



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

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΥΓΡΑΣΙΑΣ  
ΣΤΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΑΣΥΝΔΕΤΩΝ  
ΥΛΙΚΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΣΙΑΣ**



**ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ ΑΓΓΕΛΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Α. ΛΟΪΖΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.**

**ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2015**

**Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής  
παραμόρφωσης.**

Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.



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

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΥΓΡΑΣΙΑΣ  
ΣΤΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΑΣΥΝΔΕΤΩΝ  
ΥΛΙΚΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΣΙΑΣ**

**ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ ΑΓΓΕΛΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Α. ΛΟΪΖΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.**

**ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2015**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στο πιστοποιημένο Εργαστήριο Οδοποιίας του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής του ΕΜΠ, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή και Διευθυντή κου Ανδρέα Λοΐζου.

Ευχαριστώ θερμά τον κ Λοΐζο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αναθέτοντάς μου την παρούσα Διπλωματική Εργασία και επίσης για την συνεχή και πολύτιμη καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της.

Η εργασία αυτή δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χωρίς την καθημερινή και στενή συνεργασία με τον κ. Brad Cliatt, επιστημονικό συνεργάτη του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ και υποψήφιο Διδάκτορα, ο οποίος στάθηκε στο πλευρό μου καθ' όλη τη χρονική περίοδο που εργαζόμουν πάνω στην παρούσα έρευνα. Οι συμβουλές και οι υποδείξεις του οποίου σε συγκεκριμένα θέματα που ανέκυψαν κατά την διάρκεια εκπόνησης της έρευνας αυτής, με βοήθησαν στη συνέχιση των ερευνών μου. Ακόμη, να ευχαριστήσω τα μέλη του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ για την πρόθυμη βοήθειά τους, όποτε τη χρειάστηκα.

Τέλος, δεν θα πρέπει να παραλείψω την οικογένεια και τους φίλους μου, για την πολύτιμη στήριξη που μου παρείχαν, ο καθένας με τον τρόπο του.

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στον χαρακτηρισμό και τον καθορισμό των χαρακτηριστικών αντοχής και δυσκαμψίας που αφορούν την μηχανική συμπεριφορά των ασύνδετων, κοκκωδών υλικών τα οποία χρησιμοποιούνται ως υλικά βάσεων και υποβάσεων στις κατασκευές οδοστρωμάτων. Παρουσιάζεται μία εκτεταμένη εργαστηριακή έρευνα η οποία έχει ως σκοπό την εξέταση των προαναφερθέντων χαρακτηριστικών διότι ο ρόλος των κοκκωδών στρώσεων, με την έννοια της αντοχής αποτελεί ζωτικής σημασίας για την γενική και μακροπρόθεσμη απόδοση στις κατασκευές οδοστρωμάτων. Για να εξαχθούν ασφαλή αποτελέσματα αλλά και για να υπάρχει ένα μέτρο σύγκρισης εξετάστηκε η συμπεριφορά τριών υλικών τα οποία αποτελούνταν από καθαρό αμμοχάλικο τύπου 3A και ανακυκλωμένο ασφαλτικό υλικό (RAP).

Ως δείκτης της μηχανικής συμπεριφοράς χρησιμοποιήθηκε το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης  $M_r$ . Οι ελαστικές, μηχανικές ιδιότητες των υλικών βάσεων επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες. Στην παρούσα μελέτη αναλύεται λεπτομερέστερα η επιρροή του περιεχόμενου ποσοστού υγρασίας καθώς και οι διακυμάνσεις που αυτό προκαλεί σε μία στρώση βάσης συμπυκνωμένη υπό το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές έρευνες για τον καθορισμό των φυσικών ιδιοτήτων των τριών υλικών όπως η κοκκομετρική διαβάθμιση, η εξεύρεση του βέλτιστου ποσοστού υγρασίας και της μέγιστης ξηρής πυκνότητας. Στην συνέχεια εκτελέστηκαν τριαξονικές δοκιμές επαναλαμβανόμενης φόρτισης σε δοκίμια των τριών υλικών συμπυκνωμένα σε διάφορες τιμές του ποσοστού υγρασίας, προκειμένου να συλλεχθούν τα απαραίτητα δεδομένα τιμών του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης  $M_r$ . Τα δεδομένα παρουσιάζονται συσχετίζοντας τις τιμές του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης και της εφαρμοζόμενης εντατικής κατάστασης για να προσομοιωθούν οι πραγματικές συνθήκες φόρτισης στις οποίες υποβάλλεται ένα οδόστρωμα. Τέλος, παρουσιάζονται συνοπτικώς τα αποτελέσματα της έρευνας, καθώς και κάποια κύρια σημεία τα οποία χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής και καθίστανται αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

## **ABSTRACT**

This research is focused on the characterization and the determination of strength and stiffness characteristics concerning the mechanical behavior of unbound, granular materials which are extensively used as base and subbase materials in a pavement construction. An extensive laboratory investigation is described, that aims to examine the characteristics outlined above. The role of a granular layer in the concept of strength is vital for the overall and long-term performance in a pavement construction. In order to draw reliable results the behavior of three materials was examined. The materials consisted of pure gravel 3A and reclaimed asphalt pavement (RAP).

Resilient modulus ( $M_r$ ) was used as an index of the mechanical behavior of unbound granular road base materials. The elastic and mechanical properties of base materials are affected by many factors. This research analyzes in more detail and depth the influence of moisture content on the resilient modulus and the fluctuations that it causes in a base layer compacted in the optimum moisture content. Originally, laboratory tests were performed in order to determine the physical properties of the three materials such as gradation, optimum moisture content and maximum dry density. Then triaxial repeated load tests were executed on specimens of the three materials that were compacted at various values of the moisture content, with aim to collect the necessary data values of the resilient modulus. The tests data are presented by relating the values of the resilient modulus and the stress conditions applied with purpose to simulate the actual loading conditions in which a road is subjected. Finally, a summary of the research's results is presented, as well as some crucial points which require particular attention and are in need of future research.

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	4
ABSTRACT .....	5
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	11
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	17
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ.....	18
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>19</b>
1.1 Γενική εισαγωγή.....	19
1.1.1 Εμπειρικές και μηχανιστικές μέθοδοι σχεδιασμού.....	20
1.2 Αντικείμενο και σκοπός της μελέτης.....	21
1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας και τεχνικό υπόβαθρο.....	23
<b>2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....</b>	<b>25</b>
2.1 Γενικά στοιχεία για τα οδοστρώματα.....	25
2.2 Δομή οδοστρώματος.....	27
2.2.1 Δομική σύσταση εύκαμπτου οδοστρώματος.....	29
2.2.2 Κρίσιμες θέσεις αστοχίας ενός εύκαμπτου οδοστρώματος.....	31
2.3 Ο ρόλος της ύπαρξης κοκκώδους στρώσεως στη δομή ενός οδοστρώματος.....	32
2.4 Συμπεριφορά των ασύνδετων κοκκωδών υλικών ενός οδοστρώματος.....	35
2.4.1 Μηχανική συμπεριφορά ασύνδετων κοκκωδών υλικών.....	36
2.4.1.1 Συμπεριφορά κατά την ελαστική παραμόρφωση-Resilient deformation behavior .....	39

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

2.4.1.2 Συμπεριφορά κατά την μόνιμη παραμόρφωση-Permanent deformation behavior.....	41
2.4.1.3 Κοκκώδης σκελετός: παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά κατά την παραμόρφωση.....	43
2.4.2 Κατανομή τάσεων κάτω από το φορτίο ενός τροχού κατά την κατεύθυνση της κυκλοφορίας.....	49
2.4.3 Χαρακτηρισμός των ασύνδετων υλικών οδοστρωσίας.....	51
2.4.3.1 Εργαστηριακές τεχνικές.....	52
2.5 Χρησιμοποιούμενα υλικά οδοστρωσίας.....	58
2.5.1 Αδρανή υλικά-Γενικές πληροφορίες.....	58
2.5.1.1 Αδρανή υλικά φυσικών αποθέσεων-συλλεκτά.....	59
2.5.1.2 Θραυστά αδρανή πετρωμάτων.....	60
2.5.1.3 Διαχωρισμός αδρανών.....	61
2.5.1.4 Αμμοχάλικο 3A-Υλικό οδοστρωσίας.....	61
2.5.1.5 Ανακυκλωμένα υλικά οδοστρωσίας - RAP (Horpe et al., 2015).....	62
2.5.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης του αμμοχάλικου ως υλικού βάσεων και υποβάσεων (Dawson, 2003).....	63
2.5.3 Έλεγχοι που πραγματοποιούνται σε αδρανή βάσεων και υποβάσεων.....	64
2.5.3.1 Γενικές ιδιότητες.....	64
2.5.3.2 Δοκιμές προσδιορισμού γεωμετρικών ιδιοτήτων.....	65
2.5.3.3 Δοκιμές προσδιορισμού φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των αδρανών.....	67
2.5.3.4 Δοκιμές προσδιορισμού των ιδιοτήτων των αδρανών σε θερμικές και καιρικές μεταβολές.....	69
2.5.3.5 Δοκιμές προσδιορισμού των χημικών ιδιοτήτων των αδρανών.....	70
2.6 Αναλυτικότερη διερεύνηση του ελαστικού μέτρου $M_r$ (resilient modulus).....	71



## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

2.6.1 Καθορισμός του ελαστικού μέτρου $M_r$ κοκκωδών υλικών.....	73
2.6.2 Συμπύκνωση βάσης και υπόβασης από ασύνδετα κοκκώδη υλικά-δοκιμή Proctor.....	75
2.6.2.1 Γενικά.....	75
2.6.2.2 Πρότυπη και τροποποιημένη δοκιμή συμπύκνωσης Proctor-εργαστηριακός εξοπλισμός.....	77
2.6.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ελαστική απόκριση μίας ασύνδετης κοκκώδους στρώσης. ....	78
2.6.3.1 Επιβαλλόμενη τάση-effect of stress.....	79
2.6.3.2 Επίδραση της πυκνότητας-Effect of Density.....	80
2.6.3.3 Επίδραση της κοκκομετρικής διαβάθμισης, του ποσοστού σε λεπτόκοκκο υλικό και του μεγέθους μεγίστου κόκκου-Effect of Grading, Fines Content, and Maximum Grain Size .....	81
2.6.3.4 Επίδραση του ποσοστού υγρασίας-effect of moisture content.....	83
2.6.3.5 Επίδραση του ιστορικού των φορτίσεων και του αριθμού των κύκλων φόρτισης- Effect of Stress History and Number of Load Cycles ....	86
2.6.3.6 Επίδραση του είδους του αμμοχάλικου και του σχήματος των κόκκων- Effect of Aggregate Type and Particle Shape.....	87
2.6.3.7 Επίδραση της διάρκειας, της συχνότητας και της ακολουθίας φορτίσεων- Effect of Load Duration, Frequency, and Load Sequence.....	88
2.7 Καταστατικά μοντέλα ελαστικής συμπεριφοράς.....	88
2.7.1 Μοντέλο $k-\theta$ .....	89
2.7.2 Μοντέλο Uzan Universal.....	90
2.7.3 Μοντέλο MEPDG.....	91
<b>3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....</b>	<b>93</b>
3.1 Εισαγωγή.....	93
3.2 Σχεδιάγραμμα της μελέτης.....	93

**Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

3.3 Κυριότεροι στόχοι.....	94
<b>4. ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....</b>	<b>97</b>
4.1 Εισαγωγικά στοιχεία .....	97
4.2 Χρησιμοποιούμενα υλικά.....	98
4.3 Κοκκομετρική ανάλυση για κάθε υλικό. ....	99
4.4 Πρόσθετες ιδιότητες των τριών υπό διερεύνηση υλικών.....	105
4.4.1 Κατάταξη υλικών με βάση το αμερικανικό πρότυπο AASHTO Soil Classification System (AASHTO M 145 , ASTM D3282) .....	105
4.4.2 Ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας.....	106
4.5 Εργαστηριακή συμπύκνωση και εύρεση της σχέσης πυκνότητας-ποσοστού υγρασίας .....	107
4.6 Δοκιμή καθορισμού του ελαστικού μέτρου Mr (resilient modulus) .....	114
4.6.1 Εξοπλισμός δοκιμής .....	114
4.6.2 Μέθοδος δοκιμής.....	116
4.6.3 Προετοιμασία των δοκιμίων.....	118
4.6.4 Διαδικασία εκτέλεσης εργαστηριακής δοκιμής προσδιορισμού του ελαστικού μέτρου Mr .....	125
4.6.4.1 Προφόρτιση δοκιμίου.....	126
4.6.4.2 Ακολουθία ανακυκλικών αξονικών φορτίσεων και πλευρικών περιοριστικών πιέσεων.....	126
4.6.5 Τυπικά αποτελέσματα της εργαστηριακής, τριαξονικής δοκιμής, επαναλαμβανόμενης φόρτισης .....	129
<b>5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ, ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ, ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....</b>	<b>132</b>
5.1 Εισαγωγή.....	132

**Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

5.2	Συσχέτιση ελαστικού μέτρου $M_r$ και πλευρικής πίεσης περιορισμού $\sigma_3$ (confining pressure).....	133
5.3	Σύγκριση της σχέσης ελαστικού μέτρου $M_r$ και πλευρικής πίεσης $\sigma_3$ των τριών υλικών υπό τα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας τους. ....	146
5.4	Συσχέτιση ελαστικού μέτρου $M_r$ και τάσης διογκώσεως $\theta=3\sigma_3+\sigma_1$ (bulk stress).....	149
5.5	Σύγκριση της σχέσης ελαστικού μέτρου $M_r$ και τάσης διογκώσεως $\theta$ των τριών υλικών υπό τα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας τους. ....	159
5.6	Μεταβολή του ελαστικού μέτρου $M_r$ συναρτήσει της εντατικής κατάστασης για τα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας των τριών υλικών. ....	160
5.7	Στατιστική ανάλυση δεδομένων.....	167
<b>6.</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....</b>	<b>171</b>
6.1	Γενική εισαγωγή.....	171
6.2	Συμπεράσματα.....	172
6.3	Συστάσεις και μελλοντική έρευνα.....	176
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>179</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>ΣΧΗΜΑ 1:</b> Θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται σε ένα οδόστρωμα κατά τη διέλευση ενός οχήματος και κατανομή του φορτίου τροχού στις στρώσεις ενός εύκαμπτου οδοστρώματος (Chen et al., 2009).....	26
<b>ΣΧΗΜΑ 2:</b> Διαφορές των επαλλήλων στρώσεων ενός εύκαμπτου και ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος και κατανομή των κατακορύφων τάσεων στον πυθμένα της ανώτερης στρώσης.....	29
<b>ΣΧΗΜΑ 3:</b> Κρίσιμες θέσεις αστοχίας ενός εύκαμπτου οδοστρώματος (Λοΐζος, 2008).....	32
<b>ΣΧΗΜΑ 4:</b> (Α) Μονοτονική φόρτιση μέχρι την αστοχία και (Β) Παραμορφώσεις των ασύνδετων κοκκωδών υλικών για ένα κύκλο φόρτισης (Brown, 1996).....	37
<b>ΣΧΗΜΑ 5:</b> Συμπεριφορά κοκκώδους υλικού υπό επαναλαμβανόμενη-κυκλική φόρτιση (Thom & Brown, 1988).....	39
<b>ΣΧΗΜΑ 6:</b> Κύριες τάσεις της κυκλικής τριαξονικής δοκιμής.....	40
<b>ΣΧΗΜΑ 7:</b> Ορισμός μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης $M_r$ (resilient modulus). .....	41
<b>ΣΧΗΜΑ 8:</b> Διαφορετικοί τύποι συμπεριφορών μόνιμης παραμόρφωσης εξαρτώμενοι από την εξασκούμενη τάση (shakedown) Werkmeister et al. (2001). .....	43
<b>ΣΧΗΜΑ 9:</b> Οι τρεις φυσικές καταστάσεις μειγμάτων αδρανών (Molenaar, 2005).....	44
<b>ΣΧΗΜΑ 10:</b> Τάσεις που αναπτύσσονται κάτω από το φορτίο ενός τροχού κατά την κατεύθυνση της κυκλοφορίας και περιστροφή των κύριων τάσεων (Acikgoz and Rauf, 2010).....	50
<b>ΣΧΗΜΑ 11:</b> Τάσεις που αναπτύσσονται σε ένα τυχαίο σημείο κατά τη διάρκεια της διελεύσεως φορτίου (Acikgoz and Rauf, 2010).....	51
<b>ΣΧΗΜΑ 12:</b> Εργαστηριακές δοκιμές και καθεστώς τάσεων (Thom et al., 2005). .....	52

**Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

<b>ΣΧΗΜΑ 13:</b> Σκαρίφημα της συσκευής τριαξονικής δοκιμής (CEN, 2004).....	54
<b>ΣΧΗΜΑ 14:</b> Σκαρίφημα της συσκευής CBR .....	57
<b>ΣΧΗΜΑ 15:</b> Ορισμός του ελαστικού μέτρου Mr.....	72
<b>ΣΧΗΜΑ16:</b> Τυπική καμπύλη ποσοστού υγρασίας-ξηρής πυκνότητας.....	77
<b>ΣΧΗΜΑ 17:</b> Τετραμερισμός δείγματος (ASTM C702).....	100
<b>ΣΧΗΜΑ 18:</b> Κοκκομετρική καμπύλη υλικού Α-αμμοχάλικο 3Α.....	103
<b>ΣΧΗΜΑ 19:</b> Κοκκομετρική καμπύλη υλικού Β-RAP(100%).....	104
<b>ΣΧΗΜΑ 20:</b> Κοκκομετρική καμπύλη υλικού Γ- 50%3Α+50%RAP.....	104
<b>ΣΧΗΜΑ 21:</b> Συγκριτικό γράφημα των τριών κοκκομετρικών καμπυλών των τριών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.....	105
<b>ΣΧΗΜΑ 22:</b> Καμπύλη ξηρής πυκνότητας-ποσοστού υγρασίας, όπου φαίνονται η μέγιστη ξηρή πυκνότητα και το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας για το υλικό Α-αμμοχάλικο 3Α.....	110
<b>ΣΧΗΜΑ 23:</b> Καμπύλη ξηρής πυκνότητας-ποσοστού υγρασίας, όπου φαίνονται η μέγιστη ξηρή πυκνότητα και το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας για το υλικό Β-RAP(100%).....	110
<b>ΣΧΗΜΑ 24:</b> Καμπύλη ξηρής πυκνότητας-ποσοστού υγρασίας, όπου φαίνονται η μέγιστη ξηρή πυκνότητα και το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας για το υλικό Γ-50%3Α+50%RAP.....	111
<b>ΣΧΗΜΑ 25:</b> Συγκριτικό γράφημα με τις καμπύλες ξηρής πυκνότητας-ποσοστών υγρασίας των τριών υλικών που εξετάστηκαν στην παρούσα έρευνα.....	111
<b>ΣΧΗΜΑ 26:</b> Συγκριτικό γράφημα με τις καμπύλες υγρής πυκνότητας-ποσοστών υγρασίας των τριών υλικών που εξετάστηκαν στην παρούσα έρευνα.....	112
<b>ΣΧΗΜΑ 27:</b> Σχηματική απεικόνιση ενός τριαξονικού θαλάμου δοκιμής προσδιορισμού ελαστικού μέτρου Mr σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T 307 (1999).....	115
<b>ΣΧΗΜΑ 28:</b> Ημιτονοειδής παλμός φόρτισης του δοκιμίου.....	117

**Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

<b>ΣΧΗΜΑ 29:</b> Ημιτονοειδής παλμός και διάρκεια φόρτισης του δοκιμίου.....	118
<b>ΣΧΗΜΑ 30:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της πλευρικής πίεσης $\sigma_3$ του υλικού A, για ποσοστό υγρασίας 3%.....	135
<b>ΣΧΗΜΑ 31:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της πλευρικής πίεσης $\sigma_3$ του υλικού A, για ποσοστό υγρασίας 4%.....	135
<b>ΣΧΗΜΑ 32:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της πλευρικής πίεσης $\sigma_3$ του υλικού A, για το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας 5%.....	136
<b>ΣΧΗΜΑ 33:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της πλευρικής πίεσης $\sigma_3$ του υλικού A, για ποσοστό υγρασίας 6%.....	136
<b>ΣΧΗΜΑ 34:</b> Συγκριτικό γράφημα που παρουσιάζει το ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της πλευρικής πίεσης $\sigma_3$ του υλικού A, για διάφορες τιμές του ποσοστού υγρασίας.....	137
<b>ΣΧΗΜΑ 35:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της πλευρικής πίεσης $\sigma_3$ του υλικού B, για ποσοστό υγρασίας 2%.....	138
<b>ΣΧΗΜΑ 36:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της πλευρικής πίεσης $\sigma_3$ του υλικού B, για ποσοστό υγρασίας 3%.....	138
<b>ΣΧΗΜΑ 37:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της πλευρικής πίεσης $\sigma_3$ του υλικού B, για το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας 4%.....	139
<b>ΣΧΗΜΑ 38:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της πλευρικής πίεσης $\sigma_3$ του υλικού B, για ποσοστό υγρασίας 5%.....	139
<b>ΣΧΗΜΑ 39:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της πλευρικής πίεσης $\sigma_3$ του υλικού B, για ποσοστό υγρασίας 6%.....	140
<b>ΣΧΗΜΑ 40:</b> Συγκριτικό γράφημα που παρουσιάζει το ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της πλευρικής πίεσης $\sigma_3$ του υλικού B, για διάφορες τιμές του ποσοστού υγρασίας.....	140
<b>ΣΧΗΜΑ 41:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της πλευρικής πίεσης $\sigma_3$ του υλικού Γ, για ποσοστό υγρασίας 4%.....	141
<b>ΣΧΗΜΑ 42:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της πλευρικής πίεσης $\sigma_3$ του υλικού Γ, για ποσοστό υγρασίας 5%.....	141

**Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

<b>ΣΧΗΜΑ 43:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της πλευρικής πίεσης $\sigma_3$ του υλικού $\Gamma$ , για ποσοστό υγρασίας 6%.....	142
<b>ΣΧΗΜΑ 44:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της πλευρικής πίεσης $\sigma_3$ του υλικού $\Gamma$ , για το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας 7%.....	142
<b>ΣΧΗΜΑ 45:</b> Συγκριτικό γράφημα που παρουσιάζει το ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της πλευρικής πίεσης $\sigma_3$ του υλικού $\Gamma$ , για διάφορες τιμές του ποσοστού υγρασίας.....	143
<b>ΣΧΗΜΑ 46:</b> Συγκριτικό γράφημα ελαστικού μέτρου $M_r$ -πλευρικής πίεσης $\sigma_3$ των τριών υλικών υπό τα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας τους.....	148
<b>ΣΧΗΜΑ 47:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της τάσης διογκώσεως $\theta$ του υλικού $A$ , για ποσοστό υγρασίας 3%.....	150
<b>ΣΧΗΜΑ 48:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της τάσης διογκώσεως $\theta$ του υλικού $A$ , για ποσοστό υγρασίας 4%.....	150
<b>ΣΧΗΜΑ 49:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της τάσης διογκώσεως $\theta$ του υλικού $A$ , για το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας 5%.....	151
<b>ΣΧΗΜΑ 50:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της τάσης διογκώσεως $\theta$ του υλικού $A$ , για ποσοστό υγρασίας 6%.....	151
<b>ΣΧΗΜΑ 51:</b> Συγκριτικό γράφημα που παρουσιάζει το ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της τάσης διογκώσεως $\theta$ του υλικού $A$ , για διάφορες τιμές του ποσοστού υγρασίας.....	152
<b>ΣΧΗΜΑ 52:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της τάσης διογκώσεως $\theta$ του υλικού $B$ , για ποσοστό υγρασίας 2%.....	153
<b>ΣΧΗΜΑ 53:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της τάσης διογκώσεως $\theta$ του υλικού $B$ , για ποσοστό υγρασίας 3%.....	153
<b>ΣΧΗΜΑ 54:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της τάσης διογκώσεως $\theta$ του υλικού $B$ , για ποσοστό υγρασίας 4%.....	154
<b>ΣΧΗΜΑ 55:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της τάσης διογκώσεως $\theta$ του υλικού $B$ , για ποσοστό υγρασίας 5%.....	154
<b>ΣΧΗΜΑ 56:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της τάσης διογκώσεως $\theta$ του υλικού $B$ , για ποσοστό υγρασίας 6%.....	155

**Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

<b>ΣΧΗΜΑ 57:</b> Συγκριτικό γράφημα που παρουσιάζει το ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της τάσης διογκώσεως $\theta$ του υλικού Β, για διάφορες τιμές του ποσοστού υγρασίας.....	155
<b>ΣΧΗΜΑ 58:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της τάσης διογκώσεως $\theta$ του υλικού Γ, για ποσοστό υγρασίας 4%.....	156
<b>ΣΧΗΜΑ 59:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της τάσης διογκώσεως $\theta$ του υλικού Γ, για ποσοστό υγρασίας 5%.....	156
<b>ΣΧΗΜΑ 60:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της τάσης διογκώσεως $\theta$ του υλικού Γ, για ποσοστό υγρασίας 6%.....	157
<b>ΣΧΗΜΑ 61:</b> Ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της τάσης διογκώσεως $\theta$ του υλικού Γ, για το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας 7%.....	157
<b>ΣΧΗΜΑ 62:</b> Συγκριτικό γράφημα που παρουσιάζει το ελαστικό μέτρο $M_r$ συναρτήσει της τάσης διογκώσεως $\theta$ του υλικού Γ, για διάφορες τιμές του ποσοστού υγρασίας.....	158
<b>ΣΧΗΜΑ 63:</b> Συγκριτικό γράφημα ελαστικού μέτρου $M_r$ -τάσης διογκώσεως $\theta$ των τριών υλικών υπό τα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας τους.....	159
<b>ΣΧΗΜΑ 64:</b> Καμπύλες ελαστικού μέτρου $M_r$ και παρεκκλίνουσας τάσης $\sigma_d$ , υπό σταθερές τιμές πλευρικής πίεσης $\sigma_3$ του υλικού Α για το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας του με τιμή 5%.....	163
<b>ΣΧΗΜΑ 65:</b> Καμπύλες ελαστικού μέτρου $M_r$ και παρεκκλίνουσας τάσης $\sigma_d$ , υπό σταθερές τιμές πλευρικής πίεσης $\sigma_3$ του υλικού Β για το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας του με τιμή 4%.....	163
<b>ΣΧΗΜΑ 66:</b> Καμπύλες ελαστικού μέτρου $M_r$ και παρεκκλίνουσας τάσης $\sigma_d$ , υπό σταθερές τιμές πλευρικής πίεσης $\sigma_3$ του υλικού Γ για το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας του με τιμή 7%.....	164
<b>ΣΧΗΜΑ 67:</b> Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικού μέτρου $M_r$ -εντατικής κατάστασης των τριών υλικών υπό τα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας τους για περίπου σταθερή πλευρική πίεση $\sigma_3=20,7$ kPa.....	164



**Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

- ΣΧΗΜΑ 68:** Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικού μέτρου Mr-εντατικής κατάστασης των τριών υλικών υπό τα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας τους για περίπου σταθερή πλευρική πίεση  $\sigma_3=34,5$  kPa..... 165
- ΣΧΗΜΑ 69:** Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικού μέτρου Mr-εντατικής κατάστασης των τριών υλικών υπό τα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας τους για περίπου σταθερή πλευρική πίεση  $\sigma_3=68,9$  kPa..... 165
- ΣΧΗΜΑ 70:** Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικού μέτρου Mr-εντατικής κατάστασης των τριών υλικών υπό τα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας τους για περίπου σταθερή πλευρική πίεση  $\sigma_3=103,4$  kPa..... 166
- ΣΧΗΜΑ 71:** Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικού μέτρου Mr-εντατικής κατάστασης των τριών υλικών υπό τα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας τους για περίπου σταθερή πλευρική πίεση  $\sigma_3=137,9$  kPa..... 166
- ΣΧΗΜΑ 72:** Συγκριτικό ολικό διάγραμμα ελαστικού μέτρου Mr-εντατικής κατάστασης των τριών υλικών υπό τα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας τους. .. 167

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 1:</b> Διαφορές μεταξύ πρότυπης και τροποποιημένης δοκιμής συμπύκνωσης κατά Proctor. ....	78
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 2:</b> Ποσότητα δείγματος ανάλογα με το ονομαστικό μέγιστο μέγεθος κόκκου. ....	101
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 3:</b> Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ποσοστών υγρασίας και αντίστοιχων πυκνοτήτων (υγρής ή ξηρής) για τα τρία υλικά της μελέτης.	109
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 4:</b> Ακολουθία τριαξονικών δοκιμών και τα αντίστοιχα ποσοστά υγρασίας με τα οποία συμπυκνώθηκαν τα δοκίμια (πλήθος τριαξονικών δοκιμών).....	120
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 5:</b> Ακολουθία φορτίσεων υλικών βάσεων/υποβάσεων κατά το πρότυπο AASHTO T307-99.....	127
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 6:</b> Τυπικά αποτελέσματα της εργαστηριακής, τριαξονικής δοκιμής σύμφωνα με την ακολουθία φορτίσεων που ορίζει το πρότυπο AASHTO T 307, για δοκίμιο υλικού Α-αμμοχάλικο 3Α και ποσοστό υγρασίας 3%. ....	131
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 7:</b> Τιμές του μέσου συντελεστή μεταβλητότητας των δεδομένων των ελαστικών μέτρων $M_r$ για κάθε υλικό και για κάθε ποσοστό υγρασίας για το οποίο εκτελέστηκαν τριαξονικές δοκιμές, με βάση την πλευρική πίεση $\sigma_3$ .....	168
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 8:</b> Τιμές του μέσου συντελεστή μεταβλητότητας των δεδομένων των ελαστικών μέτρων $M_r$ για κάθε υλικό και για κάθε ποσοστό υγρασίας για το οποίο εκτελέστηκαν τριαξονικές δοκιμές, με βάση την τάση διογκώσεως $\theta$ .....	169

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ

<b>ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 1:</b> Τα τρία υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην εργαστηριακή έρευνα. Αμμοχάλικο 3A (αριστερά), RAP (δεξιά), Μείγμα 50%3A+50%RAP (στο κέντρο). .....	99
<b>ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 2:</b> Σειρά πρότυπων κοσκίνων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ για κοκκομετρική ανάλυση σύμφωνα με το αμερικανικό πρότυπο ASTM E11 και τοποθέτηση ποσότητας υλικού (6 kg) στην κορυφή της στήλης των κοσκίνων. ....	102
<b>ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 3:</b> Ξήρανση σταθερής μάζας κάθε υλικού σε κλίβανο υπό σταθερή θερμοκρασία. ....	106
<b>ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 4:</b> Ειδική μήτρα συμπίκνωσης κατά Proctor, κόπανος και συμπίκνωση του υλικού σε στρώσεις.....	108
<b>ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 5:</b> Το ειδικό λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στην τριαξονική δοκιμή προσδιορισμού του ελαστικού μέτρου Mr.....	116
<b>ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 6:</b> Διαδικασία δημιουργίας μειγμάτων υλικών για την τριαξονική δοκιμή στο επιθυμητό ποσοστό υγρασίας. ....	121
<b>ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 7:</b> Μembrάνη καλουπιού και πορώδης δίσκος.....	121
<b>ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 8:</b> Κατασκευή της μήτρας και τοποθέτηση μεμβράνης με υποπίεση.....	122
<b>ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 9:</b> Συμπύκνωση σε στρώσεις με δονητικό κόπανο, τοποθέτηση άνω πορώδους δίσκου και ειδικού σφραγιστικού καλύμματος μέσω του οποίου ασκείται το φορτίο στο δοκίμιο. ....	123
<b>ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 10:</b> Αφαίρεση του δοκιμίου από τη μήτρα, μορφή δοκιμίου χωρίς την μεμβράνη και τοποθέτηση δοκιμίου στη βάση του τριαξονικού κελιού.....	124
<b>ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 11:</b> Συσκευή τριαξονικής δοκιμής πριν και μετά την τελική τοποθέτηση του δοκιμίου και τοποθέτηση μηκυσιομέτρου. ....	125

## **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 Γενική εισαγωγή**

Η οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη των χωρών ανά τον κόσμο βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ποιότητα του οδικού τους συστήματος. Τεράστια χρηματικά ποσά έχουν επενδυθεί και εξακολουθούν να επενδύονται καθημερινά για την κατασκευή οδικών δικτύων αλλά και για να εξασφαλιστεί ότι οι οδοί αυτοί θα μπορούν συνεχώς να εκπληρώνουν την αποστολή τους.

Ο οικονομικός ρόλος των οδικών υποδομών καθώς και τα ποσά των χρημάτων που έχουν επενδυθεί τόσο στην κατασκευή όσο και στην συντήρησή τους υποδεικνύουν τη σημασία του καλού σχεδιασμού οδοστρωμάτων και τις διαδικασίες διαχείρισης αυτών. Το οδόστρωμα είναι ένα από τα σημαντικότερα πάγια περιουσιακά στοιχεία για τους φορείς διαχείρισης ενός οδικού δικτύου. Παράλληλα, η κατάσταση του οδοστρώματος αφορά άμεσα στους χρήστες της οδού, δεδομένου ότι συνδέεται με την ποιότητα κύλισης, την ασφάλεια της κυκλοφορίας, το λειτουργικό κόστος του οχήματος, την ταχύτητα των οχημάτων, τους χρόνους μετακίνησης και γενικά με το κόστος που επιβαρύνει τους χρήστες της οδού. Κατά συνέπεια, είναι ιδιαίτερης σημασίας ο ορθός σχεδιασμός ενός οδοστρώματος.

Κακώς σχεδιασμένα οδοστρώματα θα υποφέρουν από πρόωρη αστοχία κάτι το οποίο θα οδηγήσει σε υψηλές δαπάνες αποκατάστασης και σε μεγάλες οικονομικές απώλειες. Υπερσχεδιασμένα οδοστρώματα από την άλλη πλευρά θα αποτελούν σπατάλη περιορισμένων πόρων, χρηματικών αλλά και υλικών. Ο ορθός σχεδιασμός οδοστρωμάτων είναι μία διαδικασία όπου επιδιώκεται να βρεθεί ο οικονομικότερος συνδυασμός του πάχους των επιμέρους στρώσεων της κατασκευής και των κατάλληλων υλικών για το εκάστοτε πρόβλημα λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες του υπεδάφους, την κυκλοφορία που θα πρέπει να εξυπηρετηθεί κατά τη διάρκεια ζωής του έργου καθώς και τις κλιματικές συνθήκες. Μία ορθή διαδικασία σχεδιασμού οδοστρωμάτων θα

## **Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

πρέπει να χρησιμοποιεί σε πλήρη έκταση τα ευεργετικά μηχανικά χαρακτηριστικά αντοχής όλων των υλικών που χρησιμοποιούνται.

Για τα κοκκώδη υλικά που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές οδοστρωμάτων η γνώση όσον αφορά στα χαρακτηριστικά τους παραμένει ακόμη περιορισμένη. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για να καθορισθούν τα χαρακτηριστικά τους είναι κατά βάση εμπειρικές ή στηρίζονται στη μηχανική.

### **1.1.1 Εμπειρικές και μηχανιστικές μέθοδοι σχεδιασμού.**

Οι μέθοδοι σχεδιασμού που προέρχονται αμιγώς από εμπειρικές μελέτες της απόδοσης του οδοστρώματος ονομάζονται «εμπειρικές μέθοδοι». Μέθοδοι σχεδιασμού οι οποίες χρησιμοποιούν τις υπολογισμένες τάσεις και παραμορφώσεις του οδοστρώματος, μαζί με μελέτες της επίδρασης αυτών των τάσεων και των παραμορφώσεων στα υλικά του οδοστρώματος (μηχανική συμπεριφορά) καλούνται «μηχανιστικές μέθοδοι» ή θεωρητικές ή αναλυτικές.

Πολλές από τις διαδικασίες σχεδιασμού οδοστρωμάτων που χρησιμοποιούνται ακόμη και σήμερα βασίζονται στην εμπειρία. Έχουν αναπτυχθεί από χρόνια εμπειρίας σε υφιστάμενες οδούς, συμπληρωμένες με αναλύσεις τμημάτων δοκιμών ή ακόμη και σημαντικών ερευνητικών προγραμμάτων, όπως το AASHO Road Test (American Association of State Highway and Transportation Officials-Ottawa, Illinois, 1950).

Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούν εμπειρικές προδιαγραφές, δηλαδή με βάση το υλικό προκύπτουν τα χαρακτηριστικά του από ελέγχους συγκεκριμένων δεικτών. Οι προδιαγραφές αυτές δεν προσδιορίζουν τα υλικά με βάση τις θεμελιώδεις μηχανικές τους ιδιότητες όπως η αντοχή, η δυσκαμψία και η αντίσταση σε μόνιμη παραμόρφωση αλλά αξιολογούν εάν ένα υλικό αναμένεται να συμπεριφερθεί παρόμοια ή μη, σε σχέση με κάποιο άλλο υλικό για το οποίο υπάρχουν δεδομένα και εμπειρία κάτω από παρόμοιες συνθήκες.

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα των εμπειρικών μεθόδων είναι ότι λειτουργούν αποκλειστικά εντός των ορίων της εμπειρίας επί των οποίων βασίζονται.

## **Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

Οιαδήποτε απόκλιση, για παράδειγμα, υψηλότερα φορτία άξονα ή διαφορετικές κλιματικές συνθήκες μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλα προβλήματα. Εξαιτίας του μειονεκτήματος αυτού πολυάριθμες προσπάθειες πραγματοποιούνται ανά τον κόσμο για την ανάπτυξη αναλυτικών, μηχανιστικών μεθόδων σχεδιασμού οδοστρωμάτων. Αυτές οι μέθοδοι βασίζονται στην αναλυτική ικανότητα να υπολογίζουν τάσεις και παραμορφώσεις σε ένα οδόστρωμα υποβαλλόμενο σε ένα εξωτερικό φορτίο, λαμβάνοντας υπόψη τις κλιματολογικές συνθήκες. Με βάση τις κρίσιμες τιμές των τάσεων και των παραμορφώσεων, μπορεί να εκτιμηθεί η μακροπρόθεσμη απόδοση του οδοστρώματος και έτσι η διάρκεια ζωής του.

Οι δύο μέθοδοι είναι συμπληρωματικές και αλληλένδετες (Rolt, 2004). Οι εμπειρικές μέθοδοι απαιτούν θεωρητική κατανόηση ώστε να μπορέσουν να επεκταθούν σε διαφορετικές συνθήκες, ενώ οι μηχανιστικές μέθοδοι απαιτούν την χρήση εμπειρικών πληροφοριών για επαλήθευση. Καμία μέθοδος από μόνη της δεν είναι ιδανική αλλά ο ορθός συνδυασμός και των δύο αποτελεί βάση για τον σχεδιασμό οδοστρωμάτων, ονομαστικά την «μηχανιστική-εμπειρική» μέθοδο (M-E).

Στην αναλυτική προσέγγιση το οδόστρωμα αντιμετωπίζεται ως ενιαία δομή. Κύρια προϋπόθεση για την επιτυχία της μηχανιστικής προσέγγισης είναι ότι η συμπεριφορά των συστατικών υλικών του οδοστρώματος έχει γίνει πλήρως κατανοητή (Lekarp et al, 2000). Οι κοκκώδεις στρώσεις διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην συνολική απόδοση της δομής ενός οδοστρώματος.

### **1.2 Αντικείμενο και σκοπός της μελέτης.**

Ο κύριος στόχος της παρούσας μελέτης, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως είναι η δημιουργία μίας καινοτόμου και σχετικώς απλής τεχνικής χαρακτηρισμού των ασύνδετων, κοκκωδών υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή βάσεων και υποβάσεων ενός οδοστρώματος, όσον αφορά την αντοχή τους και τη γενική μηχανική τους συμπεριφοράς. Επιδιώκεται ειδικότερα, η εύρεση των συνθηκών κάτω από τις οποίες θα βελτιστοποιηθεί η

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

απόδοση ενός υλικού σε συνδυασμό πάντα με τις παραμέτρους από τις οποίες αυτό επηρεάζεται, κλιματολογικές ή μη. Ο μηχανικός χαρακτηρισμός των κοκκωδών υλικών βάσεων και υποβάσεων γίνεται κατά βάση εμπειρικά. Όμως, η νέα τάση χαρακτηρισμού περιλαμβάνει την εξέταση δεικτών μηχανικής συμπεριφοράς, όπως το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης  $M_T$ , με τους οποίους επιδιώκεται να κατανοηθεί πλήρως η συμπεριφορά των υλικών αυτών.

Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, προκύπτουν οι παρακάτω επιμέρους στόχοι της μελέτης.

- Κατανόηση των υφιστάμενων διαδικασιών σχεδιασμού, καθορίζοντας τις παραμέτρους που σχετίζονται με την συνολική απόδοση ενός οδοστρώματος καθώς και των επιπρόσθετων χαρακτηριστικών που επηρεάζουν τις στρώσεις από ασύνδετα κοκκώδη υλικά.
- Αξιολόγηση των υπάρχοντων τεχνικών χαρακτηρισμού των υλικών που χρησιμοποιούνται σε στρώσεις βάσεων και υποβάσεων στις κατασκευές οδοστρωμάτων, από την σκοπιά της αντοχής και της δυσκαμψίας.
- Αναγνώριση των βασικών χαρακτηριστικών μηχανικής συμπεριφοράς ενός κοκκώδους υλικού, εμβάθυνση στις κύριες παραμέτρους που επηρεάζουν τις ιδιότητες των υλικών αυτών όπως η προέλευση, η κοκκομετρική διαβάθμιση, ο βαθμός συμπύκνωσης και το περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας και τελικώς μέσω της τριαξονικής δοκιμής, κατανόηση της εξάρτησης του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης  $M_T$  από το καθεστώς των εφαρμοζόμενων τάσεων.

Σε αυτό το σημείο, εξαιτίας της σπουδαιότητας της παραμέτρου  $M_T$  με την επίσημη αγγλική ορολογία resilient modulus, πρέπει να διαφοροποιηθεί από το μέτρο ελαστικότητας κατά Young το οποίο εμφανίζεται σε αναλύσεις εδαφικών υλικών. Σε αναζήτηση που διεξήχθη διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχει κάποια επίσημη ελληνική ορολογία για την συγκεκριμένη παράμετρο. Η ορολογία που χρησιμοποιείται συνήθως είναι το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης. Επειδή είναι ένας όρος που αναφέρεται σε πολλά σημεία του παρόντος συγγράμματος θα χρησιμοποιείται με την σχετική ονομασία «ελαστικό μέτρο  $M_T$ » για να αποφευχθούν τυχόν παρανοήσεις.

## **Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

Στην παρούσα έρευνα, με γνώμονα τους παραπάνω στόχους, εξετάστηκαν τρία υλικά ως προς την ελαστική, μηχανική τους συμπεριφορά ενώ τα συμπεράσματα και τα αποτελέσματα προκύπτουν έπειτα από την εκτέλεση εργαστηριακών τριαξονικών δοκιμών. Για να εξαχθούν όσο το δυνατόν ασφαλέστερα αποτελέσματα πραγματοποιήθηκαν αρκετές εργαστηριακές δοκιμές για τις οποίες απαιτήθηκαν και μεταφέρθηκαν στο Εργαστήριο Οδοποιίας ΕΜΠ μεγάλες ποσότητες υλικών.

### **1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας και τεχνικό υπόβαθρο.**

Όπως αναφέρθηκε και στην γενική εισαγωγή, ο σχεδιασμός ενός οδοστρώματος βασίζεται κατά κύριο λόγο σε εμπειρικά και σε εργαστηριακά δεδομένα-αποτελέσματα, καθώς οι ιδιότητες των υλικών που απαρτίζουν μία τέτοια πολυσύνθετη κατασκευή, δεν μπορούν να προσδιορισθούν με μεγάλη ακρίβεια.

Οι αβεβαιότητες σχετικά με την αντοχή και την δυσκαμψία μίας στρώσης βάσης ή υπόβασης από ασύνδετο κοκκώδες υλικό είναι πολλές. Πληθώρα εργαστηριακών δοκιμών έχουν αναπτυχθεί με σκοπό αυτήν ακριβώς την κάλυψη των αβεβαιοτήτων αλλά ακόμα και αυτές είναι ικανές να προσφέρουν μία καλή εκτίμηση των βασικών παραμέτρων που υπεισέρχονται στον σχεδιασμό. Με την πάροδο των χρόνων και την συνεχόμενη ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών σε συνδυασμό με την εμπειρία που αποκτήθηκε από υπάρχουσες κατασκευές ο χαρακτηρισμός έχει γίνει ακριβέστερος και ο προσδιορισμός των βασικών μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών ευκολότερος. Πλέον, είναι δυνατή η μέτρηση τάσεων, παραμορφώσεων και οποιασδήποτε άλλης σημαντικής παραμέτρου με ικανοποιητική ακρίβεια. Αλλά, ακόμη και κάτω από αυτές τις συνθήκες υπάρχουν αρκετές αβεβαιότητες. Έτσι, οι περισσότερες τεχνικές ανά τον κόσμο βασίζονται στην εμπειρία, στην μηχανική και σε αποτελέσματα εξαντλητικών εργαστηριακών δοκιμών. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η δομή της παρούσας εργασίας ακολουθεί ακριβώς αυτό το σκεπτικό.



## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

Αρχικά στο κεφάλαιο (2) γίνεται ανασκόπηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας που αφορά τη μηχανική συμπεριφορά κοκκωδών υλικών, τη χρήση ανακυκλωμένων ασφαλτικών ως υλικά βάσεων/υποβάσεων ενώ γίνεται αναφορά στην ανάπτυξη και χρήση των βασικών εργαστηριακών δοκιμών και μεθοδολογιών που χρησιμοποιούνται για την λήψη δεδομένων που αφορούν τα χρησιμοποιούμενα υλικά. Τονίζεται ιδιαίτερα η σημασία και ο τρόπος προσδιορισμού του ελαστικού μέτρου (resilient modulus  $M_r$ ) των κοκκωδών υλικών, όπως επίσης και οι βασικές συνιστώσες από τις οποίες αυτό επηρεάζεται με κυρίαρχη θέση την επιρροή που επιφέρει το περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας.

Στο κεφάλαιο (3) παρουσιάζονται αναλυτικά οι στόχοι και οι επιδιώξεις της μελέτης. Αναφέρεται επίσης ο πειραματικός σχεδιασμός και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε προκειμένου να ληφθούν τα απαραίτητα εργαστηριακά δεδομένα που χρησιμοποιούνται αργότερα στο κύριο μέρος της ανάλυσης.

Στο κεφάλαιο (4) γίνεται εκτενής περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας, των εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στα τρία υλικά της μελέτης ενώ παράλληλα αναλύεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την λήψη και συλλογή των δεδομένων.

Το κεφάλαιο (5) αποτελεί το κύριο μέρος της ανάλυσης, στο οποίο γίνεται η ανάλυση των δεδομένων που συλλέχθηκαν και παρουσιάζονται μέσα από μία σειρά διαγραμμάτων στα οποία αντικατοπτρίζεται η συμπεριφορά κάθε υλικού σε σχέση με τις βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες τους. Ακόμη, παρουσιάζεται η στατιστική επεξεργασία των δειγμάτων τιμών που χρησιμοποιήθηκαν, για να διαπιστωθεί αν αποτελούν αξιόπιστη πηγή ενώ γίνεται μία πρώτη προσπάθεια για σχολιασμό και συζήτηση επί των αποτελεσμάτων.

Τέλος, το κεφάλαιο (6) παρουσιάζει τα τελικά συμπεράσματα της παρούσας μελέτης, τα κύρια σημεία που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής καθώς και τις τελικές παρατηρήσεις και σχόλια που αφορούν τις μηχανικές ιδιότητες μίας κοκκώδους στρώσης από ασύνδετο υλικό.

## **2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ**

### **2.1 Γενικά στοιχεία για τα οδοστρώματα.**

Το φυσικό έδαφος στη μορφή που βρίσκεται δεν είναι ικανό να φέρει τις προερχόμενες από την κυκλοφορία καταπονήσεις και δεν έχει την απαιτούμενη λεία επιφάνεια για την ομαλή κίνηση έπ' αυτού των τροχών. Επί πλέον δεν αντέχει στις κλιματολογικές διακυμάνσεις, την υγρασία, την βροχή όταν επάνω του κινούνται οχήματα. Για τους λόγους αυτούς κατασκευάζονται τα οδοστρώματα.

