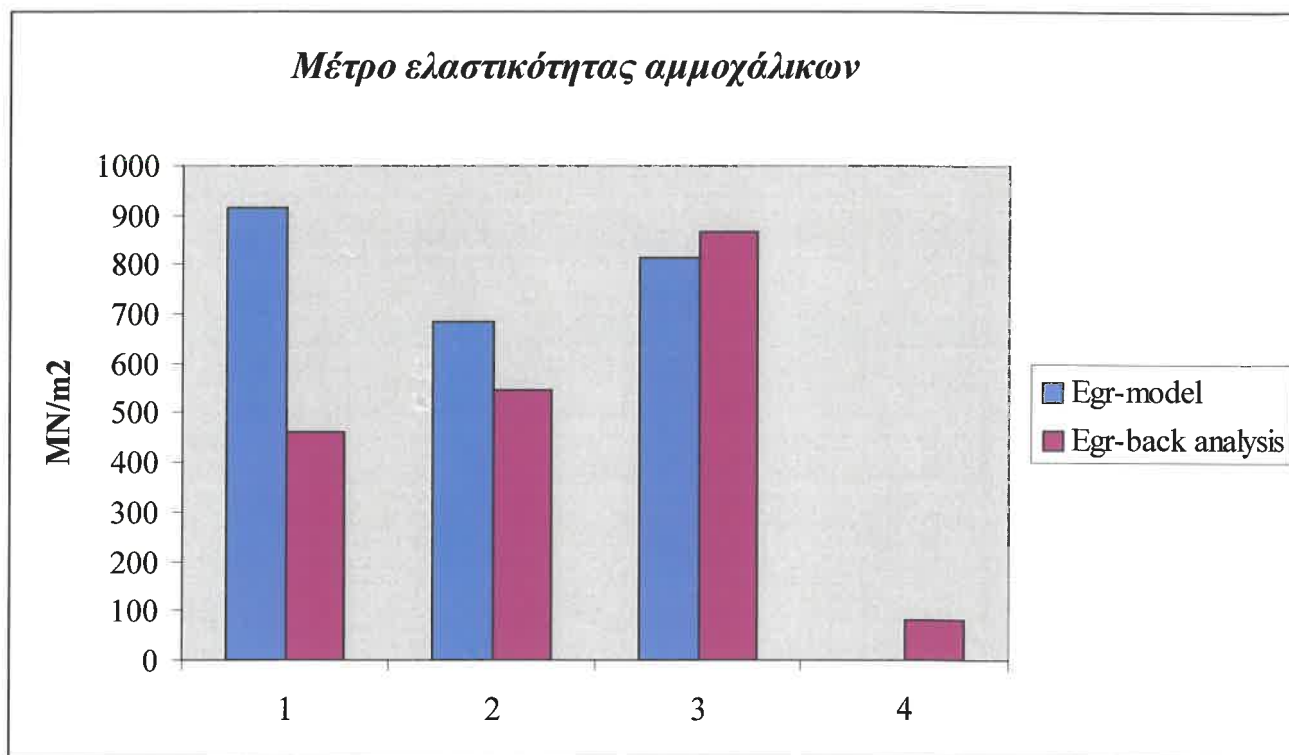
Στον ακόλουθο πίνακα εμφανίζονται τόσο τα μέτρα ελαστικότητας των αμμοχάλικων που προέκυψαν από τη διαδικασία της back analysis, όσο και τα εκτιμώμενα με τη βοήθεια του στατιστικού μοντέλου meson  $\text{lin-lin}+\text{lin}^2$ .

| A/A | Egr-model | Egr-back analysis |
|-----|-----------|-------------------|
| 1   | 916,241   | 463               |
| 2   | 683,2515  | 546               |
| 3   | 815,2315  | 865               |
| 4   | -197,369  | 81                |

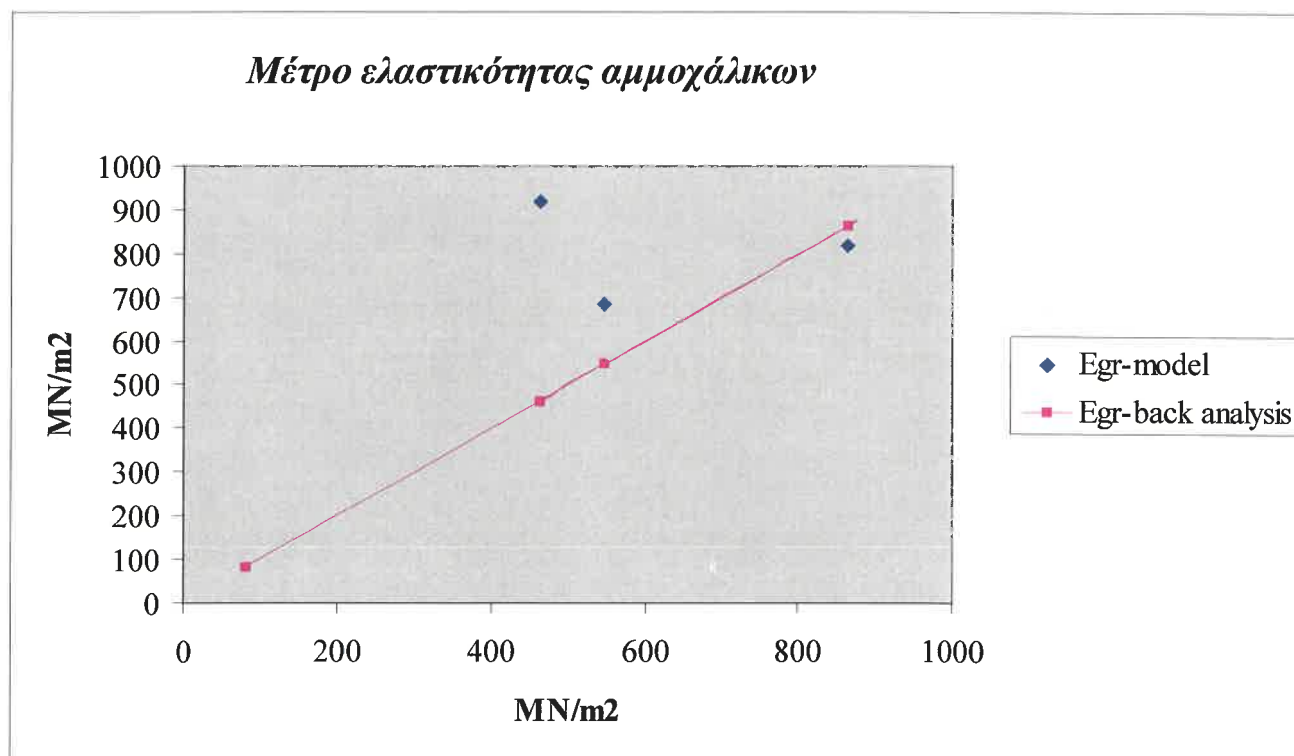
Πίνακας 10.11 : Μέτρα ελαστικότητας αμμοχάλικων

Παρατηρείται ότι τα εξαγόμενα αποτελέσματα, με τη βοήθεια του στατιστικού μοντέλου  $\text{meson lin-lin+lin}^2$ , προσεγγίζουν με πολύ μεγάλη ακρίβεια τα αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας που συνάγονται από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού

Για τη βέλτιστη παρουσίαση και αξιολόγηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων κρίθηκε σκόπιμη η χρήση ραβδογραμμάτων και διαγραμμάτων διασποράς, έτσι ώστε να διαφαίνεται καθαρά το ποσοστό λάθους ή ακόμα καλύτερα η απόκλιση των εκτιμώμενων από το μοντέλο  $\text{meson lin-lin+lin}^2$  σε σχέση με τα μέτρα ελαστικότητας αναφοράς που προσδιορίζει η μέθοδος του ανάστροφου υπολογισμού (back analysis). Η προαναφερθείσα παρουσίαση λαμβάνει χώρα στα σχήματα 10.17 και 10.18 που ακολουθούν :