Ως οδόστρωμα ορίζεται το σύνολο των επαλλήλων στρώσεων που είναι τοποθετημένες πάνω από το φυσικό έδαφος για τη δημιουργία της οδού. Το οδόστρωμα είναι μια σύνθετη κατασκευή που έχει να επιτελέσει διάφορες λειτουργίες οι οποίες είναι ανόμοιες μεταξύ τους. Το γεγονός αυτό κάνει την κατασκευή αρκετά πολύπλοκη. Είναι γνωστό ότι οι δρόμοι στην αρχαιότητα ήταν απλοί χωματόδρομοι, όπου όλο το βάρος δινόταν στην ομαλότητα της χάραξης. Οι χωματόδρομοι όμως είναι ευπαθείς τόσο στις καιρικές επιδράσεις, όσο και στη φθορά από τα φορτία κυκλοφορίας. Η δράση του νερού της βροχής κυρίως είναι εκείνη που μαλακώνει και διαβρώνει την επιφάνεια τους. Αντίστοιχα, οι τροχοί των οχημάτων αλλά και η δράση ανθρώπων και ζώων, διαταράσσει και φθείρει την επιφάνεια των χωματόδρομων. Η συνδυασμένη δε επιρροή των παραπάνω παραγόντων (βροχή και φορτία κυκλοφορίας) θεωρείται ιδιαίτερα δυσμενής και φθοροποιός.

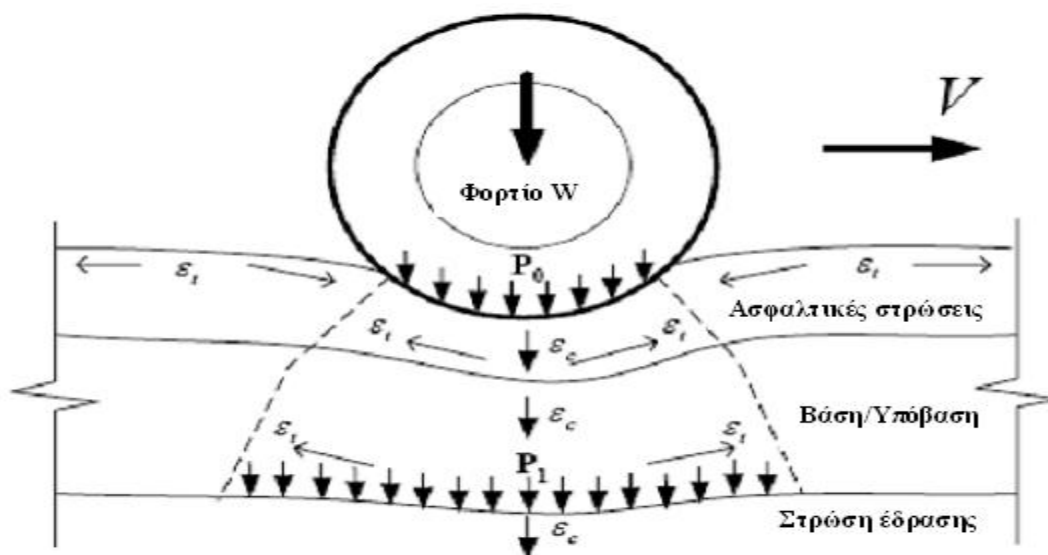
Είναι προφανές ότι, όσο αυξάνει η χρήση μίας οδού, τόσο μεγαλώνει και η φθορά της, αλλά παράλληλα αυξάνονται και οι απαιτήσεις που οι χρήστες έχουν από αυτήν. Έτσι από τους αρχαίους ακόμα χρόνους κατέστη αναγκαία κάποια μορφή προστασίας και ενίσχυσης της επιφάνειας κίνησης. Σήμερα είναι προφανές ότι, η επίστρωση των οδών με σύγχρονες ασφαλικές στρώσεις κυκλοφορίας είναι αναγκαία για να επιτευχθεί ένα αποδεκτό επίπεδο ασφαλούς, άνετης, οικονομικής και γρήγορης μετακίνησης των οχημάτων. Στο παρακάτω

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

σχήμα 1 βλέπουμε τις θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται σε ένα οδόστρωμα από τον τροχό ενός οχήματος (Chen et al., 2009).

Το οδόστρωμα είναι μία κατασκευή η οποία έχει σκοπό να εξασφαλίσει την απαιτούμενη ποιότητα κύλισης των οχημάτων για όλο το χρονικό διάστημα λειτουργίας του. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να εξασφαλίζεται :

- Η μετάδοση στο έδαφος των φορτίων των κυκλοφορούντων οχημάτων ελαττωμένων σε τέτοιο βαθμό, που να αποτρέπονται ανεπίτρεπτες σε μέγεθος μόνιμες παραμορφώσεις.
- Η δομική επάρκεια του οδοστρώματος στις επαναλαμβανόμενες επιπονήσεις της κυκλοφορίας και του περιβάλλοντος δηλαδή αποφυγή ρηγματώσεων, παραμορφώσεων και αποφλοιώσεων.
- Η προστασία του εδάφους θεμελίωσης του οδοστρώματος από τις επιδράσεις του περιβάλλοντος (παγετός, νερό), οι οποίες θα προκαλέσουν απώλεια φέρουσας ικανότητας και μόνιμες παραμορφώσεις.
- Η διατήρηση ενός ελάχιστου επιτρεπόμενου επιπέδου αντιστοιχιστικών χαρακτηριστικών της στρώσεως κύλισης.



**ΣΧΗΜΑ 1:** Θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται σε ένα οδόστρωμα κατά τη διέλευση ενός οχήματος και κατανομή του φορτίου τροχού στις στρώσεις ενός εύκαμπτου οδοστρώματος (Chen et al., 2009).

## 2.2 Δομή οδοστρώματος

Γενικά, όσον αφορά τη δομή τους και την κυκλοφορία που πρόκειται να εξυπηρετήσουν, τα οδοστρώματα μπορούν να χωρισθούν σε τέσσερις βασικές κατηγορίες.

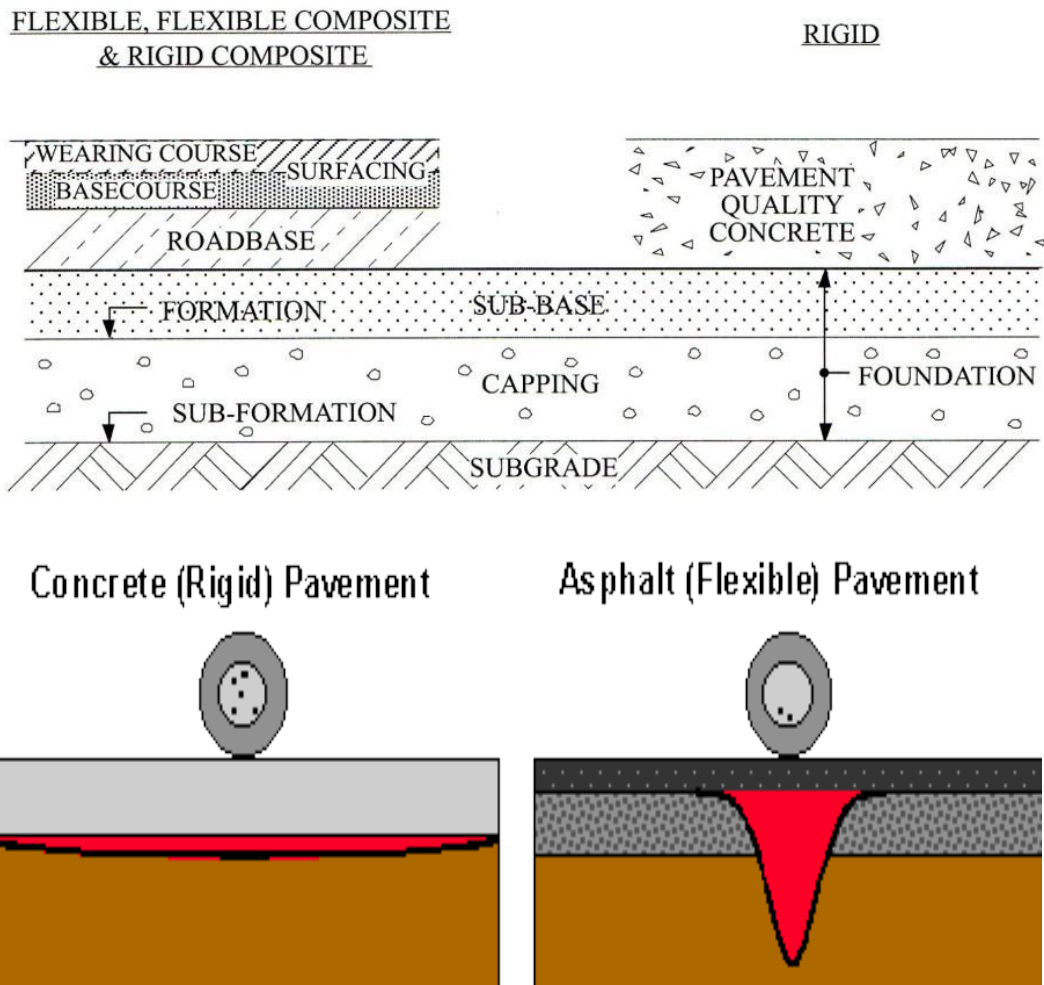
- Λεπτό ασφαλτικό οδόστρωμα, το οποίο αποτελείται από λεπτή ασφαλτική επίστρωση η οποία τοποθετείται πάνω σε μία ή περισσότερες στρώσεις από ασύνδετα κοκκώδη υλικά. Σύνηθες για οδούς χαμηλής αναμενόμενης κυκλοφορίας. Ευρύτερα γνωστά με τον όρο εύκαμπτα οδοστρώματα.
- Παχύ ασφαλτικό οδόστρωμα το οποίο αποτελείται από ασφαλτικό τάπητα, τοποθετημένο πάνω από μία ή δύο στρώσεις (βάσης και υπόβασης). Χρησιμοποιούνται για να εξυπηρετήσουν οδούς όπου αναμένεται υψηλό επίπεδο κυκλοφορίας. Μπορούν να θεωρηθούν ως εύκαμπτα, αλλά στην πραγματικότητα είναι πιο άκαμπτα συγκριτικά με τα προηγούμενα.
- Ημιάκαμπτα οδοστρώματα αποτελούμενα από ασφαλτική επίστρωση τοποθετημένη πάνω σε μία ή δύο κοκκώδεις στρώσεις κατεργασμένες με υδραυλικά συνδετικά υλικά. Χρησιμοποιούνται για να εξυπηρετήσουν οδούς όπου αναμένεται υψηλό επίπεδο κυκλοφορίας.
- Δύσκαμπτα οδοστρώματα αποτελούμενα από μία πλάκα σκυροδέματος (15 έως 40 εκατοστά πάχος), πιθανώς καλυπτόμενη με μία λεπτή ασφαλτική στρώση, η οποία στηρίζεται σε μία στρώση από συνδεόμενα ή μη κοκκώδη υλικά, είτε απευθείας πάνω στα θεμέλια. Η πλάκα σκυροδέματος μπορεί να είναι συνεχής με διαμήκη οπλισμό, ή ασυνεχής. Χρησιμοποιείται σε οδούς πολύ υψηλής αναμενόμενης κυκλοφορίας και σε οδοστρώματα αεροδρομίων.

Σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα η μεταφορά των φορτίων στο έδαφος γίνεται διαμέσου των στρώσεων του. Το ολικό πάχος του ευκάμπτου οδοστρώματος πρέπει να είναι τόσο, ώστε οι δυνάμεις που μεταβιβάζονται σε μεγαλύτερη συνεχώς επιφάνεια να μειωθούν μέχρι να γίνονται ανεκτές από το έδαφος έδρασης του οδοστρώματος όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στο σχήμα 1. Σε

## **Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

ένα δύσκαμπτο οδόστρωμα, όπου το υλικό του είναι μεγάλης αντοχής, το κύριο μέρος των τάσεων μεταβιβάζεται στο φορέα, ενώ το έδαφος θεμελίωσης απλώς αντιδρά στην παραμόρφωση του οδοστρώματος. Έτσι το πρόβλημα του υπολογισμού των δύσκαμπτων οδοστρώματων είναι η στατική επίλυση πλάκας σκυροδέματος, που εδράζεται σε άπειρα ελαστικά σημεία. Η βασικότερη, ωστόσο, διαφοροποίηση μεταξύ ευκάμπτων και δύσκαμπτων οδοστρώματων θεωρείται ο τρόπος συμπεριφοράς του συστήματος στα φορτία κυκλοφορίας. Στα εύκαμπτα οδοστρώματα το σύστημα έδαφος-οδόστρωμα συμπεριφέρεται ενιαία. Αν υπάρχει στο υπέδαφος ένα ασθενές σημείο (το οποίο δεν έχει εντοπισθεί και εξυγιανθεί κατά την κατασκευή), τότε υπό τα φορτία κυκλοφορίας το έδαφος εκεί δεν καθιζάνει. Το υπερκείμενο οδόστρωμα δεν έχει αυτοτέλεια συμπεριφοράς, η υπόβαση, ως ασύνδετο υλικό θα καταρρεύσει ακολουθώντας την καθίζηση του εδάφους, η βάση ως ασύνδετο υλικό θα καταρρεύσει και αυτή. Ο ασφαλοτάτητας βέβαια, είναι στρώση με δομική συνοχή, είναι όμως ανίκανη να γεφυρώσει μεγάλα υποκείμενα κενά για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αργά ή γρήγορα θα καταρρεύσει και αυτός ακολουθώντας το σχήμα παραμόρφωσης της υποκείμενης βάσης. Αντίθετα, αν αυτό συμβεί σε οδόστρωμα σκυροδέματος, η υπόβαση, προφανώς θα καταρρεύσει, ακολουθώντας την καθίζηση του εδάφους αλλά η πλάκα σκυροδέματος μπορεί χωρίς πρόβλημα να γεφυρώσει καθιζήσεις υπό την επιφάνεια της, εφόσον είναι οπλισμένη, χωρίς να ραγίσει. Άρα κατά τρόπο παραπλήσιο (διότι δεν είναι παρόμοια οπλισμένη) με τις τυπικές πλάκες ενός κτιρίου, οι οποίες δεν υποστηρίζονται παρά μόνο περιμετρικά. Δεν έχουμε δηλαδή τόσο ενιαίο-έδαφος, όπως είναι αυτό των ευκάμπτων οδοστρώματων.

Στο σχήμα 2 φαίνονται οι κυριότερες διαφορές των επαλλήλων στρώσεων ενός εύκαμπτου και ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος καθώς επίσης φαίνεται η κατανομή των κατακόρυφων τάσεων στον πυθμένα της ανώτερης στρώσης ενός εύκαμπτου και ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος.



**ΣΧΗΜΑ 2:** Διαφορές των επαλλήλων στρώσεων ενός εύκαμπτου και ενός δύσκαμπτου οδοστρώματος και κατανομή των κατακόρυφων τάσεων στον πυθμένα της ανώτερης στρώσης.

### 2.2.1 Δομική σύσταση εύκαμπτου οδοστρώματος.

Ένα εύκαμπτο οδόστρωμα αποτελείται από:

1. Τις ασφαλτικές στρώσεις, με συνολικό πάχος που συνήθως κυμαίνεται ανάλογα με την κυκλοφορία από περίπου 4 έως 35 εκατοστά. Οι ασφαλτικές στρώσεις αποτελούνται από:

## **Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

- τη στρώση κύλισης, η οποία πρέπει να εξασφαλίζει τα απαιτούμενα αντιολισθητικά χαρακτηριστικά και την απαιτούμενη ομαλότητα με πάχος, που ανάλογα με το αντιολισθητικό ασφαλτόμιγμα που χρησιμοποιείται, κυμαίνεται συνήθως από μερικά mm μέχρι 50 mm.
- τη συνδετική στρώση, η οποία αποτελεί μαζί με την υποκείμενη ασφαλική βάση τις κυρίως φέρουσες ασφαλικές στρώσεις.
- την ασφαλική βάση, η οποία στα αμιγώς εύκαμπτα οδοστρώματα υποβάλλεται σε κόπωση ενώ στα ημιάκαμπτα οδοστρώματα μπορεί να παραληφθεί.

### **2. Τις στρώσεις βάσης που στα:**

- αμιγώς εύκαμπτα οδοστρώματα αποτελείται από καλώς διαβαθμισμένο θραυστό αμμοχάλικο πάχους 10 έως 30 εκατοστά (ΕΛΟΤ/ΕΝ 13242).
- ημιάκαμπτα οδοστρώματα αποτελείται από στρώση σταθεροποιημένου/κατεργασμένου αμμοχάλικου πάχους 15 έως 35 εκατοστά (ΕΛΟΤ/ΕΝ 14227- 1,2, και 3).

### **3. Τις στρώσεις υπόβασης που στα:**

- αμιγώς εύκαμπτα οδοστρώματα αποτελείται από καλώς διαβαθμισμένο αμμοχάλικο (συλλεκτό ή θραυστό) πάχους 10 έως 30 εκατοστά (ΕΛΟΤ /ΕΝ 13242).
- ημιάκαμπτα οδοστρώματα μεγάλης κυκλοφορίας αποτελείται από στρώση από σταθεροποιημένο/κατεργασμένο αμμοχάλικο πάχους 15 έως 25 εκατοστά (ΕΛΟΤ/ΕΝ14227- 1, 2, και 3).
- Σε ορισμένες περιπτώσεις (μέτρια κυκλοφορία, μεγάλη φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης) η υπόβαση μπορεί να παραληφθεί, όταν η στρώση βάσης κατασκευαστεί σε μεγάλο πάχος (πχ 30 ή 35 εκατοστά).

### **4. Τη στρώση έδρασης η οποία είναι:**

- μία στρώση πάχους, συνήθως 50 έως 70 εκατοστά, επιλεγμένου εδαφικού υλικού ή μεταφερόμενου θραυστού ή φυσικού (συλλεκτού) αμμοχάλικου (χωρίς απαιτήσεις ως προς την διαβάθμιση).

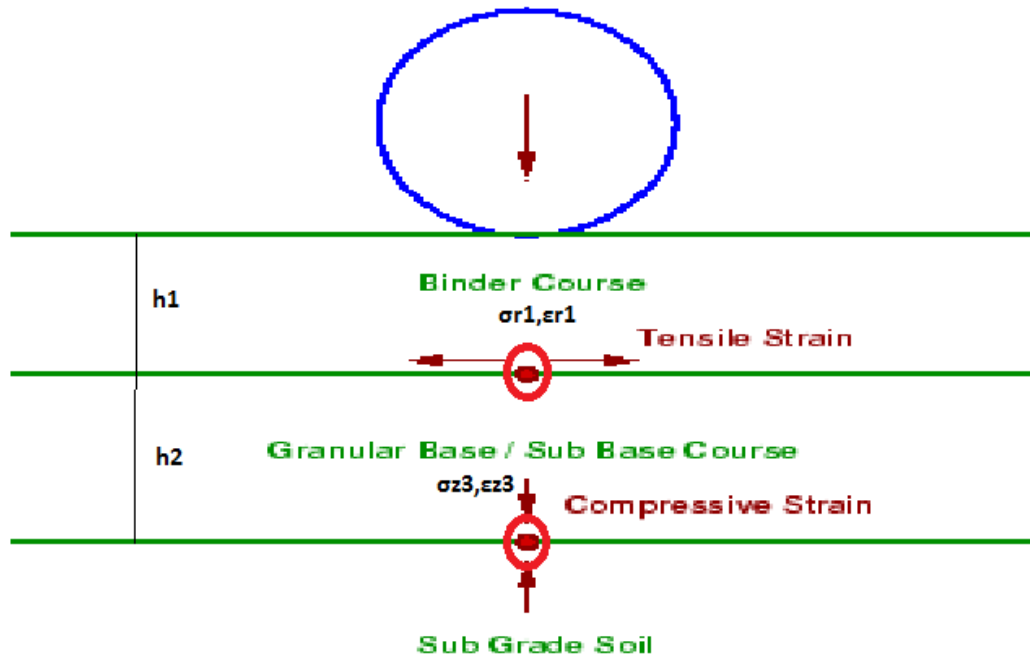
## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

- μία ή δύο στρώσεις από σταθεροποιημένο εδαφικό υλικό (EN 14227-10 έως και 14) συνολικού πάχους 40 έως 60 εκατοστά. Στις περιπτώσεις αυτές, ανάλογα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σταθεροποιημένου υλικού, είναι δυνατόν να γίνουν σημαντικές μειώσεις στα πάχη των στρώσεων του οδοστρώματος και ειδικότερα στις ασφαλτικές στρώσεις. (Εφημερίς της Κυβερνήσεως, 2007 και ΕΛΟΤ ΤΠ, 2009)

### 2.2.2 Κρίσιμες θέσεις αστοχίας ενός εύκαμπτου οδοστρώματος.

Ο καθορισμός των παραγόντων από τους οποίους εξαρτάται η φέρουσα ικανότητα ενός οδοστρώματος, καθώς και η μελέτη της δομικής καταπόνησης του απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η δυνατότητα μεταβίβασης των φορτίων κυκλοφορίας για τα οποία έχει σχεδιαστεί. Ο προσδιορισμός των κρίσιμων θέσεων ενός οδοστρώματος αποτελεί το πρώτο βήμα προκειμένου να αξιολογηθεί η συμπεριφορά του και η δομική του κατάσταση έναντι των επιβαλλόμενων φορτίων. Στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο τα εύκαμπτα οδοστρώματα. Στα εύκαμπτα οδοστρώματα εντοπίζονται δύο κρίσιμες θέσεις. Η πρώτη αντιστοιχεί στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων όπου εμφανίζονται προβλήματα που αφορούν στην αντοχή σε ρηγμάτωση λόγω κοπώσεως του ασφαλτομίγματος, ενώ η δεύτερη στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης, όπου έχουμε την αστοχία-παραμορφωσιμότητα της. Αντίστοιχα, τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη των παραπάνω θέσεων είναι η εφελκυστική τάση και παραμόρφωση ( $\sigma_{r1}, \epsilon_{r1}$ ) και η κατακόρυφη τάση και παραμόρφωση ( $\sigma_{z3}, \epsilon_{z3}$ ), όπως φαίνεται και στο σχήμα 3 (Λοΐζος, 1990 και 2008).





**ΣΧΗΜΑ 3:** Κρίσιμες θέσεις αστοχίας ενός εύκαμπτου οδοστρώματος (Λοΐζος, 2008).

Η παραμόρφωση ενός οδοστρώματος μπορεί να είναι ελαστική (ρηγματώσεις) ή παραμένουσα. Η ανάπτυξη της μόνιμης παραμόρφωσης αποτελεί μία κρίσιμη κατάσταση για το οδόστρωμα που ελλοχεύει κινδύνους για τους χρήστες της οδού. Σύμφωνα με τις αρχές σχεδιασμού των οδοστρωμάτων προκαλείται λόγω της αστοχίας της στρώσης έδρασης και της υπέρβασης της θλιπτικής αντοχής της (σχήμα 3). Ωστόσο, η ανάπτυξη παραμενουσών παραμορφώσεων μπορεί να οφείλεται και στην παραμόρφωση των ασφαλτικών στρώσεων.

### 2.3 Ο ρόλος της ύπαρξης κοκκώδους στρώσεως στη δομή ενός οδοστρώματος.

Γενικώς, ένα οδόστρωμα αποτελεί μία πολυεπίπεδη κατασκευή, επιλεγμένων κατάλληλα υλικών, τοποθετημένων σε φυσικό ή σε κατεργασμένο υπέδαφος. Πιο συγκεκριμένα αποτελείται από τις άνω ασφαλτικές στρώσεις, βάση ή/και υπόβαση με ή χωρίς υποκείμενη στρώση κάλυψης. Τα περισσότερα οδοστρώματα των αναπτυσσόμενων χωρών έχουν ως κύριο δομικό στοιχείο κοκκώδη στρώματα αποτελούμενα από παχιές στρώσεις βάσεων και

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

υποβάσεων τοποθετημένες πάνω από το υπέδαφος. Βάση είναι η στρώση του υλικού που βρίσκεται ακριβώς κάτω από την επιφανειακή στρώση ενός οδοστρώματος, ενώ υπόβαση είναι η στρώση που βρίσκεται ανάμεσα στη βάση και το υπέδαφος. Οι στρώσεις βάσης κατασκευάζονται από θραύσματα λίθων, μείγματα εδάφους-αδρανών, σιμεντόπηκτα κοκκώδη υλικά ή μείγματα ασφάλτου-αδρανών διαφόρων τύπων. Στην περίπτωση εύκαμπτων οδοστρωμάτων η στρώση βάσης βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια, έτσι θα πρέπει να έχει μεγάλη αντοχή σε παραμόρφωση για να μπορεί να παραλάβει τις υψηλές πιέσεις που ασκούνται. Η υπόβαση μπορεί να κατασκευαστεί από υλικό χαμηλότερης ποιότητας ή και να χρησιμοποιηθούν υλικά τα οποία είναι διαθέσιμα τοπικά (Haynes & Yoder, 1963).

Οι στρώσεις από ασύνδετα κοκκώδη υλικά διαδραματίζουν σπουδαίο ρόλο ενώ χρησιμοποιούνται σε εύκαμπτα και σε δύσκαμπτα οδοστρώματα με σκοπό να παρέχουν μία ή περισσότερες από τις παρακάτω λειτουργίες (Haynes & Yoder, 1963 και Sweere, 1990):

- Δημιουργία επίπεδης επιφάνειας εργασίας η οποία διευκολύνει την κατασκευή.
- Προστασία από την επίδραση του παγετού (στις περιπτώσεις όπου δεν προβλέπεται η κατασκευή αντιπαγετικής στρώσης).
- Αποτελούν στρώσεις αποστράγγισης.
- Αποτελούν δομικό στρώμα για το σύστημα του οδοστρώματος.
- Αποτρέπουν την ανάβλυση υδάτων.
- Αποτρέπουν την μεταβολή του όγκου του υπεδάφους.
- Συντελούν στην αύξηση της φορτοϊκανότητας.
- Παρέχουν πρόσθετη δυσκαμψία και αντοχή σε κόπωση.
- Κατανέμουν το φορτίο στο υπέδαφος αρκετά μειωμένο, διαμέσου του σώματος τους.
- Προσφέρουν αντίσταση στη δημιουργία μονίμων παραμορφώσεων από στρώμα σε στρώμα.

Για την πρόληψη της ανάβλυσης υδάτων η στρώση βάσης πρέπει είτε να αποστραγγίζεται ελεύθερα ή να παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση στην

## **Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

διαβρωτική επίδραση του νερού. Για να υπάρξει επαρκής αποστράγγιση το υλικό της βάσης πρέπει να είναι καλής κοκκομετρικής διαβάθμισης και να έχει πολύ λίγα λεπτόκοκκα υλικά. Μπορεί επίσης να σταθεροποιηθεί με άσφαλτο. Μία στρώση βάσης σχεδιασμένη να αντιστέκεται στην επίδραση του παγετού πρέπει να μην είναι ευαίσθητη στον παγετό και να αποστραγγίζεται ελεύθερα. Η εξασφάλιση ικανοποιητικής φορτοϊκανότητας δεν προϋποθέτει αναγκαστικά ελεύθερη αποστράγγιση αλλά πρέπει να υπάρχει καλή κοκκομετρική διαβάθμιση των υλικών ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής αντίσταση στην παραμόρφωση από φόρτιση.

Οι ρωγμές κόπωσης, οι τροχαυλακώσεις, οι τοπικές καθιζήσεις και ανασηκώματα λόγω παγετού στα εύκαμπτα οδοστρώματα μπορούν, τουλάχιστον εν μέρει να αποδοθούν στην κακή απόδοση των κοκκωδών στρώσεων βάσης και υπόβασης. Εκτενείς ρηγματώσεις, σπασίματα, απώλεια στήριξης, ανασηκώματα και διαβρώσεις στα δύσκαμπτα οδοστρώματα μπορούν επίσης να αποδοθούν στην κακή απόδοση των κοκκωδών στρώσεων.

Σε πολλές εμπειρικές διαδικασίες σχεδιασμού οδοστρωμάτων οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα τα κοκκώδη υλικά δεν διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο. Αυτές οι διαδικασίες επικεντρώνονται στον σχεδιασμό των ασφαλικών στρώσεων θεωρώντας δεδομένη την κατάσταση του υπεδάφους, τα φορτία της κυκλοφορίας και τις κλιματικές συνθήκες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στις ανεπτυγμένες χώρες, από όπου προέρχονται αυτές οι μέθοδοι, το κύριο δομικό συστατικό ενός οδοστρώματος είναι οι ασφαλικές στρώσεις και κατ' επέκταση η σημασία των κοκκωδών στρώσεων περιορίζεται στην απλή δημιουργία επίπεδης επιφάνειας εργασίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της ως άνω θεώρησης αποτελεί το εγχειρίδιο σχεδιασμού οδοστρωμάτων της Shell (Shell Pavement Design Manual) όπως σημειώνει ο Sweere (1990): Διαμέσου της σταθερής αναλογίας της δυσκαμψίας της (υπο)βάσεως και του υπεδάφους η δομική συνεισφορά του αδέσμευτου κοκκώδους υλικού είναι μειωμένη και δεν διαδραματίζει κάποιο ουσιώδη ρόλο στον σχεδιασμό οδοστρωμάτων. Αντίθετα, στις αναπτυσσόμενες χώρες, όσον αφορά την κατασκευή οδοστρωμάτων, όπου τα οδοστρώματα σχεδιάζονται με λεπτές ασφαλικές στρώσεις, οι κοκκώδεις στρώσεις βάσεων και υποβάσεων παρέχουν το μεγαλύτερο μέρος της φέρουσας

## **Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

ικανότητας. Παρά την εκτεταμένη όμως χρήση των κοκκωδών υλικών, στα εμπειρικά προσομοιώματα σχεδιασμού οδοστρωμάτων σε αυτές τις χώρες, παρατηρείται ότι δεν χρησιμοποιούνται στον μέγιστο τους βαθμό, δηλαδή δεν επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση τους. Η άνω θεώρηση ισχύει φυσικά και για τα ελληνικά δεδομένα. Επιπροσθέτως, παρά το γεγονός ότι ο σχεδιασμός ορισμένων οδοστρωμάτων πραγματοποιείται για χαμηλούς φόρτους κυκλοφορίας, αυτά υποβάλλονται σε υπερβολικές φορτίσεις, σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες όπως υψηλές θερμοκρασίες και υψηλά ποσοστά υγρασίας καθώς και σε συνεχείς εναλλαγές υγρών και ξηρών περιόδων.

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι για την εκπλήρωση των απαιτήσεων κατά τον ορθολογικό σχεδιασμό οδοστρωμάτων αλλά και για την εκπλήρωση των βασικών λειτουργιών που επιτελούν οι κοκκώδεις στρώσεις σε ένα οδόστρωμα αποτελεί κομβικής σημασίας η πλήρης κατανόηση της απόκρισης των στρώσεων αυτών υπό τα φορτία κυκλοφορίας. Επίσης, καθίσταται πολύ σημαντικό να χαρακτηριστεί σωστά και να κατανοηθεί η συμπεριφορά των ασύνδετων στρώσεων και του υπεδάφους προκειμένου να προβλεφθούν οι αποκρίσεις του οδοστρώματος ως ενιαίας κατασκευής κάτι το οποίο είναι ζωτικής σημασίας στο πλαίσιο της μηχανιστικής-εμπειρικής προσέγγισης σχεδιασμού.

### **2.4 Συμπεριφορά των ασύνδετων κοκκωδών υλικών ενός οδοστρώματος.**

Η εξέταση της ιστορίας αποκαλύπτει μια εξελικτική διαδικασία που ξεκίνησε με βάση την εμπειρία και σταδιακά εξελίχθηκε στη δημιουργία εμπειρικών εξισώσεων που βασίζονται τόσο στην εμπειρία όσο και σε ελέγχους απόδοσης πραγματικών οδοστρωμάτων. Όπως δήλωσαν οι Elliott & Thompson (1985), Monismith (2004) και De Beer (1990) η εξέλιξη αυτή και ο μετασχηματισμός συνοδεύτηκαν με βαθύτερη κατανόηση τόσο της συμπεριφοράς των υλικών όσο και της σχέσης φορτίου-οδοστρώματος και περιβαλλοντικής αλληλεπίδρασης. Με την πάροδο των χρόνων ένα μεγάλο μέρος της ανάπτυξης έχει παρεμποδιστεί από την πολυπλοκότητα του οδοστρώματος ως δομικό σύστημα,

## **Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

τόσο από την άποψη της αόριστης φύσης του όσο και από την άποψη των συνεχών μεταβαλλόμενων συνθηκών στις οποίες υποβάλλεται. Βέβαια, αν και έχει πραγματοποιηθεί μεγάλη εξέλιξη στην θεώρηση των οδοστρωμάτων ως πολύστρωτων δομικών συστημάτων με την εισαγωγή εξελιγμένων αναλυτικών μηχανιστικών μεθόδων τόσο στο σχεδιασμό όσο και στην ενίσχυση υφιστάμενων οδών εξακολουθεί να υπάρχει τεράστιο χάσμα ανάμεσα στην πραγματική συμπεριφορά των οδοστρωμάτων και τη θεωρία (De Beer , 1990).

Τα ασύνδετα κοκκώδη υλικά γνωστά και ως υλικά οδοστρωσίας χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατασκευή βάσεων και υποβάσεων ευκάμπτων οδοστρωμάτων με σκοπό να παρέχουν διανομή του φορτίου στις κατώτερες στρώσεις και τελικά στο υπέδαφος. Η φέρουσα ικανότητα των υλικών αυτών είναι αποτέλεσμα της διατμητικής αντίστασης του σκελετού του αδρανούς-αμμοχάλικου δηλαδή μέσω της εμπλοκής των σωματιδίων του αδρανούς. Καθώς οι απαιτήσεις ως προς το φορτίο και την απόδοση του οδοστρώματος συνεχώς αυξάνονται η όσο το δυνατό καλύτερη κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς και της απόκρισης των ασύνδετων υλικών οδοστρωσίας κρίνεται απαραίτητη.

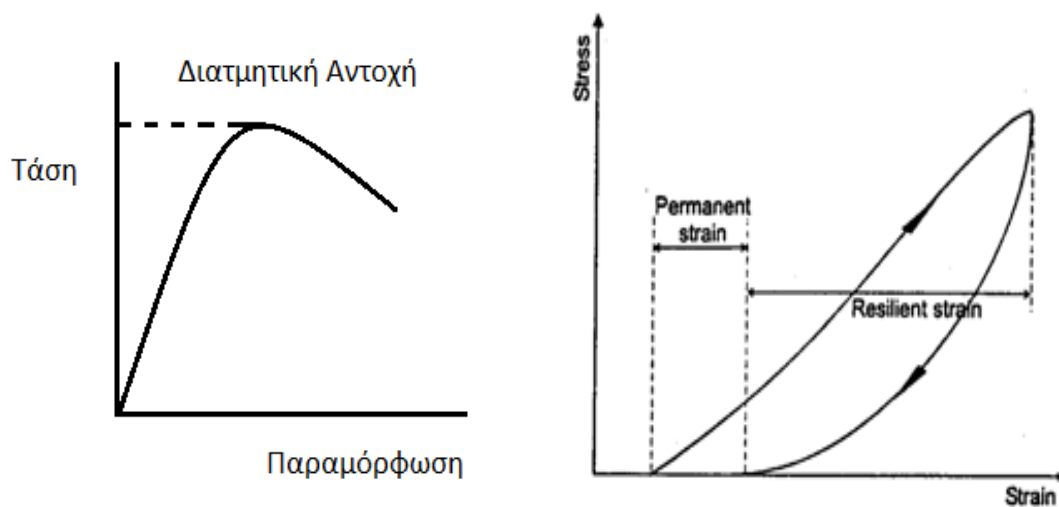
### **2.4.1 Μηχανική συμπεριφορά ασύνδετων κοκκωδών υλικών.**

Όπως συζητήθηκε και στην παράγραφο 2.3 η χρήση και κατανόηση των ιδιοτήτων των ασύνδετων υλικών των στρώσεων βάσης και υπόβασης είτε απαιτεί προηγούμενη γνώση όσον αφορά στην απόδοση τους (εμπειρικές σχέσεις σε συνδυασμό με δοκιμές) είτε καθιστά αναγκαία την εργαστηριακή μέτρηση και πρόβλεψη της απόδοσης. Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών μπορούν να μετρηθούν ή καλύτερα να εκτιμηθούν χρησιμοποιώντας εργαστηριακές διατάξεις όπως θα δούμε και στη συνέχεια. Η κύρια απαίτηση από τις εργαστηριακές αυτές δοκιμές είναι ότι οι πληροφορίες που παράγονται είναι θεμελιώδους σημασίας για την πραγματική κατανόηση της συμπεριφοράς των υλικών (Thom et al., 2005). Στην παρούσα εργασία ο όρος μηχανική συμπεριφορά αναφέρεται στην συμπεριφορά κατά την αστοχία (αντοχή), στην

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

συμπεριφορά ελαστικής παραμόρφωσης (δυσκαμψία) και στην συμπεριφορά μόνιμης παραμόρφωσης.

Το σχήμα 4Α απεικονίζει ένα παράδειγμα καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων το οποίο προκύπτει από μονοτονική φόρτιση τριαξονικής δοκιμής. Το πρώτο τμήμα της μονοτονικής καμπύλης οφείλεται στο αυξανόμενο επίπεδο της τάσης μέχρι την στιγμή όπου προσεγγίζεται το σημείο μέγιστης τάσης, μετά το οποίο η παραμόρφωση συνεχίζεται ακόμα και για μικρή μείωση της ασκούμενης τάσης. Κάτω από επαναλαμβανόμενες συνθήκες φόρτισης (αρκετά μακριά από την αστοχία και το σημείο μέγιστης τάσης) τα υλικά υφίστανται ανακτήσιμες και μη παραμορφώσεις. Οι μόνιμες και οι ανακτήσιμες (ελαστικές) παραμορφώσεις για έναν κύκλο φόρτισης φαίνονται στο σχήμα 4B. Το ανακτήσιμο τμήμα αναφέρεται στην ελαστικότητα του υλικού ενώ η μόνιμη παραμόρφωση υποδεικνύει την ευαισθησία του υλικού στη δημιουργία αυλακώσεων (Brown, 1996).



**ΣΧΗΜΑ 4:** (Α) Μονοτονική φόρτιση μέχρι την αστοχία και (Β) Παραμορφώσεις των ασύνδετων κοκκωδών υλικών για ένα κύκλο φόρτισης (Brown, 1996).

Σύμφωνα με τα παραπάνω η απόκριση των κοκκωδών στρώσεων υπό τα φορτία κυκλοφορίας, όσον αφορά την παραμόρφωση, μπορεί συμβατικά να χαρακτηριστεί από μία ανακτήσιμη (ελαστική) και μία μόνιμη (παραμένουσα) παραμόρφωση. Ωστόσο, η πραγματική φύση του μηχανισμού της παραμόρφωσης των κοκκωδών στρώσεων δεν έχει κατανοηθεί πλήρως μέχρι

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

σήμερα. Έχει τεκμηριωθεί (Luong, 1982) ότι η παραμόρφωση αυτών των υλικών αποτελεί αποτέλεσμα τριών μηχανισμών: της στερεοποίησης, της παραμόρφωσης (αλλοίωσης) και της τριβής. Ο μηχανισμός της στερεοποίησης (συμπύκνωσης) είναι η αλλαγή στο σχήμα και η συμπίεση των κόκκων που συνθέτουν το υλικό ενώ ο μηχανισμός της αλλοίωσης-παραμόρφωσης χαρακτηρίζεται από κάμψη και κύλιση-ολίσθηση των μεμονωμένων σωματιδίων. Η κάμψη των κόκκων είναι σημαντική στην περίπτωση των επίπεδων κόκκων ενώ η κύλιση σχετίζεται συνήθως με στρογγυλεμένους κόκκους.

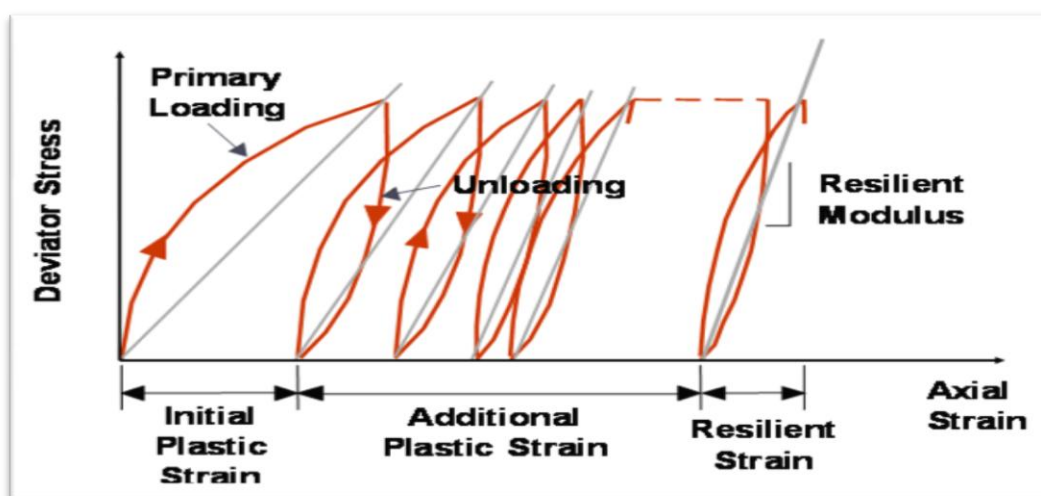
Η αντίσταση στην ολίσθηση των σωματιδίων του κόκκου εξαρτάται από την διασωματιδιακή τριβή στην περιφέρεια του κόκκου. Ο μηχανισμός της τριβής, με την έννοια της φθοράς, είναι η σύνθλιψη και το σπάσιμο που πραγματοποιείται όταν το εφαρμοζόμενο φορτίο υπερβαίνει την αντοχή των κόκκων. Η σύνθλιψη είναι μια προοδευτική διαδικασία που μπορεί να ξεκινήσει σε σχετικά χαμηλό επίπεδο τάσεων και καταλήγει σε σταδιακές αλλαγές στην σύνθεση του εδάφους. Η σύνθλιψη των σωματιδίων διέπεται από το μέγεθος των κόκκων και το σχήμα, το μέγεθος των εφαρμοζόμενων τάσεων, την ορυκτολογία και την αντοχή των μεμονωμένων κόκκων.

Αν η συμπεριφορά των κοκκωδών υλικών αναλυθεί σε μακροσκοπικό επίπεδο, η παρατηρούμενη παραμόρφωση μπορεί να είναι ογκομετρική, διατμητική, ή ορθότερα ένας συνδυασμός των δύο. Αυτές οι παραμορφώσεις προκύπτουν από διάφορους συνδυασμούς των τριών μηχανισμών που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Είναι πιθανότερο οι κινήσεις των σωματιδίων λόγω παραμόρφωσης να συμβάλουν κυρίως στη διατμητική παραμόρφωση, ενώ στερεοποίηση και τριβή συμβάλλουν κυρίως στην ογκομετρική παραμόρφωση. Ωστόσο, αυτός ο διαχωρισμός δεν είναι ακριβής, διότι η διατμητική και η ογκομετρική παραμόρφωση κοκκωδών υλικών σχετίζονται μεταξύ τους (Lekarp,2000).

2.4.1.1 Συμπεριφορά κατά την ελαστική παραμόρφωση-Resilient deformation behavior

Η θεωρία της ελαστικότητας καθορίζει τις ελαστικές ιδιότητες ενός υλικού με το μέτρο ελαστικότητας,  $E$ , και το λόγο του Poisson,  $\nu$ . Στις στρώσεις ασύνδετων κοκκωδών υλικών ενός οδοστρώματος το μέτρο ελαστικότητας  $E$  αντικαθίσταται από το ελαστικό μέτρο  $M_r$ , με σκοπό να περιγραφεί, η ελαστική (ανακτιήσιμη) και εξαρτώμενη από την επιβαλλόμενη τάση, συμπεριφορά ενός υλικού που υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση.

Οι ελαστικές ιδιότητες των ασύνδετων υλικών παρατηρήθηκαν για πρώτη φορά από τον Hveem το 1950, ο οποίος κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η παραμόρφωση των υλικών αυτών υπό παροδική φόρτιση είναι ελαστική, με την έννοια ότι είναι ανακτιήσιμη. Η πραγματική έννοια του ελαστικού μέτρου καθιερώθηκε αργότερα από τους Seed et al. (1962) ώστε να γίνει δυνατός ο χαρακτηρισμός της ελαστικής απόκρισης του υπεδάφους και της σχέσης τους με αστοχίες λόγω κόπωσης σε ασφαλτικά οδοστρώματα. Τα κοκκώδη υλικά δεν είναι στην πραγματικότητα ελαστικά (Brown, 1996) αλλά αποκτούν μη ανακτιήσιμες παραμορφώσεις μετά από κάθε φόρτιση που δέχονται. Στην περίπτωση της παροδικής φόρτισης και μετά τις πρώτες εφαρμογές του φορτίου, η αύξηση των μη ανακτιήσιμων παραμορφώσεων είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με την ελαστική-ανακτιήσιμη παραμόρφωση (σχήμα 5).



**ΣΧΗΜΑ 5:** Συμπεριφορά κοκκώδους υλικού υπό επαναλαμβανόμενη-κυκλική φόρτιση (Thom & Brown, 1988).



## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

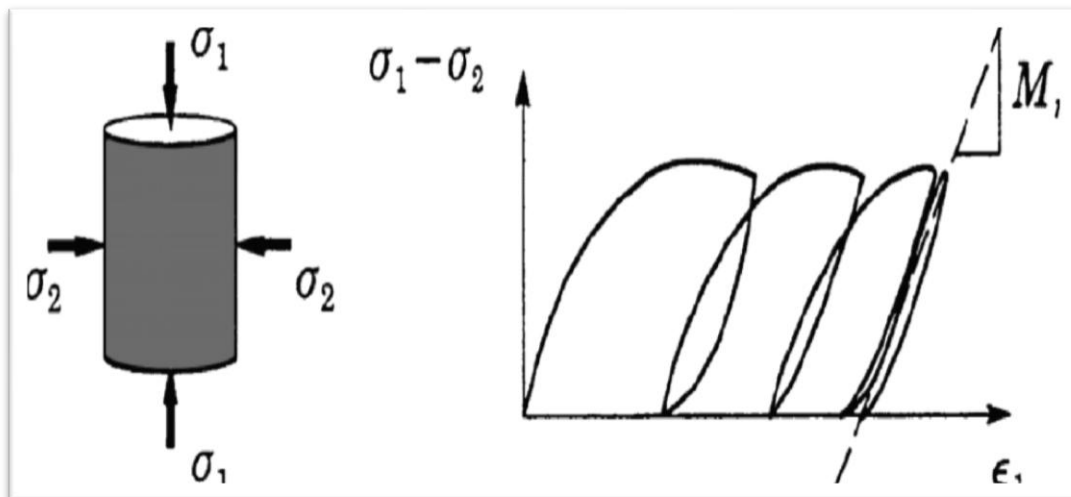
Ο όρος «ελαστικό», με την έννοια του ανακτήσιμου (resilient) αναφέρεται στο τμήμα της ενέργειας που απορροφά-συγκρατεί ένα υλικό όταν φορτίζεται το οποίο ανακτάται πλήρως όταν αποφορτιστεί. Αυτή η ελαστική συμπεριφορά των κοκκωδών στρώσεων είναι η κύρια αιτιολόγηση για τη χρήση της ελαστικής θεωρίας για την ανάλυση της απόκρισης τους υπό τα φορτία κυκλοφορίας. Η παράμετρος που χρησιμοποιείται συνήθως για τον χαρακτηρισμό αυτής της συμπεριφοράς είναι το ελαστικό μέτρο ( $M_r$ ).

Το ελαστικό μέτρο  $M_r$  (resilient modulus) ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης αξονικής παρεκκλίνουσας τάσης προς την ανακτώμενη παραμόρφωση. Το σχήμα 6 δείχνει ένα σκαρίφημα των κυρίων τάσεων της κυκλικής τριαξονικής δοκιμής ενώ το σχήμα 7 αποτυπώνει τον ορισμό του ελαστικού μέτρου  $M_r$  (Seed et al., 1962).

όπου  $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_2 =$  αξονική παρεκκλίνουσα τάση

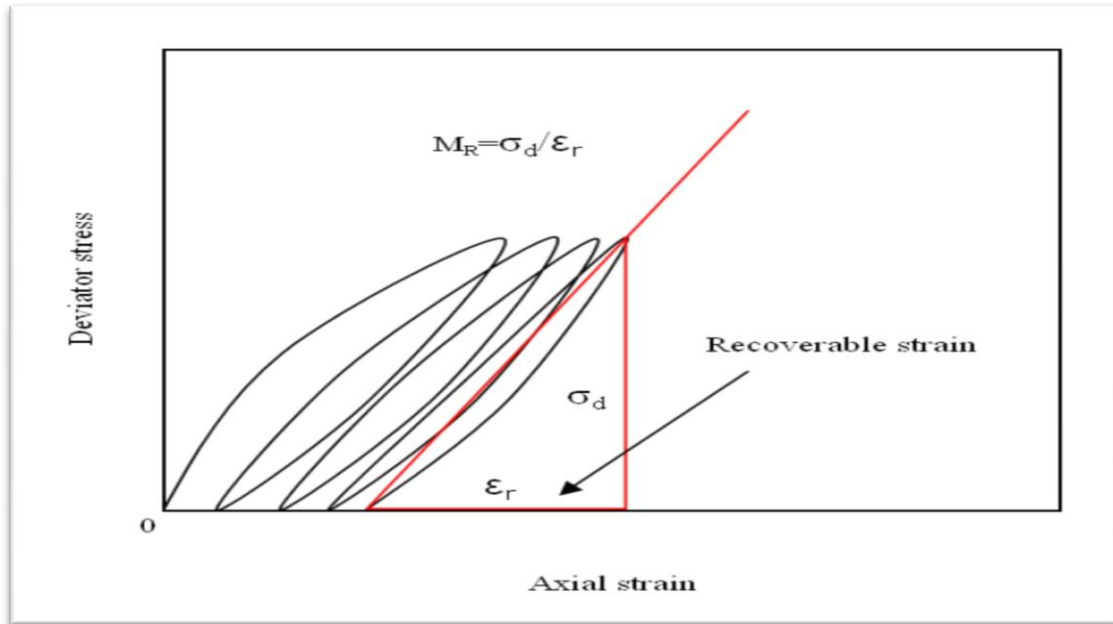
$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

$\epsilon_r =$  αξονική ανακτώμενη παραμόρφωση



**ΣΧΗΜΑ 6:** Κύριες τάσεις της κυκλικής τριαξονικής δοκιμής.

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.



**ΣΧΗΜΑ 7:** Ορισμός ελαστικού μέτρου  $M_r$  (resilient modulus).

Οι Lekarj et al. (2000) παρουσίασαν μία εκτενή έρευνα σχετικά με την ελαστική συμπεριφορά των ασύνδετων κοκκωδών υλικών. Κατέληξαν στο γεγονός ότι η ελαστική συμπεριφορά των ασύνδετων υλικών επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως το καθεστώς των τάσεων, η πυκνότητα, το ποσοστό υγρασίας, το περιεχόμενο των λεπτόκοκκων στο υλικό, η κοκκομετρική διαβάθμιση, ο τύπος του αδρανούς, ο αριθμός των φορτίσεων, το ιστορικό των φορτίσεων, η διάρκεια φόρτισης, η συχνότητα και η ακολουθία της φόρτισης. Η επιρροή αυτών των παραμέτρων θα εξετασθεί λεπτομερέστερα σε επόμενη παράγραφο.

### 2.4.1.2 Συμπεριφορά κατά την μόνιμη παραμόρφωση-Permanent deformation behavior.

Οι μόνιμες παραμορφώσεις αντιπροσωπεύουν το μη ανακτήσιμο μέρος των παραμορφώσεων. Η αυλάκωση (rutting) είναι η πιο κοινή βλάβη που προκαλείται από τις μόνιμες παραμορφώσεις στις ασύνδετες κοκκώδεις στρώσεις. Πολλοί ερευνητές έχουν αναφέρει ότι το ποσοστό συσσώρευσης μόνιμη παραμόρφωσης υπό επαναλαμβανόμενη φόρτιση μειώνεται με τον αριθμό των επαναλήψεων. Ο Barksdale (1972) πραγματοποίησε μια

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

ολοκληρωμένη μελέτη της συμπεριφοράς των διαφορετικών υλικών της στρώσης βάσης χρησιμοποιώντας τριαξονικές δοκιμές επαναλαμβανόμενης φόρτισης. Εισηγάγε την πρώτη σχέση χρησιμοποιώντας μία λογαριθμική μέθοδο ανάμεσα στην μόνιμη παραμόρφωση  $\epsilon_p$  και τον αριθμό των επαναλήψεων φόρτισης  $N$ , όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση (2-4.1). Ο Sweere (1990) τροποποίησε τη λογαριθμική προσέγγιση και πρότεινε μία αμφι-λογαριθμική σχέση μεταξύ μόνιμης αξονικής παραμόρφωσης και αριθμού επαναλήψεων φόρτισης, εξίσωση (2-4.2)

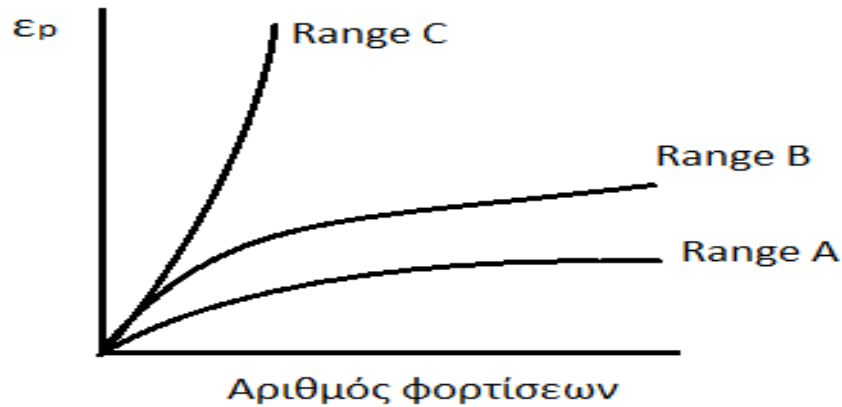
$$\epsilon_p = \alpha + b \log N \quad (2-4.1)$$

$$\epsilon_p = \alpha N^b \quad \rightarrow \quad \log \epsilon_p = \alpha + b \log N \quad (2-4.2)$$

Άλλοι ερευνητές έχουν ακολουθήσει διαφορετική προσέγγιση, προσπαθώντας να συσχετίσουν την μόνιμη παραμόρφωση μετά από ένα δεδομένο αριθμό κύκλων φόρτισης προς την εφαρμοζόμενη τάση και κάποιοι προσπάθησαν να συνδυάσουν την επίδραση των τάσεων και τον αριθμό των κύκλων φόρτισης. Ο Lekar (1999) βρήκε ότι η ανάπτυξη μονίμων παραμορφώσεων επηρεαζόταν και πάλι από πολλούς παράγοντες. Μία άλλη προσέγγιση για να περιγραφεί η συμπεριφορά πλαστικής (μόνιμης παραμόρφωσης) των ασύνδετων υλικών είναι μέσω της θεώρησης αναδιάρθρωσης (shakedown). Η έννοια shakedown, όσον αφορά τα υλικά, αναπτύχθηκε αρχικά για να περιγράψει τη συμπεριφορά παραμόρφωσης του μετάλλου σε δοχεία πίεσης υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Αργότερα αυτή η έννοια χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει την πλαστική συμπεριφορά των ασύνδετων κοκκωδών υλικών υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση (Uthus, 2007). Οι Werkmeister et al. (2001) μελέτησαν τη συμπεριφορά των ασύνδετων υλικών ως προς τη μόνιμη παραμόρφωση χρησιμοποιώντας την προσέγγιση shakedown και ανέφεραν τα αποτελέσματα της ανακυκλικής τριαξονικής δοκιμής ως ένα εύρος τιμών shakedown A, B και C όπως φαίνεται και στο σχήμα 8. Η σειρά A (range A) αναφέρεται σε πλαστική αναδιάρθρωση όπου το υλικό μετά από μία περίοδο προ-συμπίεσης καθίσταται απόλυτα ελαστικό χωρίς καμία περαιτέρω μόνιμη παραμόρφωση. Η σειρά B (range B) ορίζεται ως η ενδιάμεση απόκριση ή αλλιώς πλαστικός ερπυσμός όπου το υψηλό ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης που παρατηρείται κατά τους πρώτους

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

κύκλους φόρτισης, μειώνεται σε ένα χαμηλότερο σχεδόν σταθερό επίπεδο. Η σειρά C (range C) αντιπροσωπεύει σταδιακή κατάρρευση όπου η μόνιμη παραμόρφωση αυξάνει συνεχώς καθώς αυξάνεται ο αριθμός των φορτίσεων.



**ΣΧΗΜΑ 8:** Διαφορετικοί τύποι συμπεριφορών μόνιμης παραμόρφωσης εξαρτώμενοι από την εξασκούμενη τάση (shakedown) Werkmeister et al. (2001).

### 2.4.1.3 Κοκκώδης σκελετός: παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά κατά την παραμόρφωση.

Η αντιμετώπιση ενός κοκκώδους υλικού ως προς την σκελετική δομή του περιλαμβάνει δύο βασικές πτυχές που πρέπει να διαχωριστούν και καθορισθούν με σαφήνεια. Οι ιδιότητες των κοκκωδών υλικών χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στις εδαφικές/πετρογραφικές ιδιότητες ενός μεμονωμένου κόκκου και στις εδαφικές/πετρογραφικές ιδιότητες του συνόλου των κόκκων δηλαδή του αμμοχάλικου (Paige-Green, 1999). Οι πρώτες, περιλαμβάνουν ιδιότητες του υλικού οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν σταθερές κατά τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος όπως το χρώμα, το μέγεθος, η υφή, η κοκκομετρία, η ορυκτολογική σύνθεση και τα πλαστικά χαρακτηριστικά. Στην δεύτερη κατηγορία από την άλλη περιλαμβάνονται οι ιδιότητες του υλικού που μεταβάλλονται-ποικίλουν μόλις αλλάξουν οι συνθήκες (φόρτισης, κατασκευής, περιβαλλοντικές) όπως είναι η δομή, η πυκνότητα, ο λόγος κενών, η διαπερατότητα και η αντοχή.

➤ **Ιδιότητες κόκκων**

*Κοκκομετρική διαβάθμιση*

Η κοκκομετρική διαβάθμιση των ασύνδετων υλικών οδοστρωσίας αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για την απόδοση ενός οδοστρώματος. Οι πρώτες προσπάθειες για τον διαχωρισμό των υλικών οδοστρωσίας χρησιμοποιούσαν απλές ταξινομήσεις που σχετίζονταν με το μέγεθος των αδρανών (Strahan, 1929). Διάφορες μελέτες που σχετίζονταν με την επίδοση και πολλές εργαστηριακές έρευνες έχουν επιβεβαιώσει τη σημασία της διαβάθμισης. Η ορθή διαβάθμιση του υλικού εξασφαλίζει το αλληλοκλείδωμα και την σφικτή λειτουργία-δομή των αδρανών, επιτρέποντας έτσι στην συμπύκνωση να πραγματοποιηθεί με την λιγότερη δυνατή προσπάθεια (Simmelink, 1991). Οι Thom & Brown (1988) μελέτησαν την συμπεριφορά μείγματος θρυμματισμένου ασβεστόλιθου σε διαφορετικές διαβαθμίσεις και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η δυσκαμψία και η αντίσταση σε μόνιμη παραμόρφωση μειώνεται με αύξηση του ποσοστού λεπτόκοκκου υλικού στο μείγμα. Αυτό θα μπορούσε να εξηγηθεί από την παρουσία ποσότητας λεπτόκοκκου υλικού, μεγαλύτερης από αυτή που απαιτείται για να γεμίσουν τα κενά που δημιουργούνται μεταξύ των μεγαλύτερων κόκκων. Έτσι χάνεται η πλήρης επαφή κόκκου με κόκκο με αποτέλεσμα, η αντίσταση στη μόνιμη παραμόρφωση και η αντοχή να μειώνονται (σχήμα 9 Γ).



A) καθόλου λεπτόκοκκο B) απαιτούμενο λεπτόκοκκο Γ) υπερβολικό λεπτόκοκκο

**ΣΧΗΜΑ 9** : Οι τρεις φυσικές καταστάσεις μειγμάτων αδρανών (Molenaar, 2005).

Η κοκκομετρική διαβάθμιση των ασύνδετων υλικών οδοστρωσίας βάσεων και υποβάσεων πρέπει να βρίσκεται εντός των ορίων των εκάστοτε ισχυόντων

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

προδιαγραφών ώστε να επιτυγχάνεται η ορθή αποστράγγιση των υδάτων και να αποφεύγονται τα υψηλά ποσοστά υγρασίας εντός των στρώσεων αυτών. Ο Van Niekerk (2002) κατέληξε στο γεγονός ότι τα υλικά με μία ισορροπημένη κοκκομετρική διαβάθμιση αποδίδουν καλύτερα από τα ανομοιόμορφα διαβαθμισμένα υλικά. Πολλές μελέτες έχουν επίσης δείξει ότι η απόδοση των κοκκωδών υλικών επηρεάζεται σημαντικά από τις μορφολογικές ιδιότητες του αμμοχάλικου συμπεριλαμβανομένου του σχήματος των κόκκων και της υφής της επιφάνειάς τους. Είναι γενικά αποδεκτό ότι τα αδρανή με ίσες διαστάσεις, γωνιώδη σχήματα και τραχιές επιφάνειες αυξάνουν την αντοχή και την ανθεκτικότητα των βάσεων και υποβάσεων ενός οδοστρώματος (Barksdale & Itani, 1989 και Kuo et al., 1996).

### *Σχήμα και υφή κόκκου*

Το σχήμα ενός κόκκου διαχωρίζεται σε τρεις βασικές κλίμακες: στην σφαιρική μορφή, στα κύρια χαρακτηριστικά της επιφάνειας και στην επιφανειακή τραχύτητα. Κάθε κλίμακα αντικατοπτρίζει την ιστορία του σχηματισμού και συμμετέχει στον προσδιορισμό της συμπεριφορά της μάζας του εδάφους, από τους κόκκους έως την μηχανική απόκριση. Μπορούν να διαχωριστούν δύο γενικές ομάδες σε σχέση με το σχήμα των κόκκων: τα φυσικά αδρανή υλικά που εμφανίζουν γενικά στρογγυλεμένες ακμές και τα κονιορτοποιημένα αδρανή όπου οι ακμές των κόκκων μπορεί να είναι κοφτερές. Η διαφορά αυτή είναι πιο σημαντική για την μόνιμη παραμόρφωση. Τα θρυμματισμένα υλικά είναι πιθανό να έχουν μεγαλύτερη τριβή μεταξύ των κόκκων και άρα υψηλή αντίσταση σε μόνιμη παραμόρφωση σε σχέση με τα φυσικά αδρανή, ιδιαίτερα σε υψηλές καταπονήσεις. Οι Hicks και Monismith (1971) ανέφεραν ότι το ελαστικό μέτρο  $M_r$  ήταν υψηλότερο για ένα θρυμματισμένο υλικό από ότι για ένα μερικώς θρυμματισμένο υλικό, ανεξάρτητα από την κοκκομετρική διαβάθμιση. Οι Allen και Thompson (1974) διαπίστωσαν ότι το ελαστικό μέτρο ήταν υψηλότερο για θραυστό πέτρωμα από ότι για χαλίκι σε ένα καλά διαβαθμισμένο υλικό. Οι Barksdale και Itani (1989) σημειώνουν ότι το χαλίκι ήταν περισσότερο από δύο φορές πιο ευαίσθητο σε αυλακώσεις από τα θραυστά αδρανή. Άλλοι ερευνητές

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

καταλήγουν στο γεγονός ότι το γωνιώδες των αδρανών έχει σημαντική επιρροή στο ελαστικό μέτρο.

Εργαστηριακές δοκιμές σε φυσικά αδρανή έδωσαν υψηλότερες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων από θρυμματισμένα υλικά που παρασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν σε περίπου ίδια επίπεδα πυκνότητας. Αυτό εξηγείται από την ικανότητα των στρογγυλευμένων κόκκων για καλύτερη ανακατανομή-αναδιάταξη σε πιο σταθερές δομές. Σε γενικές γραμμές, διαπιστώθηκε ότι οι στρογγυλευμένοι κόκκοι είναι σε θέση να γλιστρούν εύκολα, ενώ τα γωνιώδη αδρανή πρέπει να ξεπεράσουν υψηλότερες δυνάμεις τριβής στις επιφάνειες επαφής. Από αυτό συνάγεται το συμπέρασμα ότι η γωνία εσωτερικής τριβής και ως εκ τούτου η αντίσταση ενάντια στη μόνιμη παραμόρφωση, αυξάνει με την αύξηση του γωνιώδους.

### ➤ Ιδιότητες αμμοχάλικου

Εκτός από τις φυσικές ιδιότητες του υλικού, το έργο του Proctor (βλέπε παρακάτω) όπως αναφέρει ο Semmelink (1991) έδειξε ότι παράγοντες όπως το ποσοστό υγρασίας, το μέγεθος και ο τρόπος με τον οποίο εφαρμόζεται η συμπίκνωση, καθώς και η υποστήριξη του υποκείμενου υλικού κατά τη διάρκεια της διαδικασίας συμπίκνωσης είχαν όλα μια σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα που θα μπορούσαν να επιτευχθούν. Η ελαστική συμπεριφορά των ασύνδετων κοκκωδών υλικών έχει βρεθεί ότι είναι πολύ ευαίσθητη στο περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας, την πυκνότητα και το καθεστώς των τάσεων. Οι Rada και Witczak (1981) παρουσίασαν μια ολοκληρωμένη εκτίμηση των μεταβλητών που επηρεάζουν την απόκριση του ελαστικού μέτρου σε κοκκώδη υλικά.

### *Ποσοστό υγρασίας*

Το νερό μπορεί να εισχωρήσει στη δομή του οδοστρώματος με πολλούς τρόπους. Υπογείως ή επιφανειακά με την μορφή βροχής μέσω ρωγμών στην επιφάνεια των ασφαλτικών στρώσεων. Λόγω της πολικότητας του νερού, δηλαδή της ικανότητας των μορίων του να κινούνται σε οποιαδήποτε

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

κατεύθυνση, τα μόρια του έχουν την δυνατότητα να συνδυαστούν με τα ορυκτά συστατικά της επιφάνειας των κόκκων του αμμοχάλικου. Τα μόρια του νερού τείνουν επίσης να εισχωρήσουν στο εσωτερικό των πόρων των κόκκων μέσω των τριχοειδών δυνάμεων που αναπτύσσονται. Αυτό συμβαίνει αν οι πόροι είναι αρκετά μικροί κάτι το οποίο σχετίζεται με την κατανομή του υλικού στο μέγεθος του κόκκου και το ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού. Η κάλυψη της επιφάνειας των κόκκων με νερό επηρεάζει την διατμητική τους αντίσταση. Η ύπαρξη μέτριας ποσότητας υγρασίας ωφελεί την αντοχή και την παραμορφωσιακή συμπεριφορά των ασύνδετων υλικών. Κατά τον πλήρη κορεσμό, επαναλαμβανόμενες φορτίσεις οδηγούν στην ανάπτυξη θετικών πιέσεων πόρων. Η υπερβολική πίεση πόρων μειώνει την ενεργητική τάση, με αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής στην παραμόρφωση του υλικού. Έτσι, η υψηλή περιεκτικότητα σε νερό μέσα σε μια ασύνδετη στρώση προκαλεί μείωση της δυσκαμψίας και της αντοχής σε παραμόρφωση του στρώματος.

Πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει την επίδραση του νερού επί του ελαστικού μέτρου. Οι Hicks και Monismith (1971) ανέφεραν μια προφανή μείωση του ελαστικού μέτρου με την αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό. Οι Raad et al. (1992) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η επίδραση του νερού στις ελαστικές ιδιότητες είναι σημαντικότερη σε καλά διαβαθμισμένα υλικά με υψηλό ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού. Εκτελώντας μία εκτεταμένη εργαστηριακή έρευνα σε κοκκώδη υλικά βάσεων, ο Sweere (1990) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το ποσοστό υγρασίας διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην αντοχή ενός υλικού. Ακόμη, διαπίστωσε ότι η αντοχή ενός καλά διαβαθμισμένου υλικού εξαρτάται περισσότερο από την υγρασία από ότι ένα κακώς διαβαθμισμένο υλικό. Γενικά, η επίδραση του ύδατος επί της συμπεριφοράς κοκκωδών υλικών σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με την ποσότητα και φύση των λεπτόκοκκων σωματιδίων.

### *Πυκνότητα*

Η πυκνότητα της σκελετικής δομής ενός αμμοχάλικου αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες επιρροής της δυσκαμψίας και της αντίστασης σε μόνιμη παραμόρφωση. Ο Barksdale (1972) μελέτησε την επίδραση της πυκνότητας στην συμπεριφορά παραμόρφωσης κοκκωδών μειγμάτων



## **Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

χρησιμοποιώντας την κυκλική τριαξονική δοκιμή. Παρατήρησε αύξηση της δυσκαμψίας και της αντίστασης σε μόνιμη παραμόρφωση καθώς αυξάνεται ο βαθμός συμπύκνωσης εκφρασμένος ως ποσοστό της μέγιστης ξηρής πυκνότητας κατά Proctor. Οι Hicks και Monismith (1971) αναφέρουν ότι η επίδραση της πυκνότητας στο ελαστικό μέτρο  $M_r$  είναι μεγαλύτερη για ένα μερικώς θρυμματισμένο υλικό από ότι σε ένα καλά θρυμματισμένο. Βρήκαν επίσης ότι η επίδραση της πυκνότητας μειώνεται καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο υλικό. Η αύξηση της ξηρής πυκνότητας αυξάνει την διατμητική αντοχή ενός υλικού (Thom & Brown, 1988 και Barksdale, 1991). Ένα υλικό που έχει υψηλή διατμητική αντοχή είναι πιο δύσκολο να συμπυκνωθεί, καθώς πρέπει να αντισταθεί στις διατμητικές τάσεις που προκαλούνται από τη συμπίεση.

Ο Van Niekerk (2002), ερεύνησε την επίδραση του βαθμού συμπύκνωσης στο ελαστικό μέτρο και στην αντίσταση σε ανάπτυξη μόνιμης παραμόρφωσης σε ανακυκλωμένα κοκκώδη μείγματα (RAP) για τρεις διαφορετικές κοκκομετρικές διαβαθμίσεις. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το ελαστικό μέτρο, γενικώς, αυξάνεται σημαντικά καθώς αυξάνεται ο βαθμός συμπύκνωσης. Επίσης συμπέρανε ότι ο ρυθμός της αύξησης αυτής σχετίζεται και με την κοκκομετρική διαβάθμιση. Μελέτη του Uthus (2007) έδειξε ότι ένα καλά διαβαθμισμένο υλικό επηρεάζεται κυρίως από την ξηρή πυκνότητα μέχρι ενός συγκεκριμένου επιπέδου περιεκτικότητας σε λεπτόκοκκο υλικό. Η ξηρή πυκνότητα ενός μείγματος με σχετικά υψηλό ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού είναι σημαντική υπό ξηρές συνθήκες αλλά καθώς το ποσοστό σε λεπτόκοκκο υλικό αυξάνεται, η επιρροή του ποσοστού υγρασίας υπερिशύχει έναντι της επίδρασης της ξηρής πυκνότητας. Για ίσες ξηρές πυκνότητες τόσο η ελαστική όσο και η μόνιμη παραμόρφωση αυξάνονται καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο υλικό. Ως εκ τούτου, υψηλή περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο υλικό δίνει ένα κατώτατο ελαστικό μέτρο καθώς και μία κατώτατη διατμητική αντοχή, εξαρτώμενα από το περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας.

Η μηχανική συμπεριφορά μίας αδέσμευτης κοκκώδους στρώσεως ενός οδοστρώματος είναι πολυσύνθετη. Ένα κοκκώδες στρώμα δεν αποτελεί συνεχές μέσο. Η απόκριση ενός στοιχείου του κοκκώδους υλικού σε ένα οδόστρωμα

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

εξαρτάται από το ιστορικό των φορτίσεων και την τρέχουσα εντατική κατάσταση σε συνδυασμό με τον βαθμό κορεσμού και την πυκνότητα.

### *Καθεστώς τάσεων-stress level*

Η απόκριση ενός υλικού σε κυκλική φόρτιση εξαρτάται πολύ από το τασικό πεδίο. Οι Hicks και Monismith (1971) ανέφεραν ότι το επίπεδο των τάσεων έχει την σημαντικότερη επιρροή στο ελαστικό μέτρο  $M_r$ . Βρήκαν ότι σε όλες τις περιπτώσεις το ελαστικό μέτρο αυξάνεται σημαντικά καθώς αυξάνεται η πλευρική πίεση, ενώ αυξάνεται ελαφρώς με αύξηση της αξονικής τάσης. Οι Allen και Thompson (1974) σε δοκιμές που πραγματοποίησαν, επίσης διαπίστωσαν ότι η μεταβλητή που επηρέαζε το ελαστικό μέτρο περισσότερο από τις υπόλοιπες ήταν η εφαρμοζόμενη εντατική κατάσταση.

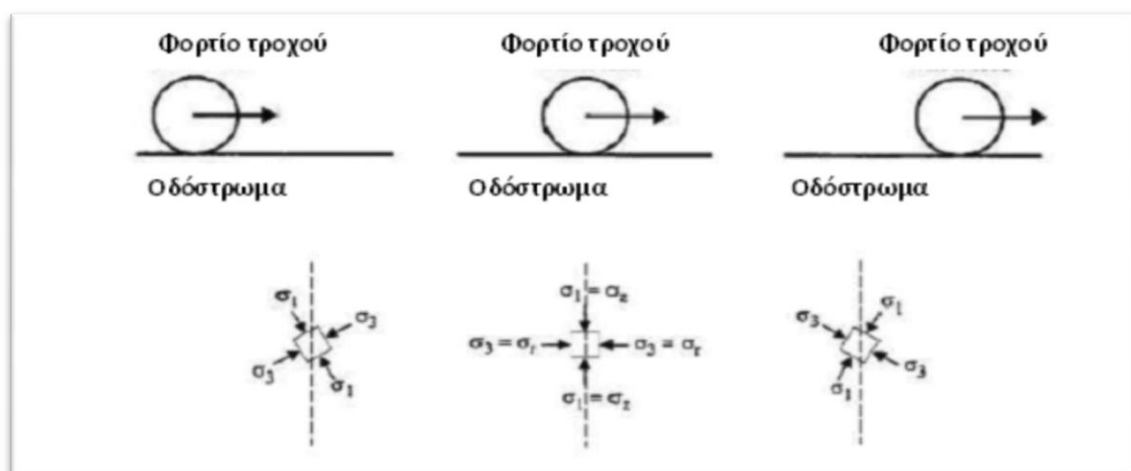
Ο Uthus (2007) διαπίστωσε ως γενικό συμπέρασμα ότι το ελαστικό μέτρο και η αντίσταση σε μόνιμη παραμόρφωση αυξάνονται, αυξανόμενης της μέσης πίεσης και της πλευρικής πίεσης. Η δυσκαμψία και η αντοχή του υλικού εξαρτάται περισσότερο από την πλευρική πίεση και λιγότερο από την παρεκκλίνουσα τάση. Βρήκε ότι είναι λογικό, το ελαστικό μέτρο να ερμηνευθεί ως συνάρτηση της μέσης τάσης καθώς η πλευρική πίεση είναι η κυρίαρχη παράμετρος, όταν χρησιμοποιείται η μέση τάση. Οι μέθοδοι αυτές που αναφέρονται παραπάνω ισχύουν για σχετικά χαμηλά επίπεδα φόρτισης. Ωστόσο, ο Van Niekerk (2002) έχει ταξινομήσει το καθεστώς φόρτισης σε «ήπιο» και «έντονο» και παρατήρησε ότι η ελαστική συμπεριφορά παραμόρφωσης είναι αισθητά επηρεασμένη από την ένταση της φόρτισης. Για το ανακυκλωμένο μείγμα υλικού που χρησιμοποίησε στις δοκιμές του παρατήρησε ότι οι δεσμοί μεταξύ των κόκκων του υλικού ήταν περισσότερο κατεστραμμένοι υπό έντονη φόρτιση.

### **2.4.2 Κατανομή τάσεων κάτω από το φορτίο ενός τροχού κατά την κατεύθυνση της κυκλοφορίας**

Η κατανομή τάσεων που επιφέρει στο οδόστρωμα η κίνηση του φορτίου τροχού είναι αρκετά σύνθετη. Το σχήμα 10 απεικονίζει ένα στοιχείο της δομής του

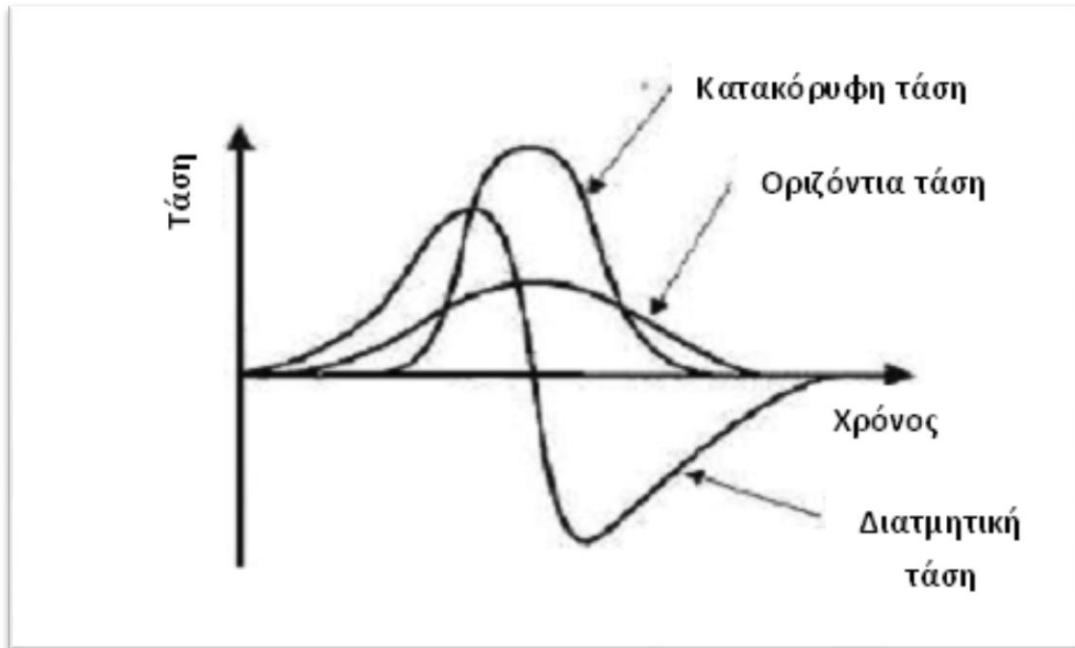
## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

οδοστρώματος το οποίο υποβάλλεται σε τασικό πεδίο αποτελούμενο από κατακόρυφη, οριζόντια και διατμητική τάση. Στα ασύνδετα στρώματα βάσης και υπόβασης οι κατακόρυφες και οι οριζόντιες τάσεις είναι θετικές ενώ η διατμητική τάση αντιστρέφεται κατά το πέρασμα του φορτίου, προκαλώντας έτσι περιστροφή των αξόνων των κυρίων τάσεων. Ο Chan (1990) απέδειξε ότι η περιστροφή των αξόνων των κύριων τάσεων δεν έχει σημαντική επίδραση στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης των κοκκωδών υλικών οδοστρώματος για μια δεδομένη εφαρμοζόμενη τάση. Ωστόσο, το φαινόμενο αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία στη μόνιμη παραμόρφωση των υλικών.



**ΣΧΗΜΑ 10:** Τάσεις που αναπτύσσονται κάτω από το φορτίο ενός τροχού κατά την κατεύθυνση της κυκλοφορίας και περιστροφή των κύριων τάσεων (Acikgoz και Rauf, 2010).

Το διάγραμμα του σχήματος 11 υποδηλώνει πως οι κατακόρυφες και οι οριζόντιες τάσεις μεταβάλλονται κατά παρόμοιο τρόπο με τη διαφορά ότι το κύμα φορτίσεως για τις οριζόντιες τάσεις είναι μεγαλύτερο και με μικρότερη ένταση από το κύμα των κατακόρυφων τάσεων (και συνήθως παρουσιάζει τάσεις εφελκυσμού στο κάτω μέρος των δύσκαμπτων στρώσεων). Επίσης, η διατμητική τάση παρουσιάζει μια αντιστροφή πρόσημου (θλίψη-εφελκυσμός) στο σημείο όπου ο τροχός διέρχεται πάνω από το σημείο (Λοΐζος, 2008).



**ΣΧΗΜΑ 11:** Τάσεις που αναπτύσσονται σε ένα τυχαίο σημείο κατά τη διάρκεια της διελεύσεως φορτίου (Acikgoz και Rauf, 2010).

#### 2.4.3 Χαρακτηρισμός των ασύνδετων υλικών οδοστρώσις.

Ο χαρακτηρισμός των υλικών οδοστρώσις αποτελεί κύρια απαίτηση κατά τον εργαστηριακό έλεγχο της επιτόπιας επιτυγχανόμενης ποιότητας. Για την μηχανιστική-εμπειρική διαδικασία σχεδιασμού ο στόχος χαρακτηρισμού συνεπάγεται τη συγκέντρωση των ιδιοτήτων των υλικών που προσδιορίζουν την απόκριση τους σε εξωτερικά ερεθίσματα-φορτία και στις περιβαλλοντικές συνθήκες.

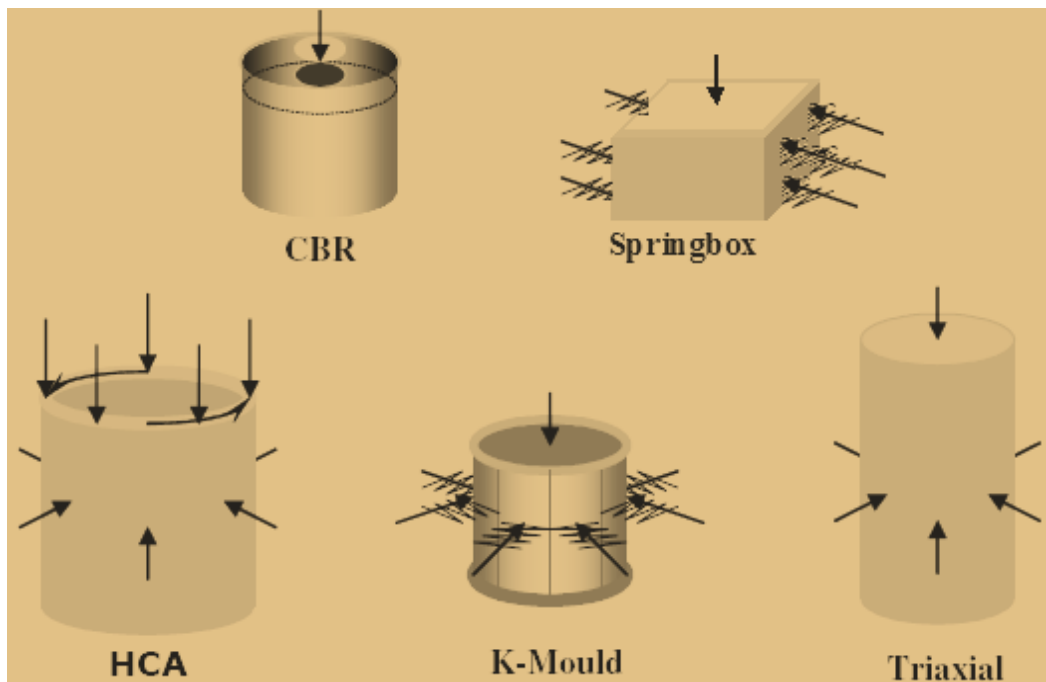
Το φορτίο κυκλοφορίας που καλείται να παραλάβει ένα οδόστρωμα αποτελείται από δύο κύρια συστατικά, την δύναμη-τάση που εφαρμόζεται και τον αριθμό των επαναλήψεων αυτής. Για τις ανάγκες σχεδιασμού τα δύο αυτά σκέλη συνήθως απλοποιούνται σε έναν αριθμό περασμάτων ενός προτύπου φορτίου άξονα εκφρασμένου σε μονάδες ισοδύναμου άξονα. Ωστόσο τα πραγματικά φορτία σε ένα οδόστρωμα είναι αρκετά πολυπλοκότερα, καθώς η διάρκεια, η συχνότητα και το μέγεθος της εφαρμοζόμενης τάσης μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος (Edwards, 2007)

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

Παρακάτω θα αναφερθούν ορισμένες εργαστηριακές δοκιμές που προσπαθούν να αναπαράγουν τη θεμελιώδη εντατική κατάσταση που επικρατεί σε ένα οδόστρωμα υπό την φόρτιση ενός κινούμενου τροχού-φορτίου με σκοπό την εκτίμηση των ιδιοτήτων των ασύνδετων υλικών οδοστρώσεως.

### 2.4.3.1 Εργαστηριακές τεχνικές

Ένας μεγάλος αριθμός εργαστηριακών δοκιμών χρησιμοποιείται στις μέρες μας για την διερεύνηση της συμπύκνωσης, της φέρουσας ικανότητας και της διαβάθμισης των ασύνδετων κοκκωδών υλικών. Οι περισσότερες από αυτές είναι δοκιμές επί συγκεκριμένων δεικτών, που αναπτύχθηκαν για την παροχή εισροών-δεδομένων στις εμπειρικές διαδικασίες σχεδιασμού οδοστρωμάτων ή για να παρέχουν ένα μέσο για την ποιοτική σύγκριση με διαφορετικά υλικά. Ωστόσο, προτιμάται η άμεση μέτρηση των ιδιοτήτων αυτών επί τόπου.



**ΣΧΗΜΑ 12:** Εργαστηριακές δοκιμές και καθεστώς τάσεων (Thom et al., 2005).

➤ **Ανα-κυκλική τριαξονική δοκιμή (επαναλαμβανόμενης φόρτισης)**

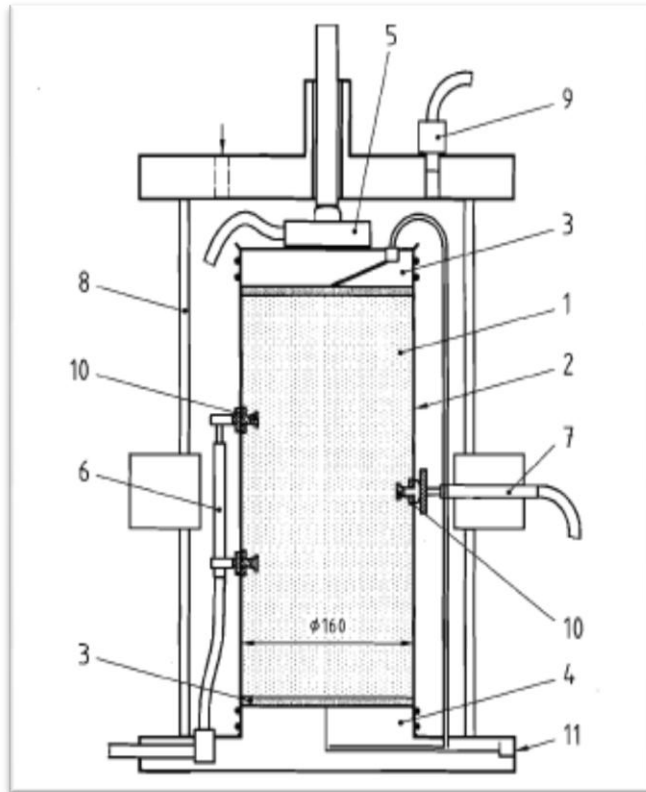
Αναπτύχθηκε αρχικά για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων κατά την αστοχία δηλαδή την γωνία εσωτερικής τριβής και την συνοχή κυρίως για θέματα γεωτεχνικής μηχανικής, παρόλο που δεν καταλήγει απαραίτητα σε ικανοποιητική ένδειξη της απόδοσης του εδάφους υπό συνεχόμενες συνθήκες φόρτισης (Seed et al., 1955). Επιπροσθέτως, οι πραγματικές συνθήκες φόρτισης που δέχονται οι κοκκώδεις στρώσεις είναι πιθανό να βρίσκονται πολύ κάτω από αυτές για τις οποίες θα αστοχούσαν. Ως εκ τούτου, η πρότυπη τριαξονική δοκιμή απαιτεί σημαντικές προσαρμογές ώστε να προσομοιωθεί ο μεγάλος αριθμός των επαναλαμβανόμενων φορτίσεων που εφαρμόζονται στο οδόστρωμα. Οι περισσότερες τριαξονικές συσκευές δέχονται διάμετρο δείγματος έως 150 mm κάτι το οποίο αποδείχθηκε ότι δεν επαρκεί για τα κοκκώδη υλικά των (υπο)βάσεων διότι περιορίζεται ο μέγιστος αριθμός διαβάθμισης των κόκκων και άρα η πραγματικές τους ιδιότητες (Araya, 2011).

Η τριαξονική δοκιμή χρησιμοποιείται κυρίως για τον καθορισμό ενός αριθμού παραμέτρων. Από την μονοτονική φόρτιση μπορεί να καθορισθεί η γωνία εσωτερικής τριβής και η συνοχή ενώ από την δοκιμή επαναλαμβανόμενης φόρτισης μπορούν να υπολογιστούν οι παράμετροι της ελαστικής και μόνιμης παραμόρφωσης. Για να μπορούν να μετρηθούν με ακρίβεια οι παραμορφώσεις η συσκευή της δοκιμής είναι εξοπλισμένη με κατάλληλα μηκυνσιόμετρα όπως φαίνεται και στο σχήμα 13.

Αναφέρθηκε προηγουμένως ότι τα ασύνδετα κοκκώδη υλικά είναι κυρίως εξαρτώμενα από το τασικό πεδίο. Για το λόγο αυτό οι παράμετροι των ελαστικών παραμορφώσεων όπως το ελαστικό μέτρο  $M_T$  πρέπει να καθορίζονται για διάφορα επίπεδα τάσεων για κάθε υλικό που εξετάζεται και αυτά τα ελαστικά χαρακτηριστικά δεν επηρεάζονται από το ιστορικό των φορτίσεων. Επομένως απαιτούνται πολλές δοκιμές στο ίδιο δοκίμιο για τον καθορισμό των ελαστικών παραμέτρων υπό την προϋπόθεση ότι οι εφαρμοζόμενες τάσεις διατηρούνται σε χαμηλό επίπεδο ώστε να αποφεύγονται ουσιώδης μόνιμες παραμορφώσεις του δοκιμίου.

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

Αντιθέτως, οι μόνιμες παραμορφώσεις των ασύνδετων υλικών επηρεάζονται σημαντικά από το ιστορικό των φορτίσεων. Άρα η δοκιμή πρέπει να επαναλαμβάνεται σε διαφορετικά δοκίμια κάθε φορά ώστε να βρεθεί η σχέση που συνδέει την επιβαλλόμενη τάση και την μόνιμη παραμόρφωση.



1. δοκίμιο
2. προστατευτική μεμβράνη
3. κάλυμμα
4. βάση δοκιμίου
5. δυναμοκυψέλη
6. αξονικό μηκυνσιόμετρο
7. ακτινικό μηκυνσιόμετρο
8. τοίχωμα κελιού
9. εισαγωγέας πλευρικής πίεσης
10. ειδικό καρφί συγκράτησης
11. σύστημα αποστράγγισης

**ΣΧΗΜΑ 13:** Σκαρίφημα της συσκευής τριαξονικής δοκιμής (CEN, 2004).

Τριαξονική δοκιμή με σταθερή πλευρική πίεση περιορισμού (CCP-constant confining pressure) και με μεταβλητή πλευρική πίεση περιορισμού (VCP-variable).

Η πλευρική πίεση που εφαρμόζεται σε ένα στοιχείο του υλικό κάτω από το οδόστρωμα αυξάνει σταδιακά καθώς το όχημα πλησιάζει και στη συνέχεια μειώνεται καθώς το όχημα απομακρύνεται. Στις δοκιμές τύπου CCP, είναι δυνατό να εφαρμοσθεί μόνο ένα σταθερό μονοπάτι τάσεων. Η δοκιμή τύπου VCP δίνει τη δυνατότητα να εφαρμοσθεί ένας ευρύς συνδυασμός διαδρομών τάσεων με εφαρμογή μίας κυκλικής πλευρικής πίεσης και μίας κυκλικής κατακόρυφης παρεκκλίνουσας τάσης. Τέτοιου είδους μονοπάτια φορτίσεων

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

δοκιμών προσομοιώνουν καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες πεδίου, δεδομένου ότι σε ένα οδόστρωμα οι πλευρικές πιέσεις που ασκούνται στα ασύνδετα υλικά είναι κυκλικής φύσεως. Η τριαξονική δοκιμή τύπου VCP θεωρείται ως μια πιο προσεκτική προσομοίωση της πραγματικότητας. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα και των δύο μεθόδων δοκιμών είναι ότι μόνο οι κανονικές κύριες τάσεις μπορούν να εφαρμοσθούν πειραματικά. Οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται κάτω από ένα κινούμενο φορτίο τροχού δεν μπορούν να εφαρμοσθούν, σε αντίθεση με την τριαξονική δοκιμή κοίλου κυλίνδρου (CEN, 2004).

### Πλεονεκτήματα και περιορισμοί της χρήσης της κυκλικής τριαξονικής δοκιμής σε ασύνδετα κοκκώδη υλικά.

Μερικά από τα κύρια πλεονεκτήματα είναι:

- ευέλικτες εφαρμογές φορτίου (πλάτος, συχνότητα, αριθμός των παλμών)
- ελεγχόμενη πλευρική πίεση περιορισμού (μεταβλητή ή σταθερή)
- ακριβής αξονική και ακτινική μέτρηση παραμόρφωσης (μόνιμη και ελαστική)
- τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα σε προηγμένα μοντέλα υλικών για την πρόβλεψη της απόδοσης της δομής του οδοστρώματος

Η μέθοδος έχει επίσης κάποια μειονεκτήματα. Τα πιο σημαντικά είναι τα εξής:

- αδυναμία προσομοίωσης της συνεχούς περιστροφής της κατεύθυνσης των αξόνων των κυρίων τάσεων
- η πλευρική περιοριστική πίεση υποβάλλεται από ελεγχόμενο μηχανισμό αντίθετα με την πραγματική περιοριστική πίεση του πεδίου η οποία αναπτύσσεται ως αποτέλεσμα της αντίστασης του υλικού σε παραμόρφωση και επαναπροσανατολισμό
- αδυναμία ελέγχου αδιατάρακτων δοκιμών από το πεδίο
- το πραγματικό μέγεθος των αδρανών συχνά απαιτεί μεγάλα, μη πρακτικά δείγματα υλικού



## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

- δαπανηρή και χρονοβόρα (απαιτείται πολλή εργασία ανά δείγμα)
- ιδιαίτερα για τις αναπτυσσόμενες χώρες είναι τεχνικά πολύ περίπλοκη, και πολύ ακριβή ώστε να χρησιμοποιηθεί για τα συνήθη οδικά έργα.