Σχήμα 10.17 : Ραβδόγραμμα αποτελεσμάτων μοντέλου  $meson\ lin-lin+lin^2$



Σχήμα 10.18 : Διάγραμμα διασποράς αποτελεσμάτων μοντέλου  $meson\ lin-lin+lin^2$

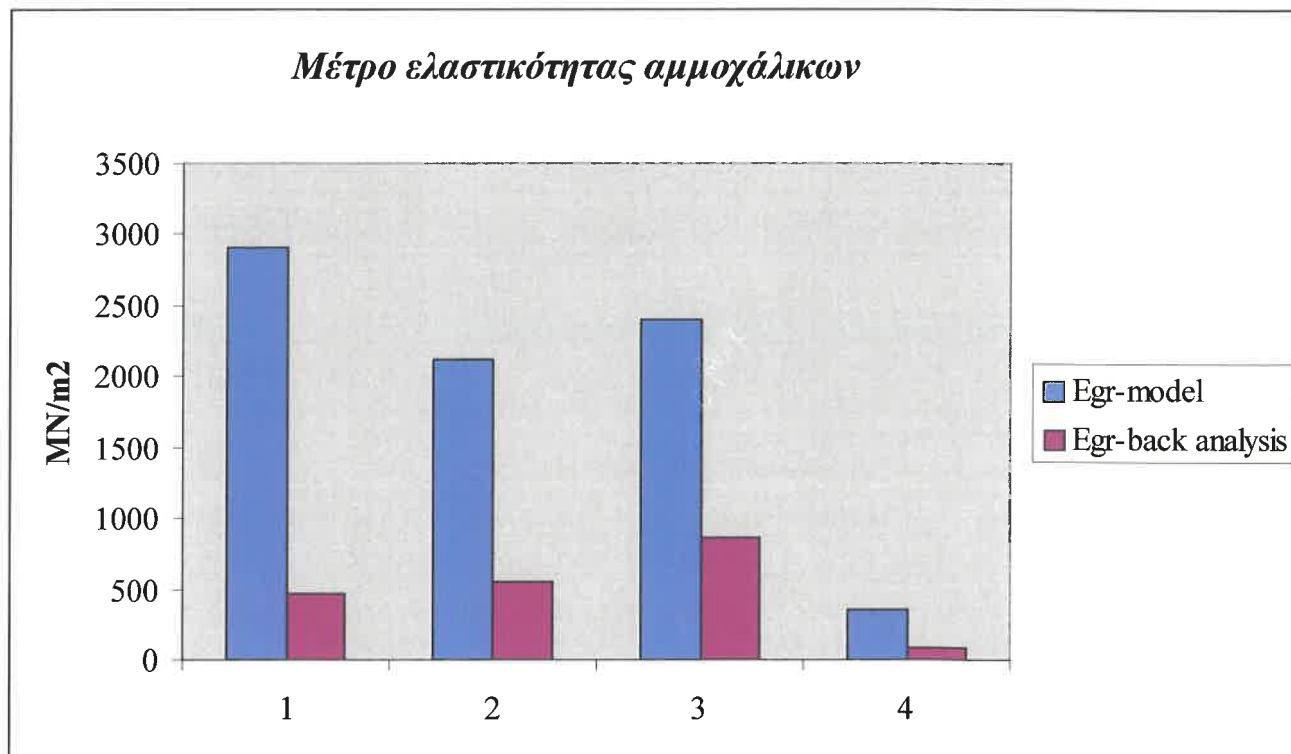
#### 10.4.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου meson log-log

Στον ακόλουθο πίνακα εμφανίζονται τόσο τα μέτρα ελαστικότητας των αμμοχάλικων που προέκυψαν από τη διαδικασία της back analysis, όσο και τα εκτιμώμενα με τη βοήθεια του στατιστικού μοντέλου meson log-log.

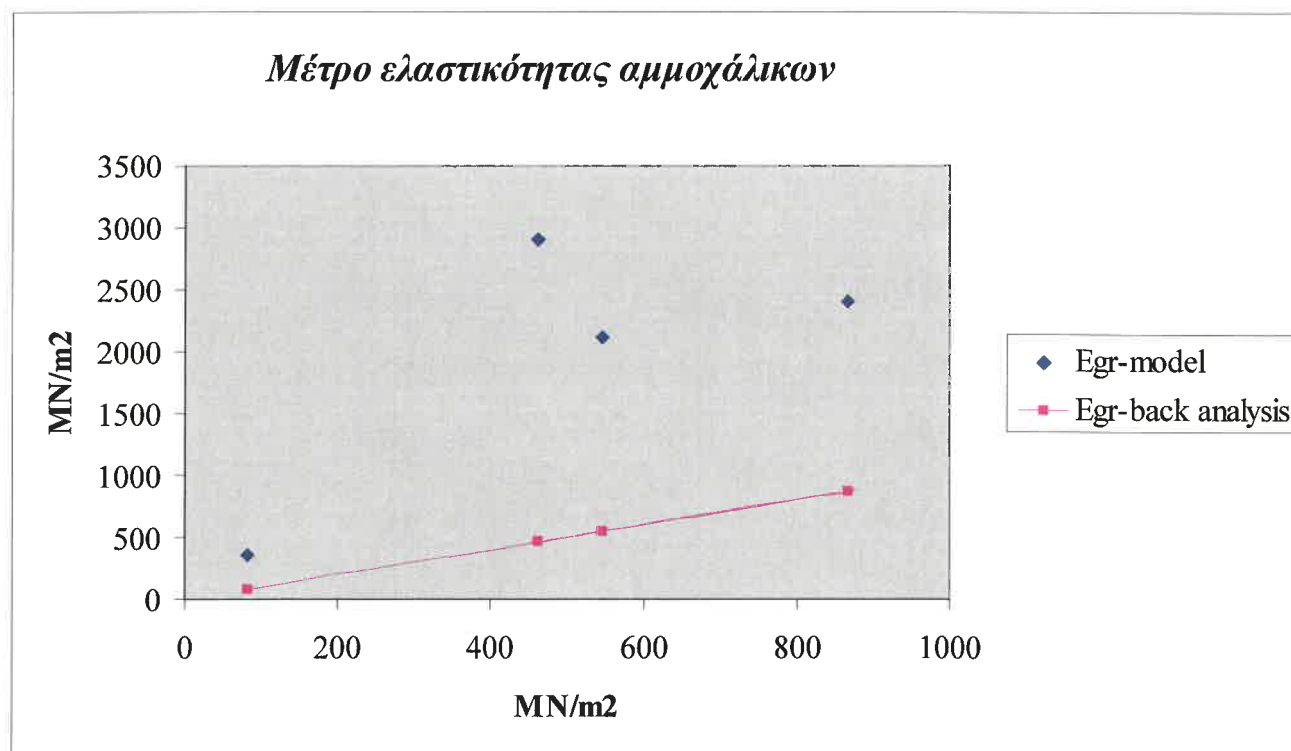
| A/A | Egr-model | Egr-back analysis |
|-----|-----------|-------------------|
| 1   | 2901,1887 | 463               |
| 2   | 2117,1627 | 546               |
| 3   | 2395,2603 | 865               |
| 4   | 347,62835 | 81                |