### ➤ Απλή Δοκιμή CBR και δοκιμή CBR επαναλαμβανομένων φορτίσεων

#### Δοκιμή CBR-καλιφορνιακού λόγου φέρουσας ικανότητας

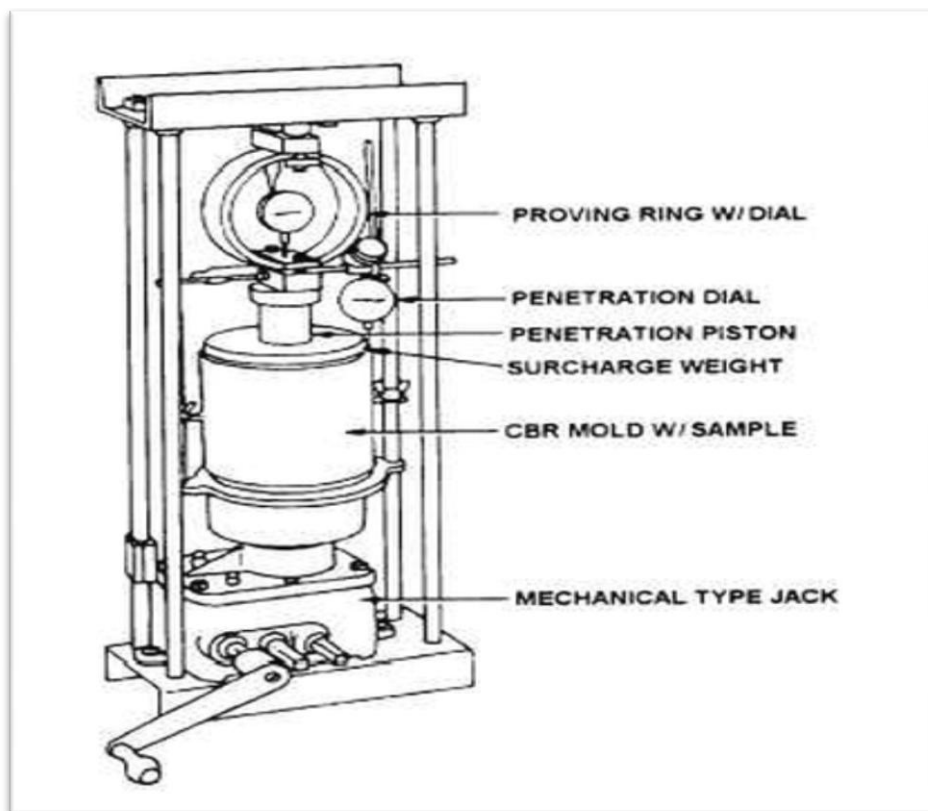
Η δοκιμή CBR χρησιμοποιείται ευρέως για την εμπειρική μέτρηση της ποιότητας των κοκκωδών υλικών οδοστρωσίας. Αναπτύχθηκε αρχικά έχοντας ως στόχο την εκτίμηση της αντοχής του υπεδάφους. Πλέον, η δοκιμή αυτή χρησιμοποιείται παγκοσμίως για μία προκαταρκτική μέτρηση της φέρουσας ικανότητας των εδαφών αλλά κυρίως των υλικών των στρώσεων βάσης και υπόβασης ενός οδοστρώματος. Η τιμή που προκύπτει από τη δοκιμή αποτελεί δεδομένο εισόδου σε πολλές μεθόδους σχεδιασμού οδοστρωμάτων όπως η μέθοδος AASHTO (1986, 1993). Πρόκειται για μία δοκιμή διείδυσης στην οποία ένα έμβολο με εμβαδόν διατομής  $1935 \text{ mm}^2$  (49,63 χιλιοστά διάμετρος) ωθείται με ένα σταθερό ρυθμό μετατόπισης 1,27 χιλιοστά/min μέσα σε ένα δείγμα που περιέχεται σε ένα κύλινδρο από χάλυβα με διάμετρο 152,4 χιλιοστά=6 ίντσες (σχήμα 14).

Αν και η εμπειρική γνώση είναι χτισμένη πάνω σε αυτή τη δοκιμή, αποτελεί, στην ουσία, μία δοκιμή αντοχής που δίνει πληροφορίες σχετικά με την διατμητική αντοχή του υλικού σε σχέση με τον βαθμό συμπύκνωσης και το περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας. Κατά την εκτέλεση της δοκιμής σε ασύνδετα κοκκώδη υλικά ανακύπτουν προβλήματα σχετικά με την αναλογία μεταξύ διαστάσεων καλουπιού δοκιμής και μεγίστου κόκκου του υπό εξέταση υλικού. Επιπλέον, το άκαμπτο καλούπι της δοκιμής επιβάλλει μία άγνωστη και ανεξέλεγκτη περιοριστική πλευρική πίεση στο δείγμα του υλικού. Για την αποφυγή των παραπάνω προβλημάτων οι προδιαγραφές ορθής εκτέλεσης της δοκιμής προτείνουν-επιβάλλουν την αφαίρεση του χονδρόκοκκου υλικού από το δείγμα. Στην περίπτωση υλικών με μεγάλο ποσοστό χονδρόκοκκων σωματιδίων

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

αυτή η αφαίρεση οδηγεί σε υποεκτίμηση και εσφαλμένη λήψη των μετρούμενων παραμέτρων.

Η δοκιμή CBR χρησιμοποιείται επίσης για την μέτρηση παραμέτρων δυσκαμψίας ενός υλικού και τα αποτελέσματα αποτελούν τιμές εισόδου σε πολλές αναλυτικές μεθόδους σχεδιασμού. Οι μέθοδοι αυτές χρειάζονται ως τιμές εισόδου τις θεμελιώδεις ιδιότητες ενός υλικού, όπως για παράδειγμα το μέτρο ελαστικότητας E. Το γεγονός αυτό οδήγησε στη δημιουργία πολλών εμπειρικών συσχετίσεων μεταξύ E και CBR. Ο Sweere (1990), ωστόσο, σημειώνει ότι η παραμόρφωση που πραγματοποιείται σε ένα δείγμα της δοκιμής CBR είναι συνδυασμός ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης. Από την στιγμή που αυτές οι δύο παραμορφώσεις δεν μπορούν να διαχωριστούν πλήρως κατά την εκτέλεση της δοκιμής και επειδή ο λόγος ελαστικής προς πλαστική παραμόρφωση μπορεί να διαφέρει από υλικό σε υλικό, η απλή δοκιμή CBR δεν είναι κατάλληλη για την μέτρηση των καθαρά ελαστικών παραμέτρων όπως το μέτρο ελαστικότητας.



**ΣΧΗΜΑ 14:** Σκαρίφημα της συσκευής CBR.

Δοκιμή επαναλαμβανόμενης φόρτισης CBR

Η εμπειρία φόρτισης κοκκωδών υλικών δείχνει ότι η παραμόρφωση αποτελείται δύο μέρη. Την ελαστική (ανακτιήσιμη) και την πλαστική (μόνιμη). Ύστερα από πολλαπλές επαναλήψεις φόρτισης του ίδιου μεγέθους, το υλικό έρχεται σε μια κατάσταση στην οποία σχεδόν όλες οι παραμορφώσεις είναι ανακτιήσιμες. Η αρχή λειτουργίας της επαναλαμβανόμενης δοκιμής φόρτισης CBR είναι παρόμοια με την απλή δοκιμή με μόνη διαφορά ότι στην πρώτη εφαρμόζονται επαναλαμβανόμενες φορτίσεις μέχρι να επιτευχθεί κατάσταση σταθεροποίησης. Το δείγμα της δοκιμής προετοιμάζεται σύμφωνα με τις εκάστοτε προδιαγραφές (AASHTO, EN) και στη συνέχεια πραγματοποιείται η διείδυση του εμβόλου. Μετά το δοκίμιο αποφορτίζεται (μηδενικό φορτίο) και στη συνέχεια επαναφορτίζεται μέχρι να επιτευχθεί η αρχική διείδυση. Αυτή η αλληλουχία εφαρμόζεται πολλές φορές μέχρις ότου η ελαστική παραμόρφωση φθάσει σε μια σταθερή τιμή. Κανονικά αυτό συμβαίνει μετά από 50 - 60 κύκλους φόρτισης. Έχουν αναπτυχθεί εμπειρικές εξισώσεις για την εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας E από την εφαρμοζόμενη τάση ( $\sigma_0$ ), τη μέση πίεση του εμβόλου, και της κατακόρυφης μετρούμενης ελαστικής παραμόρφωση ( $\nu$ ) κατά την τελευταία εφαρμογή του φορτίου.

Παρακάτω αναφέρονται ενδεικτικά ορισμένες εργαστηριακές δοκιμές που αναπτύχθηκαν για τον προσδιορισμό ελαστικών και διατμητικών παραμέτρων των υλικών οδοστρωσίας.

- Δοκιμή K-mould (Sammelink, 1991)
- Δοκιμή σταμπιλομέτρου Hveem (Hveem & Davis, 1949)
- Δοκιμή Springbox (Edwards, 2007)

## **2.5 Χρησιμοποιούμενα υλικά οδοστρωσίας.**

### **2.5.1 Αδρανή υλικά-Γενικές πληροφορίες**

Τα αδρανή υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή εύκαμπτων οδοστρωμάτων προέρχονται κυρίως από τη θραύση κατάλληλων πετρωμάτων

## **Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

ή από φυσικές αποθέσεις ποταμών και χειμάρρων ή από ορυχεία με ή χωρίς θραύση (Λοΐζος, 2013). Τα αδρανή υλικά που χρησιμοποιούνται μπορεί να προέρχονται και από σκωρίες, ή από απορρίμματα ορυχείων, ή και από υλικά κατεδαφίσεων, εφ' όσον πληρούνται οι απαιτούμενες μηχανικές και φυσικές ιδιότητες. Επίσης, ως αδρανή υλικά χρησιμοποιούνται και τεχνητά αδρανή, ή κονιορτοποιημένα υλικά παλαιών οδοστρωμάτων κατασκευασμένων από ασφαλτόμιγμα ή από σκυρόδεμα (προϊόντα ανακύκλωσης). Οι σκωρίες (slags), είναι παραπροϊόντα που παράγονται κατά η διαδικασία παραγωγής μετάλλων, όπως σιδήρου, νικελίου και άλλων. Ο τύπος των σκωριών που παράγονται ποικίλλουν ως προς τη χημική σύσταση, το ειδικό βάρος και το πορώδες. Η χρήση των σκωριών στην οδοποιία περιορίζεται συνήθως σε έργα που γίνονται κοντά στα εργοστάσια παραγωγής. Οι σκωρίες χρησιμοποιούνται κυρίως ως υποκατάστατο των αδρανών και σε ελάχιστες περιπτώσεις ως υποκατάστατο της παιπάλης (φίλλερ). Τα απορρίμματα ορυχείων είναι πετρώματα με μικρή περιεκτικότητα σε μέταλλευμα που απορρίπτονται κατά τη διαδικασία εμπλουτισμού. Τα υπολείμματα κατεδαφίσεως χρησιμοποιούνται όπως και τα απορρίμματα ορυχείων σε στρώσεις υποβάσεων ή βάσεων, αφού γίνει κάποια προεπιλογή και θραύση. Τεχνητά αδρανή, παράγονται κυρίως από τη διαπύρωση πετρωμάτων όπως ο βωξίτης και ο σχιστόλιθος. Τα κονιορτοποιημένα υλικά παλαιών οδοστρωμάτων (RAP), προέρχονται από την ανακατασκευή παλαιών οδοστρωμάτων μετά από προεπιλογή και θραύση, χαρακτηρίζονται ως ανακυκλωμένα υλικά και χρησιμοποιούνται κυρίως σε υποβάσεις και βάσεις.

### **2.5.1.1 Αδρανή υλικά φυσικών αποθέσεων-συλλεκτά**

Τα υλικά φυσικών αποθέσεων είναι τα γνωστά χαλίκια, τα αμμοχάλικα ή η φυσική άμμος, που βρίσκονται σε ελαφρώς σταθεροποιημένη μορφή στις παλαιές κοίτες ή όχθες χειμάρρων, στα υψίπεδα που δημιουργήθηκαν κατά τη μετά-παγετώνια περίοδο (postglacial), στις εκβολές ποταμών ή χειμάρρων ή σε παραλίες. Τα υλικά φυσικών αποθέσεων χρησιμοποιήθηκαν και χρησιμοποιούνται ευρέως ως υλικά υποβάσεων οδοστρωμάτων. Μπορούν

## **Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

επίσης να χρησιμοποιηθούν και για την παραγωγή ασφαλομιγμάτων αφού προηγουμένως απαλλαγούν (με προκοσκίνισμα και πλύση) από το χώμα ή την ιλύ που πιθανόν περιέχουν και κατόπιν θραυστούν ώστε να αποκτήσουν την επιθυμητή κοκκομετρική διαβάθμιση. Τα υλικά φυσικών αποθέσεων είναι χαλαρά γι' αυτό εξορύσσονται με τη βοήθεια εκσκαφέα ή ισχυρού φορτωτή. Αποτελούν μείγμα διαφόρων πετρωμάτων κυρίως ασβεστολιθικών, ψαμμιτικών και γρανιτικών. Λόγω αυτής ακριβώς της σύνθεσής τους τα θραυστά χαλίκια έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από αυτές των ασβεστολιθικών πετρωμάτων.

### 2.5.1.2 Θραυστά αδρανή πετρωμάτων

Τα θραυστά αδρανή παράγονται σε λατομεία από διάφορα πετρώματα με κατάλληλες μηχανικές και χημικές ιδιότητες. Τα πετρώματα κατατάσσονται σε τρεις γενικές κατηγορίες.

Τα πυριγενή, τα ιζηματογενή και τα μεταμορφωσιγενή. Τα πυριγενή πετρώματα είναι τα πετρώματα που σχηματίστηκαν από την ψύξη τετηγμένων υλικών. Ανάλογα με την ταχύτητα ψύξης στην οποία υποβλήθηκαν χαρακτηρίζονται ως χονδρόκοκκης υφής, όπως τα γρανιτικά πετρώματα (αργή ψύξη) ή λεπτόκοκκης υφής, όπως ο βασάλτης (γρηγορότερη ψύξη). Τα ιζηματογενή πετρώματα σχηματίστηκαν από τη στερεοποίηση ιζημάτων που εναποτέθηκαν στον πυθμένα προϊστορικών θαλασσών. Τυπικά ιζηματογενή πετρώματα είναι ο ασβεστόλιθος, ο δολομίτης, ο αργιλικός σχιστόλιθος, ο ψαμμόλιθος, ο γύψος, ο κρυπτοκρυσταλλικός χαλαζίας και άλλα. Τα μεταμορφωσιγενή πετρώματα είναι πυριγενή ή ιζηματογενή πετρώματα που μεταμορφώθηκαν κάτω από υψηλή θερμοκρασία και πίεση. Τέτοια πετρώματα είναι ο αργιλικός σχιστόλιθος, το μάρμαρο από ασβεστόλιθο, ο χαλαζίτης από ψαμμόλιθο και ο γνεύσιος από γρανίτη. Τα περισσότερα πυριγενή και ορισμένα μεταμορφωσιγενή πετρώματα είναι συνήθως πολύ σκληρά πετρώματα από τα οποία εξάγονται άριστης ποιότητας θραυστά αδρανή για όλες τις στρώσεις των οδοστρωμάτων και ιδιαίτερα για τους τάπητες κυκλοφορίας. Από τα πλέον γνωστά ιζηματογενή πετρώματα είναι αυτά του ασβεστόλιθου και του δολομίτη, από τα οποία

## **Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

εξάγονται θραυστά αδρανή κατώτερης των πυριγενών ποιότητας που όμως είναι αποδεκτά για χρήση στην οδοστρωσία. Για την κατασκευή των βάσεων από ασύνδετα υλικά χρησιμοποιούνται κατ' αποκλειστικότητα θραυστά αδρανή υλικά.

### 2.5.1.3 Διαχωρισμός αδρανών

Το σύνολο των αδρανών υλικών διακρίνεται σε χονδρόκοκκο υλικό, λεπτόκοκκο υλικό και παιπάλη ή αλλιώς φύλλερ. Ως χονδρόκοκκο αδρανές ορίζεται αυτό του οποίου οι κόκκοι συγκρατούνται στο κόσκινο των 4.75 mm (κόσκινο No 4) κατά τις Αμερικανικές προδιαγραφές AASHTO ή ASTM. Ως λεπτόκοκκο αδρανές ορίζεται αυτό του οποίου οι κόκκοι διέρχονται από το κόσκινο των 4.75 mm ή 5.0 mm, ανάλογα με τις ισχύουσες προδιαγραφές και συγκρατούνται στο κόσκινο των 75 μm (κόσκινο No 200). Το λεπτόκοκκο υλικό του αδρανούς έχει κοινώς διαστάσεις άμμου. Ως παιπάλη ή φύλλερ ορίζεται το αδρανές υλικό που διέρχεται από το κόσκινο των 75 μm (κόσκινο No 200), έχει δηλαδή μορφή σκόνης.

### 2.5.1.4 Αμμοχάλικο 3Α-Υλικό οδοστρωσίας

Το αμμοχάλικο 3Α είναι θραυστό υλικό οδοστρωσίας και παράγεται από μηχανική κατεργασία και θραύση ασβεστόλιθου στο λατομείο και στη συνέχεια γίνεται διαχωρισμός με κόσκινα. Η ονομασία του προέρχεται από το κόσκινο που χρησιμοποιείται. Το κόσκινο που χρησιμοποιείται είναι 3" με Α διαβάθμιση, δηλαδή το υλικό αποτελείται από μέγιστο κόκκο που διέρχεται από το αναφερθέν κόσκινο. Η διαβάθμιση του είναι: 0 έως 31,5 mm. Η κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού εναρμονίζεται με τις Πρότυπες Τεχνικές Προδιαγραφές Οδοστρωσίας, Π.Τ.Π.Ο 155 για βάσεις οδοστρωμάτων και Π.Τ.Π.Ο 150 για υποβάσεις οδοστρωμάτων. Χρησιμοποιείται ως υλικό οδοστρωσίας και σε σταθεροποιημένα με υδραυλικές κονίες υλικά σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 13242 το οποίο αποτελεί το αντίστοιχο ευρωπαϊκό πρότυπο.

2.5.1.5 Ανακυκλωμένα υλικά οδοστρωσίας – RAP (Horpe et al., 2015)

Με την πάροδο των χρόνων, το αυξανόμενο κόστος κατασκευής και συντήρησης των οδοστρωμάτων είχε ως αποτέλεσμα την επιτακτική χρήση της ανακύκλωσης υλικών. Οι κυριότεροι παράγοντες που κατέστησαν την ανακύκλωση αναγκαία είναι η μείωση των κατασκευαστικών αποβλήτων, η διατήρηση όσο το δυνατόν των μη ανανεώσιμων φυσικών πόρων και τα χαμηλότερα κόστη, τόσο ως προς τα χρηματικά κεφάλαια όσο ως προς και το θέμα της ενέργειας. Εξίσου σημαντικοί είναι οι παράγοντες της δυνατότητας ολοκλήρωσης σε μικρότερο χρονικό διάστημα άρα λιγότερη ταλαιπωρία του επιβατικού κοινού και η προστασία του περιβάλλοντος. Έτσι η ανακύκλωση των ασφαλικών οδοστρωμάτων αποτέλεσε και αποτελεί στόχο της αειφόρου ανάπτυξης.

Τα υπάρχοντα ασφατικά υλικά των οδοστρωμάτων συνήθως αφαιρούνται κατά τις διαδικασίες αποκατάστασης ή ανακατασκευής ενός οδικού τμήματος. Μόλις αυτό το υλικό αφαιρεθεί και επεξεργαστεί μετατρέπεται στο λεγόμενο κονιορτοποιημένο υλικό κατασκευασμένο από ασφαλτόμιγμα ή αλλιώς RAP (Reclaimed Asphalt Pavement). Το RAP εμπεριέχει σημαντικό ποσοστό ασφάλτου και αδρανών. Χρησιμοποιείται συνήθως στην διάστρωση ανακυκλωμένου ασφατικού οδοστρώματος μαζί με την προσθήκη νέων υλικών αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν ασύνδετο κοκκώδες υλικό της βάσης και της υπόβασης ενός οδοστρώματος ή ως σταθεροποιητικό υλικό των βάσεων. Το RAP αποτελεί πολύτιμο υλικό, υψηλής ποιότητας και μπορεί να αντικαταστήσει επάξια τα αδρανή και την ασφαλτο. Οι ιδιότητες του RAP εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα υπάρχοντα συστατικά του. Μπορεί να υπάρξει σημαντική διακύμανση μεταξύ των υφισταμένων επί τόπου μειγμάτων ανάλογα με τον τύπο, την ποιότητα και το μέγεθος του αδρανούς, τη συνοχή του μείγματος και το περιεχόμενο ποσοστό της ασφάλτου. Εξαιτίας της κυκλοφοριακής φόρτισης και της μεθόδου επεξεργασίας (άλεσμα), το RAP είναι λεπτότερο από το αρχικό μέγεθος του αδρανούς. Το τελικό προϊόν ελέγχεται για να διασφαλιστεί ότι πληρεί την απαιτούμενη κοκκομετρική διαβάθμιση και ποιότητα και στην συνέχεια αναμειγνύεται με φρέσκα αδρανή και ασφαλτο, αν απαιτείται.

## **Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

Το ποσοστό του RAP που επιτρέπεται για οδούς χαμηλής κυκλοφορίας αυξήθηκε από 25 τοις εκατό σε 30 τοις εκατό. Για τη βάση και την υπόβαση επιτρέπεται έως και πάνω από 50 τοις εκατό ποσοστό σε RAP ενώ για τις επιφανειακές στρώσεις, το ποσοστό που επιτρέπεται κυμαίνεται από 10 τοις εκατό έως 15 τοις εκατό για όλες, εκτός τις οδούς υψηλής κυκλοφορίας (Horpe et al., 2015).

### **2.5.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης του αμμοχάλικου ως υλικού βάσεων και υποβάσεων (Dawson, 2003).**

Τα πλεονεκτήματα χρήσης αμμοχάλικου στις ασύνδετες στρώσεις ενός οδοστρώματος συνοψίζονται παρακάτω:

- Είναι φθηνό ως προς την απόκτηση και τη χρήση, αν και η τιμή της καλύτερης ποιότητας υλικού συχνά θα είναι ευαίσθητη στα έξοδα μεταφοράς.
- Στις περισσότερες περιοχές τα αμμοχάλικα είναι άμεσα διαθέσιμα, με εξαίρεση τις μητροπολιτικές περιοχές όπου απαιτείται μεταφορά των υλικών στο εργοτάξιο εξαιτίας των δυσκολιών απόκτησης άδειας λατόμευσης κοντά σε κατοικημένες περιοχές.
- Τα αμμοχάλικα είναι εύκολο να τοποθετηθούν και να συμπυκνωθούν. Τα επίπεδα υγρασίας ελέγχονται εντός των επιτρεπτών ορίων, μικρό ποσοστό του υλικού θα αντιμετωπίσει προβλήματα διάβρωσης. Οι δονητικοί κύλινδροι και οι διαστρωτήρες είναι τα πιο πολύπλοκα μηχανήματα που απαιτούνται.
- Τα αμμοχάλικα είναι ένα πολύ ανθεκτικό υλικό και δεν είναι ευαίσθητα στην κακή χρήση. Η ανεπαρκής συμπύκνωση και η διάβρωση δεν θα προκαλέσουν άμεση αποτυχία μιας βάσης οδοστρώματος, ακόμα και αν μειωθεί η απόδοσή τους.

Τα μειονεκτήματα χρήσης αμμοχάλικου συνοψίζονται παρακάτω:



## **Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

- Η αναγκαιότητα της χρήσης ενός ελάχιστα επεξεργασμένου υλικού σημαίνει ότι είναι αδύνατο να ικανοποιήσει όλες τις απαιτήσεις εξίσου καλά.
- Μια συχνή συνέπεια της στρατηγικής κόστους είναι ότι οι χρήστες θεωρούν ότι οι ιδιότητες του αμμοχάλικου είναι ασήμαντες. Οι χρήστες, κύριοι του έργου, συχνά πιστεύουν ότι όλα τα αδρανή θα αποδώσουν το ίδιο, ακόμη και αν οι γεωλογικές ιδιότητες, το σχήμα των αδρανών και τα χαρακτηριστικά υγρασίας τους μπορεί να διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό. Οι προδιαγραφές ενδέχεται να ενισχύσουν αυτήν την υπόθεση κάνοντας αναφορά μόνο στις ιδιότητες των αδρανών και ποτέ στο σύνολο των ιδιοτήτων της στρώσεως. Έτσι, οι περισσότερες αστοχίες οδοστρωμάτων οφείλονται σε αστοχίες των βάσεων αυτών.

### **2.5.3. Έλεγχοι που πραγματοποιούνται σε αδρανή βάσεων και υποβάσεων.**

Τα αδρανή υλικά, λόγω των πολλών πηγών προέλευσής τους, πρέπει να ελέγχονται σε ότι αφορά τις φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες. Έτσι γίνεται διερεύνηση της καταλληλότητας και ιεράρχηση των υλικών για την επιλογή του καλύτερου. Οι έλεγχοι των αδρανών μπορούν να ταξινομηθούν σε πέντε κύριες ομάδες:

- τους περιγραφικούς "ελέγχους"
- τους μη καταστροφικούς ποιοτικούς ελέγχους
- τους ελέγχους σκληρότητας και ανθεκτικότητας
- τους ελέγχους καθαρότητας
- τους ελέγχους πυκνότητας

#### 2.5.3.1 Γενικές ιδιότητες.

- **Μέθοδοι δειγματοληψίας:** Η δοκιμή προηγείται του συνόλου των δοκιμών. Δεν προσδιορίζει ιδιότητα αλλά θέτει όρους για την λήψη αντιπροσωπευτικού εργοταξιακού δείγματος. Η δειγματοληψία ενός αδρανούς μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα των δοκιμών

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

στις οποίες θα υποβληθεί ένα δείγμα. Τα στιγμιαία δείγματα θα πρέπει να είναι τυχαία και κατανεμημένα σε όλα τα σημεία της εξεταζόμενης παρτίδας. Τα στιγμιαία δείγματα θα πρέπει να ανακατεύονται και έτσι να αποτελούν το συνολικό εργοταξιακό δείγμα. Ανάλογα με το μέγεθος του μέγιστου κόκκου καθώς και με το επιθυμητό σημείο δειγματοληψίας (σωροί αποθήκευσης, μεταφορική ταινία, φορτηγά, πλοία κλπ) πρέπει να ακολουθείται διαφορετική διαδικασία. (ASTM D75, ΕΛΟΤ EN 932-1, AASHTO T-2)

- **Μέθοδοι μείωσης εργαστηριακών δειγμάτων:** Η δοκιμή προηγείται του συνόλου των δοκιμών. Δεν προσδιορίζει ιδιότητα αλλά θέτει όρους για την μείωση του εργοταξιακού δείγματος και την λήψη αντιπροσωπευτικών εργαστηριακών δειγμάτων για την διεξαγωγή δοκιμών. Ανάλογα με το μέγεθος του μέγιστου κόκκου καθώς και την επιθυμητή ποσότητα δείγματος προς δοκιμή εφαρμόζονται διαφορετική μέθοδοι. (AASHTO T-248, ASTM C 702, ΕΛΟΤ EN 932-2)
- **Ορολογία και Πετρογραφική Περιγραφή :** Προσδιορισμός των φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών των αδρανών που παρατηρούνται με πετρογραφικές μεθόδους ανάλυσης. Εφαρμόζεται σε όλα τα αδρανή τα οποία περιέχουν χημικώς ασταθή ορυκτά ή ορυκτά που είναι δυνατόν να επηρεάσουν ιδιότητες και την ποιότητα του τελικού προϊόντος. (ASTM 294, ASTM 295, ΕΛΟΤ EN 932-3)

### 2.5.3.2 Δοκιμές προσδιορισμού γεωμετρικών ιδιοτήτων.

- **Κοκκομετρική ανάλυση:** Ποσοτική κατάταξη των κόκκων με βάση το μέγεθος των κόκκων. Η κοκκομετρική διαβάθμιση αναφέρεται είτε στα επιμέρους κλάσματα που με ανάμιξη δίνουν το τελικό μίγμα των αδρανών, είτε στο τελικό μίγμα προς εφαρμογή. Ο μέγιστος κόκκος καθορίζει την δυνατότητα του αδρανούς να διέρχεται από κάποια περιοριστικό άνοιγμα βροχίδας κοσκίνου κατά ένα συγκεκριμένο ποσοστό. Σε συνδυασμό με τους δείκτες πλακοειδούς και επιμήκυνσης καθορίζει το ποσοστό του όγκου των κενών μεταξύ των κόκκων του συμπυκνωμένου αδρανούς. Η συνολική διαβάθμιση σε συνάρτηση με το γωνιώδες, την τραχύτητα, τους δείκτες

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

πλακοειδούς και επιμήκυνσης, το ειδικό βάρος των κόκκων και την φαινόμενη πυκνότητα καθορίζει την ρεολογία του μείγματος, τη συνεκτικότητά του, την τάση απόμιξης και την ικανότητα να μεταφέρει τα κάθετα φορτία στα υποκείμενα στρώματα χωρίς οριζόντιες τάσεις. (AASHTO T-27, ASTM C-136, ΕΛΟΤ EN 933-1)

- **Ποσοστό παιπάλης:** Προσδιορισμός ποσοστού κόκκων με μέση διάσταση μικρότερη από όριο προδιαγραφής (0,075 ή 0,063 mm). Η παιπάλη εμπεριέχεται στα χονδρόκοκκα και κυρίως στα λεπτόκοκκα αδρανή σε ποσοστά που ποικίλουν ανάλογα με την προέλευση του υλικού και την παραγωγική διαδικασία. Σε άλλες εφαρμογές απαιτείται σε επιπλέον ποσότητα από αυτή που περιέχεται στα αδρανή οπότε και προστίθεται υπό μορφή filler (π.χ. κονιάματα, οδοστρώματα) (AASHTO T-11, ASTM C-117, ΕΛΟΤ EN 933-1)
- **Δείκτης Πλακοειδούς-Δείκτης Σχήματος:** Προσδιορισμός μέγιστου ποσοστού πεπλατυσμένων κόκκων σε κάθε κοκκομετρικό κλάσμα  $d_i/D_i$ . Αυτό αντιστοιχεί σε % διερχόμενων κόκκων από ραβδωτό κόσκινο με απόσταση ράβδων  $D_i/2$ . Γίνεται επίσης προσδιορισμός μέγιστου ποσοστού επιμηκυσμένων κόκκων. Αυτό αντιστοιχεί σε % κόκκων των οποίων ο λόγος μήκος/πλάτος είναι μεγαλύτερος από 3/1 (με βάση το σχέδιο προτύπου ΕΛΟΤ 408 το % αντιστοιχεί σε ποσοστό των κόκκων που η μέγιστη προς ελάχιστη διάσταση είναι μεγαλύτερη από 3:1). Οι επιμήκεις και πεπλατυσμένοι κόκκοι πρέπει να αποφεύγονται επειδή είναι δυνατόν να υπάρχει ανομοιόμορφη κατανομή τάσεων λόγω σχήματος με αποτέλεσμα τον κίνδυνο θραύσης των αδρανών. Επιπλέον το κυβικό σχήμα επιτυγχάνει τη βέλτιστη γεωμετρική κατανομή των κόκκων με αποτέλεσμα την μέγιστη δυνατή συμπύκνωση. Η δοκιμή του δείκτη σχήματος είναι εναλλακτική του δείκτη πλακοειδούς. (ΕΛΟΤ EN 933-3, ΕΛΟΤ EN 933-4)
- **Ποιοτικός Προσδιορισμός Παιπάλης-Ισοδύναμο Άμμο:** Έμμεσος και συγκριτικός προσδιορισμός ποσοστού κόκκων λεπτόκοκκου κλάσματος, όχι κατ' ανάγκη αργλικών, που παραμένουν σε αιώρηση σε υδατικό διάλυμα μετά από συγκεκριμένη ώρα, σε σχέση με το σύνολο των κόκκων. Δίνει ένδειξη για την ύπαρξη βλαπτικών αργλικών συστατικών στην άμμο

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

(κλάσμα 0/4) και στα υλικά βάσεων, υποβάσεων οδοστρωμάτων. Σε συνδυασμό με την ποσότητα της παιπάλης δίνει μια ολοκληρωμένη εικόνα. (ASTM D-2419, ΕΛΟΤ EN 933-8)

- **Μπλε του Μεθυλενίου:** Έμμεσος προσδιορισμός των κόκκων, όχι κατ' ανάγκη αργιλικών, που έχουν την ικανότητα απορρόφησης διαλύματος μπλε του μεθυλενίου. Δίνει αντίστοιχη ένδειξη με την δοκιμή Ισοδυναμίου Άμμου. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων, όπου αυτό είναι εφικτό, δίνει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα για τον χαρακτηρισμό του εξεταζόμενου δείγματος. Εκτελείται στα κλάσματα 0/2 και 0/0,125 mm. (ΕΛΟΤ EN 933-9)

### 2.5.3.3 Δοκιμές προσδιορισμού φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των αδρανών.

- **Αντοχή σε φθορά κατά micro-Deval (συντελεστής micro-Deval):** Προσδιορισμός του μέγιστου ποσοστού φθοράς χονδρόκοκκου κλάσματος κατά την εκτέλεση πρότυπης δοκιμής στην συσκευή micro-Deval παρουσία νερού. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές της νέας Ευρωπαϊκής δοκιμής με την υφιστάμενη στην Ελλάδα δοκιμή δεν έχουν αντιστοιχία (στο κεφάλαιο για το έρμα αναφέρονται οι τιμές). Σύμφωνα με τους Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς η δοκιμή θα εκτελείται στα αδρανή για ασφαλτικά μίγματα, αδρανή για βάσεις και υποβάσεις. (ΕΛΟΤ EN 1097-1)
- **Αντοχή σε απότριψη κατά Los Angeles (συντελεστής Los Angeles):** Προσδιορισμός του μέγιστου ποσοστού φθοράς χονδρόκοκκου κλάσματος αδρανών υλικών κατά την εκτέλεση πρότυπης δοκιμής θρυμματισμού με τριβή και κρούση. Χαμηλές τιμές του συντελεστή Los Angeles αποτελούν ένδειξη υγείας πετρώματος. Γενικά κατά την θραύση και την συνεπαγόμενη μείωση του μεγέθους του υλικού, προκύπτει τελικό προϊόν που παρουσιάζει καλύτερη ανθεκτικότητα σε θρυμματισμό αφού μειώνονται οι πιθανές ασυνέχειες της μάζας του, βελτιώνεται το σχήμα, λειοτριβούνται και αποβάλλονται ασθενείς και ψαθυροί κόκκοι. Αποτελεί δοκιμή αναφοράς για τον προσδιορισμό του ποσοστού φθοράς των αδρανών σε τριβή και σε κρούση. (ΕΛΟΤ EN 1097-2, ASTM C 535, ASTM C 131, AASHTO T-96)
- **Φαινόμενο βάρος και ποσοστό όγκου κενών:** Προσδιορισμός μάζας αδρανών ανά μονάδα όγκου πρότυπα συμπυκνωμένη ή μη. Σε συνδυασμό με

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

το φαινόμενο ειδικό βάρος προσδιορίζεται ο όγκος των κενών του συμπυκνωμένου ή μη μίγματος αδρανών. Εφαρμόζεται σε αδρανή με μέγιστο κόκκο 63 mm. Με βάση τις Ευρωπαϊκές προδιαγραφές η δοκιμή αυτή εφαρμόζεται μόνο στα ελαφροβαρή αδρανή, σε αντίθεση στην Ελλάδα εκτελείται σε όλους τους τύπους. Ειδικά για τα filler ο προσδιορισμός γίνεται με κηροζίνη σύμφωνα με το EN 1097-3B. ( ΕΛΟΤ EN 1097-3, ASTM C-29)

- **Φυσική Υγρασία Αδρανών:** Προσδιορισμός του % ποσοστού υγρασίας που περιέχεται στο δείγμα αδρανών που εξετάζεται με ξήρανση του υλικού στους  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Ο προσδιορισμός της φυσικής υγρασίας αποτελεί προκαταρκτική δοκιμή για πλήθος άλλων δοκιμών. (ASTM C 566, ΕΛΟΤ EN 1097-5 )
- **Φαινόμενο Ειδικό βάρος και Υδατοαπορροφητικότητα:** Προσδιορισμός του ειδικού βάρους των κόκκων συμπεριλαμβανομένων των απροσπέλαστων ή των συνολικών κενών τους στον συνολικό όγκο. Υδατοαπορροφητικότητα κόκκων στα κενά του όγκου τους. Η υδατοαπορροφητικότητα είναι έμμεσος τρόπος χαρακτηρισμού του πορώδους των κόκκων και της απορροφητικότητας γενικά (π.χ. σε άσφαλτο). (ASTM C-127, ASTM C-128, ΕΛΟΤ EN 1097-6)
- **Όριο Υδαρότητας:** Προσδιορισμός της περιεκτικότητας σε νερό στο όριο μεταξύ υδαρούς και στερεάς κατάστασης. Χρησιμοποιώντας την συσκευή Casagrande, ως όριο υδαρότητας ορίζεται η περιεκτικότητα σε νερό κατά την οποία το εδαφικό υλικό μετά από 25 χτυπήματα ρέει κατά μια απόσταση 1mm. Εφαρμόζεται στα αδρανή υλικά βάσεων-υποβάσεων. (ASTM D 854, AASHTO T-89)
- **Όριο πλαστικότητας:** Προσδιορισμός της περιεκτικότητας σε νερό στην οποία το εδαφικό υλικό βρίσκεται στο όριο μεταξύ πλαστικής και ημιστερεάς μορφής. Εφαρμόζεται στα αδρανή υλικά βάσης-υποβάσεων. (ASTM D 4318, AASHTO T-90)
- **Δείκτης Πλαστικότητας:** Είναι η αριθμητική διαφορά μεταξύ του ορίου υδαρότητας και ορίου πλαστικότητας. Εφαρμόζεται στα αδρανή υλικά βάσης- υποβάσεων. (ASTM D 4318, AASHTO T-91)
- **Τροποποιημένη μέθοδος Proctor:** Προσδιορίζει την σχέση μεταξύ της πυκνότητας και της περιεχόμενης υγρασίας, και συνεπώς από την βέλτιστη υγρασία την μέγιστη πυκνότητα (με την χρησιμοποίηση κόπανου βάρους

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

4,54 kg και ύψους πτώσης 457 mm). Μέθοδος Α, Β, Γ & Δ. Εφαρμόζεται στα αδρανή υλικά βάσης – υποβάσεων. ( ASTM D 1557, AASHTO T-180 )

- **Καλιφορνιακός λόγος Φέρουσας Ικανότητας (CBR):** Τρία δείγματα συμπυκνώνονται με πυκνότητα από 95-100% της μέγιστης ξηράς πυκνότητας και γίνεται υδρεμποτισμός για 96 ώρες. Κατόπιν έμβολο διεισδύσεως φορτίου 44,5N επικάθεται επάνω στο δοκίμιο με ταχύτητα 1,3mm/min

$$C.B.R.= \frac{\text{διορθωμένη τιμή πίεσης}}{\text{πρότυπη πίεση}} \times 100$$

πρότυπη πίεση

Εφαρμόζεται στα αδρανή υλικά (υπο)βάσεων. (ASTM D 1883, AASHTO 193)

- **Αντίσταση σε θλίψη (ACV-Aggregate Compression Value)- Προσδιορισμός δύναμης για 10% λεπτόκοκκα (TFV-Ten percent Fines Value)-Αντίσταση σε κρούση (AIV-Aggregate Impact Value):** Χονδρόκοκκα αδρανή τοποθετούνται σε μεταλλική μήτρα. Στις δύο πρώτες δοκιμές υποβάλλονται σε θλίψη ενώ στην τρίτη σε επαναλαμβανόμενο κρουστικό φορτίο. Στην πρώτη και στην τρίτη δοκιμή προσδιορίζεται η φθορά σαν ποσοστό ενώ στη δεύτερη η δύναμη που προκαλεί φθορά 10%. Χαρακτηρίζει την ικανότητα των αδρανών να ανθίστανται στον θρυμματισμό από την επιβολή φορτίων κατά την κατασκευή και τη λειτουργία του έργου (π.χ. ασφαλτοτάπητας, βάση, υπόβαση κτλ. κατά τη διάστρωση με οδοστρωτήρα και στη διάρκεια του χρόνου λόγω της κυκλοφορίας.) (ΕΛΟΤ EN 1097-2:1999)

### 2.5.3.4 Δοκιμές προσδιορισμού των ιδιοτήτων των αδρανών σε θερμικές και καιρικές μεταβολές.

- **Ανθεκτικότητα σε κύκλους ψύξης-απόψυξης:** Δείγμα χονδρόκοκκων αδρανών (d/D) (συνήθη κλάσματα :4/8, 8/16, 16/32 mm), αφού πρώτα έχει εμβαπτιστεί σε νερό, υποβάλλεται σε 10 κύκλους ψύξης-απόψυξης. Η ανθεκτικότητα του σε ψύξη-απόψυξη προσδιορίζεται με βάση την ποσότητα του δείγματος με μέγιστο κόκκο <d/2. Οι δοκιμές προσομοιάζουν

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

κύκλους ψύξης-απόψυξης και καθορίζουν την ανθεκτικότητα του υλικού σε παγετό σε συνδυασμό με τη υδαταπορροφητικότητα του με την πετρογραφική του δομή καθώς και με τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής. Είναι αναγκαίες προκειμένου για αδρανή εκτεθειμένα σε έντονες ατμοσφαιρικές επιδράσεις (εναλλαγές ακραίων θερμο-υγρομετρικών συνθηκών). Έχουν εφαρμογή σε όλα τα αδρανή. Επιβάλλεται ο έλεγχος όταν η υδαταπορροφητικότητα είναι μεγαλύτερη από όρια που επιβάλλουν οι προδιαγραφές των αντίστοιχων υλικών στις τοπικές συνθήκες. (ΕΛΟΤ EN 1367-1)

- **Ανθεκτικότητα στην αποσάθρωση με χρήση Θεϊκού μαγνησίου (Υγεία πετρώματος):** Προσδιορίζεται η φθορά του υλικού όταν υποστεί κύκλους εμφάνισης σε διάλυμα θεϊκού μαγνησίου. Είναι αναγκαίες προκειμένου για αδρανή εκτεθειμένα σε έντονες ατμοσφαιρικές επιδράσεις (εναλλαγές ακραίων θερμο-υγρομετρικών συνθηκών). Έχουν εφαρμογή σε όλα τα αδρανή. (ΕΛΟΤ EN 1367-2, ASTM C 88, AASHTO T-104)
- **Δοκιμή Βρασμού «Sonnenbrand» του βασάλτη και αποσύνθεση σκωρίας σιδήρου:** Βρασμός για επιταχυνόμενη εμφάνιση αντίδρασης Sonnenbrand του βασάλτη. Μετράται η απώλεια μάζας και η αύξηση του Συντελεστή Los Angeles και της Τιμής Κρούσης. Η αντίδραση Sonnenbrand εμφανίζεται σε ορισμένους Βασάλτες σε ατμοσφαιρικές συνθήκες με αποτέλεσμα την αποσάθρωσή τους. Εμφανίζεται υπό τη μορφή γκρι στιγμάτων και συνοδεύεται από σχηματισμό ρωγμών στο πέτρωμα με επακόλουθη την επιτάχυνση της αποσάθρωσης λόγω της «αναπνοής». Ο χρόνος της αντίδρασης είναι από μερικούς μήνες μέχρι και δεκαετίες. Σε εξεζητημένες περιπτώσεις μπορεί να συμβεί ακαριαία. (ΕΛΟΤ EN 1367-3)

### 2.5.3.5 Δοκιμές προσδιορισμού των χημικών ιδιοτήτων των αδρανών.

- **Χημική ανάλυση:** Καθορίζεται η σύσταση και τα βλαπτικά συστατικά. Προσδιορίζονται οι οργανικές προσμίξεις και επιβλαβή συστατικά των αδρανών υλικών, ανάλογα με την χρήση τους εφαρμόζεται το κατάλληλο άρθρο της μεθόδου. (ΕΛΟΤ EN 1744-1)

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

- **Προσδιορισμός ολικού Θείου:** Προσδιορίζεται η περιεκτικότητα σε ολικό θείο με χρήση βρώμιου και νιτρικού οξέος. Εφαρμόζεται στα αδρανή σκυροδέματος καθώς και σε αδρανή βάσεων και υποβάσεων με ή όχι συνδετικό υλικό. Η ύπαρξη θειούχων ενώσεων σε αδρανή υλικά είναι δυνατόν να προκαλέσει διογκώσεις στο σκυρόδεμα. (ΕΛΟΤ EN 1744-1)(άρθρο 11)
- **Προσδιορισμός ευδιάλυτων σε οξέα SO<sub>3</sub>:** Προσδιορισμός της περιεκτικότητας των SO<sub>3</sub> με χρήση HCl. Εφαρμόζεται στα αδρανή σκυροδέματος και βάσεων-υποβάσεων με ή όχι συνδετικό υλικό. (ΕΛΟΤ EN 1744-1) (άρθρο 12)
- **Προσδιορισμός οργανικών προσμίξεων:** Προσδιορισμός της ύπαρξης οργανικών προσμίξεων με χρωματογραφική μέθοδο ελέγχου. Οι οργανικές προσμίξεις παρεμποδίζουν την πήξη και την σκλήρυνση σκυροδέματος ή κονιάματος, και είναι δυνατόν να χρωματίσουν τις επιφάνειες αυτών. Εφαρμόζεται σε αδρανή σκυροδέματος, κονιάματος και σε αδρανή βάσεων-υποβάσεων με ή όχι συνδετικό υλικό. (ΕΛΟΤ EN 1744-1(άρθρο 15-1), ASTM C-33)
- **Προσδιορισμός των οργανικών προσμίξεων λεπτόκοκκων αδρανών με δοκιμές κονιάματος:** Προσδιορισμός της επιρροής των οργανικών προσμίξεων στην αντοχή καθώς και στο χρόνο πήξης κονιάματος. Έχει εφαρμογή σε αδρανή κονιάματος, σκυροδέματος, αδρανή για βάσεις και υποβάσεις με ή όχι συνδετικό υλικό που δεν πληρούν τις απαιτήσεις των άρθρων 15.1 ή και 15.2. (ΕΛΟΤ EN 1744-1(άρθρο 15.3), ASTM C 87)

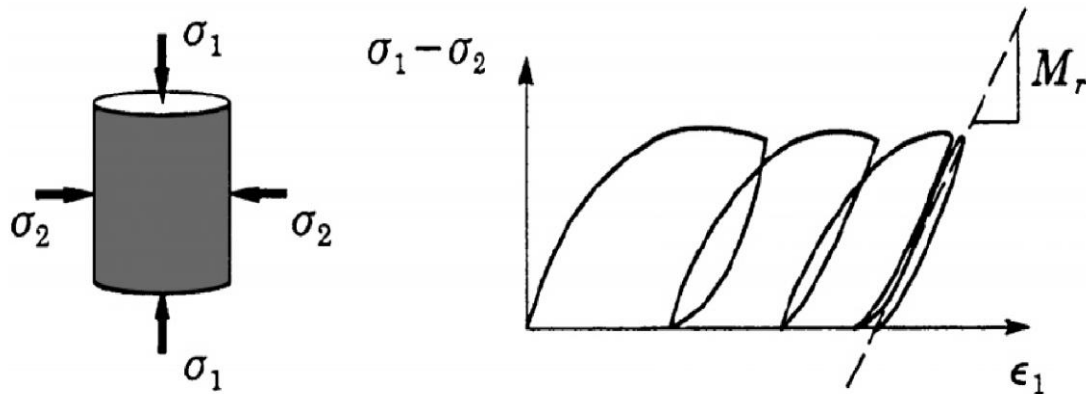
## 2.6 Αναλυτικότερη διερεύνηση του ελαστικού μέτρου Mr (resilient modulus).

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως (παράγραφος 2.4.1.1), το ελαστικό μέτρο (Mr), αποτελεί την βασικότερη παράμετρο στον καθορισμό της δομητικής φέρουσας ικανότητας των ασύνδετων κοκκωδών στρώσεων βάσεως και υποβάσεως ενός οδοστρώματος τόσο στην εργαστηριακή ανάλυση όσο και στο σχεδιασμό σε μελλοντική κλίμακα. Η θεώρηση του ελαστικού μέτρου



## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

εμφανίστηκε από τους Seed et al. (1955). Η ελαστική απόκριση ενός κοκκώδους υλικού χαρακτηρίζεται από μία τιμή του ελαστικού μέτρου για δεδομένη εντατική κατάσταση. Το ελαστικό μέτρο ορίζεται ως το πηλίκο της μέγιστης εφαρμοζόμενης παρεκκλίνουσας τάσης ( $\sigma_1 - \sigma_2$ ) προς την μέγιστη ανακτήσιμη ελαστική παραμόρφωση ( $\epsilon_r$ ) που δημιουργείται όταν αφαιρεθεί το φορτίο από το δοκίμιο (σχήμα 15).



**ΣΧΗΜΑ 15:** Ορισμός του ελαστικού μέτρου  $M_r$ .

Το ελαστικό μέτρο είναι η παράμετρος που εκφράζει την αντοχή που αντιστοιχεί στην ελαστική παραμόρφωση, η οποία οφείλεται στις επαναλαμβανόμενες φορτίσεις υπό διάφορους συνδυασμούς τάσεων. Έτσι προσομοιώνεται η συμπεριφορά ενός κοκκώδους στοιχείου εντός της δομής του οδοστρώματος υπό τα φορτία κυκλοφορίας. Το ελαστικό μέτρο των κοκκωδών υλικών είναι μη γραμμικό και ποικίλλει ανάλογα με το καθεστώς των τάσεων (Hicks & Monismith, 1971, Lekar et al., 2000, Lekar, 1999). Βρέθηκε ότι αυξάνεται καθώς αυξάνεται η πλευρική πίεση  $\sigma_2$ . Ακόμη εξαρτάται από μία σειρά άλλων παραγόντων όπως το περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας, την πυκνότητα, την κοκκομετρική διαβάθμιση και το γωνιώδες των κόκκων του αδρανούς υλικού. Αρκετοί ερευνητές έχουν προσπαθήσει να αναπτύξουν και να επαληθεύσουν αναλυτικά μοντέλα μέσω των οποίων περιγράφεται η επίδραση των παραπάνω παραγόντων στο ελαστικό μέτρο των κοκκωδών υλικών (Rada & Witczak, 1981, Witczak & Uzan, 1988).

### 2.6.1 Καθορισμός του ελαστικού μέτρου $M_r$ κοκκωδών υλικών.

Για τον εργαστηριακό προσδιορισμό του ελαστικού μέτρου έχουν αναπτυχθεί δύο συνιστώμενα πρότυπα πρωτόκολλα μεταξύ των οποίων υπάρχουν πολλές ομοιότητες και διαφορές που σχετίζονται κυρίως με τις εφαρμοζόμενες ακολουθίες των τάσεων, την μορφή του παλμού φόρτισης, την μέτρηση της παραμόρφωσης και την διαδικασία συμπύκνωσης του δοκιμίου. Ο προσδιορισμός του ελαστικού μέτρου είναι μία πολύπλοκη και χρονοβόρα εργαστηριακή δοκιμή, ευαίσθητη σε πολλές μεταβλητές, που αφορούν κυρίως τον εξοπλισμό και το υπό εξέταση υλικό. Η δοκιμή αυτή καταπιάνεται με ευαίσθητες τιμές παρεκκλιουσών τάσεων και παραμορφώσεων οπότε καθίσταται πολύ σημαντική η προσεκτική και ακριβής καταγραφή και μέτρηση αυτών. Τα δύο αποδεκτά πρότυπα είναι:

- Καθορισμός του ελαστικού μέτρου εδαφών και κοκκωδών υλικών- [Determining the resilient modulus of soils and aggregate materials (AASHTO T 307-99 (2007))]
- Εναρμονισμένες μέθοδοι δοκιμών για τον εργαστηριακό προσδιορισμό του ελαστικού μέτρου για τον σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων- [Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design (NCHRP 1-28A(2002))]

#### Μέθοδος AASHTO T307-99 (2007)

Για τον προσδιορισμό του ελαστικού μέτρου  $M_r$  κοκκωδών υλικών, αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ από την αμερικανική ένωση πολιτειακών αυτοκινητοδρόμων (AASHTO), μία πρότυπη μέθοδος εργαστηριακών δοκιμών. Η μέθοδος αυτή καλύπτει ένα μεγάλο εύρος διαδικασιών σχετικά με την προετοιμασία και τον έλεγχο αδιατάρακτων δειγμάτων κοκκωδών υλικών βάσεων/υποβάσεων ή δειγμάτων εδάφους, για την προσεγγιστική εκτίμηση του ελαστικού μέτρου προσομοιώνοντας σε μεγάλο βαθμό τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης ενός εύκαμπτου οδοστρώματος. Στη μέθοδο αυτή πραγματοποιείται εργαστηριακή συμπύκνωση του δείγματος για να

## **Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

προσομοιαστεί η αδιατάρακτη φύση των υλικών οδοστρωσίας. Ακόμη, το επίπεδο των τάσεων που θα χρησιμοποιηθεί και οι διαστάσεις του δοκιμίου είναι προκαθορισμένες από τη δοκιμή. Η τιμή του ελαστικού μέτρου που προκύπτει από αυτή τη διαδικασία λαμβάνει υπόψη της ορισμένα μη γραμμικά χαρακτηριστικά των κοκκωδών υλικών και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας-απόκρισης υπό το φορτίο σχεδιασμού ενός οδοστρώματος (AASHTO Designation T307-99, 2007).

Αναλυτικότερα, η τιμή του ελαστικού μέτρου  $M_r$  καθορίζεται από την εκτέλεση τριαξονικής δοκιμής επαναλαμβανόμενης φόρτισης σε κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 152 χιλιοστών. Στη μέθοδο AASHTO T307 ασκείται επαναλαμβανόμενη, δυναμική, ημιτονοειδής κυματομορφή φόρτισης με διάρκεια φόρτισης 0,1 δευτερολέπτων. Αυτός ο παλμός του φορτίου ακολουθείται από μία περίοδο 0,9 δευτερολέπτων κατά την οποία ασκείται στο δοκίμιο φορτίο ίσο με το 10% της μέγιστης τάσης προσομοιώνοντας έτσι την αποφόρτιση που επιφέρει το πέρασμα των αξόνων ενός οχήματος από ένα συγκεκριμένο σημείο μιας κοκκώδους στρώσης ενός πραγματικού οδοστρώματος. Πραγματοποιούνται ειδικές προ-φορτίσεις για τη μείωση των διαταραχών του δείγματος κατά τη διαδικασία προετοιμασίας και την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων της ατελούς επαφής μεταξύ των ακραίων πλακών και του δοκιμίου καθώς και για την ορθή βαθμονόμηση της συσκευής. Η ειδική αυτή προφόρτιση επαναλαμβάνεται 500 φορές (500 κύκλοι φόρτισης). Ακολουθούν 15 διαφορετικά ζευγάρια πλευρικής πίεσης και παρεκκλίνουσας τάσης με διάρκεια 100 κύκλων το καθένα και στη συνέχεια συλλέγεται η τιμή του ελαστικού μέτρου  $M_r$  ως η μέση τιμή των 5 τελευταίων κύκλων φόρτισης (κύκλοι 95 έως 100). Κάθε ακολουθία φόρτισης επαναλαμβάνεται 100 φορές μέχρι η μόνιμη παραμόρφωση να είναι εντός του ορίου του 5% του συνόλου της παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Για το σχεδιασμό ενός οδοστρώματος, αναμένεται ότι η ελαστική παραμόρφωση αυξάνεται περισσότερο από ότι η μόνιμη παραμόρφωση καθώς εφαρμόζονται περισσότεροι κύκλοι φόρτισης έτσι ώστε μετά από ένα μεγάλο αριθμό κύκλων η παραμόρφωση κάτω από κάθε κύκλο είναι σχεδόν ανακτήσιμη. Ως εκ τούτου, οι τιμές του ελαστικού μέτρου  $M_r$  υπολογίζονται με βάση τους τελευταίους πέντε

## **Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

κύκλους σε κάθε ακολουθία φόρτισης (βλέπε και παράγραφο 2.4.3-ανακυκλική τριαξονική δοκιμή).

Στην παρούσα εργασία, για τον καθορισμό του ελαστικού μέτρου πραγματοποιούνται εργαστηριακές τριαξονικές δοκιμές με βάση το αμερικανικό πρότυπο AASHTO T 307-99 (2007).

### **2.6.2 Συμπύκνωση βάσης και υπόβασης από ασύνδετα κοκκώδη υλικά-δοκιμή Proctor.**

#### 2.6.2.1 Γενικά

Με τον όρο συμπύκνωση των κοκκωδών στρώσεων εννοούμε την τεχνητή αύξηση της πυκνότητας του υλικού της στρώσης χρησιμοποιώντας μηχανικά μέσα. Με την συμπύκνωση επιτυγχάνουμε αύξηση της διατμητικής αντοχής, μείωση των καθιζήσεων και της διαπερατότητας και τέλος αύξηση της αντίστασης του αδρανούς υλικού σε αποσάθρωση. Η συμπύκνωση των κοκκωδών υλικών εξαρτάται άμεσα από το περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας. Μέγιστη συμπύκνωση του υλικού μπορεί να επιτευχθεί μόνο για συγκεκριμένο ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας το οποίο ονομάζεται βέλτιστο ποσοστό υγρασίας.

Ο καθορισμός του βέλτιστου ποσοστού υγρασίας για την επίτευξη μέγιστης πυκνότητας καθορίζεται με την εκτέλεση της εργαστηριακής δοκιμής Proctor. Οι πλέον παραδοσιακές εργαστηριακές δοκιμές συμπύκνωσης είναι η πρότυπη δοκιμή Proctor και η τροποποιημένη δοκιμή Proctor, οι οποίες πήραν το όνομα τους από τον άνθρωπο που τις ανέπτυξε το 1933, τον R. R. Proctor. Ο Proctor παρατήρησε ότι η συμπύκνωση αποτελεί συνάρτηση τεσσάρων μεταβλητών: της προσπάθειας συμπύκνωσης, του τύπου του υλικού, της ξηρής πυκνότητας και του ποσοστού υγρασίας. Επομένως, το απαιτούμενο επίπεδο της συμπύκνωσης που πρέπει να επιτευχθεί στο πεδίο κατά τη διάρκεια της κατασκευής μίας κοκκώδους στρώσης καθορίζεται ως ένα ποσοστό της

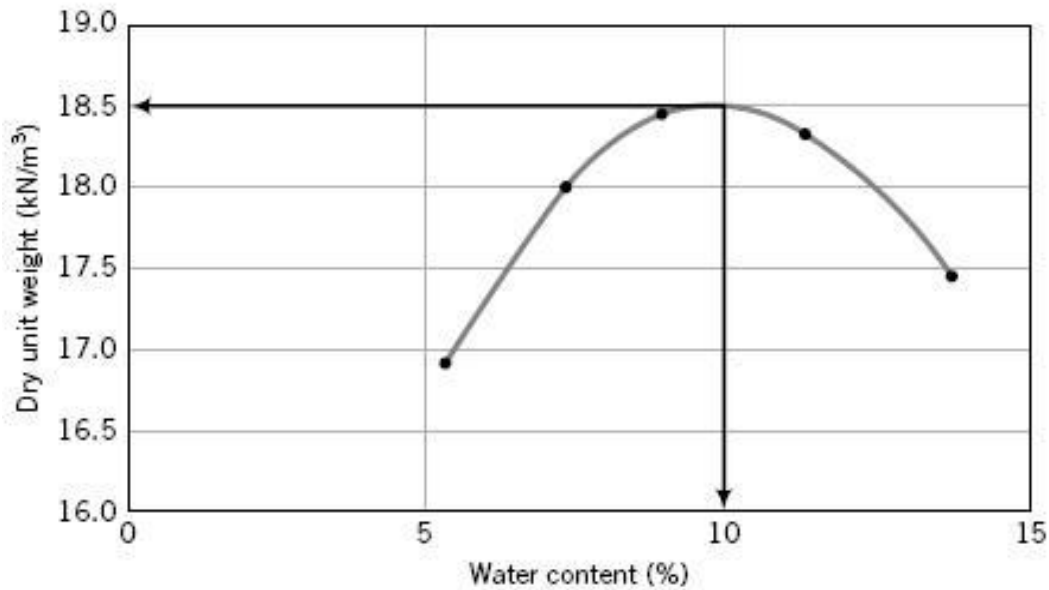
## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

μέγιστης ξηρής πυκνότητα που λαμβάνεται από την εργαστηριακή δοκιμή συμπίκνωσης (Sweere, 1990 και Marek & Jones, 1974).

Παρόλο που η πρότυπη και η τροποποιημένη δοκιμή συμπίκνωσης Proctor είναι οι καθολικά περισσότερο μεταχειριζόμενες δοκιμές συμπίκνωσης, έχει πλέον γίνει αντιληπτό ότι οι δοκιμές αυτές δεν είναι κατάλληλες για τον προσδιορισμό της μέγιστης ξηρής πυκνότητας όλων των τύπων υλικών, όπως για παράδειγμα τα χονδρόκοκκα υλικά. Για τέτοιου είδους ασύνδετα κοκκώδη υλικά βρέθηκε ότι οι μέθοδοι δονητικής συμπίκνωσης είναι καταλληλότερες (Semmelink, 1991 και Marek & Jones, 1974). Είναι σκόπιμο να σημειωθεί εδώ η χαρακτηριστική διαφορά μεταξύ της πυκνότητας και της συμπίκνωσης (Marek & Jones, 1974). Δύο κοκκώδη υλικά μπορεί να έχουν την ίδια πυκνότητα, αλλά διαφορετικούς βαθμούς συμπίκνωσης. Η καλή συμπίκνωση του υλικού οδηγεί πάντα σε καλή απόδοση της στρώσης, ενώ υψηλή τιμή της πυκνότητας μπορεί ή και όχι να οδηγήσει σε καλή απόδοση ανάλογα με τον βαθμό συμπίκνωσης που έχει επιτευχθεί.

Από την πρότυπη ή την τροποποιημένη εργαστηριακή δοκιμή συμπίκνωσης κατά Proctor, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, καθορίζεται η σχέση που συνδέει ποσοστό υγρασίας και πυκνότητα τόσο μειγμάτων κοκκωδών υλικών όσο και εδαφών. Κατά την εκτέλεση της δοκιμής, προετοιμάζεται συγκεκριμένη ποσότητα του υπό εξέταση μείγματος κοκκωδών υλικών, σε καθορισμένο περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας και συμπυκνώνεται σε πρότυπο καλούπι χρησιμοποιώντας χειροκίνητο ή μηχανικό κόπανο. Για τον προσδιορισμό της υγρής πυκνότητας η υγρή μάζα του συμπυκνωμένου δείγματος διαιρείται με τον όγκο του καλουπιού. Γνωρίζοντας την υγρή πυκνότητα και το περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας της συγκεκριμένης δοκιμής υπολογίζεται η ξηρή πυκνότητα του υλικού. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για διάφορες τιμές ποσοστού υγρασίας και τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε γραφική παράσταση με τη μορφή του σχήματος 16. Σχεδιάζοντας ομαλή γραμμή μεταξύ των σημείων που προκύπτουν για κάθε τιμή του ποσοστού υγρασίας παράγεται μία καμπύλη. Η μέγιστη πυκνότητα και το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας προσδιορίζονται με την επιλογή ενός σημείου στην κορυφή της καμπύλης.

Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.



**ΣΧΗΜΑ16:** Τυπική καμπύλη ποσοστού υγρασίας-ξηρής πυκνότητας.

2.6.2.2 Πρότυπη και τροποποιημένη δοκιμή συμπίκνωσης Proctor-εργαστηριακός εξοπλισμός.

Για την πρότυπη μέθοδο χρησιμοποιούνται τα αμερικανικά πρότυπα ASTM D 698 (2007), AASHTO T 99 ενώ η Ελλάδα αναρμονίζεται με το ευρωπαϊκό πρότυπο CEN-ΕΛΟΤ EN 13286.02:2<sup>η</sup> έκδοση (2004). Από την άλλη, για την τροποποιημένη δοκιμή χρησιμοποιούνται τα ASTM D 1557 (2007), AASHTO T 180 στις ΗΠΑ και το ΕΛΟΤ EN 13286.02:2<sup>η</sup> έκδοση (2004) στην Ελλάδα. Για την εκτέλεση εργαστηριακής δοκιμής Proctor, σύμφωνα με τα ισχύοντα ευρωπαϊκά πρότυπα χρησιμοποιούνται κυλινδρικά καλούπια (τύποι Α,Β,С) διαμέτρου 100, 150, 250 χιλιοστών και ύψους 120, 120, 200 χιλιοστών αντίστοιχα, με απόκλιση ενός χιλιοστού. Χρησιμοποιούνται ειδικά σφυριά-κόπανοι (κατηγορίες Α,Β,С) βάρους 2.5, 4.5, 15.0 κιλών, διαμέτρου κεφαλής 50, 50, 125 χιλιοστών τα οποία ρίχνονται ελεύθερα από ύψη 305, 457 και 600 χιλιοστά αντιστοίχως. Η ποσότητα του δείγματος που απαιτείται για την εκτέλεση της δοκιμής καθώς και το αναγκαίο μέγεθος του καλουπιού προκύπτουν από το μέγεθος των κόκκων του υλικού και του ποσοστού διερχόμενου υλικού από συγκεκριμένα κόσκινα [πίνακας 4 ΕΛΟΤ EN 13286.02]. Συνοπτικά στοιχεία των δύο δοκιμών με βάση το ΕΛΟΤ EN 13286.02 παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 1.

**Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

			ΚΑΛΟΥΠΙ ΔΟΚΙΜΗΣ		
ΤΥΠΟΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	A	B	C
	Μάζα κοπάνου	kg	2,5	2,5	15
	Διάμετρος κοπάνου	mm	50	50	125
<b><u>Πρότυπη Proctor</u></b>	Ύψος πτώσης	mm	305	305	600
	Αριθμός στρώσεων	-	3	3	3
	Χτυπήματα ανά στρώση	-	25	56	22
	Μάζα κοπάνου	kg	4,5	4,5	15
	Διάμετρος κοπάνου	mm	50	50	125
<b><u>Τροποποιημένη</u></b>	Ύψος πτώσης	mm	457	457	600
	Αριθμός στρώσεων	-	5	5	3
	Χτυπήματα ανά στρώση	-	25	56	98

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1:** Διαφορές μεταξύ πρότυπης και τροποποιημένης δοκιμής συμπύκνωσης κατά Proctor.

**2.6.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την ελαστική απόκριση μίας ασύνδετης κοκκώδους στρώσης.**

Τα τελευταία χρόνια, πολυάριθμες ερευνητικές προσπάθειες έχουν αφοσιωθεί στον χαρακτηρισμό της ελαστικής συμπεριφοράς των κοκκωδών υλικών. Είναι γνωστό ότι οι κοκκώδεις στρώσεις ενός οδοστρώματος υπό τα φορτία κυκλοφορίας παρουσιάζουν μη γραμμική, εξαρτώμενη από το χρόνο, ελαστοπλαστική συμπεριφορά (Lekarj et al., 2000). Για να αντιμετωπιστεί αυτή η μη γραμμικότητα αλλά και για να ξεφύγουμε από την κλασική θεωρία ελαστικότητας, η ελαστική απόκριση ορίζεται από το ελαστικό μέτρο  $M_T$  και τον λόγο του Poisson  $\nu$ . Επομένως, για λόγους που αφορούν κυρίως το σχεδιασμό, κρίνεται απαραίτητο να γνωρίζουμε την μεταβολή της ελαστικής συμπεριφοράς των χρησιμοποιούμενων υλικών όταν αλλάζουν οι κύριοι παράγοντες που την επηρεάζουν. Παρακάτω αναλύονται οι κυριότεροι παράγοντες από τους οποίους

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

επηρεάζεται η ελαστική συμπεριφορά-απόκριση των ασύνδετων κοκκωδών στρώσεων ενός οδοστρώματος. Στις παρακάτω παραγράφους, με τον όρο δυσκαμψία εννοείται η αντίσταση του υλικού κατά την παραμόρφωση του.

### 2.6.3.1 Επιβαλλόμενη τάση-effect of stress.

Σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες η επίδραση της επιβαλλόμενης τάσης, αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα στην μηχανική συμπεριφορά ενός κοκκώδους υλικού (Kolisoja, 1997). Πολλές μελέτες έχουν δείξει πολύ υψηλό βαθμό εξάρτησης της περιοριστικής-πλευρικής πίεσης και του αθροίσματος των κυρίων τάσεων κατά τον υπολογισμό του ελαστικού μέτρου αδιατάρακτων μειγμάτων κοκκωδών υλικών (Mitry, 1964, Monismith et al., 1967, Hicks, 1970, Uzan, 1985 και Sweere, 1990). Το ελαστικό μέτρο αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση της πλευρικής πίεσης περιορισμού και του αθροίσματος των κυρίων τάσεων. Ενδεικτικά, οι Monismith et al.(1967) παρατήρησαν αύξηση της τάξεως του 500% στο ελαστικό μέτρο για αλλαγή της πλευρικής πίεσης από 20 έως 200 kPa, ενώ άλλοι ερευνητές σημειώνουν παρόμοιες αυξήσεις για αύξηση του αθροίσματος των κυρίων τάσεων. Η παρεκκλίνουσα τάση ή διατμητική τάση όπως αλλιώς ονομάζεται, έχει μικρότερη επιρροή στην δυσκαμψία του υλικού σε σύγκριση με την πλευρική πίεση. Σε μελέτη που διεξήχθη από τον Morgan (1966), το ελαστικό μέτρο φάνηκε να μειώνεται ελαφρώς με αύξηση της παρεκκλίνουσας τάσης υπό συνεχή περιορισμό. Ο Hicks (1970) επισήμανε ότι το ελαστικό μέτρο είναι σχεδόν ανεπηρέαστο από το μέγεθος της εφαρμοζόμενης παρεκκλίνουσας τάσης, υπό την προϋπόθεση ότι δεν δημιουργείται υπερβολική πλαστική παραμόρφωση. Ακόμη σε έρευνα που πραγματοποίησαν με τον Monismith (1971) αναφέρουν ότι το υλικό που χρησιμοποίησαν παρουσίασε ένα ελαφρύ μαλάκωμα υπό χαμηλά επίπεδα παρεκκλίνουσας τάσης ενώ σε υψηλά επίπεδα τάσεων το υλικό απέκτησε μεγαλύτερη δυσκαμψία.

Επίσης, έχει αποδειχθεί ότι ο ελαστικός λόγος του Poisson είναι άμεσα επηρεασμένος από το εφαρμοζόμενο τασικό πεδίο. Ο Hicks (1970), καθώς και ο Kolisoja (1997) αναφέρουν ότι ο λόγος του Poisson κοκκωδών υλικών αυξάνεται, με αύξηση της παρεκκλίνουσας τάσης και μείωση της περιοριστικής



## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

πίεσης. Σε εργαστηριακές τριαξονικές δοκιμές χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι. Στην πρώτη η πλευρική πίεση παραμένει σταθερή (CCP) ενώ στη δεύτερη είναι μεταβαλλόμενη (VCP). Οι Allen και Thompson (1974) υπέβαλλαν σε σύγκριση τα αποτελέσματα που έλαβαν από τις δύο παραπάνω μεθόδους και ανέφεραν υψηλότερες γενικώς τιμές του ελαστικού μέτρου στη δοκιμή υπό σταθερή πίεση περιορισμού. Το εύρος της διαφοράς αυτής δεν είναι σταθερό αλλά ποικίλει ανάλογα με την επιβαλλόμενη τάση. Επίσης, στην παραπάνω μελέτη φαίνεται ότι οι δοκιμές υπό σταθερή πλευρική πίεση έχουν ως αποτέλεσμα υψηλότερες πλευρικές παραμορφώσεις και μεγαλύτερες τιμές του λόγου του Poisson  $\nu$ .

### 2.6.3.2 Επίδραση της πυκνότητας-Effect of Density.

Είναι γνωστό εδώ και πολλά χρόνια ότι η αύξηση της πυκνότητας ενός κοκκώδους υλικού αλλάζει σημαντικά την απόκριση του υπό στατικά φορτία, προσδίδοντας του περισσότερη δυσκαμψία και ανθεκτικότητα. Ωστόσο, η επιρροή της πυκνότητας στην ελαστική απόκριση και αντοχή δεν έχει μελετηθεί με ανάλογη λεπτομέρεια. Η διαθέσιμη βιβλιογραφία είναι κάπως ασαφής όσον αφορά την επίδραση της πυκνότητας στην ελαστική απόκριση ενός κοκκώδους υλικού. Σε αρκετές μελέτες (Trollope et al., 1962, Hicks, 1970, Rada και Witczak, 1981 και Kolisoja, 1997) επισημαίνεται ότι το ελαστικό μέτρο γενικώς αυξάνεται, αυξανόμενης της πυκνότητας του υλικού. Οι Trollope et al. (1962) πραγματοποίησαν δοκιμές επαναλαμβανόμενης φόρτισης σε ομοιόμορφο υλικό και βρήκαν αύξηση του ελαστικού μέτρου κατά 50% ανάμεσα σε χαλαρά και πυκνά δοκίμια. Όταν αυξάνεται η πυκνότητα ενός υλικού, αυξάνονται και τα σημεία επαφής μεταξύ των κόκκων με αποτέλεσμα πρόσθετη συμπίεση-συμπύκνωση του συστήματος των κόκκων. Αυτό, με τη σειρά του, μειώνει την μέση πίεση επαφής που αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο εξωτερικό φορτίο. Ως εκ τούτου, η παραμόρφωση στα σημεία επαφής των κόκκων μειώνεται και το ελαστικό μέτρο αυξάνεται (Kolisoja, 1997).

Αντιθέτως, οι Thom και Brown (1988) αναφέρουν ότι η επίδραση της πυκνότητας, ή η κατάσταση συμπύκνωσης, είναι σχετικά ασήμαντη. Οι Hicks και Monismith (1971) βρήκαν ότι η επίδραση της πυκνότητας είναι μεγαλύτερη για

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

μερικώς θραυσμένα από ό,τι για πλήρως αποδιοργανωμένα αμμοχάλικα. Ακόμη, στη μελέτη που πραγματοποίησαν το ελαστικό μέτρο αυξάνεται με τη σχετική πυκνότητα για τα εν μέρει θραυστά αδρανή, ενώ παραμένει σχεδόν αμετάβλητο, όταν τα αδρανή συνθλίβονται πλήρως. Αναφέρουν επίσης ότι η επίδραση των μεταβολών στην πυκνότητα μειώνεται, καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο υλικό. Σε μελέτη που διεξήχθη από τους Barksdale και Itani (1989), το ελαστικό μέτρο αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση της πυκνότητας, μόνο σε χαμηλές τιμές της μέσης τάσης. Σε υψηλά επίπεδα τάσεων, η επίδραση της πυκνότητας βρέθηκε λιγότερο έντονη. Ο Vuong (1992) αναφέρει σε αποτελέσματα των δοκιμών του ότι σε τιμές πυκνότητας πάνω από τη βέλτιστη τιμή, το ελαστικό μέτρο δεν είναι ευαίσθητο ως προς την πυκνότητα. Η πυκνότητα του υλικού φαίνεται επίσης να έχει κάποια επιρροή στο λόγο του Poisson. Αυτή η επιρροή θεωρείται από ορισμένους ερευνητές μικρή, χωρίς σημαντικές αποκλίσεις (Hicks 1970, Allen 1973, Allen και Thompson 1974). Από την άλλη, δεν είναι λίγοι εκείνοι οι οποίοι αναφέρουν μία ελαφριά μείωση του λόγου του Poisson καθώς η πυκνότητα του υλικού αυξάνεται (Hicks και Monismith, 1971, Kolisoja, 1997).

### 2.6.3.3 Επίδραση της κοκκομετρικής διαβάθμισης, του ποσοστού σε λεπτόκοκκο υλικό και του μεγέθους μεγίστου κόκκου-Effect of Grading, Fines Content and Maximum Grain Size.

Τα κοκκώδη υλικά αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό κόκκων, συνήθως διαφορετικού μεγέθους. Προηγούμενες έρευνες στο συγκεκριμένο πεδίο έδειξαν ότι η αντοχή τέτοιων υλικών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κατανομή και το μέγεθος αυτών των σωματιδίων-κόκκων. Ωστόσο, στην υπάρχουσα βιβλιογραφία δεν υπάρχει ξεκάθαρη αναφορά της επίδρασης του ποσοστού σε λεπτόκοκκο υλικό, στην δυσκαμψία. Παρόλα αυτά, ορισμένοι ερευνητές αναφέρουν ότι το ελαστικό μέτρο γενικώς μειώνεται όταν αυξάνεται το περιεχόμενο ποσοστό σε λεπτόκοκκο υλικό (Thom and Brown, 1987, Kamal et al., 1993). Οι Hicks και Monismith (1971) παρατήρησαν μείωση στο ελαστικό μέτρο, αυξανομένης της περιεκτικότητας σε λεπτόκοκκο υλικό μείγματος μερικώς θραυσμένων αδρανών, ενώ αντίθετη επίδραση αναφέρεται στη δοκιμή

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

με πλήρως θραυσμένο μείγμα. Η διακύμανση-μεταβολή του περιεχομένου ποσοστού σε λεπτόκοκκο υλικό σε εύρος 2-10% έχει ελάχιστη επίδραση στο ελαστικό μέτρο σύμφωνα με τον Hicks (1970). Ωστόσο, μια δραματική πτώση στο ελαστικό μέτρο, της τάξεως του 60% σημειώθηκε από τους Barksdale και Itani (1989), όταν το ποσοστό σε λεπτόκοκκο αυξήθηκε από 0 έως 10%. Εργασία που εκτέλεσαν οι Jorenby και Hicks (1986) έδειξε μια αρχικά αυξανόμενη δυσκαμψία και στη συνέχεια σημαντική μείωση, καθώς προστέθηκε στο αρχικό θραυσμένο μείγμα, λεπτόκοκκο αργιλώδες υλικό. Η αρχική βελτίωση στην δυσκαμψία οφείλεται στην αύξηση των σημείων επαφής καθώς γεμίζουν τα κενά των πόρων. Σταδιακά, τα περίσσια λεπτόκοκκα σωματίδια εκτοπίζουν τους χονδρούς κόκκους έτσι ώστε η μηχανική απόδοση στηρίζεται μόνον στο λεπτόκοκκο μέρος του μείγματος και άρα επέρχεται μείωση της αντοχής. Για αδρανή υλικά με το ίδιο ποσοστό σε λεπτόκοκκο υλικό και παρόμοιο σχήμα της κατανομής του μεγέθους των κόκκων, έχειδειχθεί ότι το ελαστικό μέτρο αυξάνεται καθώς αυξάνεται το μέγεθος του μέγιστου κόκκου (Gray, 1962, Thom, 1988, Kolisoja, 1997). Σύμφωνα με τον Kolisoja (1997), η ιδιαίτερη εξήγηση της παραπάνω συμπεριφοράς είναι ότι το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου που ενεργεί σε μια ασύνδετη κοκκώδη μορφή, είτε είναι στρώση είτε δοκίμιο ελέγχου, μεταδίδεται από σωματίδιο σε σωματίδιο σχηματίζοντας διαδοχική ουρά. Όταν το φορτίο μεταδίδεται μέσω των χονδρότερων σωματιδίων, ο μικρότερος αριθμός επαφής μεταξύ σωματιδίων οδηγεί σε μικρότερη συνολική παραμόρφωση και κατά συνέπεια υψηλότερη αντοχή. Η κατανομή μεγέθους σωματιδίων ή αλλιώς η κοκκομετρική διαβάθμιση κοκκωδών υλικών, φαίνεται να έχει επιρροή στην δυσκαμψία του υλικού, αν και αυτό γενικά θεωρείται ότι είναι ελάχιστης σημασίας. Οι Thom και Brown (1988) μελέτησαν την συμπεριφορά θρυμματισμένου ασβεστόλιθου σε διαφορετικές διαβαθμίσεις και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα ομοιόμορφα διαβαθμισμένα αδρανή ήταν ελαφρώς πιο δύσκαμπτα από ό,τι τα καλώς διαβαθμισμένα αδρανή. Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρθηκαν από τους Brown και Selig (1991) και τους Raad et al. (1992).

Ο Plaistow (1994) υποστήριξε ότι, όταν εισάγεται η υγρασία σε καλά διαβαθμισμένα υλικά, η επίδραση της κοκκομετρικής διαβάθμισης μπορεί να

## **Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

αυξηθεί σημαντικά, επειδή αυτά τα υλικά μπορούν να συγκρατήσουν νερό στους πόρους τους. Μπορούν επίσης να επιτύχουν υψηλότερα επίπεδα πυκνότητας από τα ομοιόμορφα διαβαθμισμένα υλικά διότι οι μικρότεροι κόκκοι γεμίζουν τα κενά μεταξύ των μεγαλύτερων κόκκων. Ο Plaistow, ως εκ τούτου, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η κοκκομετρική διαβάθμιση έχει έμμεση επίδραση στην ελαστική συμπεριφορά του ασύνδετου αμμοχάλικου ελέγχοντας την επίδραση της υγρασίας και της πυκνότητας του συστήματος. Οι Heydinger et al. (1996) συνέκριναν την επίδραση της διαβάθμισης στο ελαστικό μέτρο για τρία υλικά: ασβεστόλιθο, χαλίκι και σκωρίες. Ο ασβεστόλιθος παρουσίασε υψηλότερο ελαστικό μέτρο, όταν ήταν καλώς διαβαθμισμένος, ενώ δεν παρατηρήθηκε κάτι αξιοσημείωτο στις μεταβολές του ελαστικού μέτρου για το χαλίκι. Στην σκωρία, ωστόσο, τα αποτελέσματα ήταν τα ακριβώς αντίθετα. Η πυκνότερη διαβάθμιση έτεινε να δώσει μεγαλύτερη δυσκαμψία. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα συμπεράσματα που συνάγονται από άλλους ερευνητές, όπως προαναφέρθηκε. Ο Van Niekerk (2002) υποστήριξε ότι, ως αποτέλεσμα του μεγαλύτερου αριθμού των περιοχών επαφής υπό σταθερό περιορισμό, ένα καλώς διαβαθμισμένο υλικό μπορεί να αναλάβει μεγάλη παρεκκλίνουσα τάση υπό σταθερή παραμόρφωση, οδηγώντας έτσι σε υψηλότερη δυσκαμψία. Η μεταβολή-απόκλιση στον ελαστικό λόγο του Poisson σε σχέση με το περιεχόμενο λεπτόκοκκο υλικό ερευνήθηκε από τον Hicks (1970), ο οποίος κατέληξε στο συμπέρασμα ότι αύξηση του ποσοστού των λεπτόκοκκων, γενικώς, οδηγεί σε μείωση του λόγου του Poisson. Ο Kolisoja (1997) σημειώνει στις μελέτες του την ύπαρξη μερικής επιρροής της διαβάθμισης των αδρανών στο λόγο του Poisson, η οποία φαίνεται να είναι ελαφρώς μικρότερη για χονδρόκοκκα από ό,τι για καλώς διαβαθμισμένα μείγματα υλικών.

### 2.6.3.4 Επίδραση του ποσοστού υγρασίας-effect of moisture content.

Έχει βρεθεί εργαστηριακά αλλά και σε επιτόπου δοκιμές ότι ο βαθμός κορεσμού ή το περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας των περισσότερων αδιατάρακτων κοκκωδών υλικών επηρεάζει την ελαστική απόκριση και τα χαρακτηριστικά του υλικού. Είναι γενικά αποδεκτό ότι η ελαστική απόκριση ξηρών αλλά και μερικώς

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

κορεσμένων κοκκωδών υλικών είναι παρόμοια, καθώς όμως προσεγγίζεται ο πλήρης κορεσμός, η ελαστική συμπεριφορά μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά. (Smith και Nair, 1973, Vuong, 1992). Ο Vuong (1992) βρήκε ότι το ελαστικό μέτρο αυξάνεται καθώς μειώνεται το ποσοστό υγρασίας. Παρατήρησε όμως ότι η αύξηση αυτή στο ελαστικό μέτρο δεν ήταν σημαντική όταν το ποσοστό υγρασίας έπεφτε κάτω από το 70% του βέλτιστου ποσοστού υγρασίας. Ερευνητές, οι οποίοι μελέτησαν την συμπεριφορά κοκκωδών υλικών υπό υψηλές τιμές του βαθμού κορεσμού, ανέφεραν αξιοσημείωτη εξάρτηση μεταξύ ελαστικού μέτρου και ποσοστού υγρασίας, με το μέτρο να μειώνεται καθώς αυξάνεται το επίπεδο κορεσμού (Haynes και Yoder, 1963, Hicks και Monismith, 1971, Barksdale και Itani, 1989, Dawson et al., 1996). Οι Haynes και Yoder (1963) για παράδειγμα, παρατήρησαν μείωση κατά περίπου 50%, στο ελαστικό μέτρο υλικού από χαλίκι για αύξηση του βαθμού κορεσμού από 70% σε 97%. Οι Hicks και Monismith (1971) κατάφεραν να δείξουν ότι το ελαστικό μέτρο μειώνεται σταθερά καθώς αυξάνεται το ποσοστό υγρασίας άνω της βέλτιστης τιμής.

Οι περισσότεροι μελετητές προτιμούν να εκφράζουν τις σχέσεις τάσεων σε όρους ολικών τάσεων, συνήθως αγνοώντας την επίδραση των πιέσεων του νερού των πόρων, επειδή είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η πίεση αυτή σε ένα μερικώς κορεσμένο υλικό ή στη δομή του οδοστρώματος. Μπορεί να υποστηριχθεί ότι δεν είναι ο βαθμός κορεσμού που επηρεάζει τη συμπεριφορά του υλικού, αλλά η απόκριση της πίεσης πόρων είναι αυτή που ελέγχει την παραμορφωσιακή συμπεριφορά. Ο Mitry (1964), οι Seed et al. (1967) και ο Hicks (1970) αναφέρουν ότι επέρχεται μείωση στον ελαστικό συντελεστή λόγω κορεσμού μόνον εφόσον η ανάλυση βασίζεται σε ολικές τάσεις. Οι Thom και Brown (1987), όμως, υποστήριξαν ότι η παρουσία υγρασίας σε ένα μείγμα αμμοχάλικου έχει λιπαντική δράση στους κόκκους του υλικού. Αυτό αυξάνει την παραμόρφωση του υλικού με επακόλουθη μείωση του ελαστικού μέτρου, ακόμη και χωρίς την δημιουργία πίεσης του νερού των πόρων. Επιβεβαίωσαν αυτή την υπόθεση με μια σειρά από επαναλαμβανόμενες τριαξονικές δοκιμές σε δοκίμια θρυμματισμένου βράχου, μεταβάλλοντας την περιεκτικότητα σε υγρασία. Εκτέλεσαν δοκιμές υπό πλήρως στραγγιζόμενες συνθήκες και συχνότητες

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

φόρτισης 0,1-3 Hz, και παρατήρησαν ότι δεν αναπτύχθηκαν αξιοσημείωτες πιέσεις πόρων για βαθμούς κορεσμού έως 85%. Παρά την μη ανάπτυξη πίεσης του νερού των πόρων τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι υπάρχει μείωση στο ελαστικό μέτρο αυξανόμενης της περιεκτικότητας σε υγρασία και αυτό σχετίζεται με την λιπαντική επίδραση του νερού. Επίσης, ένας άλλος τρόπος ερμηνείας των παρατηρήσεων αυτών είναι ότι με την υψηλότερη περιεκτικότητα σε νερό, μειώνονται, τοπικά, οι αναρροφήσεις των πόρων με αποτέλεσμα τη μείωση των διασωματιδιακών δυνάμεων επαφής. Μελέτη που διεξήχθη από τους Raad et al. (1992) έδειξε ότι η επίδραση της υγρασίας επί της ελαστικής συμπεριφοράς ασύνδετων κοκκωδών υλικών είναι ίσως ο πιο σημαντικός παράγοντας σε καλά διαβαθμισμένα υλικά με υψηλό ποσοστό σε λεπτόκοκκο μέρος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το νερό συγκρατείται πιο εύκολα στους πόρους των υλικών αυτών, ενώ τα κακώς διαβαθμισμένα υλικά επιτρέπουν στο νερό να ρέει-στραγγίζει ελεύθερα. Οι Dawson et al. (1996) μελέτησαν μια σειρά από καλώς διαβαθμισμένα ασύνδετα μείγματα αδρανών και διαπίστωσαν ότι η δυσκαμψία έχει την τάση να αυξάνεται καθώς αυξάνεται το ποσοστό υγρασίας, σε τιμές όμως κάτω από τη βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία. Προφανώς αυτό οφείλεται στην ανάπτυξη μηχανισμού αναρρόφησης στους πόρους των αδρανών. Πέρα από το βέλτιστο ποσοστό σε υγρασία, καθώς το υλικό γίνεται περισσότερο κορεσμένο και αναπτύσσεται υπερβολική πίεση του νερού των πόρων, η επίδραση αντιστρέφεται και η δυσκαμψία αρχίζει να μειώνεται αρκετά γρήγορα.

Ο κορεσμός επηρεάζει επίσης το λόγο του Poisson των αδέσμευτων κοκκωδών υλικών. Ο Hicks (1970) αλλά και οι Hicks και Monismith (1971) αναφέρουν ότι ο λόγος του Poisson  $\nu$ , μειώνεται καθώς αυξάνεται ο βαθμός κορεσμού. Σύμφωνα με τον Hicks, η μείωση στο λόγο του Poisson σημειώνεται όταν η ανάλυση βασίζεται σε ολικές ή ενεργητικές τάσεις. Αυτό υποδηλώνει ότι η θεώρηση της αναρρόφησης που πραγματοποιείται στους πόρους ενός κόκκου, όσον αφορά την αλλαγή του ελαστικού λόγου του Poisson, είναι ανεπαρκής. Ακόμη, η θεώρηση που αναφέρεται στην λιπαντική επίδραση του νερού θα πρέπει επίσης να τεθεί υπό αμφισβήτηση, καθώς με μεγαλύτερη λίπανση θα έπρεπε να εμφανίζεται μεγαλύτερος λόγος του Poisson.

2.6.3.5 Επίδραση του ιστορικού των φορτίσεων και του αριθμού των κύκλων φόρτισης - Effect of Stress History and Number of Load Cycles.

Μελέτες έχουν δείξει ότι το ιστορικό των φορτίσεων μπορεί να έχει επιπτώσεις στην ελαστική συμπεριφορά των κοκκωδών υλικών. Σύμφωνα με τον Dehlen (1969), οι επιδράσεις του ιστορικού των φορτίσεων εμφανίζονται ως συνέπεια της προοδευτικής πύκνωσης και αναδιάταξης των κόκκων υπό επαναλαμβανόμενη φόρτιση. Οι Boyce et al. (1976) πραγματοποίησαν τριαξονικές δοκιμές επαναλαμβανομένων φορτίσεων σε δείγματα καλά διαβαθμισμένου συνθλιμμένου ασβεστολίθου, όπου όλα τα δοκίμια είχαν συμπιεστεί ώστε να έχουν την ίδια πυκνότητα σε ξηρή κατάσταση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το υλικό ήταν ευπαθές στην επίδραση του ιστορικού των φορτίσεων αλλά οι επιδράσεις αυτές θα μπορούσαν να μειωθούν με προφόρτιση με μερικούς κύκλους του ισχύοντος καθεστώτος φόρτισης και αποφεύγοντας υψηλές αναλογίες τάσεων στις δοκιμές προσδιορισμού της ελαστικής απόκρισης. Ο Hicks (1970), από την άλλη πλευρά, ανέφερε ότι επιτυγχάνεται σταθερή και μόνιμη ελαστική απόκριση μετά την εφαρμογή περίπου 100 κύκλων του ίδιου μεγέθους τάσεων όπου πλέον η επίδραση της ιστορίας φορτίσεων έχει σχεδόν εξαλειφθεί. Παρόμοιες παρατηρήσεις αναφέρθηκαν από άλλους ερευνητές οι οποίοι πρότειναν προφορτίσεις του υπό εξέταση δείγματος έως και για 1000 επαναλήψεις-κύκλους φορτίσεων. Αρκετοί ερευνητές ανέφεραν ότι τα χαρακτηριστικά ελαστικότητας των αδέσμευτων κοκκωδών υλικών δεν είναι ευαίσθητα ως προς το ιστορικό των φορτίσεων, υπό την προϋπόθεση ότι οι εφαρμοζόμενες τάσεις διατηρούνται σε αρκετά χαμηλά επίπεδα, για την αποφυγή σημαντικής μόνιμης παραμόρφωση στο υλικό. (Brown και Hyde, 1975, Mayhew, 1983). Επομένως, μεγάλος αριθμός ελαστικών δοκιμών μπορούν να διεξαχθούν διαδοχικά στο ίδιο δοκίμιο, για τον προσδιορισμό των ελαστικών παραμέτρων του υλικού. Οι Moore et al. (1970) ερεύνησαν την επίδραση του αριθμού των κύκλων φορτίσεως στην ελαστική απόκριση των κοκκωδών υλικών. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το ελαστικό μέτρο αυξάνεται καθώς αυξάνεται ο αριθμός των επαναλήψεων φόρτισης, εν μέρει λόγω της απώλειας της υγρασίας από το δοκίμιο κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Ο Hicks (1970), από την άλλη πλευρά, ανέφερε ότι οι ελαστικές

## **Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

ιδιότητες των κοκκωδών υλικών που εξετάσε ήταν σχεδόν οι ίδιες μετά από 50-100 επαναλήψεις φορτίσεων έως και για 25.000 επαναλήψεις.

### 2.6.3.6 Επίδραση του είδους του αμμοχάλικου και του σχήματος των κόκκων-Effect of Aggregate Type and Particle Shape.

Σε πρόσφατη μελέτη, που διεξήχθη από τους Heydinger et al. (1996), δείχθηκε ότι το χαλίκι έχει υψηλότερο ελαστικό μέτρο από τον θρυμματισμένο ασβεστόλιθο. Επιπροσθέτως, πολλοί ερευνητές αναφέρουν ότι τα θρυμματισμένα αμμοχάλικα, με γωνιακό ή περίπου γωνιακό σχήμα των κόκκων τους, παρέχουν καλύτερες ιδιότητες ως προς τη διασπορά του φορτίου με το βάθος καθώς και υψηλότερο ελαστικό μέτρο συγκριτικά με ένα άθραυστο αμμοχάλικο με στρογγυλεμένες αιχμές των κόκκων του (Hicks, 1970, Hicks και Monismith, 1971, Allen, 1973, Allen και Thompson, 1974, Barksdale και Itani, 1989, Thom και Brown, 1989). Η τραχεία επιφάνεια των κόκκων είναι επίσης ένας παράγοντας που οδηγεί σε υψηλότερο ελαστικό μέτρο. Οι Barksdale και Itani (1989) ερεύνησαν πολλούς και διαφορετικούς τύπους αμμοχάλικων. Παρατήρησαν ότι το ελαστικό μέτρο ήταν υψηλότερο σε θραυστά αμμοχάλικα με τραχεία και γωνιώδη επιφάνεια των κόκκων τους σε σχέση με ένα αμμοχάλικο με στρογγυλεμένους κόκκους. Παρά το γεγονός ότι η αύξηση του γωνιώδους και της επιφανειακής τραχύτητας των κόκκων ενός αμμοχάλικου θα μπορούσε να οδηγήσει σε υψηλότερη τιμή του ελαστικού μέτρου, οι μελέτες δείχνουν ότι ο λόγος του Poisson μειώνεται για τις ίδιες συνθήκες (Hicks, 1970, Hicks και Monismith, 1971, Allen, 1973). Αυτή η παρατήρηση τείνει να ενισχύσει την αμφιβολία που υπάρχει σχετικά με την θεώρηση της λιπαντικής επίδρασης του νερού και της σχέσης ανάμεσα στο λόγο του Poisson και το ποσοστό υγρασίας, που αναφέρθηκε νωρίτερα, καθώς οι πλευρικές, ελαστικές κινήσεις ελέγχονται από τις συνθήκες επαφής μεταξύ των κόκκων του υλικού.



2.6.3.7 Επίδραση της διάρκειας, της συχνότητας και της ακολουθίας φορτίσεων-  
Effect of Load Duration, Frequency and Load Sequence

Η γενική άποψη σχετικά με την επίδραση της διάρκειας φόρτισης και της συχνότητας στην ελαστική συμπεριφορά κοκκωδών υλικών είναι ότι αυτές οι παράμετροι έχουν ελάχιστη ή καμία σημασία (Seed et al., 1965, Hicks, 1970, Boyce et al., 1976, Thom και Brown, 1987). Οι Seed et al. (1965) αναφέρουν σε μία μελέτη που πραγματοποίησαν ότι το ελαστικό μέτρο αμμώδους υλικού αυξήθηκε ελαφρά καθώς μειωνόταν η διάρκεια φόρτισης. Ο Hicks (1970) πραγματοποίησε δοκιμές με διάρκεια φορτίσεων 0.1, 0.15 και 0.25 δευτερόλεπτα και δεν βρήκε καμία αλλαγή στο ελαστικό μέτρο ή στο λόγο του Poisson.

Το πιθανότερο σενάριο είναι ότι το ελαστικό μέτρο μειώνεται, με αυξανόμενη συχνότητα φόρτισης, όταν το ποσοστό υγρασίας πλησιάζει το σημείο κορεσμού. Τότε μπορούν να αναπτυχθούν παροδικές πιέσεις πόρων προκαλώντας μείωση των ενεργητικών τάσεων. Τούτο εκδηλώνεται περισσότερο αν υπάρχει μικρή πιθανότητα αποστράγγισης. Οι Hicks (1970) και Allen (1973) μελέτησαν την ακολουθία φόρτισης της δοκιμής και τη σειρά με την οποία εφαρμόζονται οι τάσεις σε ένα δείγμα. Οι μελέτες αυτές έδειξαν ότι η αλληλουχία των φορτίσεων δεν έχει σχεδόν καμία επίδραση στις ελαστικές ιδιότητες των κοκκωδών υλικών.