Πίνακας 10.12 : Μέτρα ελαστικότητας αμμοχάλικων

Για τη βέλτιστη παρουσίαση και αξιολόγηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων κρίθηκε σκόπιμη η χρήση ραβδογραμμάτων και διαγραμμάτων διασποράς, έτσι ώστε να διαφαίνεται καθαρά το ποσοστό λάθους ή ακόμα καλύτερα η απόκλιση των εκτιμώμενων από το μοντέλο meson log-log σε σχέση με τα μέτρα ελαστικότητας αναφοράς που προσδιορίζει η μέθοδος του ανάστροφου υπολογισμού (back analysis). Η προαναφερθείσα παρουσίαση λαμβάνει χώρα στα σχήματα 10.19 και 10.20 που ακολουθούν :



Σχήμα 10.19 : Ραβδόγραμμα αποτελεσμάτων μοντέλου meson log-log



Σχήμα 10.20 : Διάγραμμα διασποράς αποτελεσμάτων μοντέλου meson log-log



## 10.5 Τύρναβος

### 10.5.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $\text{lin-lin+lin}^2$

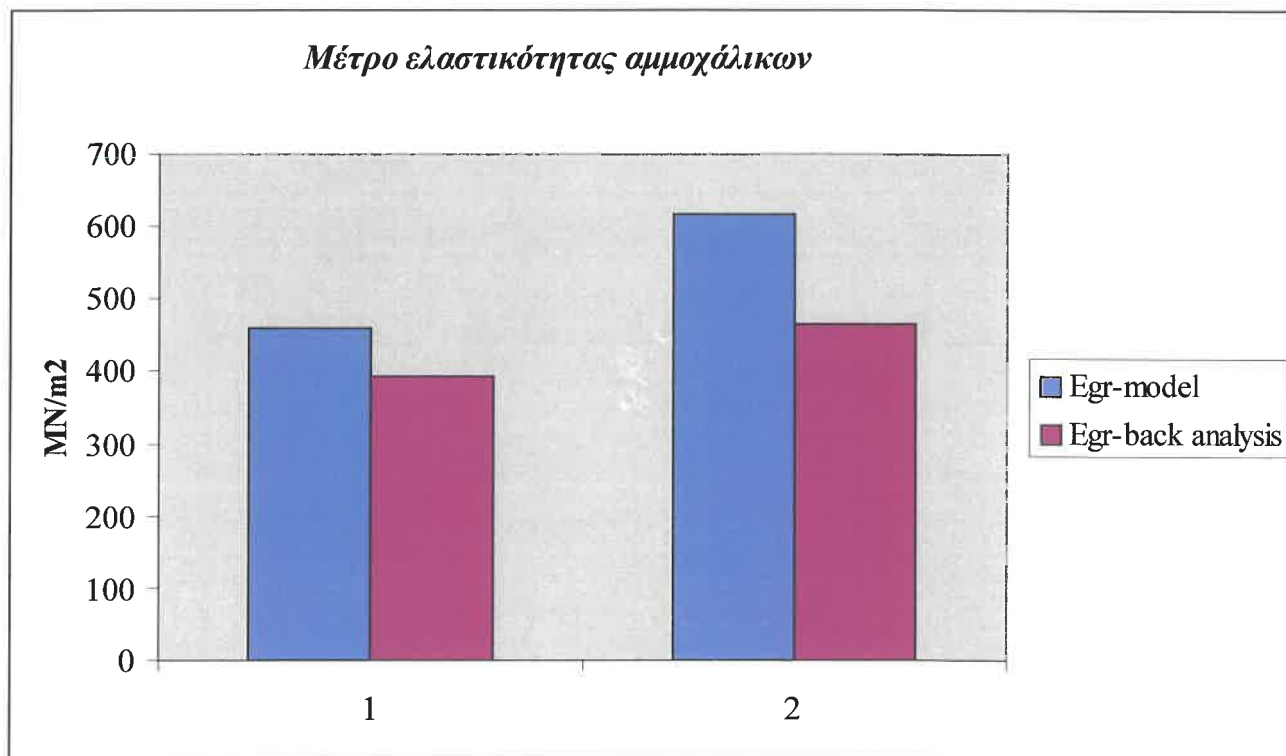
Στον ακόλουθο πίνακα εμφανίζονται τόσο τα μέτρα ελαστικότητας των αμμοχάλικων που προέκυψαν από τη διαδικασία της back analysis, όσο και τα εκτιμώμενα με τη βοήθεια του στατιστικού μοντέλου  $\text{lin-lin+lin}^2$ .

| A/A | Egr-model | Egr-back analysis |
|-----|-----------|-------------------|
| 1   | 458,3     | 394               |
| 2   | 616,5     | 466               |

Πίνακας 10.13 : Μέτρα ελαστικότητας αμμοχάλικων

Παρατηρείται ότι τα εξαγόμενα αποτελέσματα, με τη βοήθεια του στατιστικού μοντέλου  $\text{lin-lin+lin}^2$ , προσεγγίζουν με πολύ μεγάλη ακρίβεια τα αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας που συνάγονται από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού.

Για τη βέλτιστη παρουσίαση και αξιολόγηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων κρίθηκε σκόπιμη η χρήση ραβδογράμματος, έτσι ώστε να διαφαίνεται καθαρά το ποσοστό λάθους ή ακόμα καλύτερα η απόκλιση των εκτιμώμενων από το μοντέλο  $\text{lin-lin+lin}^2$  σε σχέση με τα μέτρα ελαστικότητας αναφοράς που προσδιορίζει η μέθοδος του ανάστροφου υπολογισμού (back analysis). Η προαναφερθείσα παρουσίαση λαμβάνει χώρα στο σχήμα 10.21 που ακολουθεί :



Σχήμα 10.21 : Ραβδόγραμμα αποτελεσμάτων μοντέλου  $lin-lin+lin^2$

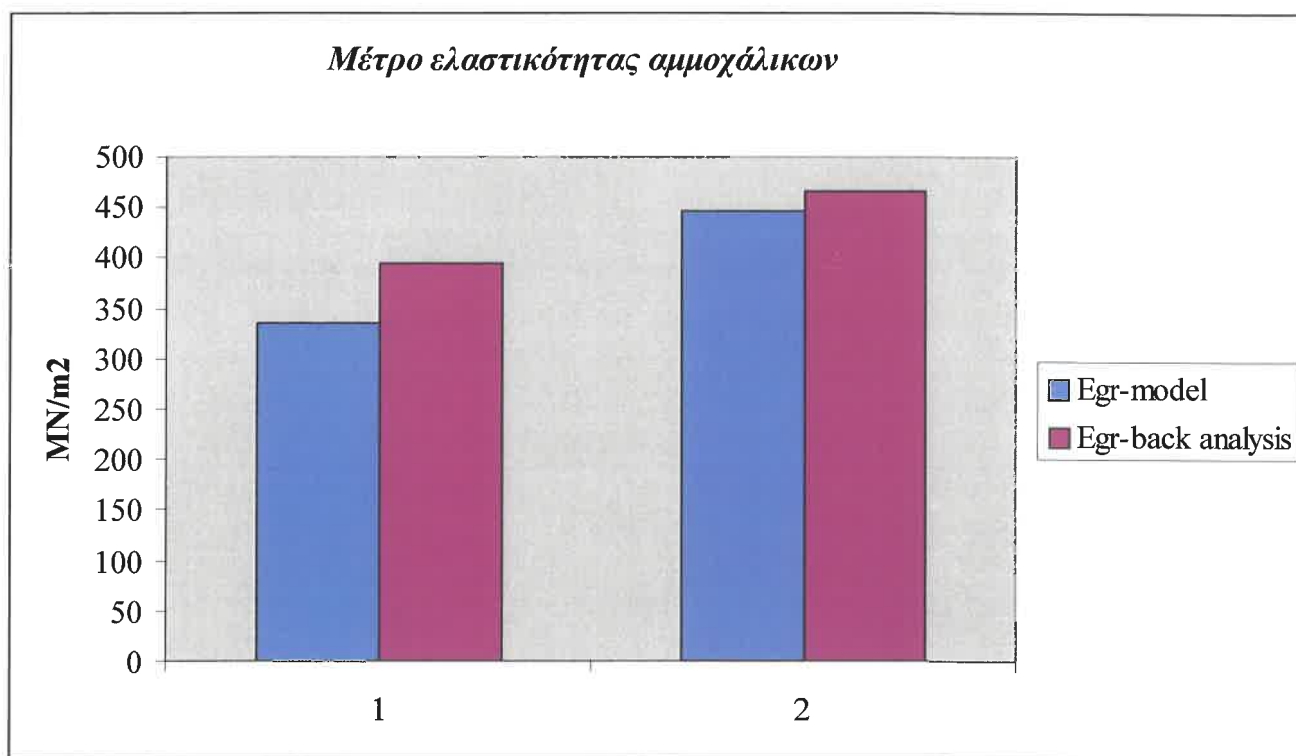
### 10.5.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $log-log$