## **2.7 Καταστατικά μοντέλα ελαστικής συμπεριφοράς.**

Η ανασκόπηση των καταστατικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται κυρίως στον ευρωπαϊκό χώρο για την περιγραφή της ελαστικής συμπεριφοράς των ασύνδετων κοκκωδών υλικών βάσεων και υποβάσεων υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση οδηγεί στον διαχωρισμό τριών βασικών, μη γραμμικών και ελαστικών τύπων μοντέλων.

### 2.7.1 Μοντέλο k-θ

Το πρώτο, ευρέως γνωστό μοντέλο είναι το μοντέλο k-θ. Μία αρκετά διαδεδομένη προσέγγιση στην αντιμετώπιση της επίδρασης των τάσεων στην δυσκαμψία του υλικού είναι η έκφραση του ελαστικού μέτρου ως συνάρτηση του αθροίσματος των κύριων τάσεων γνωστή και ως τάση διογκώσεως. Οι Seed et al. (1967), Brown και Pell (1967), και ο Hicks (1970) αργότερα πρότειναν την παρακάτω υπερβολική σχέση:.

$$E_r = k_1 p_a \left( \frac{3p}{p_a} \right)^{k_2}$$

όπου

$E_r$ : το ελαστικό μέτρο

p: μέση κανονική κύρια τάση

$$p = \frac{\sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3}{3} = \frac{\theta}{3}$$

$p_a$ : ισοδύναμη πίεση αναφοράς ίση με 100 kPa

$k_1, k_2$  : παράμετροι του υλικού ανάλογα με την κατάσταση και την ποιότητα του υλικού

$\sigma_1$  = κύρια κατακόρυφη τάση

$\sigma_3$  = κύρια οριζόντια τάση

$\theta$  = τάση διόγκωσης =  $\sigma_1 + 3 \sigma_3 = 3p$

Το μοντέλο αυτό ήταν το πρώτο που προτείνει να περιγράφουν τα αποτελέσματα των επαναλαμβανομένων τριαξονικών δοκιμών φόρτισης με σταθερή πλευρική πίεση (CCP). Εξακολουθεί να χρησιμοποιείται ευρέως, λόγω της απλότητάς του. Η απλότητα αυτή του μοντέλου k-θ είναι που το κατέστησε εξαιρετικά χρήσιμο και ευρέως αποδεκτό για αναλύσεις του ελαστικού μέτρου

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

του υλικού η οποία εξαρτάται από το τασικό πεδίο. Ωστόσο, το μοντέλο έχει διάφορα μειονεκτήματα και για αυτό το λόγο διάφοροι ερευνητές έχουν προβεί σε αρκετές τροποποιήσεις. Το μοντέλο k-θ υποθέτει σταθερό λόγο του Poisson, με γενικά αποδεκτή τιμή  $\nu = 0.3$ , η οποία χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τον υπολογισμό της ακτινικής παραμόρφωσης. Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι αυτή η αυθαίρετη θεώρηση είναι εσφαλμένη, διότι ο λόγος του Poisson δεν είναι σταθερός αλλά μεταβάλλεται σύμφωνα με τις εφαρμοζόμενες τάσεις (Hicks, 1970, Hicks και Monismith, 1971, Brown και Hyde, 1975, Boyce, 1980, Sweere, 1990, Kolisoja, 1997). Ο Sweere (1990), για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας σταθερή αναλογία του Poisson, εξέτασε το μοντέλο k-θ και ανέφερε καλές προβλέψεις όσον αφορά τις αξονικές παραμορφώσεις αλλά πολύ κακές προβλέψεις ακτινικών και ογκομετρικών παραμορφώσεων. Ένα άλλο μειονέκτημα του μοντέλου είναι το γεγονός ότι η επίδραση των τάσεων στο ελαστικό μέτρο εξηγείται μόνο από το άθροισμα των κυρίων τάσεων. Αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι η θεώρηση αυτή είναι ανεπαρκής και απαιτούνται πρόσθετες τασικές παράμετροι. Οι May και Witczak (1981) σε επιτόπου δοκιμές που πραγματοποίησαν, παρατήρησαν ότι το ελαστικό μέτρο μίας κοκκώδους στρώσεως είναι συνάρτηση όχι μόνο της τάσης διογκώσεως αλλά εξαρτάται και από το μέγεθος της διατμητικής παραμόρφωσης που προκαλείται κυρίως από διάτμηση ή την παρεκκλίνουσα τάση.

### 2.7.2 Μοντέλο Uzan Universal

Πρόσφατα οι Uzan et al. (1992), τροποποίησαν το αρχικό μοντέλο k-θ, υποθέτοντας ότι το ελαστικό μέτρο εξαρτάται από την μέση κανονική τάση p αλλά και από την παρεκκλίνουσα τάση q. Η σχέση που χρησιμοποιείται είναι η εξής:

$$E_r = K_1 p_a \left( \frac{3p}{p_a} \right)^{K_2} \left( \frac{q}{p_a} \right)^{K_3}$$

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

Όπου

$q$ : παρεκκλίνουσα τάση =  $\sigma_1 - \sigma_3$

$K_1, K_2, K_3$ : Παράμετροι του υλικού εξαρτώμενοι από την κατάσταση και την ποιότητα του ασύνδετου κοκκώδους υλικού.

Σε περίπτωση απεικόνισης σε τρεις διαστάσεις η παρεκκλίνουσα τάση  $q$  στο μοντέλο Uzan αντικαθίσταται από την οκταεδρική τάση  $\tau_{oct}$ . Επίσης, και σε αυτό το μοντέλο υποτίθεται σταθερός συντελεστής Poisson ίσος με  $\nu = 0.3$ . Σύμφωνα με αρκετές μελέτες το μοντέλο Uzan υπερτερεί έναντι του μοντέλου  $k-\theta$  σε πολλούς τομείς (Witczak και Uzan, 1988, Kolisoja, 1997). Αυτός είναι και ο λόγος που χρησιμοποιείται ευρέως σε αναλύσεις ρουτίνας.

### 2.7.3 Μοντέλο MEPDG

Το μοντέλο MEPDG-Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide εισήχθη πρόσφατα στις Ηνωμένες Πολιτείες (AASHTO 2008). Το μοντέλο αναπτύχθηκε από το εθνικό οδικό πρόγραμμα έρευνας των ΗΠΑ [National Cooperative Highway Research Program (NCHRP)] υπό την χορηγία της αμερικανικής ένωσης των κρατικών εθνικών οδών και μεταφορών (ARA, 2004). Το MEPDG και το σχετικό λογισμικό παρέχει δυνατότητες για την ανάλυση και την πρόβλεψη της απόδοσης εύκαμπτων και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. Στο μοντέλο αυτό, το ελαστικό μέτρο των ασύνδετων κοκκωδών υλικών εκτιμάται χρησιμοποιώντας μια σχέση παρόμοια με αυτή του μοντέλου Uzan Universal όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\text{MEPDG Model (NCHRP., 2004): } E_r = K_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{K_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{K_3}$$

$E_r$ : το ελαστικό μέτρο

$p_a$ : ισοδύναμη πίεση αναφοράς ίση με 100 kPa

$K_1, K_2, K_3$ : παράμετροι του υλικού ανάλογα με την κατάσταση και την ποιότητα του υλικού (συντελεστές παλινδρόμησης)

Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

$\sigma_1$  = κύρια κατακόρυφη τάση

$\sigma_3$  = κύρια οριζόντια τάση

$\sigma_1, \sigma_2,$  και  $\sigma_3$  = κύριες τάσεις, όπου  $\sigma_2 = \sigma_3$

$\sigma_d = q$ : παρεκκλίνουσα τάση =  $\sigma_1 - \sigma_3$

$\theta$  = τάση διόγκωσης =  $\sigma_1 + 3 \sigma_3 = 3p$

$\tau_{oct}$  = οκταεδρική διατμητική

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_d$$

.

### **3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ**

#### **3.1 Εισαγωγή**

Η παρούσα μελέτη έχει ως στόχο την έρευνα, την ανάπτυξη και την επικύρωση υπαρχόντων δεδομένων σχετικά με την μηχανική συμπεριφορά των ασύνδετων, υλικών οδοστρωσίας τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως ως υλικά βάσεων και υποβάσεων κατά την κατασκευή ενός οδοστρώματος. Μέσω εργαστηριακών πειραματικών δοκιμών και με χρήση του απαραίτητου εξοπλισμού γίνεται προσπάθεια για εμβάθυνση στις παραμέτρους που επηρεάζουν την φέρουσα ικανότητα και αντοχή μίας στρώσης από κοκκώδες υλικό. Ως άξονας χρησιμοποιείται το ελαστικό μέτρο  $M_T$  του υλικού και οι παράγοντες που το επηρεάζουν, εξετάζοντας λεπτομερέστερα την επιρροή του ποσοστού υγρασίας.

#### **3.2 Σχεδιάγραμμα της μελέτης**

Γίνεται μία προσπάθεια κατανόησης και διερεύνησης των κύριων παραγόντων που επηρεάζουν την συμπεριφορά τριών υλικών τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά κατασκευής βάσεων και υποβάσεων σε διάφορους τύπους οδοστρώματος. Ένας από τους κυριότερους στόχους που έχουν τεθεί στην παρούσα έρευνα είναι η πλήρης απλοποίηση και κατανόηση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς των υλικών αυτών. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού και εξαιτίας του γεγονότος ότι υπάρχει τεράστια ποικιλία περιπτώσεων και καταστάσεων συμπεριφοράς, κρίνεται αναγκαία η αξιοποίηση και χρήση επαρκών δεδομένων. Επομένως, η χρησιμοποίηση των υπαρχόντων δεδομένων αλλά και αυτών που προκύπτουν από την παρούσα μελέτη καθιστά επιτακτική την ανάγκη για μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των υλικών αυτών. Για την πραγματοποίηση των παραπάνω σκοπών και για την εξέταση των σημαντικότερων παραμέτρων που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά και την συμπεριφορά ενός υλικού (περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας, καθεστώς των

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

τάσεων και προέλευση του υλικού) γίνεται λεπτομερής εξέταση των τριών διαθέσιμων υλικών με χρήση εργαστηριακών δοκιμών.

### 3.3 Κυριότεροι στόχοι

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο κυριότερος στόχος της παρούσας μελέτης εναπόκειται στην όσο το δυνατόν καλύτερη κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς κατά την παραμόρφωση, συμβατικών αλλά και ανακυκλωμένων ασύνδετων κοκκωδών υλικών, υπό τα φορτία κυκλοφορίας καθώς και η εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στην ελαστική τους απόκριση χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών. Οι πέντε σημαντικότερες σκοπιές της παρούσας έρευνας συνοψίζονται παρακάτω.

- Καθορισμός της ελαστικής παραμόρφωσης των ασύνδετων υλικών οδοστρωσίας ως συνάρτηση του αριθμού των επαναλήψεων φόρτισης, του περιεχόμενου ποσοστού υγρασίας, της σχετικής πυκνότητας, της πλευρικής πίεσης και της παρεκκλίνουσας τάσης.
- Προσδιορισμός του ελαστικού μέτρου  $M_T$  των ασύνδετων κοκκωδών υλικών συναρτήσει της σχετικής πυκνότητας, του ποσοστού υγρασίας, της πλευρικής πίεσης, της παρεκκλίνουσας τάσης και του περιεχόμενου ποσοστού σε λεπτόκοκκο υλικό.
- Σύγκριση της ελαστικής, ανακτήσιμης παραμόρφωσης και του ελαστικού μέτρου διαφορετικών κοκκωδών υλικών.
- Εκτίμηση της συμβατότητας αριθμητικών μοντέλων που αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιούνται από πολλούς ερευνητές για την πρόβλεψη της ελαστικής απόκρισης και των παραμέτρων της.
- Συζήτηση των πιθανότερων σφαλμάτων που εμφανίζονται στις επαναλαμβανόμενες τριαξονικές δοκιμές φόρτισης για τον καθορισμό και την διόρθωση του ελαστικού μέτρου και της απόκρισης.

Για τον χαρακτηρισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των ασύνδετων κοκκωδών υλικών που χρησιμοποιούνται στην παρούσα έρευνα, διεξήχθησαν εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού των βασικών ιδιοτήτων ταυτότητας

## **Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

(ταξινόμηση, κοκκομετρική διαβάθμιση, εύρεση του περιεχόμενου ποσοστού υγρασίας) καθώς και δοκιμές που αφορούν τον βαθμό συμπύκνωσης (τροποποιημένη δοκιμή Proctor, μέγιστη ξηρή πυκνότητα και βέλτιστο ποσοστό υγρασίας) των τριών υλικών. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν και συζητούνται λεπτομερέστερα σε επόμενο κεφάλαιο ειδικές τεχνικές προετοιμασίας δειγμάτων και δοκιμών σύμφωνα με τις αμερικανικές, πρότυπες προδιαγραφές. Τέλος, προσδιορίστηκε η ελαστική παραμόρφωση και το ελαστικό μέτρο  $M_r$ , μέσω της εργαστηριακής, τριαξονικής δοκιμής.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφική ανασκόπηση που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 2, γίνεται σαφές ότι η μηχανική συμπεριφορά ενός ασύνδετου, κοκκώδους υλικού βάσεως ή υποβάσεως οδοστρώματος, υπό την έννοια της αντοχής, της δυσκαμψίας και της αντίστασης σε παραμόρφωση, χαρακτηρίζεται καλύτερα στο εργαστήριο με την τριαξονική δοκιμή. Ο σκοπός της τριαξονικής δοκιμής είναι να προσομοιώσει στο εργαστήριο, όσο το δυνατόν πιστότερα την κατάσταση μέσα στη δομή του οδοστρώματος σε σχέση με την κοκκομετρική διαβάθμιση, το περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας, την πυκνότητα και τις εφαρμοζόμενες τάσεις. Μετρούνται και καταγράφονται οι παραμορφώσεις που προκύπτουν ως αποτέλεσμα της εφαρμογής ενός τασικού πεδίου σε ένα δοκίμιο και στη συνέχεια καθορίζονται οι θεμελιώδεις παράμετροι ενός υλικού. Παρακάτω συνοψίζονται οι επιμέρους στόχοι που καλείται να επιτύχει η εργαστηριακή τριαξονική δοκιμή:

- Χαρακτηρισμός της αστοχίας και της συμπεριφοράς κατά την παραμόρφωση ενός ασύνδετου, κοκκώδους υλικού.
- Αξιολόγηση της επίδρασης που επιφέρουν σε ένα υλικό ορισμένες βασικές παράμετροι, όπως ο τύπος του υλικού, το ποσοστό υγρασίας και ο βαθμός συμπύκνωσης.
- Αξιολόγηση της καταλληλότητας των υφιστάμενων μαθηματικών μοντέλων ελαστικής παραμόρφωσης για τα υπό εξέταση υλικά.
- Χρησιμοποίηση των αποτελεσμάτων της εργαστηριακής δοκιμής για την ανάπτυξη και επικύρωση ενός καταλληλότερου μοντέλου, για κάθε κατηγορία υλικού.



## **Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

Η παρούσα μελέτη αναφέρεται και ασχολείται κυρίως με την ελαστική παραμόρφωση-απόκριση τριών ασύνδετων, κοκκωδών υλικών. Κατά την εκτέλεση της εργαστηριακής τριαξονικής δοκιμής, δεν πραγματοποιήθηκαν δοκιμές που αφορούν την μόνιμη παραμόρφωση-απόκριση των υλικών για τους δύο παρακάτω βασικούς λόγους.

- Παρά την μεγάλη ποσότητα υλικών που μεταφέρθηκε στο εργαστήριο, δεν περίσσεψε επαρκής ποσότητα υλικών για την περάτωση δοκιμών μόνιμης παραμόρφωσης.
- Εξαιτίας του εκτεταμένου προγράμματος τριαξονικών δοκιμών ανακυκλικής φόρτισης και ελαστικής παραμόρφωσης, το οποίο είναι και ο πρωταρχικός στόχος του παρόντος ερευνητικού έργου, δεν ήταν δυνατόν να συμπεριληφθούν εντός της περιορισμένης διάρκειας της έρευνας, εργαστηριακές δοκιμές μόνιμης παραμόρφωσης.

## **4. ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ**

### **4.1 Εισαγωγικά στοιχεία**

Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει μία περιγραφή των πειραματικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη συμπεριλαμβανομένων των υλικών, της προετοιμασίας των δειγμάτων και των μεθόδων εργαστηριακών δοκιμών. Ακόμη, παρουσιάζονται οι γενικές ιδιότητες των υπό εξέταση κοκκωδών υλικών όπως η κοκκομετρική τους διαβάθμιση, το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας, η μέγιστη ξηρή πυκνότητα και άλλες. Για την εξαγωγή όσο το δυνατόν ακριβέστερων αποτελεσμάτων εκτελέστηκαν πολυάριθμες τριαξονικές δοκιμές κυκλικής φόρτισης προκειμένου να εκτιμηθεί η επιρροή του περιεχόμενου ποσοστού υγρασίας στο ελαστικό μέτρο των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν.

Η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας δείχνει ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά ενός κοκκώδους υλικού είναι:

- Οι ιδιότητες των κόκκων του υλικού όπως η κοκκομετρία, το σχήμα, η υφή, η ορυκτολογική σύνθεση και η πηγή λήψης του αμμοχάλικου ή του υλικού της στρώσης.
- Οι ιδιότητες-συνθήκες του αμμοχάλικου όπως το περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας, ο βαθμός συμπύκνωσης και το καθεστώς των τάσεων στις οποίες υποβάλλεται.

Οπότε, προκειμένου να καταφέρουμε να ερευνήσουμε την σημασία των παραπάνω ιδιοτήτων ενός υλικού και να την επικυρώσουμε με τις εργαστηριακές δοκιμές σε διάφορα υλικά, κρίνεται αναγκαίο να εξετάσουμε τρεις τύπους υλικών στην παρούσα έρευνα. Για το σκοπό αυτό, απαιτήθηκαν και συγκεντρώθηκαν στο εργαστήριο μεγάλες ποσότητες των εξεταζόμενων κοκκωδών υλικών βάσεων/υποβάσεων. Όλες οι παραπάνω ιδιότητες τόσο των μεμονωμένων κόκκων αλλά και του αμμοχάλικου ως σύνολο πιστεύετε ότι επηρεάζουν την μηχανική συμπεριφορά όχι όμως με την ίδια βαρύτητα. Εντός του πεδίου μελέτης της παρούσας έρευνας ως κυριότεροι παράμετροι επιρροής

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

επιλέχθηκαν να εξεταστούν το ποσοστό υγρασίας, ο βαθμός συμπίκνωσης και οι επιβαλλόμενες τάσεις.

### 4.2 Χρησιμοποιούμενα υλικά

#### Υλικό Α-Θραυστό αμμοχάλικο 3Α

Πρόκειται για αμμοχάλικο που προέκυψε από θραύση και μηχανική κατεργασία ασβεστολίθου σε λατομείο και εναρμονίζεται με τις Πρότυπες Τεχνικές Προδιαγραφές Οδοστρωσίας, Π.Τ.Π.Ο 155 για βάσεις οδοστρωμάτων. Αποτελείται από χαλίκια μέσων διαστάσεων και άμμο ενώ οι κόκκοι χαρακτηρίζονται από επίμηκες, επιπεδογενές σχήμα.

#### Υλικό Β-Ανακυκλωμένο ασφαλτικό υλικό(RAP)

Είναι κονιορτοποιημένο, επεξεργασμένο υλικό προερχόμενο από την ανακύκλωση ασφαλτομίγματος. Περιέχει σημαντικό ποσοστό ασφάλτου και αδρανών υψηλής ποιότητας και χρησιμοποιείται ως ασύνδετο υλικό βάσεων και υποβάσεων.

#### Υλικό Γ-Μείγμα αμμοχάλικου 3Α και ανακυκλωμένου υλικού RAP 50/50

Το τρίτο υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία αποτελεί μείγμα των δύο πρώτων υλικών δηλαδή πρόκειται για μείγμα θραυστού αμμοχάλικου 3Α και ανακυκλωμένου ασφαλτικού υλικού RAP σε αναλογίες ανάμειξης 50% έκαστο. Τα δύο υλικά αναμείχθηκαν καλά με την βοήθεια μηχανικού διαχωριστή προκειμένου το τελικό μείγμα να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο ομοιογενές.



**ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 1:** Τα τρία υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην εργαστηριακή έρευνα. Αμμοχάλικο 3A (αριστερά), RAP (δεξιά), Μείγμα 50%3A+50%RAP (στο κέντρο).

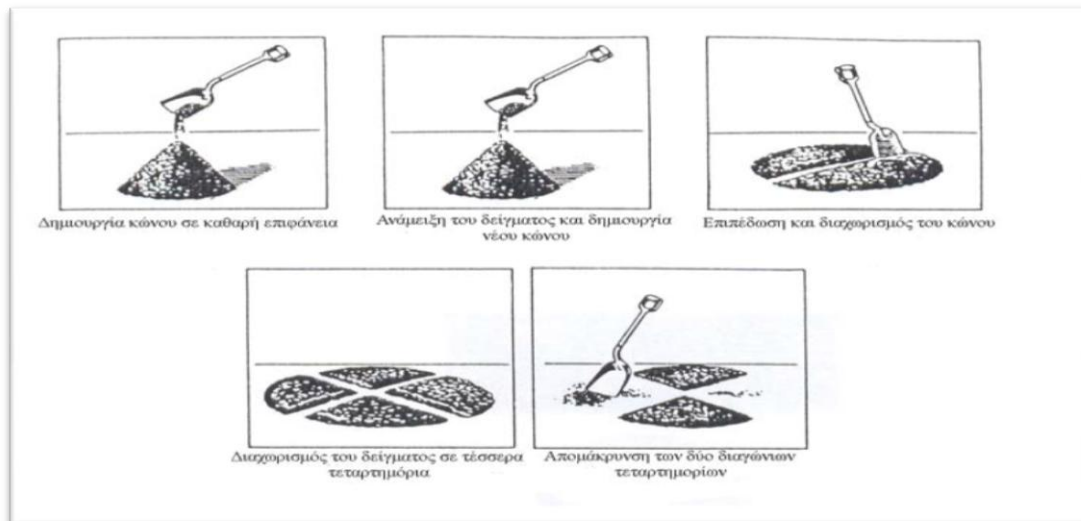
#### 4.3 Κοκκομετρική ανάλυση για κάθε υλικό.

Η συμβολή της κοκκομετρικής διαβάθμισης και της κατανομής μεγέθους των κόκκων είναι γνωστό ότι επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες και την απόκριση των αδρανών υλικών. Διαφορετικές διαβαθμίσεις οδηγούν ουσιαστικά σε σημαντικές μεταβολές στην συμπεριφορά ενός κοκκώδους υλικού. Αυτό συμβαίνει επειδή η κατανομή μεγέθους των κόκκων διαμορφώνει την δομή ενός υλικού καθώς καθορίζει τις σχέσεις επαφής μεταξύ των κόκκων. Η πυκνή διαμόρφωση των κόκκων αυξάνει τις μεταξύ τους τριβές και τάσεις επαφής, οδηγώντας στην αύξηση της διατμητικής αντοχής και στην μείωση της συμπιεστότητας των αδρανών ενός υλικού. Στα οδοστρώματα, με βάσεις και υποβάσεις κατασκευασμένες από ασύνδετα κοκκώδη υλικά, η κατανομή του μεγέθους των κόκκων προτιμάται συχνά να είναι καλά διαβαθμισμένη ώστε να

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

παρέχεται επαρκής διατμητική αντοχή όταν υποβάλλονται σε φορτίσεις λόγω της κυκλοφορίας.

Η κοκκομετρική ανάλυση ξεκινάει με μείωση του αρχικού δείγματος κάθε υλικού στην ποσότητα που απαιτείται για τη δοκιμή με κόσκινα, σύμφωνα με το αμερικανικό πρότυπο ASTM C702 (Practice for reducing field samples of aggregate to testing size) με τη μέθοδο του τετραμερισμού (σχήμα 17).



**ΣΧΗΜΑ 17:** Τετραμερισμός δείγματος (ASTM C702).

Η διαδικασία κοκκομετρικής ανάλυσης αδρανών υλικών διαφέρει για τα χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα αδρανή υλικά και για τον προσδιορισμό της παιπάλης η οποία εμπεριέχεται στα χονδρόκοκκα και κυρίως στα λεπτόκοκκα αδρανή σε ποσοστά που ποικίλουν ανάλογα με την προέλευση του υλικού καθώς και την παραγωγική διαδικασία.

### Κοκκομετρική ανάλυση λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων αδρανών-ASTM C 136-95 (Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregate)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τη διαβάθμιση των υλικών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ως αδρανή υλικά. Τα αποτελέσματα θα καθορίσουν την προσαρμογή της κατανομής του μεγέθους των κόκκων σύμφωνα με τις

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

απαιτήσεις των προδιαγραφών. Η συνολική ποσότητα που απαιτείται εξαρτάται από το ονομαστικό μέγιστο μέγεθος κόκκου και καθορίζεται όπως στον παρακάτω πίνακα 2.

Ονομαστικό μέγιστο μέγεθος κόκκου σε in. (mm)	Ελάχιστο βάρος δείγματος σε Kgr.
3/8 (9,5)	1
1/2 (12,5)	2
3/4 (19,0)	5
1 (25,0)	10
1 1/2 (37,5)	15
2 (50,0)	20
2 1/2 (63,0)	35
3 (75,0)	60
3 1/2 (90,0)	100
4 (100)	150
4 1/2 (112)	200
5 (125)	300
6 (150)	500

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2:** Ποσότητα δείγματος ανάλογα με το ονομαστικό μέγιστο μέγεθος κόκκου.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία έχουν ονομαστικό μέγιστο μέγεθος κόκκου περί τα 30 χιλιοστά οπότε για την εκτέλεση της ανάλυσης απαιτήθηκαν περίπου δέκα (10) κιλά από το κάθε υλικό. Η σειρά κοσκίνων που χρησιμοποιήθηκαν απεικονίζεται στην παρακάτω φωτογραφία 2 και ακολουθεί το πρότυπο ASTM E11.

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.



**ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 2:** Σειρά πρότυπων κοσκίνων του Εργαστηρίου Οδοποιίας ΕΜΠ για κοκκομετρική ανάλυση σύμφωνα με το αμερικανικό πρότυπο ASTM E11 και τοποθέτηση ποσότητας υλικού (6 kg) στην κορυφή της στήλης των κοσκίνων.

Ο αριθμός και τα ανοίγματα των κοσκίνων που χρησιμοποιούνται κάθε φορά καθορίζονται από τις πληροφορίες που θέλουμε να πάρουμε για το δείγμα που εξετάζεται. Χρησιμοποιήθηκαν κόσκινα με ανοίγματα **0.074-0.180-0.420-2.000-4.750-9.5-19.0** και **25.0** χιλιοστά των οποίων το βάρος ζυγίστηκε και καταγράφηκε πριν την έναρξη της διαδικασίας. Τα δείγματα των τριών υλικών ξεραίνονται στην κατάλληλη θερμοκρασία (στους 110 οC το υλικό Α-αμμοχάλικο 3Α και στους 40 οC τα δύο άλλα υλικά που περιέχουν RAP) για 4-6 ώρες ώστε να απομακρυνθεί το ανεπιθύμητο περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας. Στη συνέχεια για κάθε ένα από τα τρία υλικά της δοκιμής, τοποθετείται αντιπροσωπευτική ποσότητα του μείγματος στην κορυφή της στήλης των κοσκίνων (φωτογραφία 2) και ξεκινάει η κοσκίνιση. Η κοσκίνιση πραγματοποιήθηκε με ανατάραξη των κοσκίνων με μηχανικό δονητή για δέκα λεπτά. Το υλικό κατανέμεται στα κόσκινα και ζυγίζεται η καθαρή ποσότητα υλικού που παραμένει σε κάθε κόσκινο. Υπολογίζονται για κάθε κόσκινο το ποσοστό διερχόμενου υλικού, το ποσοστό συγκρατούμενου υλικού και το συνολικό αθροιστικό διερχόμενο

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

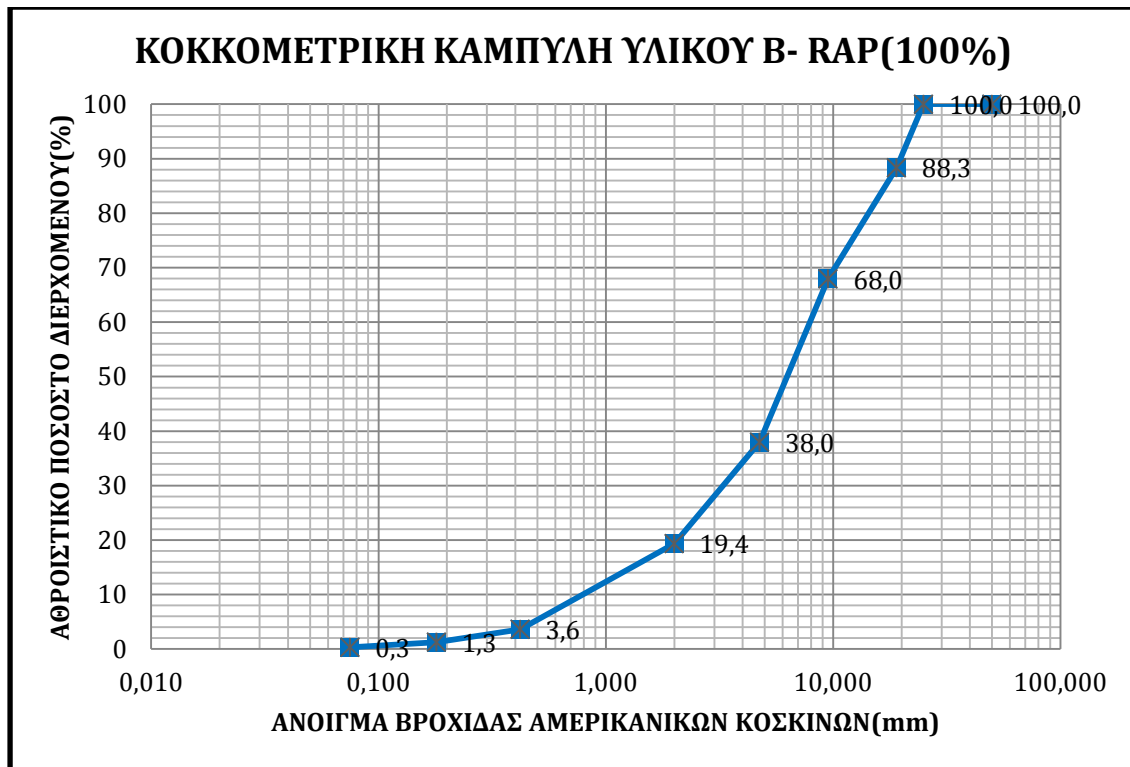
ποσοστό. Γνωρίζοντας το χαρακτηριστικό άνοιγμα βροχίδας καθενός κοσκίνου και το αθροιστικό επί τοις εκατό διερχόμενο ποσοστό από κάθε κόσκινο, χαράσσεται η κοκκομετρική καμπύλη. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για τα τρία υλικά που θα εξετασθούν και προκύπτουν οι παρακάτω κοκκομετρικές καμπύλες (σχήματα 18,19,20 και 21). Από το συγκριτικό σχήμα 21, φαίνεται ότι οι κοκκομετρικές καμπύλες των τριών υλικών δεν έχουν ουσιαστικές διαφορές άρα η επιρροή της κοκκομετρίας στα μηχανικά χαρακτηριστικά που θα μας απασχολήσουν στην συνέχεια αναμένεται ότι δεν θα προκαλέσει ιδιαίτερες διακυμάνσεις.



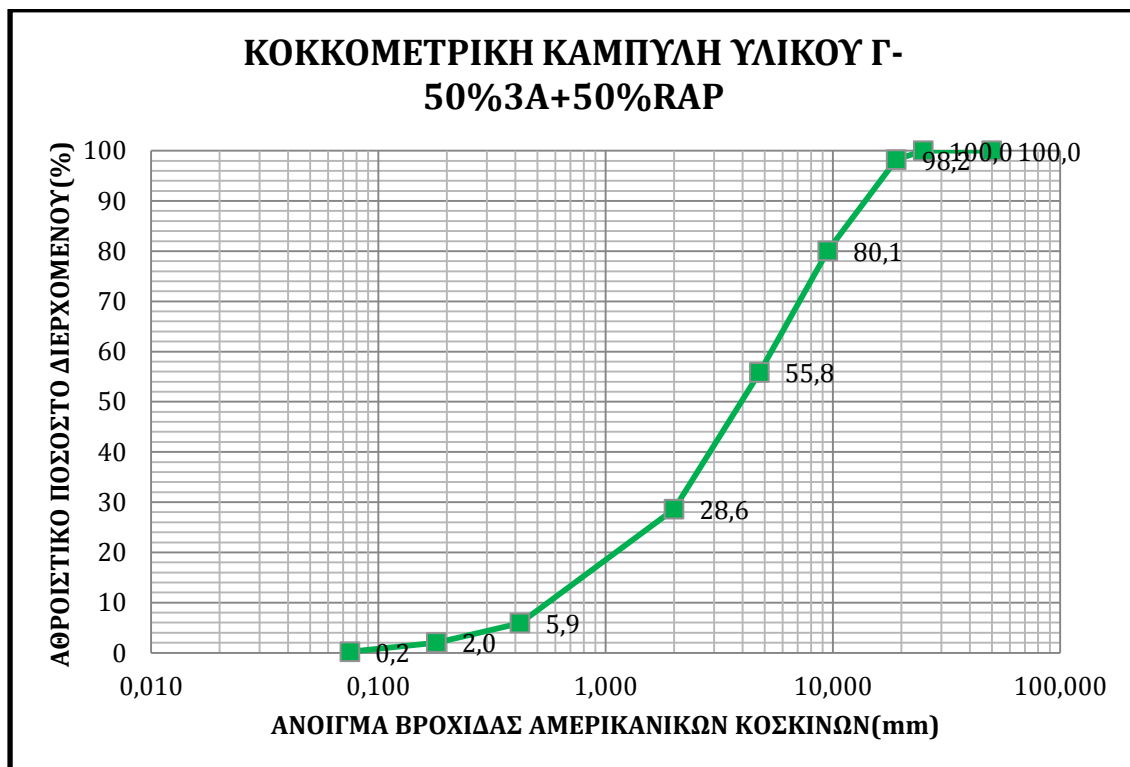
**ΣΧΗΜΑ 18:** Κοκκομετρική καμπύλη υλικού Α-αμμοχάλικο 3Α.



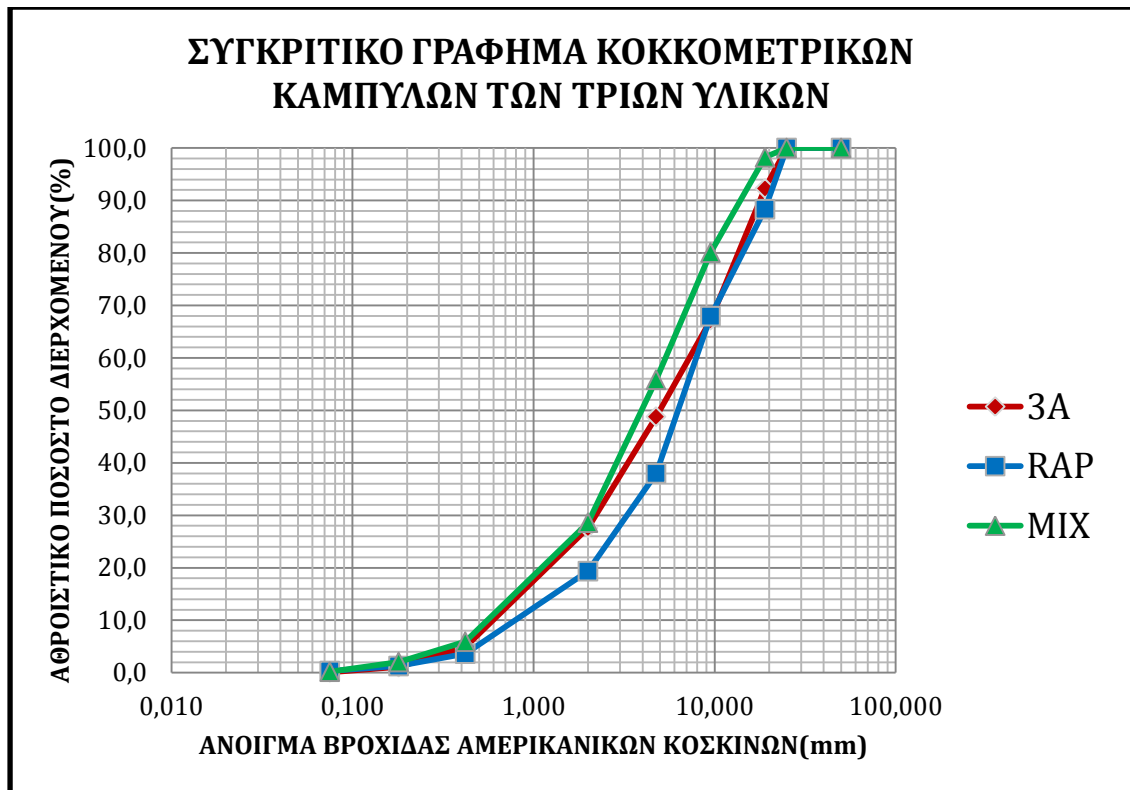
Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.



**ΣΧΗΜΑ 19:** Κοκκομετρική καμπύλη υλικού Β-RAP(100%).



**ΣΧΗΜΑ 20:** Κοκκομετρική καμπύλη υλικού Γ- 50%3Α+50%RAP.



**ΣΧΗΜΑ 21:** Συγκριτικό γράφημα των τριών κοκκομετρικών καμπυλών των τριών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

#### 4.4 Πρόσθετες ιδιότητες των τριών υπό διερεύνηση υλικών.

##### 4.4.1 Κατάταξη υλικών με βάση το αμερικανικό πρότυπο AASHTO Soil Classification System (AASHTO M 145, ASTM D3282)

Για την κατάταξη των τριών ασύνδετων κοκκωδών υλικών που εξετάζονται στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα πρότυπα AASHTO και USCS (ενοποιημένο σύστημα ταξινόμησης εδαφών). Για την ταξινόμηση, τα δύο παραπάνω συστήματα χρησιμοποιούν ως δείκτες ελέγχου τα όρια Atterberg (όριο υδαρότητας και δείκτη πλαστικότητας) και το μέγεθος των κόκκων του υλικού. Ωστόσο, το αμμοχάλικο 3A, το ανακυκλωμένο ασφαλτικό καθώς και το μείγμα των δύο αυτών είναι μη-πλαστικά υλικά οπότε η ταξινόμηση τους γίνεται αποκλειστικά και μόνο με βάση την κατανομή του μεγέθους των κόκκων τους. Επειδή από το κόσκινο No200 με άνοιγμα βροχίδας 0.075 χιλιοστά το επί τοις εκατό διερχόμενο ποσοστό από κάθε υλικό είναι μικρότερο από δεκαπέντε τοις

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

εκατό (15%) συμπεραίνουμε ότι και τα τρία υλικά της μελέτης ανήκουν στην υποκατηγορία A-1-α (κοκκώδη υλικά). Η υποομάδα A-1-α περιλαμβάνει εκείνα τα υλικά που αποτελούνται κυρίως από θραύσματα λίθων ή χαλίκι, με ή χωρίς καλά διαβαθμισμένο λεπτόκοκκο υλικό.

### 4.4.2 Ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας

Το περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας του αμμοχάλικου 3A (υλικό Α) προσδιορίστηκε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D2216-10 με ξήρανση σταθερής μάζας του δείγματος σε κλίβανο (φωτογραφία 3) και σε θερμοκρασία  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $230 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ). Αντίθετα το ανακυκλωμένο ασφαλτικό υλικό RAP (υλικό Β) όπως επίσης και το μείγμα 3Α και RAP (υλικό Γ) ξεράθηκαν υπό ελεγχόμενες θερμοκρασίες του κλιβάνου στους  $40^{\circ}\text{C}$ . Τούτο πραγματοποιήθηκε για αποφυγή τήξης της ασφάλτου που εμπεριέχεται στα δύο υλικά, κάτι που θα επέφερε αλλαγή στην κατανομή του μεγέθους των κόκκων και συνεπώς αλλαγή των αρχικών ιδιοτήτων των υλικών.



**ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 3:** Ξήρανση σταθερής μάζας κάθε υλικού σε κλίβανο υπό σταθερή θερμοκρασία.

#### 4.5 Εργαστηριακή συμπύκνωση και εύρεση της σχέσης πυκνότητας-ποσοστού υγρασίας

Για την εύρεση της σχέσης που συνδέει πυκνότητα και ποσοστό υγρασίας των τριών μειγμάτων της παρούσας μελέτης διεξήχθη η τροποποιημένη δοκιμή συμπύκνωσης κατά Proctor. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις αμερικανικές πρότυπες προδιαγραφές AASHTO T 180-97.

Αναλυτικότερα, για κάθε ένα από τα τρία υλικά (3A, RAP, 50%3A+50%RAP) πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές προκειμένου να καθορισθεί το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας και η αντίστοιχη μέγιστη ξηρή πυκνότητα όπου αυτό εμφανίζεται. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού, απαιτήθηκαν περίπου εξήντα κιλά από κάθε υλικό τα οποία έχουν ξεραθεί σε κλίβανο για να αφαιρεθεί τυχόν περιεχόμενο νερό. Για κάθε υλικό πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες υπο-δοκιμές για ποσοστά υγρασίας με εύρος από 2-9 %. Για την πρώτη υπο-δοκιμή (2% ποσοστό υγρασίας) του υλικού A, τοποθετείται σε έξι κιλά (6 kg) ξηρού υλικού ποσότητα νερού ίση με 2%, δηλαδή εκατόν είκοσι (120 gr) γραμμάρια νερό (στον παρακάτω πίνακα 3 φαίνεται η ακολουθία δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν καθώς και τα αντίστοιχα ποσοστά υγρασίας για κάθε υλικό). Το μείγμα αναμειγνύεται μέχρι να γίνει όσο το δυνατόν περισσότερο ομοιόμορφο. Εν συνεχεία, το ομοιόμορφο πλέον μείγμα τοποθετήθηκε στην ειδική μήτρα της δοκιμής (διάμετρος 150 χιλιοστά και ύψος 120 χιλιοστά) σε πέντε στρώσεις. Σε κάθε στρώση, τοποθετείται ποσότητα ίση με το ένα πέμπτο της αρχικής ποσότητας των έξι κιλών, περίπου 1.2 κιλά και πραγματοποιείται χειροκίνητη συμπύκνωση με τον κόπανο των προδιαγραφών βάρους 4.5 κιλών. Κάθε μία από τις 5 στρώσεις υποβλήθηκε σε πενήντα έξι (56) χτυπήματα από ύψος πτώσης 46 εκατοστών (φωτογραφία 4). Το καθαρό βάρος της μήτρας είναι γνωστό. Ακολούθως ζυγίστηκε η μήτρα με το συμπυκνωμένο πλέον υλικό με ποσοστό υγρασίας 2%. Η διαφορά τους είναι το βάρος του υλικού εντός του καλουπιού. Άρα, γνωρίζοντας τις διαστάσεις της μήτρας υπολογίστηκε ο όγκος της και αφού υπολογίσαμε το βάρος του συμπυκνωμένου υλικού, με χρήση της σχέσης [πυκνότητα=μάζα/όγκος] βρέθηκε η πυκνότητα που αντιστοιχεί σε ποσοστό υγρασίας 2%. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τις

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

υπόλοιπες υπο-δοκιμές με ποσοστά υγρασίας 3,4,5,6,7,8 και 9 %. Με τα ζευγάρια τιμών που προκύπτουν από κάθε δοκιμή χαράσσεται διάγραμμα πυκνότητας-ποσοστού υγρασίας. Το κορυφαίο σημείο του διαγράμματος αντιστοιχεί στη μέγιστη ξηρή πυκνότητα για το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας. Όλα τα παραπάνω πραγματοποιήθηκαν και για τα τρία υλικά της παρούσας μελέτης και προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα (σχήματα 22, 23, 24, 25 και 26).



**ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 4:** Ειδική μήτρα δοκιμής συμπίκνωσης κατά Proctor, κόπανος και συμπίκνωση του υλικού σε στρώσεις.

**Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

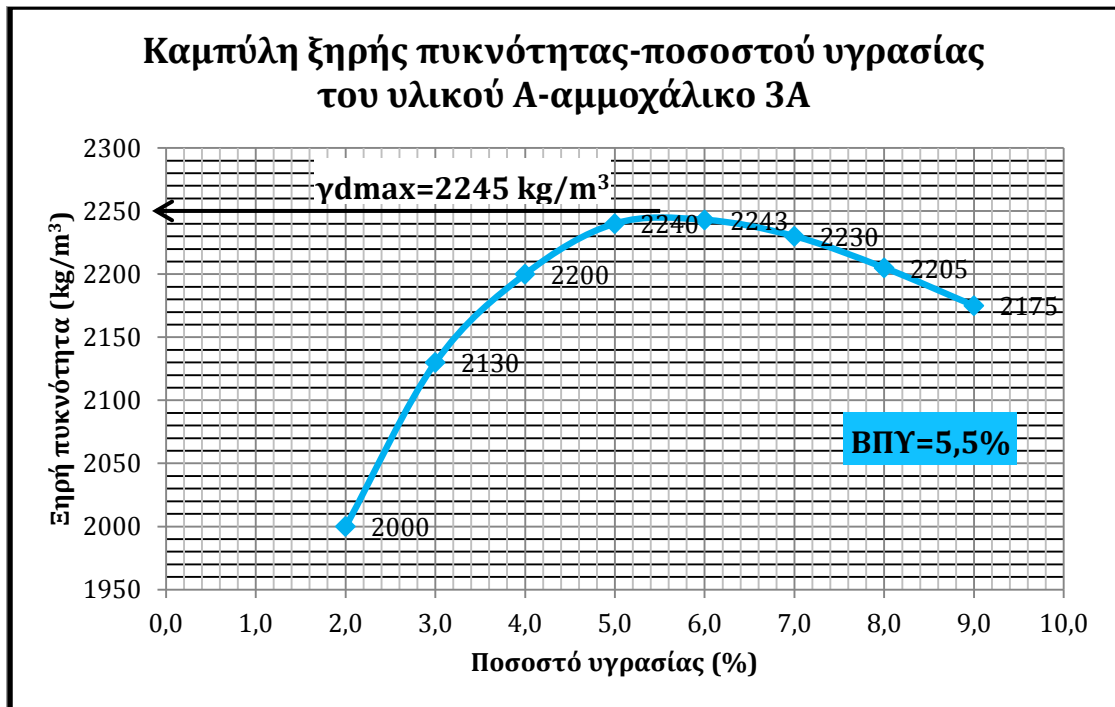
<b>ΥΛΙΚΟ Α-3Α</b>			<b>ΥΛΙΚΟ Β-RAP(100%)</b>			<b>ΥΛΙΚΟ Γ-50/50</b>		
<b>ΠΥ(%)</b>	<b>kg/m<sup>3</sup>(ΥΠ)</b>	<b>kg/m<sup>3</sup> (ΞΠ)</b>	<b>ΠΥ(%)</b>	<b>kg/m<sup>3</sup>(ΥΠ)</b>	<b>kg/m<sup>3</sup> (ΞΠ)</b>	<b>ΠΥ(%)</b>	<b>kg/m<sup>3</sup>(ΥΠ)</b>	<b>kg/m<sup>3</sup> (ΞΠ)</b>
-	-	-	1,0	1950	1930,69	-	-	-
2,0	2040	2000	2,0	2058	2017,65	2,0	-	-
3,0	2193,9	2130	2,1	2061	2018,61	3,0	-	-
4,0	2288	2200	2,9	2105	2045,68	4,0	2256	2169
5,0	2352	2240	3,0	2114	2052,43	5,0	2283	2195
6,0	2377,58	2243	4,0	2155	2072,12	6,0	2297	2208
7,0	2386,1	2230	4,1	2164	2078,77	7,0	2306	2217
8,0	2381,4	2205	4,8	2128	2030,53	8,0	2300	2212
9,0	2370,75	2175	5,0	2110	2009,52	9,0	2279	2191
			6,0	2068	1950,94			

ΠΥ= Ποσοστό υγρασίας

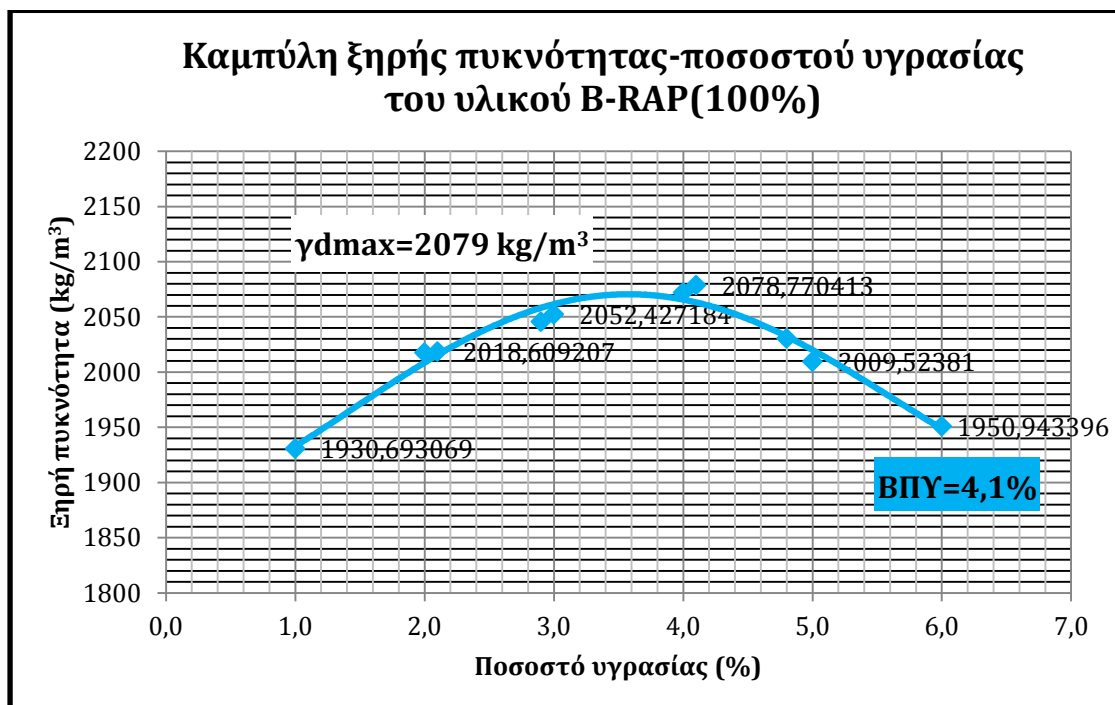
ΞΠ= Ξηρή πυκνότητα

ΥΠ= Υγρή πυκνότητα (πυκνότητα του υλικού μετά την προσθήκη νερού εντός της μήτρας της δοκιμής Proctor)

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ποσοστών υγρασίας και αντίστοιχων πυκνοτήτων (υγρής ή ξηρής) για τα τρία υλικά της μελέτης.

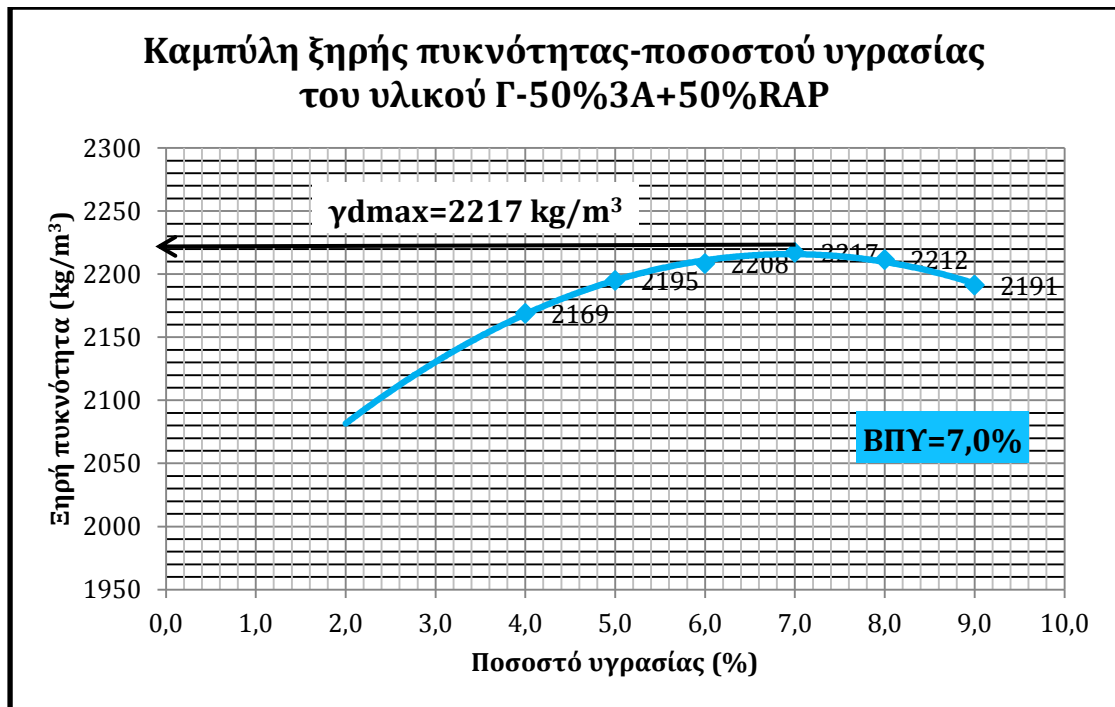


**ΣΧΗΜΑ 22:** Καμπύλη ξηρής πυκνότητας-ποσοστού υγρασίας, όπου φαίνονται η μέγιστη ξηρή πυκνότητα και το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας για το υλικό Α-αμμοχάλικο 3Α.

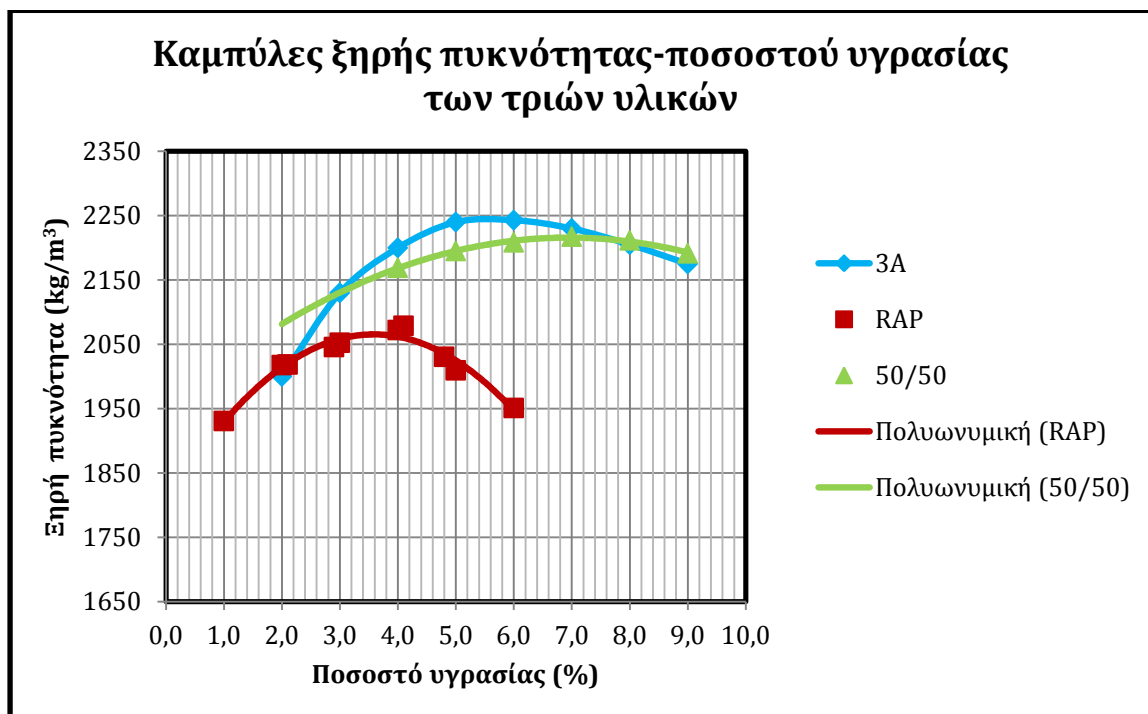


**ΣΧΗΜΑ 23:** Καμπύλη ξηρής πυκνότητας-ποσοστού υγρασίας, όπου φαίνονται η μέγιστη ξηρή πυκνότητα και το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας για το υλικό Β-RAP(100%).



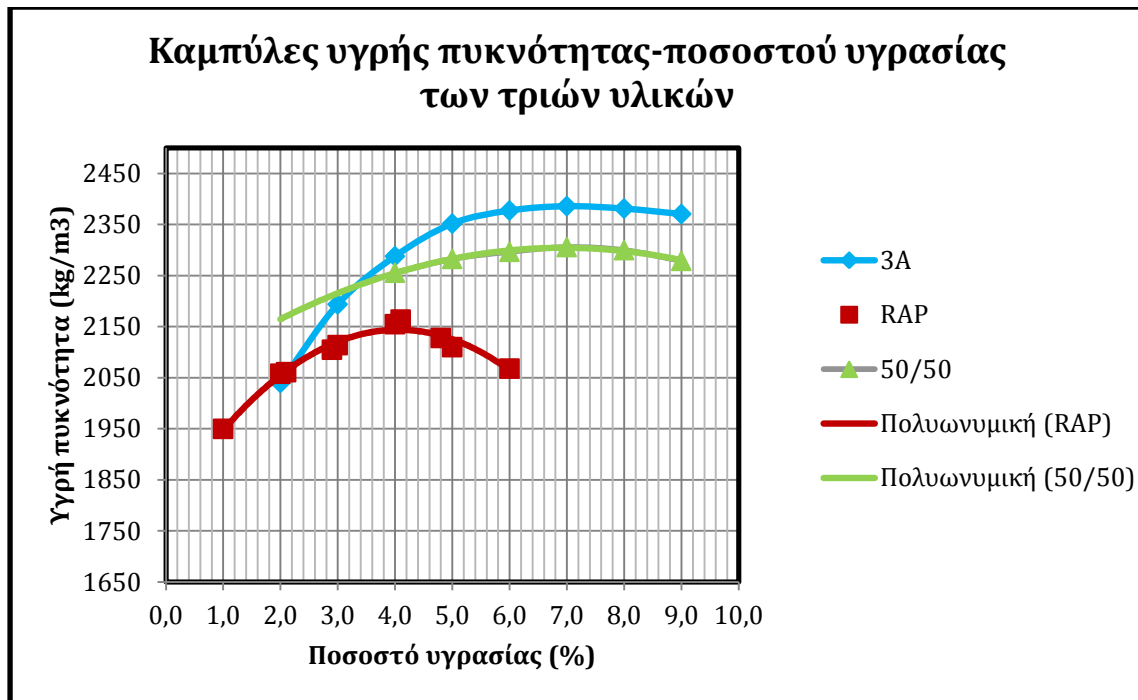


**ΣΧΗΜΑ 24:** Καμπύλη ξηρής πυκνότητας-ποσοστού υγρασίας, όπου φαίνονται η μέγιστη ξηρή πυκνότητα και το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας για το υλικό Γ-50%3Α+50%RAP.



**ΣΧΗΜΑ 25:** Συγκριτικό γράφημα με τις καμπύλες ξηρής πυκνότητας-ποσοστών υγρασίας των τριών υλικών που εξετάσθηκαν στην παρούσα έρευνα.





**ΣΧΗΜΑ 26:** Συγκριτικό γράφημα με τις καμπύλες υγρής πυκνότητας-ποσοστών υγρασίας των τριών υλικών που εξετάστηκαν στην παρούσα έρευνα.

Στον παραπάνω πίνακα 3 παρουσιάζονται συνοπτικώς οι ακολουθίες τροποποιημένων δοκιμών κατά Proctor που διενεργήθηκαν σε κάθε ένα υλικό της μελέτης, για τα διάφορα ποσοστά υγρασίας που προστέθηκαν στα υλικά ενώ παρουσιάζονται επίσης οι τιμές ξηρών και υγρών πυκνοτήτων που προέκυψαν σε κάθε δοκιμή. Για το υλικό B-RAP (100%) έγιναν λεπτομερέστερες δοκιμές για περισσότερες τιμές του ποσοστού υγρασίας για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του υλικού. Παρατηρείται επίσης ότι για το υλικό B η απαιτούμενη ακολουθία ποσοστών υγρασίας κατανέμεται σε μικρότερο εύρος τιμών (1-6%) σε σχέση με τα άλλα δύο υλικά (2-9%). Αυτό οφείλεται εν μέρει στο γεγονός ότι η ξηρή πυκνότητα του υλικού B ακολουθεί πτωτική πορεία μετά την τιμή του ποσοστού υγρασίας 4%, οπότε κρίθηκε άσκοπη η περαιτέρω διερεύνηση για πολύ μεγαλύτερες τιμές.

Στα παραπάνω σχήματα 22, 23 και 24 φαίνεται η μέγιστη ξηρή πυκνότητα και το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας των τριών υλικών που εξετάστηκαν. Το υλικό Α-αμμοχάλικο 3Α εμφανίζει την μέγιστη ξηρή πυκνότητα του  $\gamma_{dmaxA}=2245 \text{ kg/m}^3$  για ποσοστό υγρασίας  $BΠΥ_A=5,5\%$ . Το υλικό B-RAP (100%) έχει  $\gamma_{dmaxB}=2079$

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

kg/m<sup>3</sup> για ΒΠΥ<sub>B</sub>=4,1% ενώ το μείγμα του υλικού Γ (50%3A+50%RAP) έχει μέγιστη ξηρή πυκνότητα  $\gamma_{dmax\Gamma}=2217$  kg/m<sup>3</sup> για ΒΠΥ<sub>Γ</sub>=7,0%. Από τα παραπάνω στοιχεία φαίνεται ότι τα τρία υλικά έχουν αρκετά κοντινές τιμές μέγιστων ξηρών πυκνοτήτων, με βασική όμως διαφορά ότι αυτή εμφανίζεται σε διαφορετικές τιμές του περιεχόμενου ποσοστού υγρασίας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το ασύνδετο ανακυκλωμένο υλικό B-RAP (100%), στο οποίο η μέγιστη ξηρή πυκνότητα εμφανίζεται σε μικρή τιμή του ποσοστού υγρασίας. Αυτό ίσως οφείλεται στο γεγονός ότι η άσφαλτος έχει διεισδύσει στους πόρους του αμμοχάλικου του υλικού και τους έχει περιβάλλει, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η απορρόφηση περισσότερου νερού. Αντίθετα, το υλικό Γ (μείγμα 3A και RAP σε αναλογία 50/50) εμφανίζει μεγαλύτερη τιμή μέγιστης ξηρής πυκνότητας από ότι το B αλλά για ποσοστό υγρασίας σχεδόν διπλάσιο. Παρατηρώντας το σχήμα 24 του υλικού Γ (50%3A+50%RAP) διακρίνεται μία ομαλότητα, δηλαδή για τιμές του ποσοστού υγρασίας από 4-9 % οι αντίστοιχες ξηρές πυκνότητες έχουν περίπου την ίδια τιμή, πολύ κοντά στη μέγιστη τιμή. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στην καλή κοκκομετρική διαβάθμιση του μείγματος του υλικού (μεγάλο ποσοστό σε λεπτόκοκκο υλικό) και στην πλήρωση των κενών μεταξύ των ασύνδετων ανακυκλωμένων κόκκων από το λεπτόκοκκο υλικό του αμμοχάλικου 3A. Στην ουσία δηλαδή το υλικό Γ και η πυκνότητα του δεν επηρεάζεται πολύ από το περιεχόμενο ποσοστό νερού για ένα εύρος τιμών γύρω από το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας. Αντίθετα τα άλλα δύο ομογενή υλικά A και B (3A και RAP) παρουσιάζουν μία πιο απότομη μορφή, εμφανίζοντας ακρότατα στα αντίστοιχα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας τους, τα οποία λογικώς υποδεικνύουν ότι το αμμοχάλικο 3A χρειάζεται περισσότερο νερό για να προσεγγίσει την μέγιστη πυκνότητα συμύκνωσης του.

Για λόγους πληρότητας, παρουσιάζεται το συγκριτικό σχήμα 26 που δείχνει τη σχέση μεταξύ υγρής πυκνότητας και περιεχόμενου ποσοστού υγρασίας. Η τιμή της υγρής πυκνότητας προφανώς είναι μεγαλύτερη από της ξηρής διότι προστίθεται και η συνεισφορά του νερού, με αποτέλεσμα οι καμπύλες και των τριών υλικών να είναι ολόκληρες μετατεθειμένες προς τα πάνω. Ακόμη παρατηρείται ότι για τις υψηλές τιμές του ποσοστού υγρασίας οι καμπύλες

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

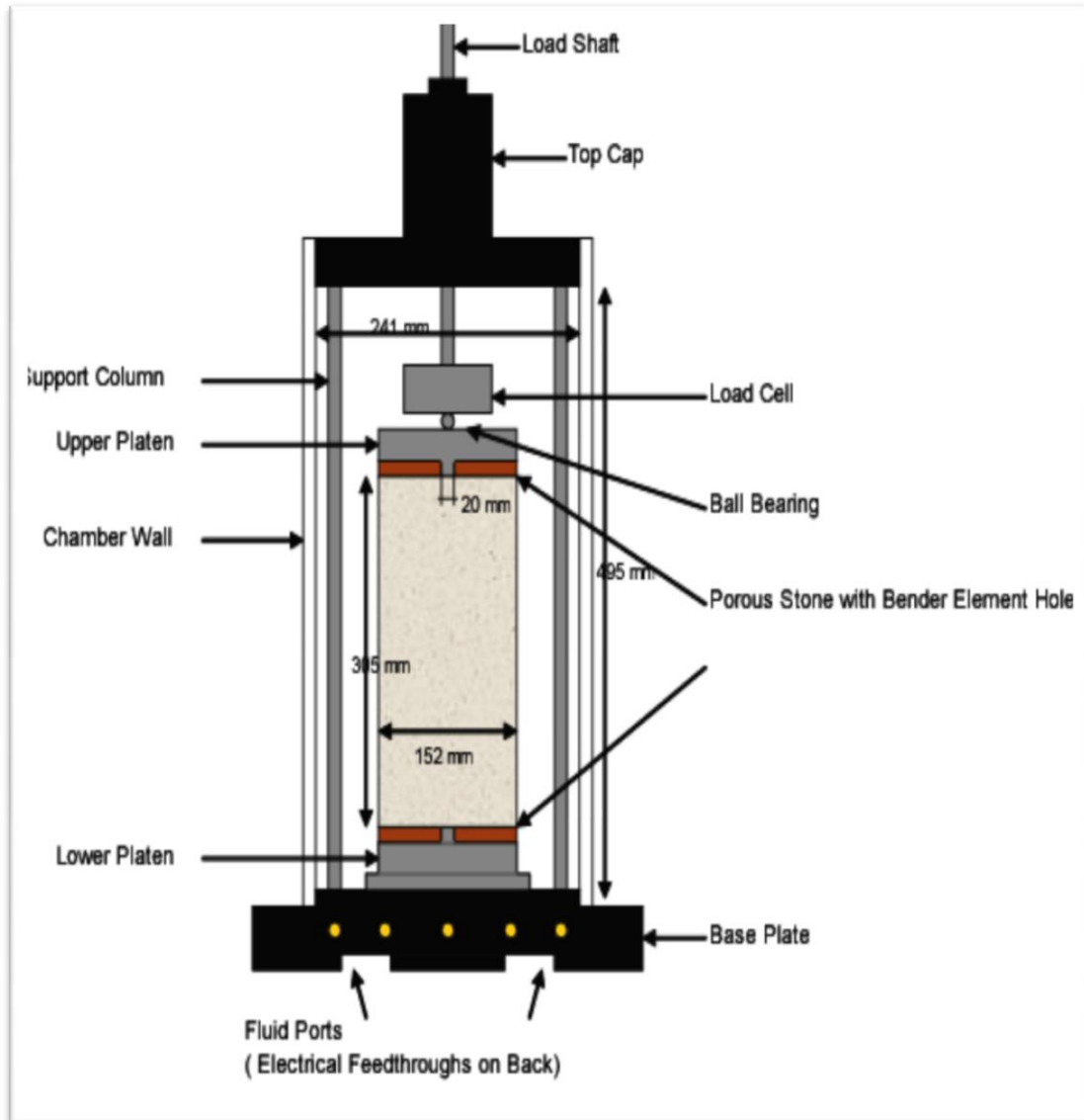
τείνουν να οριζοντιωθούν, δηλαδή η τιμή της υγρής πυκνότητας τους είναι περίπου σταθερή.

### 4.6 Δοκιμή καθορισμού του ελαστικού μέτρου $M_r$ (resilient modulus).

#### 4.6.1 Εξοπλισμός δοκιμής

Για την δοκιμή καθορισμού του ελαστικού μέτρου σε κοκκώδη υλικά, όλα τα υπάρχοντα πρότυπα πρωτόκολλα απαιτούν την χρήση τριαξονικού θαλάμου, εντός του οποίου τοποθετείται το δοκίμιο, υπό ελεγχόμενη πλευρική και παρεκκλίνουσα τάση. Η δοκιμή για κοκκώδη υλικά αποτελεί στην ουσία τριαξονική συμπίκνωση ενός κυλινδρικού δοκιμίου σταθερών διαστάσεων ανάλογα με το χρησιμοποιηθέν πρότυπο στην οποία ασκείται κυκλικό-επαναλαμβανόμενο αξονικό φορτίο. Το ασκούμενο φορτίο ελέγχεται και μετράται από το κελί φόρτισης ενώ παράλληλα μετράται και καταγράφεται η ελαστική, αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου. Για την εκτέλεση της δοκιμής ασκείται στο δοκίμιο συγκεκριμένος αριθμός επαναλήψεων ενός εύρους παρεκκλινουσών και πλευρικών τάσεων. Στο παρακάτω σχήμα 27 παρουσιάζεται σκαριφηματικά η διάταξη της συσκευής που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη.

Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

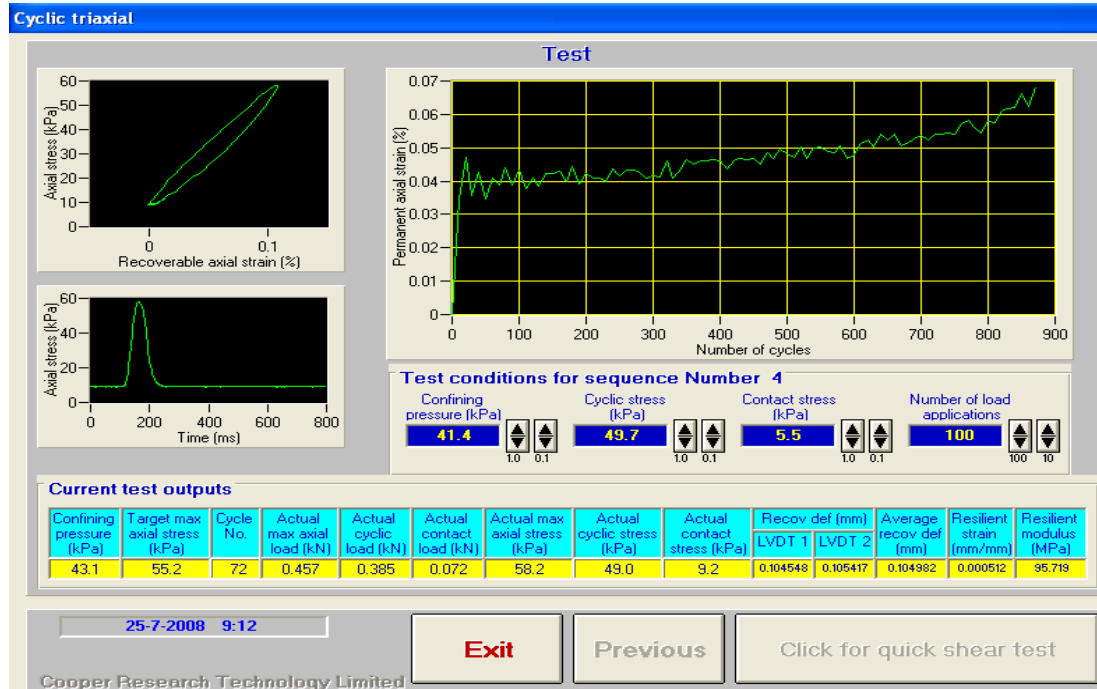


**ΣΧΗΜΑ 27:** Σχηματική απεικόνιση ενός τριαξονικού θαλάμου δοκιμής προσδιορισμού ελαστικού μέτρου  $M_r$  σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T 307 (1999).

Κύρια συστατικά μέρη της παραπάνω συσκευής είναι το σύστημα επιβολής του φορτίου, η ψηφιακή μονάδα ελέγχου-υπολογιστής με τον οποίο συνδέεται, το τριαξονικό κελί και τα γραμμικά μηκυνσιόμετρα (LVDT-linear variable differential transducer) τα οποία είναι συστήματα μέτρησης της αξονικής παραμόρφωσης. Για την καταγραφή της διαδικασίας εκτέλεσης της δοκιμής και των δεδομένων η συσκευή συνδέεται ηλεκτρονικά με υπολογιστή εφοδιασμένο με κατάλληλο λογισμικό επιτρέποντας στο χρήστη να παρακολουθεί διαρκώς τα

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

δεδομένα φορτίσεων και παραμορφώσεων μέσω ειδικών γραφημάτων. Στη φωτογραφία 5 φαίνεται ένα μέρος του ειδικού λογισμικού καταγραφής και ελέγχου με το οποίο είναι εξοπλισμένη η συσκευή.



**ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 5:** Το ειδικό λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στην τριαξονική δοκιμή προσδιορισμού του ελαστικού μέτρου  $M_r$ .

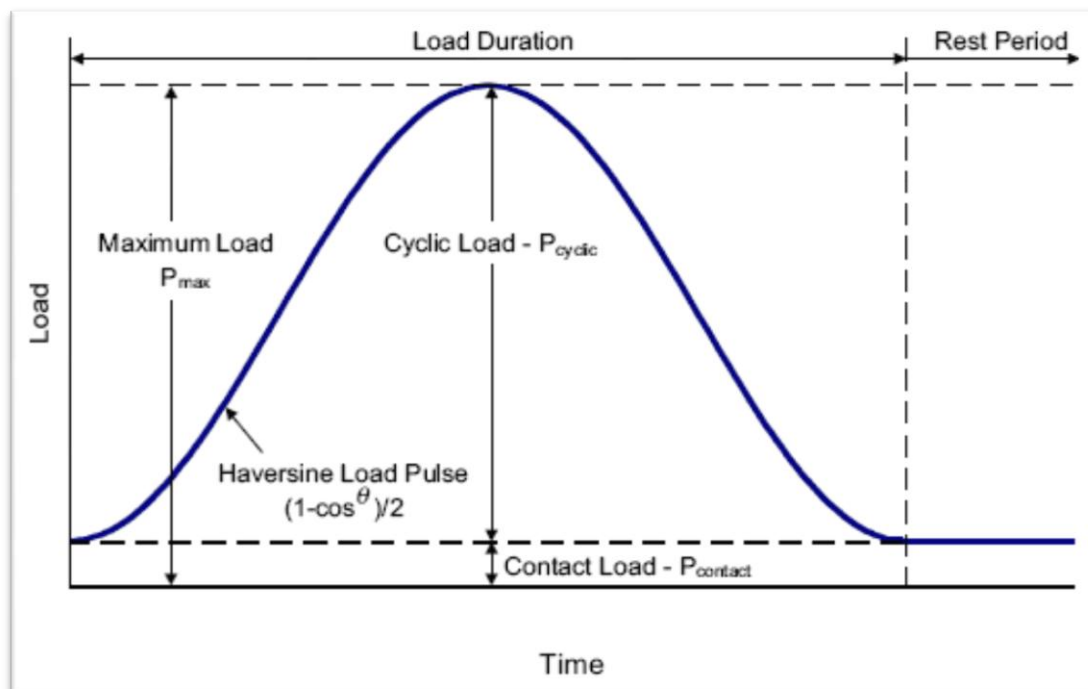
### 4.6.2 Μέθοδος δοκιμής

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στη δοκιμή καθορισμού του ελαστικού μέτρου των τριών υλικών της παρούσας μελέτης βασίζεται στο αμερικάνικο πρότυπο AASHTO T307-99, "Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials". Η πρότυπη μέθοδος αυτή καλύπτει ένα ευρύ φάσμα διαδικασιών που αφορούν την προετοιμασία και εκτέλεση εργαστηριακής δοκιμής σε αδιατάρακτα δοκίμια κοκκωδών υλικών βάσεων/υποβάσεων ή υπεδάφους για τον προσδιορισμό του ελαστικού μέτρου υπό συνθήκες που προσομοιώνουν την πραγματική φόρτιση ενός εύκαμπτου οδοστρώματος κατά την κίνηση ενός οχήματος επ' αυτού. Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, η τριαξονική δοκιμή επαναλαμβανόμενης φόρτισης περιλαμβάνει την εφαρμογή ανακυκλικού φορτίου σε κυλινδρικό δοκίμιο υπό μεταβαλλόμενη πλευρική πίεση και μέτρηση

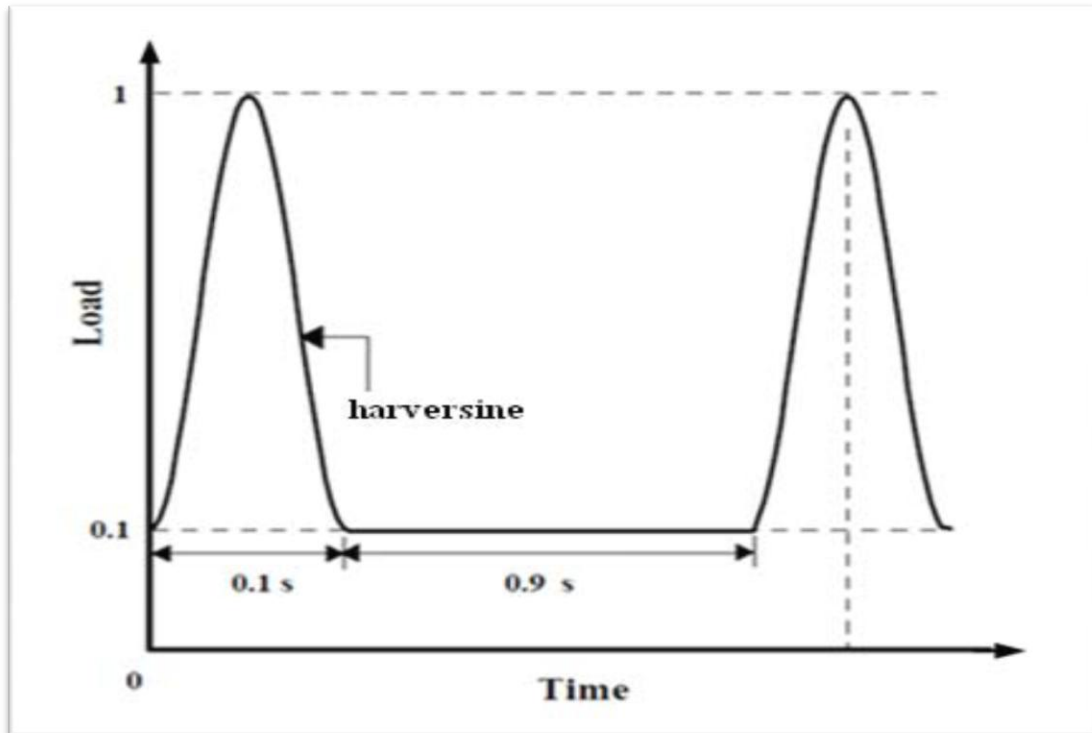
## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

της αξονικής, ελαστικής, ανακτήσιμης παραμόρφωσης. Με χρήση του λόγου  $M_r = \sigma_{cyc} / \varepsilon_r$  προκύπτει το ελαστικό μέτρο, όπου  $\sigma_{cyc}$  η παρεκκλίνουσα τάση και  $\varepsilon_r$  η κατακόρυφη παραμόρφωση. Το παρακάτω σχήμα 28 παρουσιάζει τον ορισμό του ανακυκλικού αξονικού φορτίου που ασκείται στο δοκίμιο μέσω ενός ημιτονοειδούς παλμού. Στο δοκίμιο ασκείται επαναλαμβανόμενη, δυναμική, ημιτονοειδής κυματομορφή φόρτισης με αρχική διάρκεια φόρτισης 0,1 δευτερολέπτων. Αυτός ο παλμός του φορτίου ακολουθείται από μία περίοδο 0,9 δευτερολέπτων κατά την οποία ασκείται στο δοκίμιο φορτίο ίσο με το 10% της μέγιστης τάσης προσομοιώνοντας έτσι την αποφόρτιση που επιφέρει το πέρασμα των αξόνων ενός οχήματος από ένα συγκεκριμένο σημείο μιας κοκκώδους στρώσης ενός πραγματικού οδοστρώματος (σχήμα 29). Το κελί φόρτισης της τριαξονικής συσκευής έχει ικανότητα φόρτισης 22.2 kN. Απλοποιητικά, ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις.

$$\sigma_{cyc} = P_{cyc} / A \quad A = \pi \cdot D^2 / 4 \quad P_{cyc} = P_{max} - P_{contact} \quad P_{contact} = 0,1 \cdot P_{max}$$



**ΣΧΗΜΑ 28:** Ημιτονοειδής παλμός φόρτισης του δοκιμίου.



**ΣΧΗΜΑ 29:** Ημιτονοειδής παλμός και διάρκεια φόρτισης του δοκιμίου.

#### 4.6.3 Προετοιμασία των δοκιμίων

Αρχικά, για την προετοιμασία των δοκιμίων απαιτείται να γνωρίζουμε τον τύπο των υπό εξέταση υλικών. Το πρότυπο AASHTO T307-99 ορίζει δύο τύπους υλικού, ανάλογα με το ποσοστό διερχόμενου υλικού από συγκεκριμένα κόσκινα. Εάν τα μη επεξεργασμένα κοκκώδη υλικά βάσεων και υποβάσεων έχουν ποσοστό διερχόμενου από το κόσκινο No10 (με άνοιγμα βρογχίδας 2.00 χιλιοστών) λιγότερο από 70% και επιπλέον έχουν ποσοστό διερχόμενου από το κόσκινο No200 (με άνοιγμα βρογχίδας 0.075 χιλιοστών) λιγότερο από 20% ανήκουν στον πρώτο τύπο υλικού (αμμοχάλικα) διαφορετικά ανήκουν στον δεύτερο (έδαφος). Τα τρία υλικά που θα εξετασθούν στην παρούσα δοκιμή καλύπτουν τις παραπάνω απαιτήσεις σύμφωνα με τις κοκκομετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν οπότε χαρακτηρίζονται ως υλικά τύπου 1. Η παραπάνω διαδικασία είναι απαραίτητη διότι το πρότυπο καθορίζει διαφορετική ακολουθία τιμών φόρτισης για κάθε δοκίμιο υλικού ανάλογα με

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

την κατηγορία στην οποία ανήκει. Επίσης, καθορίζεται και η διάμετρος της μήτρας που θα πραγματοποιηθεί η δοκιμή.

Λόγω της κατηγορίας υλικού 1, στην παρούσα μελέτη όλες οι τριαξονικές δοκιμές προσδιορισμού του ελαστικού μέτρου έγιναν σε μήτρες διαμέτρου 150 χιλιοστών και ύψους  $300 \pm 10$  χιλιοστών (δηλαδή η αναλογία ύψους: διαμέτρου είναι 2:1 σύμφωνα με το πρότυπο T307-99). Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε στατική συμπίκνωση του υλικού, παρόμοια με αυτήν που έγινε στο στάδιο προσδιορισμού της σχέσης πυκνότητας-υγρασίας κατά Proctor. Για κάθε τύπο κοκκώδους υλικού που εξετάστηκε [ΥΛΙΚΟ Α (3Α), ΥΛΙΚΟ Β (RAP), ΥΛΙΚΟ Γ (50%3Α+50%RAP)] προετοιμάστηκαν συμπυκνωμένα δοκίμια με διαφορετικούς συνδυασμούς περιεχόμενου ποσοστού υγρασίας σε ένα εύρος εκατέρωθεν του βέλτιστου ποσοστού υγρασίας. Η κύρια δοκιμή έγινε για το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας (ΒΠΥ) κάθε υλικού ενώ έγιναν και δοκιμές για ποσοστά υγρασίας μικρότερα και μεγαλύτερα από το βέλτιστο για να εκτιμηθεί και να συγκριθεί η επιρροή του ποσοστού υγρασίας στο ελαστικό μέτρο.

Στον παρακάτω πίνακα 4 παρουσιάζεται η ακολουθία τριαξονικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκε σε κάθε ένα από τα τρία υλικά της μελέτης και τα αντίστοιχα ποσοστά υγρασίας με τα οποία παρασκευάστηκαν και συμπυκνώθηκαν τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν. Για κάθε τιμή ποσοστού υγρασίας πραγματοποιήθηκαν τόσες δοκιμές όσες απαιτήθηκαν για την σύγκλιση των αποτελεσμάτων. Οι αριθμοί εντός των παρενθέσεων του παρακάτω πίνακα υποδεικνύουν τον αριθμό επαναλήψεων των τριαξονικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν για κάθε τιμή του ποσοστού υγρασίας, για κάθε υλικό.



**Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

<b>ΥΛΙΚΟ Α-3Α</b>	<b>ΥΛΙΚΟ Β-RAP(100%)</b>	<b>ΥΛΙΚΟ Γ-50%3Α+50%RAP</b>
<b>ΒΠΥ=5,5%</b>	<b>ΒΠΥ=4,1%</b>	<b>ΒΠΥ=7%</b>
Ποσοστά υγρασίας για τα οποία έγιναν τριαξονικές δοκιμές		
-	2%(2)	-
3%(3)	3%(3)	-
4%(4)	4%(3)	4%(4)
5%(4)	5%(2)	5%(4)
6%(3)	6%(2)	6%(4)
-	-	7%(4)

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4:** Ακολουθία τριαξονικών δοκιμών και τα αντίστοιχα ποσοστά υγρασίας με τα οποία συμπυκνώθηκαν τα δοκίμια (πλήθος τριαξονικών δοκιμών).

Ακολουθεί αναλυτική αφήγηση της διαδικασίας που πραγματοποιήθηκε για την συμπύκνωση και παρασκευή των δοκιμών διαμέτρου 150 mm και ύψους 300 mm. Αρχικά, τοποθετήθηκε αρκετή ποσότητα από κάθε υλικό στον κλίβανο ξήρανσης για να αφαιρεθεί τελείως το νερό από τους πόρους των υλικών. Έπειτα στα τρία ξηρά πλέον υλικά τοποθετήθηκε η ακριβής ποσότητα νερού που αντιστοιχεί στο βέλτιστο ποσοστό υγρασίας τους και ακολούθησε ανάμειξη ώστε να ομογενοποιηθούν τα τρία μείγματα. Μετά την ανάμειξη τα μείγματα τοποθετήθηκαν σε σφραγισμένες πλαστικές σακούλες όπου και παρέμειναν για 48 ώρες προκειμένου να αποκτήσουν παντού το ίδιο ποσοστό υγρασίας. Η παραπάνω διαδικασία παρουσιάζεται στη σειρά φωτογραφιών 6 που ακολουθεί. Στη συνέχεια ακολούθησε η κατασκευή της ειδικής μήτρας υποδοχής του δοκιμίου όπου μεμβράνη τοποθετείται μέσα στο καλούπι με εφαρμογή υποπίεσης, ενώ στον πάτο τοποθετείται πορώδης δίσκος (φωτογραφία 7 και 8).

Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.



**ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 6:** Διαδικασία δημιουργίας μειγμάτων υλικών για την τριαξονική δοκιμή στο επιθυμητό ποσοστό υγρασίας.



**ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 7:** Μembrάνη καλουπιού και πορώδης δίσκος.

Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.



**ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 8:** Κατασκευή της μήτρας και τοποθέτηση μεμβράνης με υποπίεση.

Στην έτοιμη πλέον μήτρα, τοποθετήθηκε και συμπυκνώθηκε κάθε υλικό σε έξι (6) ισοπαχής στρώσεις των πέντε εκατοστών (5 cm). Η συμπύκνωση έγινε με ηλεκτρικό δονητικό κόπανο ικανότητας δύο χιλιάδων κτύπων ανά λεπτό. Κατά τη διάρκεια της συμπύκνωσης διατηρείται η υποπίεση για να μην δημιουργηθούν κενά στο δοκίμιο. Μετά τη συμπύκνωση, τοποθετείται πορώδης δίσκος καθώς και το ειδικό καπάκι της δοκιμής στο άνω μέρος ενώ σφραγίζεται η μεμβράνη άνω και κάτω με κυκλικά δαχτυλίδια από καουτσούκ (φωτογραφία 9). Έτσι, δημιουργήθηκε για τα τρία υλικά το συμπυκνωμένο δοκίμιο με το

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

βέλτιστο (ή οποιοδήποτε από τις τιμές του πίνακα 4) ποσοστό υγρασίας και την μέγιστη ξηρή πυκνότητα (ΜΞΠ) αφού συμπυκνώθηκαν με δονητικό κόπανο. Καθ' όλη τη διάρκεια της παραπάνω διαδικασίας τηρήθηκαν πιστά οι προδιαγραφές του προτύπου AASHTO T 307-99. Τελικώς, τα δοκίμια είναι έτοιμα, αφαιρούνται με προσοχή από την μήτρα και τοποθετούνται στην ειδικά διαμορφωμένη βάση του τριαξονικού κελιού (φωτογραφία 10). Το τριαξονικό κελί σφραγίζεται και τοποθετείται στην υποδοχή-βάση της δυναμικής συσκευής τριαξονικής δοκιμής. Η υποπίεση εξακολουθεί να παρέχεται μέχρι την έναρξη της δοκιμής για να διατηρηθεί το σχήμα του δοκιμίου ενώ παράλληλα πραγματοποιούνται οι απαραίτητοι έλεγχοι των συνδέσεων και της σωστής εφαρμογής των μηκυνσιομέτρων πάνω στο δοκίμιο (φωτογραφία 11).



**ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 9:** Συμπύκνωση σε στρώσεις με δονητικό κόπανο, τοποθέτηση άνω πορώδους δίσκου και ειδικού σφραγιστικού καλύμματος μέσω του οποίου ασκείται το φορτίο στο δοκίμιο.



Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.



**ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 10:** Αφαίρεση του δοκιμίου από τη μήτρα, μορφή δοκιμίου χωρίς την μεμβράνη και τοποθέτηση δοκιμίου στη βάση του τριαξονικού κελιού.

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.



**ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 11:** Συσκευή τριαξονικής δοκιμής πριν και μετά την τελική τοποθέτηση του δοκιμίου και τοποθέτηση μηχανοσιομέτρου.

### 4.6.4 Διαδικασία εκτέλεσης εργαστηριακής δοκιμής προσδιορισμού του ελαστικού μέτρου $M_r$ .

Η διαδικασία εκτέλεσης της δοκιμής πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T307-99. Τα δοκίμια των τριών υλικών της παρούσας μελέτης ετοιμάστηκαν και συμπυκνώθηκαν ακολουθώντας την διαδικασία που περιγράφεται στην παραπάνω παράγραφο. Στη συνέχεια κάθε δοκίμιο τοποθετείται στη βάση του τριαξονικού θαλάμου και είναι έτοιμο προς εξέταση. Στην άνω πλάκα της συσκευής, από όπου ασκείται το φορτίο στο δοκίμιο ύψους τριάντα εκατοστών τοποθετούνται δύο μηχανοσιομέτρα (τύπου LVDT) για την μέτρηση και καταγραφή της κάθετης αξονικής παραμόρφωσης. Οι βαλβίδες αποστράγγισης της συσκευής έμειναν ανοιχτές για την ελεύθερη διαφυγή του νερού ώστε να προσομοιωθούν συνθήκες ελεύθερης στράγγισης.

#### 4.6.4.1 Προφόρτιση δοκιμίου

Πραγματοποιήθηκε αρχική προφόρτιση του δοκιμίου για να προσομοιωθεί το ιστορικό τάσεων που θα υπήρχε σε συνθήκες πεδίου. Η προφόρτιση έγινε επίσης για να μειωθούν οι επιδράσεις αρχικών ατελειών επαφής μεταξύ δοκιμίου και πλακών της συσκευής. Αρχικά ελέγχθηκε ότι το υδραυλικό έμβολο που εξασκεί την αξονική πίεση στο τριαξονικό κελί ακουμπά οριακά σε αυτό. Για την προφόρτιση ασκείται στο δοκίμιο περιοριστική πλευρική πίεση αέρα 103.4 kPa και μέγιστη αξονική τάση 103.4 kPa που ισοδυναμεί με τιμή κυκλικής αξονικής τάσης ίση με 93.1 kPa σύμφωνα με το πρότυπο T307-99. Η προφόρτιση του δοκιμίου με αυτές τις τιμές τάσεων έγινε για 1000 επαναλήψεις ασκώντας στο δοκίμιο τον ημιτονοειδή παλμό διάρκειας 0.1 δευτερολέπτων που αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.6.2.

#### 4.6.4.2 Ακολουθία ανακυκλικών αξονικών φορτίσεων και πλευρικών περιοριστικών πιέσεων

Η εργαστηριακή δοκιμή προσδιορισμού του ελαστικού μέτρου  $M_T$  σε βάσεις ή υποβάσεις από ασύνδετα κοκκώδη υλικά προσομοιώνει τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης που δέχεται ένα οδόστρωμα. Συνεπώς, η ακολουθία εντατικής κατάστασης (αξονική και πλευρική πίεση) που θα ασκηθεί στο δοκίμιο πρέπει να είναι τέτοια ώστε να καλύπτεται ολόκληρο το πιθανό εύρος τιμών που θα δεχθεί το οδόστρωμα σε όλη την διάρκεια ζωής του. Στον παρακάτω πίνακα, ο οποίος εναρμονίζεται με το πρότυπο AASHTO T307-99 για υλικά βάσεων/υποβάσεων, φαίνονται οι τιμές των εφαρμοζόμενων τάσεων στο δοκίμιο. Στην παρούσα μελέτη, κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των τριαξονικών δοκιμών ασκήθηκαν στα δοκίμια οι τιμές του πίνακα 5, οι οποίες παρέχονται αυτόματα στη συσκευή μέσω του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε.

**Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

<b>AASHTO T307-99</b>					
ΔΟΚΙΜΗ	kPa	kPa	kPa	kPa	
ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ $\sigma_3$	ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΞΟΝΙΚΗ $\sigma_{max}$	ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΑΣΗ $\sigma_{cyclic}$	ΤΑΣΗ ΕΠΑΦΗΣ $0.1\sigma_{max}$	ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΠΑΝ. ΦΟΡΤΙΣΗΣ
ΠΡΟΦΟΡΤΙΣΗ-0	103,4	103,4	93,1	10,3	500-1000
1	20,7	20,7	18,6	2,1	100
2	20,7	41,4	37,3	4,1	100
3	20,7	62,1	55,9	6,2	100
4	34,5	34,5	31	3,5	100
5	34,5	68,9	62	6,9	100
6	34,5	103,4	93,1	10,3	100
7	68,9	68,9	62	6,9	100
8	68,9	137,9	124,1	13,8	100
9	68,9	206,8	186,1	20,7	100
10	103,4	68,9	62	6,9	100
11	103,4	103,4	93,1	10,3	100
12	103,4	206,8	186,1	20,7	100
13	137,9	103,4	93,1	10,3	100
14	137,9	137,9	124,1	13,8	100
15	137,9	275,8	248,2	27,6	100

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5:** Ακολουθία φορτίσεων υλικών βάσεων/υποβάσεων κατά το πρότυπο AASHTO T307-99.