Στον ακόλουθο πίνακα εμφανίζονται τόσο τα μέτρα ελαστικότητας των αμμοχάλικων που προέκυψαν από τη διαδικασία της back analysis, όσο και τα εκτιμώμενα με τη βοήθεια του στατιστικού μοντέλου  $log-log$ .

| A/A | Egr-model | Egr-back analysis |
|-----|-----------|-------------------|
| 1   | 335,1     | 394               |
| 2   | 446,3     | 466               |

Πίνακας 10.14 : Μέτρα ελαστικότητας αμμοχάλικων

Για τη βέλτιστη παρουσίαση και αξιολόγηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων κρίθηκε σκόπιμη η χρήση ραβδογράμματος, έτσι ώστε να διαφαίνεται καθαρά το ποσοστό λάθους ή ακόμα καλύτερα η απόκλιση των εκτιμώμενων από το μοντέλο log-log σε σχέση με τα μέτρα ελαστικότητας αναφοράς που προσδιορίζει η μέθοδος του ανάστροφου υπολογισμού (back analysis). Η προαναφερθείσα παρουσίαση λαμβάνει χώρα στο σχήμα 10.22 που ακολουθεί :



Σχήμα 10.22 : Ραβδόγραμμα αποτελεσμάτων μοντέλου log-log

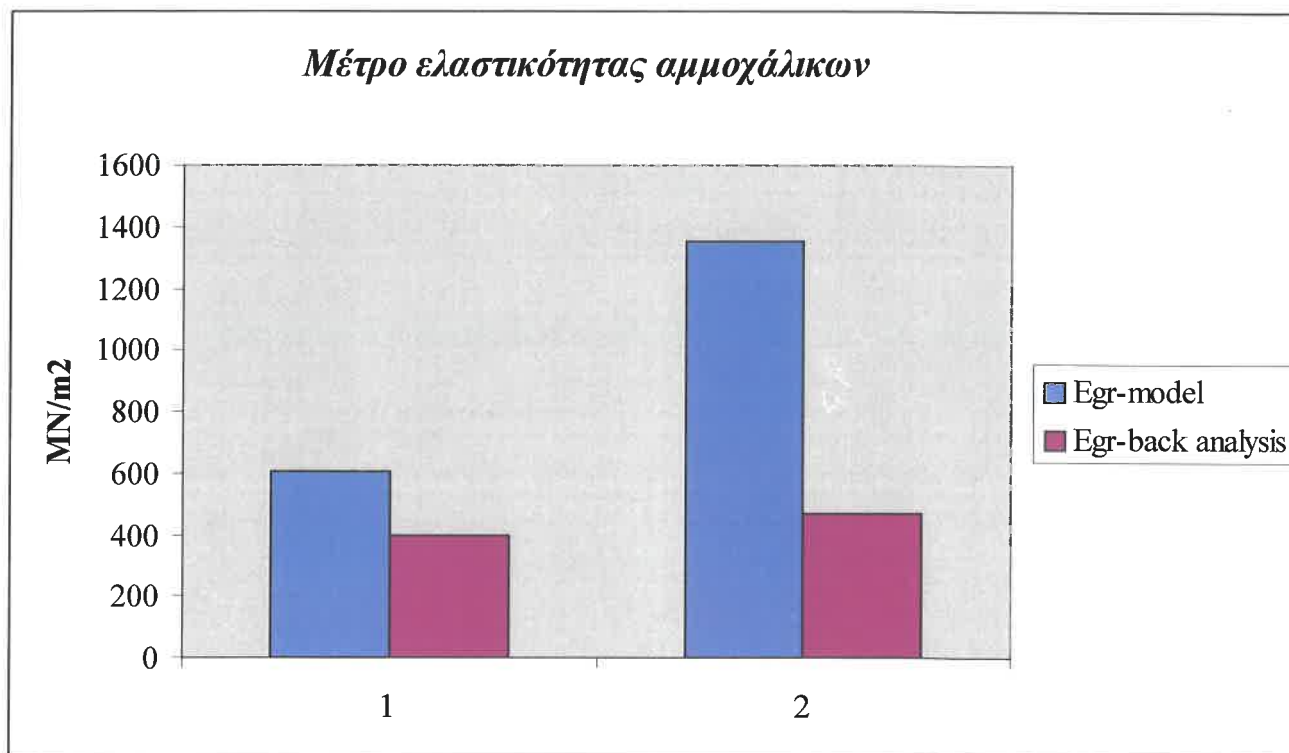
### 10.5.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου $meson\ lin-lin+lin^2$

Στον ακόλουθο πίνακα εμφανίζονται τόσο τα μέτρα ελαστικότητας των αμμοχάλικων που προέκυψαν από τη διαδικασία της back analysis, όσο και τα εκτιμώμενα με τη βοήθεια του στατιστικού μοντέλου  $meson\ lin-lin+lin^2$ .

| A/A | Egr-model | Egr-back analysis |
|-----|-----------|-------------------|
| 1   | 603,2     | 394               |
| 2   | 1351,3    | 466               |

Πίνακας 10.15 : Μέτρα ελαστικότητας αμμοχάλικων

Για τη βέλτιστη παρουσίαση και αξιολόγηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων κρίθηκε σκόπιμη η χρήση ραβδογράμματος, έτσι ώστε να διαφαίνεται καθαρά το ποσοστό λάθους ή ακόμα καλύτερα η απόκλιση των εκτιμώμενων από το μοντέλο  $meson\ lin-lin+lin^2$  σε σχέση με τα μέτρα ελαστικότητας αναφοράς που προσδιορίζει η μέθοδος του ανάστροφου υπολογισμού (back analysis). Η προαναφερθείσα παρουσίαση λαμβάνει χώρα στο σχήμα 10.23 που ακολουθεί :



Σχήμα 10.23 : Ραβδόγραμμα αποτελεσμάτων μοντέλου *meson lin-lin+lin<sup>2</sup>*

#### 10.5.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντέλου *meson log-log*

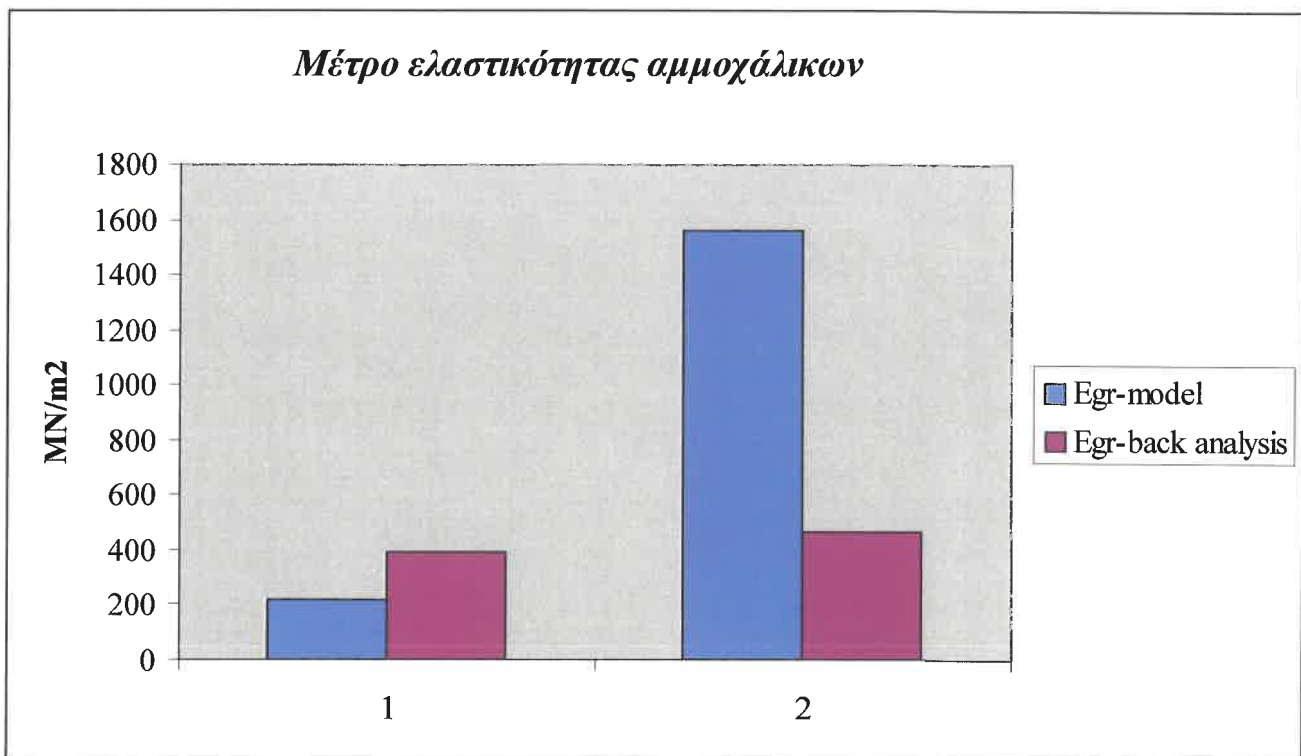
Στον ακόλουθο πίνακα εμφανίζονται τόσο τα μέτρα ελαστικότητας των αμμοχάλικων που προέκυψαν από τη διαδικασία της back analysis, όσο και τα εκτιμώμενα με τη βοήθεια του στατιστικού μοντέλου *meson log-log*.

| A/A | Egr-model | Egr-back analysis |
|-----|-----------|-------------------|
| 1   | 218,1     | 394               |
| 2   | 1560,8    | 466               |

Πίνακας 10.16 : Μέτρα ελαστικότητας αμμοχάλικων

Παρατηρείται ότι τα εξαγόμενα αποτελέσματα, με τη βοήθεια του στατιστικού μοντέλου log-log , προσεγγίζουν με πολύ μεγάλη ακρίβεια τα αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας που συνάγονται από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού

Για τη βέλτιστη παρουσίαση και αξιολόγηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων κρίθηκε σκόπιμη η χρήση ραβδογράμματος, έτσι ώστε να διαφαίνεται καθαρά το ποσοστό λάθους ή ακόμα καλύτερα η απόκλιση των εκτιμώμενων από το μοντέλο meson log-log σε σχέση με τα μέτρα ελαστικότητας αναφοράς που προσδιορίζει η μέθοδος του ανάστροφου υπολογισμού (back analysis). Η προαναφερθείσα παρουσίαση λαμβάνει χώρα στο σχήμα 10.24 που ακολουθεί :



Σχήμα 10.24 : Ραβδόγραμμα αποτελεσμάτων μοντέλου meson log-log

## 10.6 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Είναι γεγονός ότι το μέγεθος του δείγματος των μετρήσεων στις παραπάνω περιοχές είναι αρκετά μικρό και συνακόλουθα η εξαγωγή συμπερασμάτων δεν είναι ιδιαίτερα ασφαλής και αμερόληπτη. Παρόλα αυτά όμως από την επεξεργασία προκύπτουν ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις.

Πρώτον, όσον αφορά την περιοχή της Κασσάνδρας παρατηρούμε ότι τα στατιστικά μοντέλα  $\text{lin-lin+lin}^2$  και  $\text{log-log}$  προσεγγίζουν με πολύ μεγάλη ακρίβεια τα μέτρα ελαστικότητας που προσδιορίζει η διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού. Το ποσοστό λάθους εκτίμησης είναι εξαιρετικά χαμηλό και σε ορισμένες περιπτώσεις τείνει να μηδενισθεί. Συγκεκριμένα, εμφανίζουν μέσο σφάλμα πρόβλεψης του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων 15,85 % και 31,55 % αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αυτά έχουν ιδιαίτερη αξία αν συνυπολογισθεί και το γεγονός ότι η εξίσωση των Dormon-Metcalf δεν αφορά οδοστρώματα εν λειτουργία. Τα υπόλοιπα στατιστικά μοντέλα δεν παρουσιάζουν την ίδια αποτελεσματικότητα.

Δεύτερον, όσον αφορά την περιοχή του Όλυνθου παρατηρούμε ότι όλα τα στατιστικά μοντέλα δεν προσεγγίζουν με ικανοποιητική ακρίβεια τα μέτρα ελαστικότητας που προσδιορίζει η διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού. Το ποσοστό λάθους εκτίμησης είναι αρκετά σημαντικό.

Τρίτον, όσον αφορά την περιοχή της Αγ. Αναστασίας παρατηρούμε ότι τα στατιστικά μοντέλα  $\text{lin-lin+lin}^2$ ,  $\text{log-log}$  και  $\text{meson log-log}$  προσεγγίζουν με αρκετά ικανοποιητική ακρίβεια τα μέτρα ελαστικότητας που προσδιορίζει η διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού. Το ποσοστό λάθους εκτίμησης είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικό. Συγκεκριμένα, εμφανίζουν μέσο σφάλμα πρόβλεψης του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων 15,46 %, 21,84 % και 26,95 % αντίστοιχα..

Τέταρτον, όσον αφορά την περιοχή του Τύρναβου παρατηρούμε ότι τα στατιστικά μοντέλα  $\text{lin-lin+lin}^2$  και  $\text{log-log}$  προσεγγίζουν με πολύ μεγάλη ακρίβεια τα μέτρα ελαστικότητας που προσδιορίζει η διαδικασία της back analysis. Το ποσοστό λάθους εκτίμησης είναι εξαιρετικά χαμηλό και σε ορισμένες περιπτώσεις τείνει να μηδενισθεί. Συγκεκριμένα, εμφανίζουν μέσο σφάλμα πρόβλεψης του μέτρου

ελαστικότητας των αμμοχάλικων 24,97 % και 9,14 % αντίστοιχα. Τα υπόλοιπα στατιστικά μοντέλα δεν παρουσιάζουν την ίδια αποτελεσματικότητα.



## **Κεφάλαιο 11**

### **Ανακεφαλαίωση-Προτάσεις**

## 11.1 Ανακεφαλαίωση

Σύμφωνα με τη διεθνή εμπειρία, η εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας των υλικών οδοστρώσας ( $E_{gr}$ ) συνδέεται με το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους έδρασης ( $E_{sg}$ ) με απλές συσχετίσεις της μορφής  $E_{gr} = K * E_{sg}$ , όπου οι αντίστοιχες τιμές των μέτρων ελαστικότητας εκτιμώνται από εμπειρικές συσχετίσεις E-CBR μέσω αποτελεσμάτων επιτόπου (in situ) δοκιμών της φέρουσας ικανότητας.

Στο πλαίσιο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας γίνεται μια προσπάθεια ανάπτυξης μιας εναλλακτικής σχέσης που να συνδέει το μέτρο ελαστικότητας των ασύνδετων στρώσεων ( $E_{gr}$ ) από κοκκώδες υλικό με το αντίστοιχο μέτρο ελαστικότητας του εδαφικού υλικού της υποκείμενης στρώσης έδρασης ( $E_{sg}$ ) του οδοστρώματος.

Σε αντίθεση με τις έως τώρα απλουστευμένες ισχύουσες ημ εμπειρικές συσχετίσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας αναπτύχθηκαν 4 αλγόριθμοι προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας των ασύνδετων υλικών, οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τη γεωμετρία του οδοστρώματος (πάχη στρώσεων), τα μηχανικά χαρακτηριστικά των επιμέρους στρώσεων, καθώς και την περιορισμένη ικανότητα των υλικών οδοστρώσας να αναλάβουν εφελκυστικές τάσεις σε φάση ολοκλήρωσης της κατασκευής και του τελικού ασφαλοτάπητα κυκλοφορίας. Η διαμόρφωση των προτεινόμενων αλγόριθμων βασίστηκε σε σχετική βιβλιογραφική διερεύνηση, όσον αφορά στα πάχη των οδοστρώματων και τις ιδιότητες των υλικών τους, κάνοντας χρήση της θεωρίας των πολλαπλών επάλληλων στρώσεων και του αντίστοιχου λογισμικού BISAR.

Για την ανάπτυξη των αλγόριθμων έγινε χρήση της στατιστικής και πολυπαραμετρικής ανάλυσης μέσω του στατιστικού προγράμματος SPSS. Από την ανάλυση σχηματίστηκαν 4 στατιστικά μοντέλα, τα οποία αξιολογήθηκαν και επεξεργάστηκαν με επιτόπου μετρήσεις του Κ.Ε.Δ.Ε, καθώς και με μετρήσεις σε οδοστρώματα εν λειτουργία του επαρχιακού δικτύου.

Από την επεξεργασία των μετρήσεων προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα τα οποία αναφέρονται ακόλουθα για κάθε πρότυπο ξεχωριστά.

Δεν αυτοαξιολογείται

### 11.1.1 Μοντέλο $\text{lin-lin+lin}^2$

Το συγκεκριμένο στατιστικό πρότυπο εμφανίζει συντελεστής συσχέτισης  $R^2 = 0,1329$ . Οι ανεξάρτητες μεταβλητές ( $\text{EAC}^2, \text{Esg}^2, \text{hAC}^2, \text{hgr}^2$ ) είναι στατιστικά σημαντικές για επίπεδο εμπιστοσύνης πάνω από 90%, εκτός από το μέτρο δυσκαμψίας του ασφατομίγματος. Όλοι οι συντελεστές των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι θετικοί.

Από την επεξεργασία των επιτόπου μετρήσεων προέκυψε ότι ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων με τη συμβολή του στατιστικού μοντέλου  $\text{lin-lin+lin}^2$  καταλήγει σε αποτελέσματα με αρκετά μεγάλη απόκλιση από τις τιμές των μέτρων ελαστικότητας που συνάγονται από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού. Το στατιστικό μας μοντέλο εμφανίζει σημαντικό μέσο σφάλμα πρόβλεψης. Ο προσδιορισμός των μέτρων ελαστικότητας των αμμοχάλικων μέσω της εξίσωσης των Dormon-Metcalf καταλήγει σε αποτελέσματα με μικρότερη απόκλιση από αυτά του στατιστικού μοντέλου.

Από την επεξεργασία των μετρήσεων των οδοστρωμάτων συντήρησης προέκυψε ότι ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων με τη συμβολή του στατιστικού μοντέλου  $\text{lin-lin+lin}^2$  καταλήγει σε αποτελέσματα με πολύ μικρή απόκλιση από τις τιμές των μέτρων ελαστικότητας που συνάγονται από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού των επιτόπου μετρήσεων. Συγκεκριμένα για τις περιοχές της Κασσάνδρας, της Αγ. Αναστασίας και του Τύρναβου το στατιστικό μοντέλο εμφάνισε μέσο σφάλμα πρόβλεψης 15,85 %, 15,46 % και 24,97 % αντίστοιχα. Συνεπάγεται λοιπόν ότι τα αποτελέσματα αυτά έχουν ιδιαίτερη αξία αν συνυπολογισθεί και το γεγονός ότι η εξίσωση των Dormon-Metcalf δεν αφορά οδοστρώματα εν λειτουργία.

### 11.1.2 Μοντέλο log-log

Το συγκεκριμένο στατιστικό πρότυπο εμφανίζει συντελεστή συσχέτισης συντελεστής συσχέτισης  $R^2 = 0,14307$ . Οι ανεξάρτητες μεταβλητές (LEAC, LEsg, LhAC, Lhgr) είναι στατιστικά σημαντικές για επίπεδο εμπιστοσύνης πάνω από 90%, εκτός από το μέτρο δυσκαμψίας του ασφατομίγματος. Όλοι οι συντελεστές των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι θετικοί.

Από την επεξεργασία των επιτόπου μετρήσεων προέκυψε ότι ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων με τη συμβολή του στατιστικού μοντέλου log-log καταλήγει σε αποτελέσματα με καλή προσέγγιση στις τιμές των μέτρων ελαστικότητας που συνάγονται από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού. Συγκεκριμένα το στατιστικό μας μοντέλο εμφανίζει μέσο σφάλμα πρόβλεψης αρκετά χαμηλό. Ο προσδιορισμός των μέτρων ελαστικότητας των αμμοχάλικων μέσω της εξίσωσης των Dormon-Metcalf καταλήγει σε αποτελέσματα με μεγάλη απόκλιση από αυτά του ανάστροφου υπολογισμού. Το μέσο σφάλμα πρόβλεψης είναι πολύ υψηλότερο του στατιστικού προτύπου. Αναλυτικά, το στατιστικό πρότυπο προβλέπει με μικρότερη απόκλιση τα αποτελέσματα του ανάστροφου υπολογισμού στο 89,47 % των μετρήσεων. Αξίζει επίσης να μνημονεύσουμε στο σημείο αυτό ότι αν εξαιρεθούν τα αποτελέσματα των μέτρων ελαστικότητας των αμμοχάλικων του ανάστροφου υπολογισμού που εμφανίζουν υψηλές τιμές ( εκτός ορίων διακύμανσης αντιστοίχων κατά την αναλυτική διαδικασία επάλληλων στρώσεων ), καθώς και τα αντίστοιχα εξαγόμενα με τη συμβολή του στατιστικού προτύπου και μέσω της εξίσωσης Dormon-Metcalf, το στατιστικό μας μοντέλο εξακολουθεί να εμφανίζει πολύ καλύτερη προσέγγιση στα μέτρα ελαστικότητας αμμοχάλικων που προσδιορίζονται από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού, συγκριτικά με τα αντίστοιχα εξαγόμενα από την εξίσωση των Dormon-Metcalf.

Από την επεξεργασία των μετρήσεων των οδοστρωμάτων συντήρησης προέκυψε ότι ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων με τη συμβολή του στατιστικού μοντέλου lin-lin+lin<sup>2</sup> καταλήγει σε αποτελέσματα με πολύ μικρή απόκλιση από τις τιμές των μέτρων ελαστικότητας που συνάγονται από τη

διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού των επιτόπου μετρήσεων. Συγκεκριμένα για τις περιοχές της Κασσάνδρας, και του Τύρναβου το στατιστικό μοντέλο εμφάνισε μέσο σφάλμα πρόβλεψης 31,55 %, και 9,14 % αντίστοιχα Συνεπάγεται λοιπόν ότι τα αποτελέσματα αυτά έχουν ιδιαίτερη αξία αν συνυπολογισθεί και το γεγονός ότι η εξίσωση των Dormon-Metcalf δεν αφορά οδοστρώματα εν λειτουργία

### 11.1.3 Μοντέλο meson lin-lin+lin2

Το συγκεκριμένο στατιστικό πρότυπο εμφανίζει συντελεστής συσχέτισης  $R^2 = 0,89818$ . Οι ανεξάρτητες μεταβλητές (EAC, Esg, hAC, hgr<sup>2</sup>) είναι στατιστικά σημαντικές για επίπεδο εμπιστοσύνης πάνω από 90%, εκτός από το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης και το πάχος της ασφαλτικής στρώσης. Όλοι οι συντελεστές των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι θετικοί, εκτός από το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης που εμφανίζει αρνητικό συντελεστή.

Από την επεξεργασία των επιτόπου μετρήσεων προέκυψε ότι ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων με τη συμβολή του στατιστικού μοντέλου log-log καταλήγει σε διαφορετικά αποτελέσματα, καθώς σε αρκετές περιπτώσεις εμφανίζει ικανοποιητική προσέγγιση, σε σχέση με τις τιμές των μέτρων ελαστικότητας που συνάγονται από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού των επιτόπου μετρήσεων, ενώ στις υπόλοιπες απολήγει σε αρνητικές τιμές των μέτρων ελαστικότητας των αμμοχάλικων, κάτι το οποίο δεν έχει φυσική ερμηνεία. Το στατιστικό μας μοντέλο εμφανίζει σημαντικό μέσο σφάλμα πρόβλεψης. Ο προσδιορισμός των μέτρων ελαστικότητας των αμμοχάλικων μέσω της εξίσωσης των Dormon-Metcalf καταλήγει σε αποτελέσματα με μεγάλη απόκλιση από αυτά του ανάστροφου υπολογισμού. Το μέσο σφάλμα πρόβλεψης είναι πολύ υψηλότερο του στατιστικού προτύπου.

Από την επεξεργασία των μετρήσεων των οδοστρωμάτων συντήρησης προέκυψε ότι ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων με τη συμβολή του στατιστικού μοντέλου lin-lin+lin<sup>2</sup> καταλήγει σε αποτελέσματα με μεγάλη απόκλιση, σε σχέση με τις τιμές των μέτρων ελαστικότητας που συνάγονται από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού των επιτόπου μετρήσεων.



### 11.1.4 Μοντέλο meson log-log

Το συγκεκριμένο στατιστικό πρότυπο εμφανίζει συντελεστή συσχέτισης  $R^2 = 0,94477$ . Οι ανεξάρτητες μεταβλητές (LEAC, LEsg, LhAC, Lhgr) είναι στατιστικά σημαντικές για επίπεδο εμπιστοσύνης πάνω από 90%, εκτός από το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης. Όλοι οι συντελεστές των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι θετικοί, εκτός από το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης που εμφανίζει αρνητικό συντελεστή.

Από την επεξεργασία των επιτόπου μετρήσεων προέκυψε ότι ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων με τη συμβολή του στατιστικού μοντέλου log-log καταλήγει σε αποτελέσματα με καλή προσέγγιση στις τιμές των μέτρων ελαστικότητας που συνάγονται από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού των επιτόπου μετρήσεων. Συγκεκριμένα το στατιστικό μας μοντέλο εμφανίζει μέσο σφάλμα πρόβλεψης αρκετά σημαντικό. Ο προσδιορισμός των μέτρων ελαστικότητας των αμμοχάλικων μέσω της εξίσωσης των Dormon-Metcalf καταλήγει σε αποτελέσματα με μεγάλη απόκλιση από αυτά του ανάστροφου υπολογισμού. Το μέσο σφάλμα πρόβλεψης είναι πολύ υψηλότερο του στατιστικού προτύπου.

Από την επεξεργασία των μετρήσεων των οδοστρωμάτων συντήρησης προέκυψε ότι ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων με τη συμβολή του στατιστικού μοντέλου meson lin-lin+lin<sup>2</sup> καταλήγει σε αποτελέσματα με σημαντική απόκλιση από τις τιμές των μέτρων ελαστικότητας που συνάγονται από τη διαδικασία του ανάστροφου υπολογισμού των επιτόπου μετρήσεων. Αξίζει όμως να αναφέρουμε ότι για την περιοχή της Αγ. Αναστασίας το στατιστικό μοντέλο εμφάνισε μέσο σφάλμα πρόβλεψης 26,95 %, το οποίο κρίνεται ιδιαίτερα ενθαρρυντικό

## 11.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αποσκοπούσε στη ανάπτυξη μιας εναλλακτικής σχέσης που να συνδέει το μέτρο ελαστικότητας των ασύνδετων υλικών οδοστρώσις και το μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης, αξιοποιώντας τη θεώρηση «ψευδοεφελκυστικής αντοχής» των αμμοχάλικων και η οποία να λαμβάνει υπόψη τη γεωμετρία του οδοστρώματος (πάχος ασφαλικής στρώσης, πάχος στρώσης αμμοχάλικων), τα μηχανικά χαρακτηριστικά των επιμέρους στρώσεων (μέτρο δυσκαμψίας ασφατομίγματος, μέτρο ελαστικότητας στρώσης έδρασης) .

Πρώτον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερο δείγμα επιτόπου μετρήσεων σε κατασκευασμένους ακυκλοφόρητους ασφαλοτάπητες κυκλοφορίας. Είναι προφανές ότι το μέγεθος του δείγματος που διατίθεται για την στατιστική ανάλυση συμβάλλει σημαντικά στην ορθότητα και την αξιοπιστία των εκτιμώμενων μέτρων ελαστικότητας των αμμοχάλικων και συνακόλουθα τη σύγκρισή τους με τα εκτιμώμενα από την εξίσωση των Dormon-Metcalf μέτρα ελαστικότητας .

Δεύτερον, θα ήταν προτιμότερο να λάβει χώρα μια ευρύτερη στατιστική πολυπαραμετρική ανάλυση, ώστε να προκύψουν περισσότερα στατιστικά μοντέλα προς διερεύνηση και αξιολόγηση, που θα βασίζονται σε σημαντικό στατιστικό υπόβαθρο. Έχουμε την πεποίθηση ότι η παρούσα Διπλωματική Εργασία μπορεί να αποτελέσει την αφετηρία συστηματικής επιστημονικής έρευνας για την ανάπτυξη ενός αξιόπιστου αλγόριθμου εκτίμησης του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων, που θα «υποσκελίζει» την ευρέως χρησιμοποιούμενη εξίσωση των Dormon-Metcalf και θα αποτελέσει βασική αρχή για τη διαστασιολόγηση των εύκαμπτων οδοστρώματων. Τα αποτελέσματα της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά προς αυτή την κατεύθυνση.

Τρίτον, προτείνεται περαιτέρω προκαταρκτική διερεύνηση για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των συγκεκριμένων αλγόριθμων σε οδοστρώματα συντήρησης, όπου η εξίσωση των Dormon-Metcalf δεν έχει ισχύ, καθώς δε μπορεί να προβλέψει τη μείωση του μέτρου ελαστικότητας των αμμοχάλικων από τη φόρτιση του οδοστρώματος λόγω

κυκλοφορίας. Τα ιδιαίτερα αξιόλογα αποτελέσματα ενθαρρύνουν προς αυτήν την κατεύθυνση.



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Ullidtz P., "Pavement Analysis" Development in Civil Engineering, 19, ELSEVIER, 1998.
- [2] ΥΠΕΧΩΔΕ «Οδοστρωσία», Πρότυποι Τεχνικάί Προδιαγραφαί Έργων Οδοποιίας, Τεύχος 1ον, Εθνικό Τυπογραφείο, Αθήνα, 1980.
- [3] Boussinesq, V.J. Applications des potentiels a l' etude de l' equilibre, et du mouvement des solides elastiques avec des notes entendues sur divers points de physique, mathematique et d' analyse. Gauthier-Villais, Paris, 1885.
- [4] Burmister, D.M. "The theory of stresses and displacements in layered systems and applications to the design of airport runways". Proceedings, Highway Research Board, Vol. 23, pp.127-148, 1943.
- [5] Odemark, N. "Undersoekning av elasticitetsegenskaperna hos olika jordarter samt teori for beraekning av belaeagninger enligt elasticitetsteorien" Meddelande 77, Statens Vaeginstitute, Stockholm, 1949.
- [6] Jong, D.L. de, M.G.F. Peutz and A. Korswagen. Computerprogram BISAR. "Layered systems under normal and tangential surface loads". External report AMSR.0006.731, Koninklijke/Shell-Laboratorium, Amsterdam, 1973
- [7] Duncan, J.M., C.L. Monismith and E.L. Wilson. "Finite element analysis of pavements" Highway Research Record 228, pp. 18-31, 1968.
- [8] Shell Pavement Design Manual. Shell International Petroleum Company Limited, London, 1978.
- [9] Hveem, F.N. "Pavement deflection and fatigue failures". Highway Research Board Bulletin, No 114, 1955.

- [10] Hweem, F.N., E. Zube, R. Bridges and R. Forsyth."The effect of resiliency-deflection relationship on the structural design of asphalt pavements".Proceedings, International Conference Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, USA, pp. 649-666, 1962.
- [11] Seed, H.B., C.K. Chan and C.E. Lee."Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures in asphalt pavements". Proceedings, International Conference Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, USA, pp. 611, 1962.
- [12] Medina, J. E.S. Preussler, S. Pinto and L. Motta "A study of resiliency for pavement design in Brasil". Proceedings, Fifth International Conference Structural Design of Asphalt Pavements, Delft, pp. 726-737, 1982.
- [13] Thompson, M.R. and Q.L. Robnet "Resilient properties of subgrade soils".Transportation Engineering Journal, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 105, No. TE1, pp 71-89, 1979.
- [14] Monismith. C.L. H.B.Seed, F.G. Mitry and C.K. Chan."Prediction of pavement deflections from laboratory tests".Proceedings, Second International Conference Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, USA, pp. 109-140, 1967.
- [15] Brown, S.F and P.S. Pell."An experimental investigation of the stresses, stains and deflection in a layered pavement structure subjected to dynamic loads".Proceedings, Second International Conference Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, USA, pp. 487-504, 1967.
- [16] Heukelom, W. and C.R. Foster."Dynamic testing of pavemen"t.Journal of Structural Division. ASCE, SM1, February, pp 1-29, 1960.
- [17] Powell,W.D., J.F.Potter, H.C. Mayhew and M.E. Nunn."The structural design of bituminous roads" Laboratory report 1132, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, 1984.
- [18] Brown, S.F., S.C. Loach and M.P. O' Reilly.Repeated loading of fine grained soils.Pavement Research Group, Department of Civil Engineering, University of Nottingham, 1987.

- [19] Heukelom, W. and A.J.G. Klomp., "Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction".Proceedings, International Conference Structural Design of Asphalt Pavements, Volume 1, Ann Arbor, USA, pp. 667-679, 1962.
- [20] Brown, S.F. and J.W. Pappin, Modeling of granular materials in pavements.Transportation Research Record 1022, pp. 45-51, 1985.
- [21] Φραντζής Χ., «ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ» 2<sup>ο</sup> ΜΕΡΟΣ, Ξάνθη, σελ. 48- 54, 1984.
- [22] UNBAR 5, "Unbound Aggregates in Road Construction".Proceedings, 5<sup>th</sup> International Symposium on Unbound Aggregates in Roads, edited by A.R. Dawson by AA Balkema, Rotterdam, Nottingham, 2000.
- [23] Gerlach, A., J. Hothan, H. Luecke"Zur Bestimmung der Nachrerdichtbarkeit von Tragschichten ohne Bindemittel".Strasse and Autobahn, No. 4, pp. 148-152., 1987.
- [24] Λοΐζος Α., Αναγνωστόπουλος Α., ΠΡΑΚΤΙΚΑ, Τέταρτο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Αθήνα, Μάιος 2001
- [25] BISAR , "Bitumen Structural Analysis in Roads".Koninklijke Schell Laboratorium, Version BISAR/SPDM,Amsterdam, 1998.
- [26] COST 333 "Development of New Bituminous Pavement Design Method".Transport Research, Final Report, European Communities, Brussels, 1999.
- [27] COST 323, "Weigh in Motion of Road Vehicles".Transport Research, Final Report, European Communities, Brussels, 1998.
- [28] Κόλλιας Σ., Λοΐζος Α. «Σημειώσεις Οδοστρωμάτων»,Τομέας ΜΣΥ, ΕΜΠ., 1999.
- [29] Κόλλιας Σ., Λοΐζος Α., Κυρκιλή Ε., «Εκτίμηση της Μέσης Ετήσιας Σταθμισμένης Θερμοκρασίας για τον Υπολογισμό του Πάχους των Εύκαμπτων και Ημιακάμπτων Οδοστρωμάτων». Τεχνικά Χρονικά, Τόμος 14, Τεύχος 4, pp. 69-97, 1994.

- [30] Sweere G., "Unbound Granular Bases for Roads", 1990
  
- [31] Λοΐζος Α., Σαριδάκης Δ., «Αξιολόγηση Μετρήσεων Φέρουσας Ικανότητας Ασφαλτοταπήτων Οδοστρωμάτων», ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΡΟΝΙΚΑ Τόμος 14, Τεύχος 4, Οκτ.-Δεκ. 1994
  
- [32] National Cooperative Highway Research Program Synthesis 278, "Measuring In Situ Mechanical Properties of Pavement Subgrade Soils", Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1999.
  
- [33]. Irwin L.H., Yang W.S., Stubstad R.N. "Deflection Reading Accuracy and Layer Thickness Accuracy in Backcalculation of Pavement Layer Moduli", Non destructive Testing of Pavements and Backcalculation OF pavement Layer Moduli ASTM STP 1026, Philadelphia, 1989
  
- [34] Lytton, R.L., "Backcalculation of Pavement Layer Properties", Non Destructive Testing of Pavements and Backcalculation of Pavement Layer Moduli ASTM STP 1026, Philadelphia, 1989.
  
- [35] Rwebangira T., Hicks R.G., Truebe M., "Sensitivity analysis of selected Backcalculation Procedures", Transportation Research Record 1117, pp. 25-37, 1987