Μόλις ολοκληρωθεί το αρχικό στάδιο της προφόρτισης, το δοκίμιο είναι πλέον έτοιμο για το κύριο σκέλος της δοκιμής. Ακολουθεί η φόρτιση του δοκιμίου (στάδιο 1) με μειωμένη πλευρική περιοριστική πίεση τιμής 20,7 kPa, μέγιστη αξονική 20,7 kPa δηλαδή παρεκκλίνουσα τάση τιμής 18,6 kPa για 100 επαναλήψεις-κύκλους φόρτισης αρκεί η παραμόρφωση να μην ξεπερνάει το όριο του 5%. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, τα δύο αξονικά μηκυνσιόμετρα μετρούν και καταγράφουν την μέση τελική τιμή της αξονικής, κάθετης, ανακτήσιμης παραμόρφωσης των πέντε τελευταίων κύκλων (95-100) για τη δεδομένη φόρτιση. Αναλυτικότερα, από τις καταγραφές μετατόπισης των δύο μηκυνσιομέτρων προκύπτει η μέση τιμή τους η οποία διαιρεμένη με το αρχικό



## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

ύψος του δοκιμίου δίνει την συσσωρευμένη αξονική παραμόρφωση. Η διαφορά μεταξύ μέγιστης και τελευταίας αξονικής παραμόρφωσης των 100 κύκλων φόρτισης για κάθε στάδιο (15) φόρτισης αποτελεί την ελαστική παραμόρφωση του εκάστοτε σταδίου φόρτισης. Οι αξονικές, επιβαλλόμενες τάσεις για κάθε κύκλο φόρτισης υπολογίζονται διαιρώντας το φορτίο με την κυκλική επιφάνεια των δοκιμίων. Η παρεκκλίνουσα, κυκλική τάση  $\sigma_{cyc}$  προκύπτει ως η διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης αξονικής τάσης των 100 κύκλων φόρτισης για κάθε ένα στάδιο φόρτισης. Η τιμή του ελαστικού μέτρου  $M_r$  προκύπτει από την διαίρεση της κυκλικής τάσης με την ελαστική παραμόρφωση για κάθε στάδιο φόρτισης (1-15) και για τους πέντε τελευταίους (95-100) κύκλους φόρτισης. Η διαδικασία συνεχίζεται ως έχει για όλα τα επόμενα στάδια (2-15) με τις τιμές που δίνονται στον παραπάνω πίνακα, πάντα καταγράφοντας τις τιμές των παραμορφώσεων.

Με το πέρας της δοκιμής δημιουργείται αυτόματα από το λογισμικό αρχείο με τα ανεπεξέργαστα δεδομένα της δοκιμής. Τα δεδομένα που καταγράφονται σε αυτό το αρχείο περιλαμβάνουν τα πραγματικά αξονικά φορτία για κάθε περιοριστική πλευρική πίεση, τη διάρκεια της δοκιμής και τις καταγραφές των μηκυνσιομέτρων. Το λογισμικό του υπολογιστικού προγράμματος που συνδέεται με την τριαξονική συσκευή είναι σε θέση να παράγει στοιχεία μόλις ολοκληρωθεί η δοκιμή. Υπολογίζει το ελαστικό μέτρο  $M_r$  ως τη μέση τιμή των ενδείξεων των τελευταίων πέντε κύκλων φόρτισης (95-100) για κάθε ακολουθία φόρτισης, από το στάδιο 1 έως το στάδιο 15, κάνοντας χρήση της σχέσης  $M_r = \sigma_{cyc} / \epsilon_r$ .

Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε για τα τρία ασύνδετα υλικά που εξετάζονται στην παρούσα έρευνα [ΥΛΙΚΟ Α (3A), ΥΛΙΚΟ Β (RAP), ΥΛΙΚΟ Γ (50%3A+50%RAP)] τα δοκίμια των οποίων συμπυκνώθηκαν, για τις τρεις κύριες δοκιμές, με το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας (BΠΥ) και τη μέγιστη ξηρή πυκνότητα (ΜΕΠ) που υπολογίστηκε για το καθένα. Επιπρόσθετες τριαξονικές δοκιμές έγιναν για κάθε ένα από τα τρία υλικά για διάφορες τιμές του ποσοστού υγρασίας (πίνακας 4), προκειμένου να διαπιστωθεί η επιρροή του ποσοστού υγρασίας στο ελαστικό μέτρο των υλικών αυτών.

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

### 4.6.5 Τυπικά αποτελέσματα της εργαστηριακής, τριαξονικής δοκιμής, επαναλαμβανόμενης φόρτισης.

Στον παρακάτω πίνακα 6 δίδονται μερικά τυπικά αποτελέσματα, τα οποία προέκυψαν από την εκτέλεση της τριαξονικής δοκιμής στο εργαστήριο και του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε, σύμφωνα με τις πρότυπες προδιαγραφές AASHTO T307-99 για ασύνδετα κοκκώδη υλικά βάσεων και υποβάσεων. Για τα αποτελέσματα που ακολουθούν χρησιμοποιήθηκε δοκίμιο του υλικού A, δηλαδή αμμοχάλικο 3A, συμπυκνωμένο με περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας 3%. Το ελαστικό μέτρο μίας στρώσης από ασύνδετο κοκκώδες υλικό εξαρτάται επίσης από την εντατική κατάσταση. Συγκεκριμένα, αυξάνεται καθώς αυξάνεται η τάση διόγκωσης  $\theta$  (bulk stress) και η πλευρική πίεση (confining pressure) αλλά με μεγαλύτερη κλίση.

**Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

Κύκλος φόρτισης	Πλευρική ή πίεση (σc)	Πραγματική μέγιστη αξονική τάση	Πραγματική κυκλική τάση (σcyc)	Αξονική μετατόπιση LVDT1	Αξονική μετατόπιση LVDT2	Ελαστική παραμόρφωση	Ελαστικό μέτρο (Mr)	Τάση διογκώσεως (3σc + σs)
	kPa	kPa	kPa	mm	mm	mm/mm	MPa	kPa
1	20,5	21,2	18,6	0,29095	0,29308	0,000973	19,148	82,7
1	20,7	21,1	18,5	0,29373	0,2955	0,000982	18,866	83,2
1	20,7	21,2	18,6	0,29547	0,29734	0,000988	18,797	83,3
1	20,7	21,2	18,7	0,29187	0,29377	0,000976	19,139	83,3
1	20,7	21,2	18,6	0,29234	0,29435	0,000978	19,046	83,3
2	20,7	46,9	37,2	0,34485	0,33812	0,001138	32,704	109
2	20,7	46,8	37,4	0,34659	0,33938	0,001143	32,721	108,9
2	20,7	46,9	37,4	0,34798	0,34249	0,001151	32,483	109
2	20,7	46,9	37,4	0,34705	0,34007	0,001145	32,637	109
2	20,7	46,8	37,2	0,34705	0,33915	0,001144	32,497	108,9
3	21	66,3	56,1	0,41405	0,41314	0,001379	40,65	129,3
3	20,5	66,3	56	0,41335	0,41349	0,001378	40,609	127,8
3	20,9	66,3	55,9	0,41753	0,41556	0,001388	40,282	129
3	20,5	66,3	55,9	0,41104	0,41096	0,00137	40,806	127,8
3	20,8	66,3	56	0,41335	0,41257	0,001377	40,674	128,7
4	34,7	40,5	30,9	0,27553	0,26988	0,000909	34,034	144,6
4	34,6	40,4	30,9	0,27484	0,26884	0,000906	34,131	144,2
4	34,4	40,4	31,1	0,26858	0,26459	0,000889	34,934	143,6
4	34,7	40,4	31	0,27298	0,26735	0,000901	34,44	144,5
4	34,5	40,5	30,9	0,27994	0,27401	0,000923	33,425	144
5	34,6	72,7	62,1	0,37765	0,38281	0,001267	49,032	176,5
5	34,4	72,7	61,8	0,37846	0,38166	0,001267	48,788	175,9
5	34,6	72,6	62,1	0,37244	0,37707	0,001249	49,73	176,4
5	34,4	72,6	61,8	0,37533	0,37994	0,001259	49,087	175,8
5	34,4	72,8	61,9	0,37823	0,38316	0,001269	48,794	176
6	34,5	105,1	93,1	0,43445	0,44819	0,001471	63,312	208,6
6	34,6	105,1	93,1	0,42993	0,44233	0,001454	64,032	208,9
6	34,3	105,2	93,4	0,42379	0,43796	0,001436	65,037	208,1
6	34,6	105,1	93,2	0,43144	0,44451	0,00146	63,827	208,9
6	34,4	105	93,2	0,42413	0,43635	0,001434	64,987	208,2
7	69,1	73	62	0,28747	0,28906	0,000961	64,475	280,3
7	68,6	73	62	0,28422	0,28573	0,00095	65,249	278,8
7	69	73	62	0,28504	0,28642	0,000952	65,163	280
7	68,9	73,1	62,1	0,28411	0,28562	0,00095	65,41	279,8
7	69	73,1	62	0,28677	0,28906	0,00096	64,546	280,1
8	68,9	137,8	124,1	0,34253	0,35478	0,001162	106,779	344,5
8	68,7	137,9	124	0,34125	0,35501	0,00116	106,908	344
8	69,1	137,9	124,1	0,34068	0,35386	0,001158	107,206	345,2
8	68,9	137,9	124	0,34438	0,35765	0,00117	105,972	344,6
8	68,8	137,8	124,1	0,33975	0,35271	0,001154	107,526	344,2

**Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

9	68,7	206,8	186	0,34856	0,37557	0,001207	154,117	412,9
9	69,1	207	186,1	0,34891	0,3758	0,001208	154,094	414,3
9	68,8	206,8	186,1	0,34717	0,37362	0,001201	154,952	413,2
9	68,9	206,9	186,3	0,34995	0,37649	0,001211	153,814	413,6
9	69	206,8	186,3	0,34717	0,37454	0,001203	154,889	413,8
10	103,7	73	61,8	0,23844	0,22886	0,000779	79,304	384,1
10	103,4	73	61,8	0,24215	0,23323	0,000792	78,082	383,2
10	103,2	73,2	61,8	0,24261	0,23288	0,000792	78,054	382,8
10	103,6	73,2	61,9	0,24296	0,23357	0,000794	78,003	384
10	103,2	73,2	62	0,2418	0,23196	0,00079	78,492	382,8
11	103,5	105,5	93,1	0,2848	0,28045	0,000942	98,811	416
11	103,3	105,5	92,8	0,28063	0,277	0,000929	99,937	415,4
11	103,6	105,6	92,9	0,28237	0,27884	0,000935	99,344	416,4
11	103,3	105,6	93,1	0,28388	0,2793	0,000939	99,178	415,5
11	103,6	105,6	93,2	0,28295	0,27895	0,000937	99,454	416,4
12	103,6	206,7	186,2	0,30625	0,3295	0,00106	175,697	517,5
12	103,5	206,8	186	0,30799	0,33054	0,001064	174,788	517,3
12	103,3	206,6	185,9	0,30694	0,33088	0,001063	174,843	516,5
12	103,4	206,9	186,1	0,30636	0,3295	0,00106	175,605	517,1
12	103,5	206,8	186	0,30822	0,33203	0,001067	174,335	517,3
13	137,9	105,9	93,2	0,25142	0,24391	0,000826	112,814	519,6
13	138	105,8	93,2	0,25235	0,24426	0,000828	112,528	519,8
13	137,8	105,9	93	0,25478	0,24747	0,000837	111,153	519,3
13	137,9	105,8	93	0,2513	0,24276	0,000823	113,049	519,5
13	138	105,8	93	0,24875	0,24023	0,000815	114,149	519,8
14	137,8	138	123,9	0,27669	0,27677	0,000922	134,352	551,4
14	137,9	138,1	124,1	0,27924	0,27953	0,000931	133,249	551,8
14	137,9	138	123,9	0,27669	0,27746	0,000924	134,101	551,7
14	137,9	138,1	124	0,27727	0,27711	0,000924	134,153	551,8
14	137,7	138,1	124,3	0,27565	0,27551	0,000919	135,244	551,2
15	137,8	275,8	248,1	0,30265	0,34938	0,001087	228,214	689,2
15	137,9	275,9	248,2	0,3015	0,34835	0,001083	229,215	689,6
15	138	275,7	248,2	0,30115	0,34766	0,001081	229,629	689,7
15	137,9	275,8	248	0,30323	0,35007	0,001089	227,733	689,5
15	137,9	275,7	248,1	0,30254	0,34823	0,001085	228,645	689,4

**ΠΙΝΑΚΑΣ 6:** Τυπικά αποτελέσματα της εργαστηριακής, τριαξονικής δοκιμής σύμφωνα με την ακολουθία φορτίσεων που ορίζει το πρότυπο AASHTO T 307, για δοκίμιο υλικού Α-αμμοχάλικο 3Α και ποσοστό υγρασίας 3%.

## **5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ, ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ, ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ**

### **5.1 Εισαγωγή**

Δεδομένα και αποτελέσματα που αφορούν τις ιδιότητες κάθε υλικού που εξετάστηκε, όπως η κοκκομετρική διαβάθμιση και η σχέση ποσοστού υγρασίας-μέγιστης ξηρής πυκνότητας καθώς και ο προσδιορισμός του βέλτιστου ποσοστού υγρασίας για κάθε υλικό παρουσιάζονται αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο 4. Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται λεπτομερέστερα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις εργαστηριακές δοκιμές και αφορούν κυρίως το ελαστικό μέτρο  $M_r$  και τα μεγέθη από τα οποία επηρεάζεται. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα εργαστηριακά δεδομένα που προέκυψαν από την εκτέλεση τριαξονικών δοκιμών επαναλαμβανόμενης φόρτισης σε δοκίμια τριών υλικών και παρουσιάζονται παρακάτω με τη μορφή διαγραμμάτων. Τα τρία υλικά της παρούσας μελέτης χαρακτηρίζονται ως υλικό Α (αμμοχάλικο 3Α), υλικό Β (RAP-100%) και υλικό Γ (50%3Α+50%RAP). Για το υλικό Α θεωρήθηκε βέλτιστο ποσοστό υγρασίας (OMC) ίσο με 5%, για το υλικό Β το 4% και για το υλικό Γ ποσοστό 7% όπως προέκυψαν από την τροποποιημένη δοκιμή συμπίκνωσης κατά Proctor. Επιπροσθέτως, με βάση τα διαγράμματα που παρουσιάζονται, γίνεται η προσπάθεια συζήτησης και κατανόησης των βασικών διαφορών που εμφανίζονται μεταξύ των τριών διαφορετικών κοκκωδών υλικών καθώς και τις αιτίες που ευθύνονται για αυτές τις διακυμάνσεις. Προκειμένου να αξιοποιηθούν ευχερέστερα τα εργαστηριακά στοιχεία που συλλέχθηκαν αλλά και για την κατάλληλη επεξεργασία και ανάλυση αυτών, χρησιμοποιείται υπολογιστικό φύλλο (excel).

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερος ότι τα δεδομένα που προέκυψαν από τις εργαστηριακές δοκιμές και χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις που ακολουθούν, επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες όσον αφορά την ορθότητα τους. Αυτό βέβαια οφείλεται εν μέρει στο γεγονός ότι οι συνθήκες εκτέλεσης των εργαστηριακών δοκιμών διέπονται από πολλές

## **Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

αβεβαιότητες. Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την ορθή λήψη πειραματικών δεδομένων αφορούν κυρίως την τεχνική δειγματοληψίας, τη μέθοδο προετοιμασίας των δειγμάτων, τη διαδικασία παρασκευής των δοκιμών που ελέγχονται, τον εξοπλισμό των εργαστηριακών δοκιμών, τη μέθοδο και το πρόγραμμα εκτέλεσης των δοκιμών, τις περιβαλλοντικές συνθήκες κατά την διάρκεια εκτέλεσης, καθώς και λάθη που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των δοκιμών και οφείλονται είτε στο χειριστή, είτε στη συσκευή. Άλλα πιθανά αίτια σφαλμάτων που οδηγούν σε λανθασμένες καταγραφές δεδομένων κυρίως στην τριαξονική δοκιμή είναι η λανθασμένη βαθμονόμηση του τριαξονικού κελιού φόρτισης, οι εξωγενείς παρεμβολές σημάτων, η λανθασμένη ακολουθία φορτίσεων, διαρροές στη μεμβράνη που περικλείει το δοκίμιο καθώς και η λανθασμένη τοποθέτηση των μηκυνσιομέτρων που μετρούν τις παραμορφώσεις. Στην παρούσα μελέτη έγινε έλεγχος και εξακρίβωση ότι η επιρροή όλων των προαναφερθέντων παραμέτρων έχει ελαχιστοποιηθεί. Δίνεται έμφαση μόνο στην επιρροή που επιφέρει το περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας στις τιμές του ελαστικού μέτρου  $M_r$  των τριών υλικών όταν οι υπόλοιπες συνθήκες εκτέλεσης των εργαστηριακών δοκιμών παραμένουν αμετάβλητες. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στις παρακάτω αναλύσεις ελέγχθηκαν ως προς την αξιοπιστία τους και την ορθότητα τους.

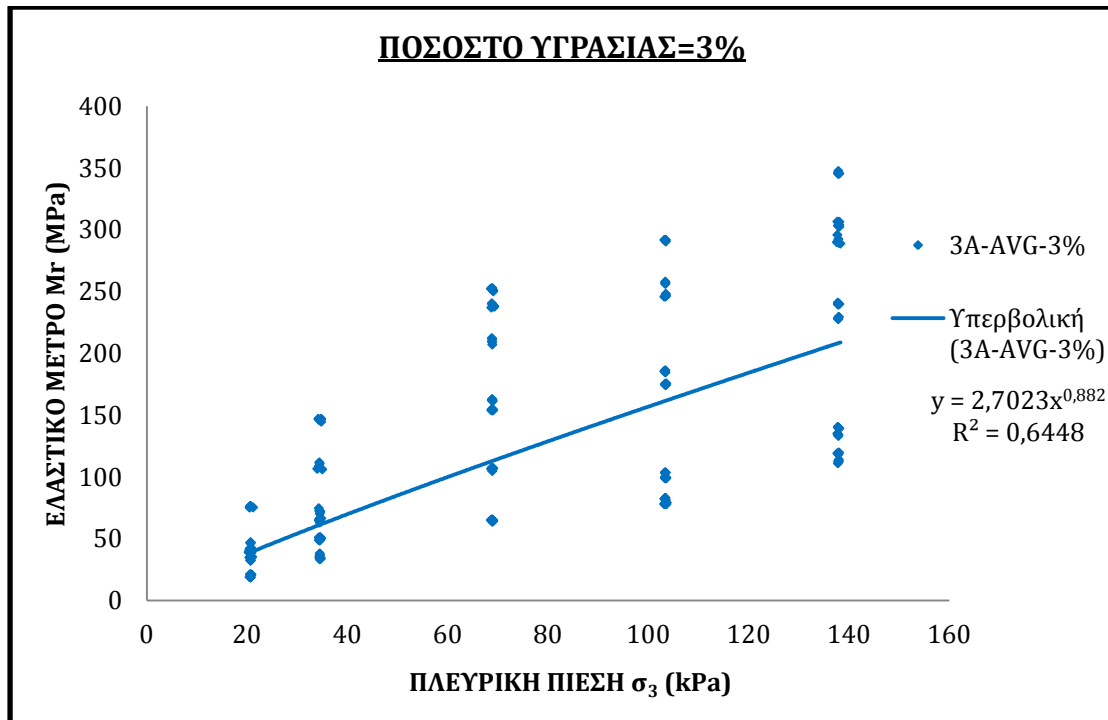
### **5.2 Συσχέτιση ελαστικού μέτρου $M_r$ και πλευρικής πίεσης περιορισμού $\sigma_3$ (confining pressure).**

Σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T307-99 για την εκτέλεση τριαξονικών εργαστηριακών δοκιμών ασκείται στα δοκίμια μία ακολουθία εντατικών καταστάσεων η οποία αποτελείται από ζεύγη τιμών πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  και παρεκκλίνουσας τάσης  $\sigma_d$ . Οι τιμές αυτές των τάσεων έχουν επιλεγεί κατάλληλα προκειμένου να προσομοιωθεί το καθεστώς τάσεων που πρόκειται να δεχθεί μία στρώση από ασύνδετα κοκκώδη υλικά εντός της δομής του οδοστρώματος από τα φορτία κυκλοφορίας κατά τη διάρκεια ζωής του. Κατά την εκτέλεση των εργαστηριακών τριαξονικών δοκιμών σε δοκίμια από κάθε υλικό, το λογισμικό της συσκευής καταγράφει δεδομένα φορτίσεων και μετακινήσεων τα οποία

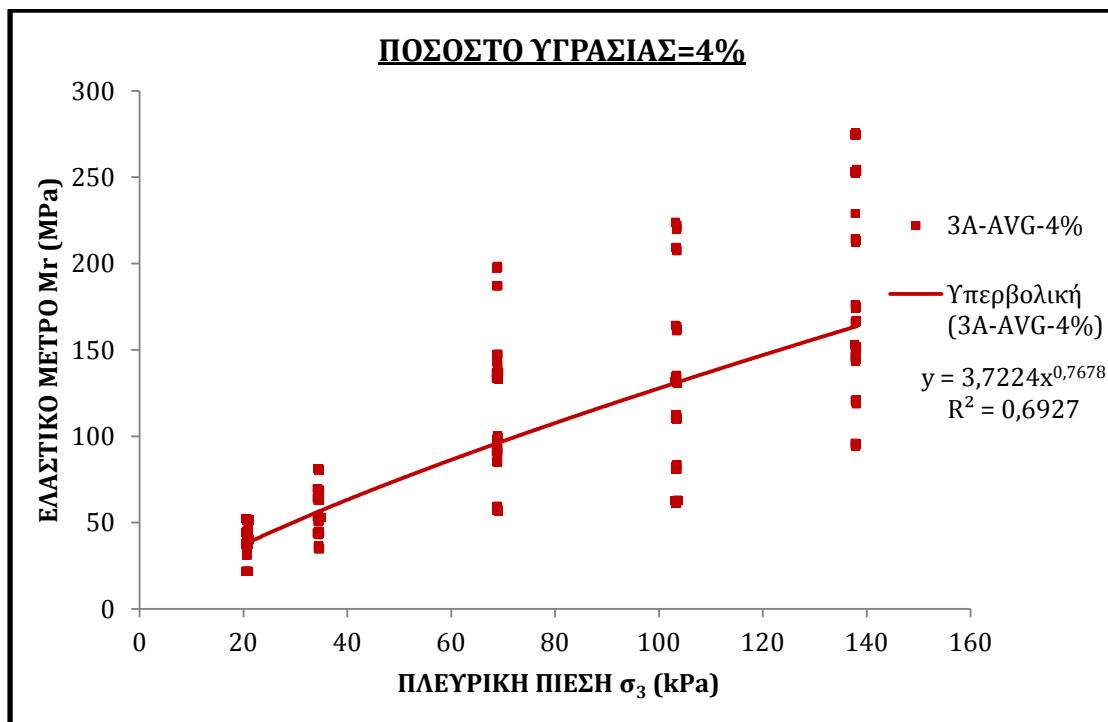
## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό του ελαστικού μέτρου  $M_r$ . Η διακύμανση των τιμών του ελαστικού μέτρου  $M_r$  σε κάθε ακολουθία φόρτισης είναι μεγαλύτερη όταν εφαρμόζονται στο δοκίμιο υψηλές τιμές τάσεων παρά όταν ασκούνται χαμηλά επίπεδα τάσεων, κάτι το οποίο επαληθεύεται με μία πρώτη ματιά στα διαγράμματα των τριών υλικών που ακολουθούν. Στα παρακάτω σχήματα 30 έως 45 παρουσιάζεται το ελαστικό μέτρο  $M_r$  συναρτήσει της πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$ , για τα τρία υλικά που εξετάστηκαν και για διάφορες τιμές του περιεχόμενου ποσοστού υγρασίας με το οποίο συμπυκνώθηκαν τα δοκίμια καθώς και της βέλτιστης τιμής του ποσοστού υγρασίας για κάθε υλικό. Η διασπορά των τιμών των δεδομένων, για περίπου σταθερή τιμή της πλευρικής πίεσης, αντιπροσωπεύει τιμές του ελαστικού μέτρου  $M_r$  υπό διαφορετικές τιμές παρεκκλινουσών, κατακόρυφων τάσεων. Η προσαρμογή της καμπύλης που χρησιμοποιήθηκε μεταξύ ελαστικού μέτρου  $M_r$  και πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  βασίζεται σε εξάρτηση μορφής τετραγωνικής ρίζας. Χρησιμοποιήθηκε αυτό το είδος μη γραμμικής καμπύλης εξάρτησης επειδή και τα τρία υλικά έχουν μη γραμμική συμπεριφορά (non-linear behavior). Από τα παρακάτω γραφήματα, γίνεται αντιληπτό, ότι για τα ασύνδετα κοκκώδη υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη, το ελαστικό μέτρο  $M_r$  αυξάνεται καθώς αυξάνεται σταθερώς η πλευρική πίεση περιορισμού του δοκιμίου  $\sigma_3$ .

ΥΛΙΚΟ Α- ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟ 3Α



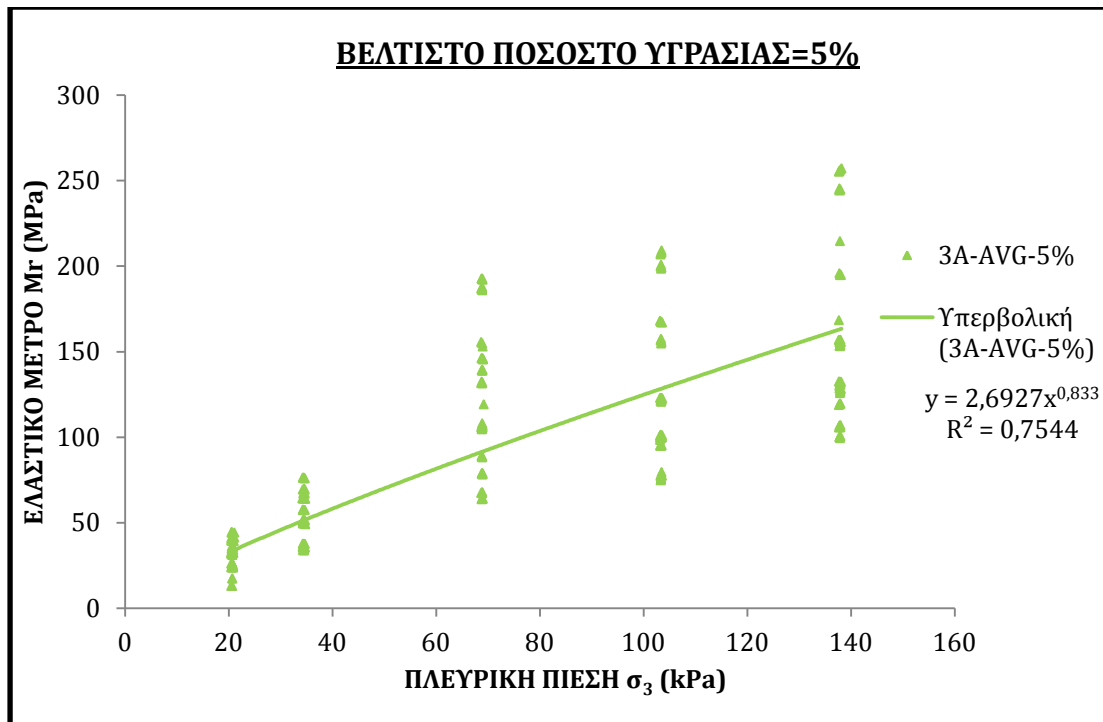
**ΣΧΗΜΑ 30:** Ελαστικό μέτρο  $M_r$  συναρτήσει της πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  του υλικού Α, για ποσοστό υγρασίας 3%.



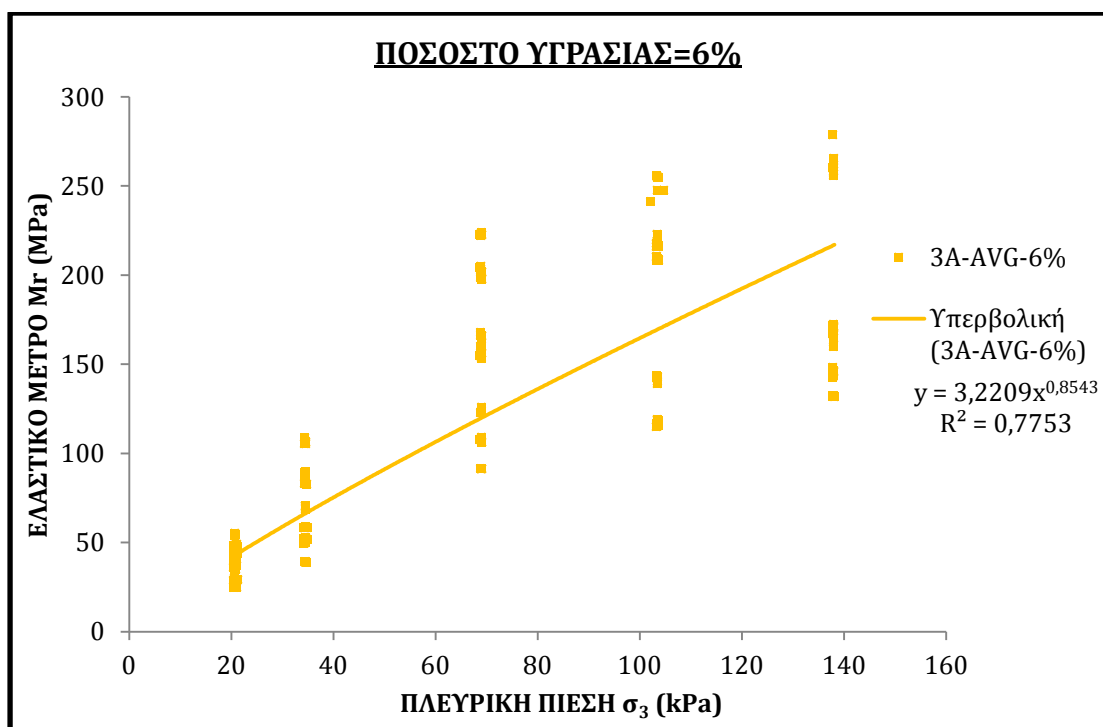
**ΣΧΗΜΑ 31:** Ελαστικό μέτρο  $M_r$  συναρτήσει της πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  του υλικού Α, για ποσοστό υγρασίας 4%.



Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

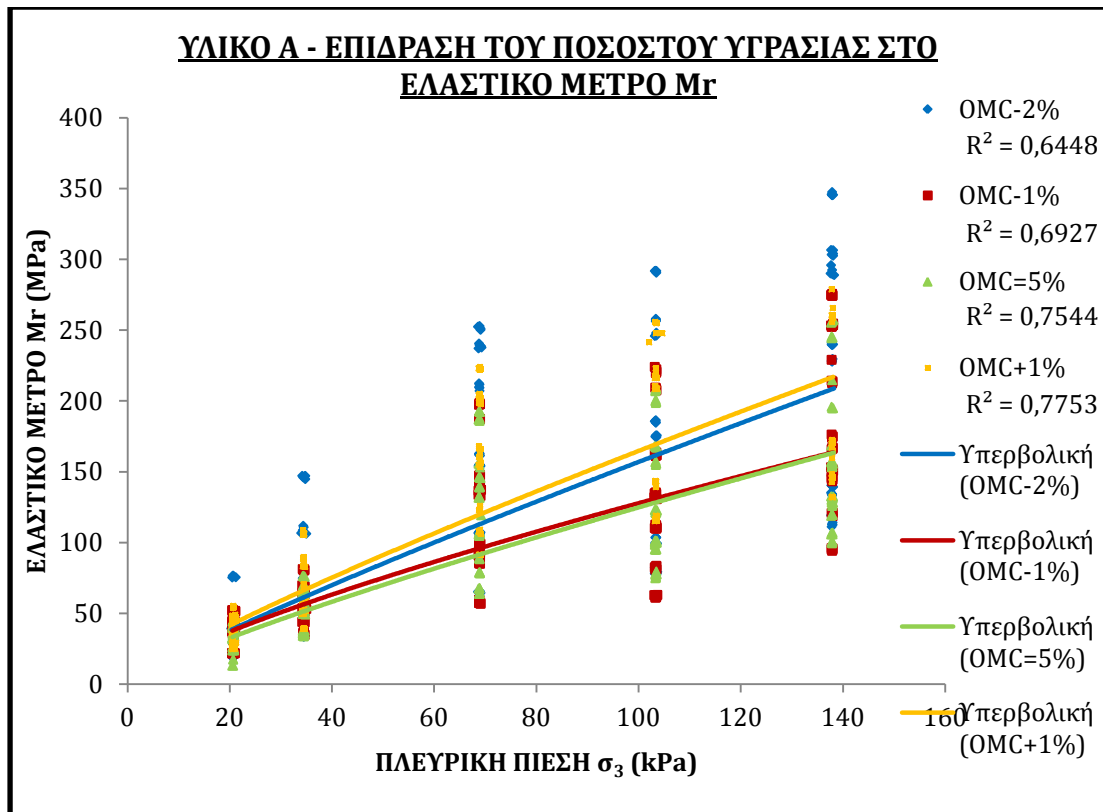


**ΣΧΗΜΑ 32:** Ελαστικό μέτρο  $M_r$  συναρτήσει της πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  του υλικού A, για το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας 5%.



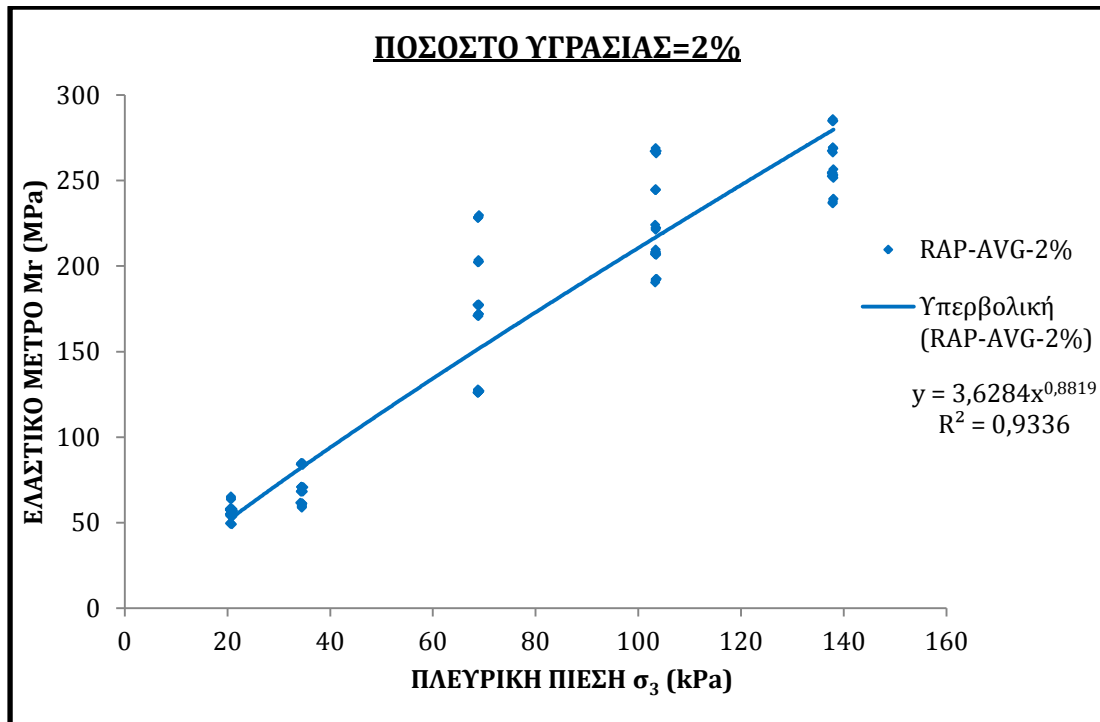
**ΣΧΗΜΑ 33:** Ελαστικό μέτρο  $M_r$  συναρτήσει της πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  του υλικού A, για ποσοστό υγρασίας 6%.

Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

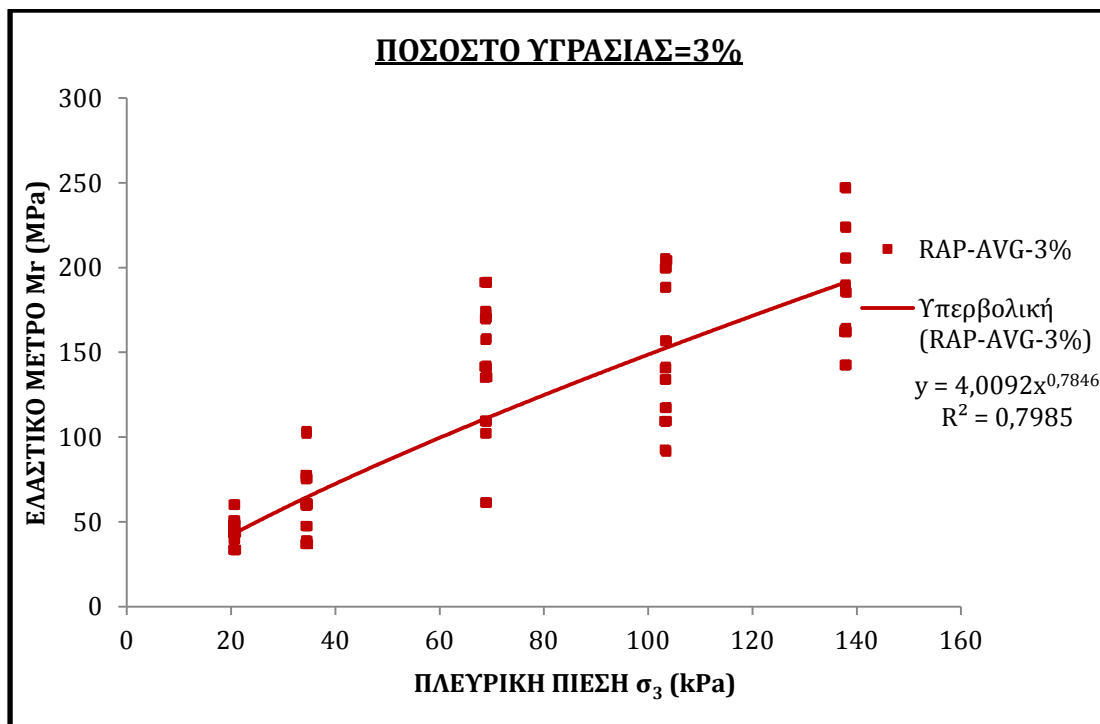


**ΣΧΗΜΑ 34:** Συγκριτικό γράφημα που παρουσιάζει το ελαστικό μέτρο  $M_r$  συναρτήσει της πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  του υλικού Α, για διάφορες τιμές του ποσοστού υγρασίας.

ΥΛΙΚΟ Β- RAP(100%)

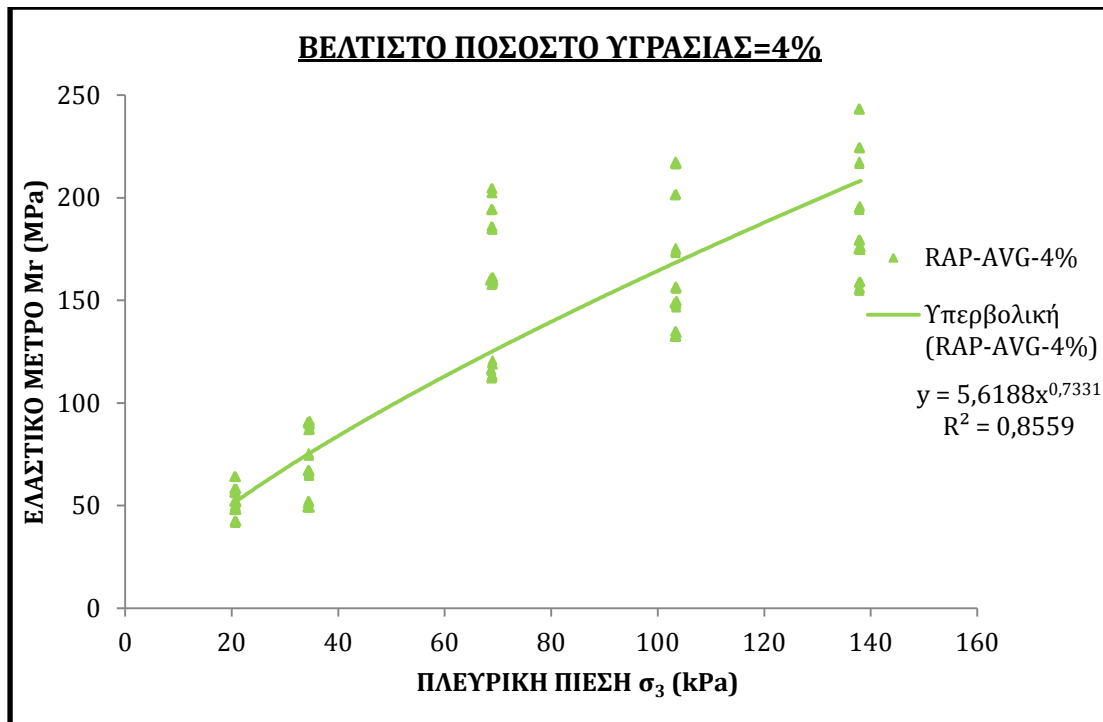


**ΣΧΗΜΑ 35:** Ελαστικό μέτρο  $M_r$  συναρτήσει της πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  του υλικού Β, για ποσοστό υγρασίας 2%.

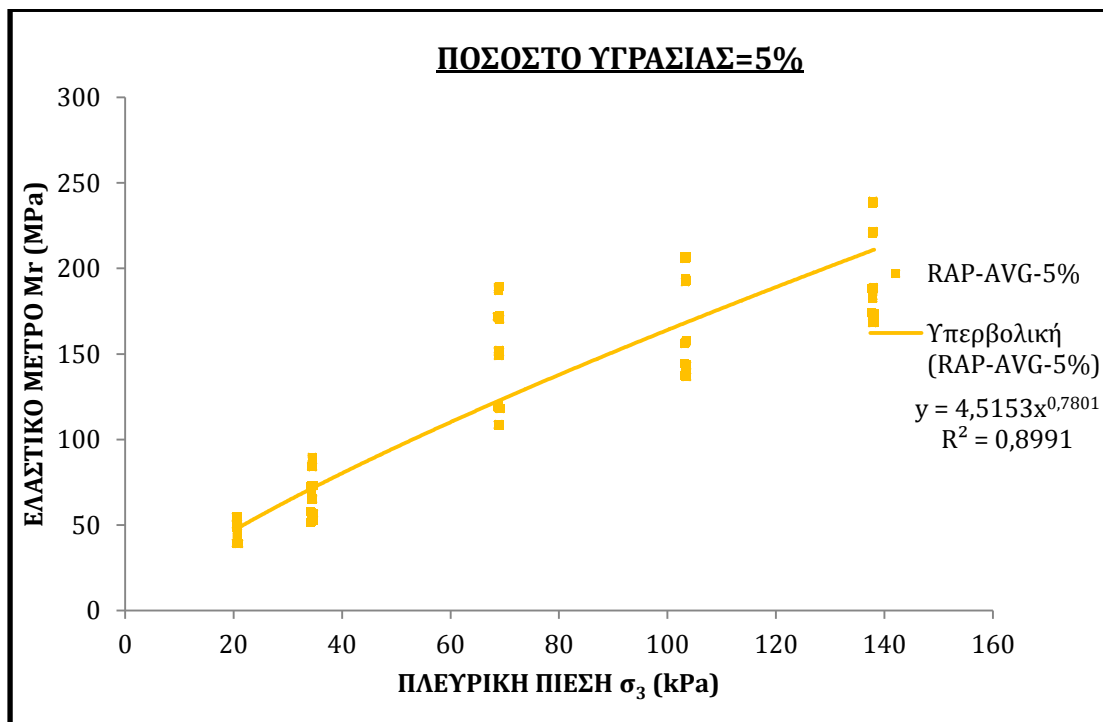


**ΣΧΗΜΑ 36:** Ελαστικό μέτρο  $M_r$  συναρτήσει της πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  του υλικού Β, για ποσοστό υγρασίας 3%.

Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

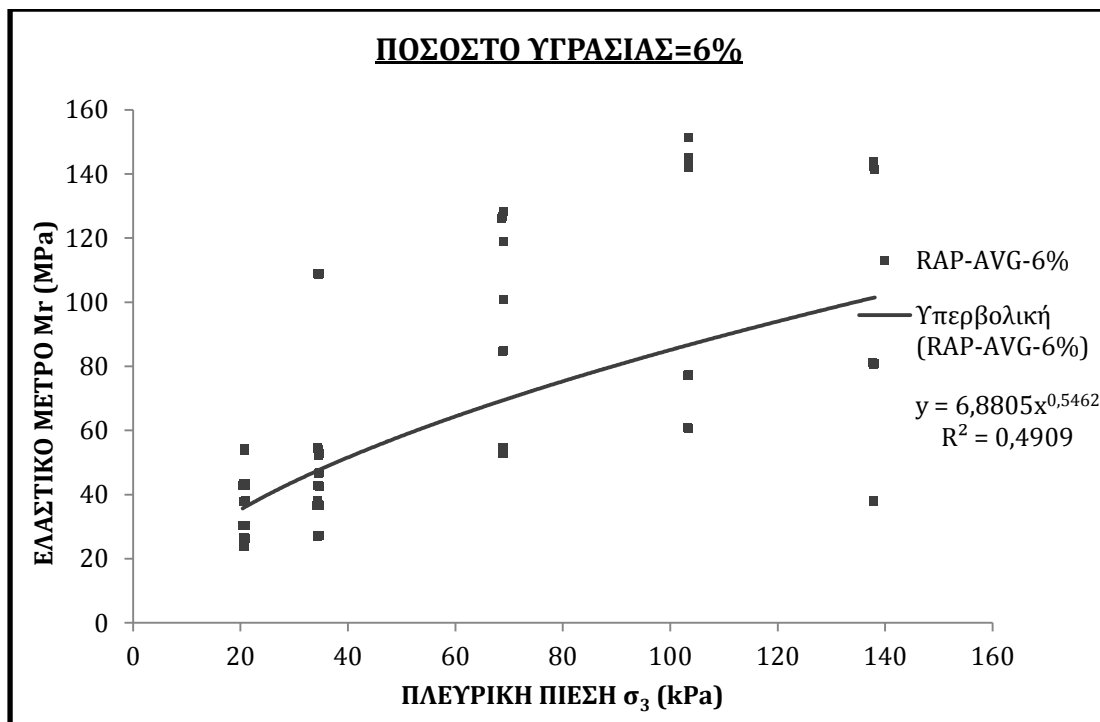


**ΣΧΗΜΑ 37:** Ελαστικό μέτρο  $M_r$  συναρτήσει της πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  του υλικού Β, για το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας 4%.

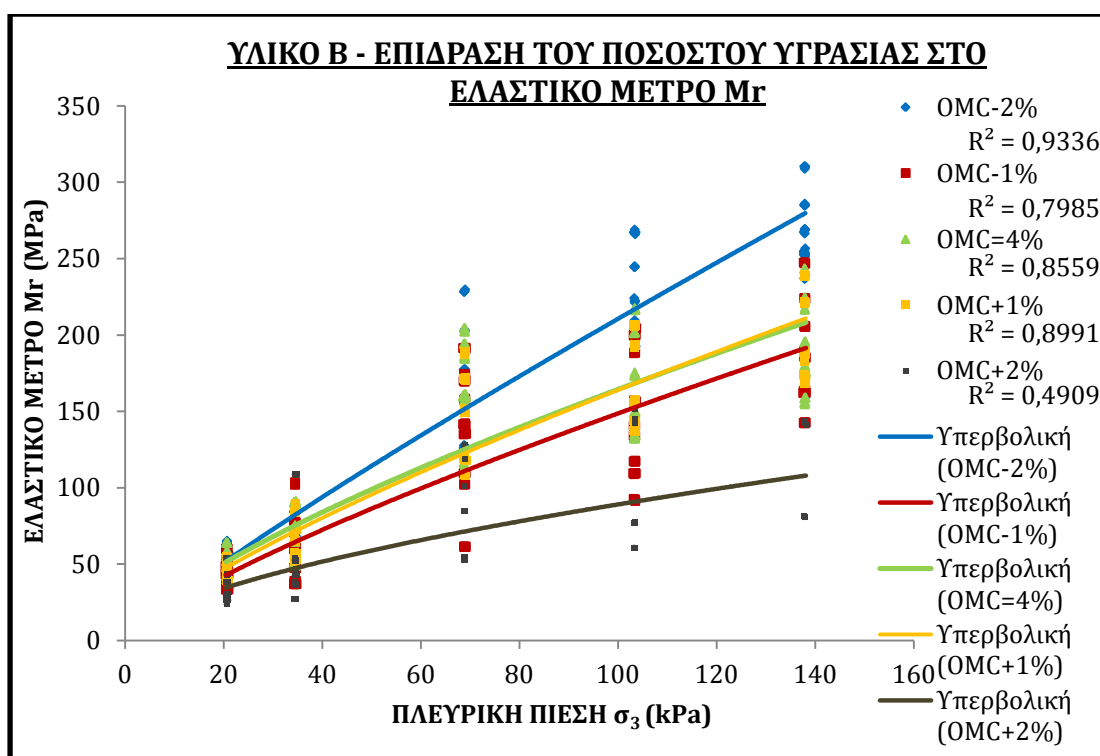


**ΣΧΗΜΑ 38:** Ελαστικό μέτρο  $M_r$  συναρτήσει της πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  του υλικού Β, για ποσοστό υγρασίας 5%.

Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

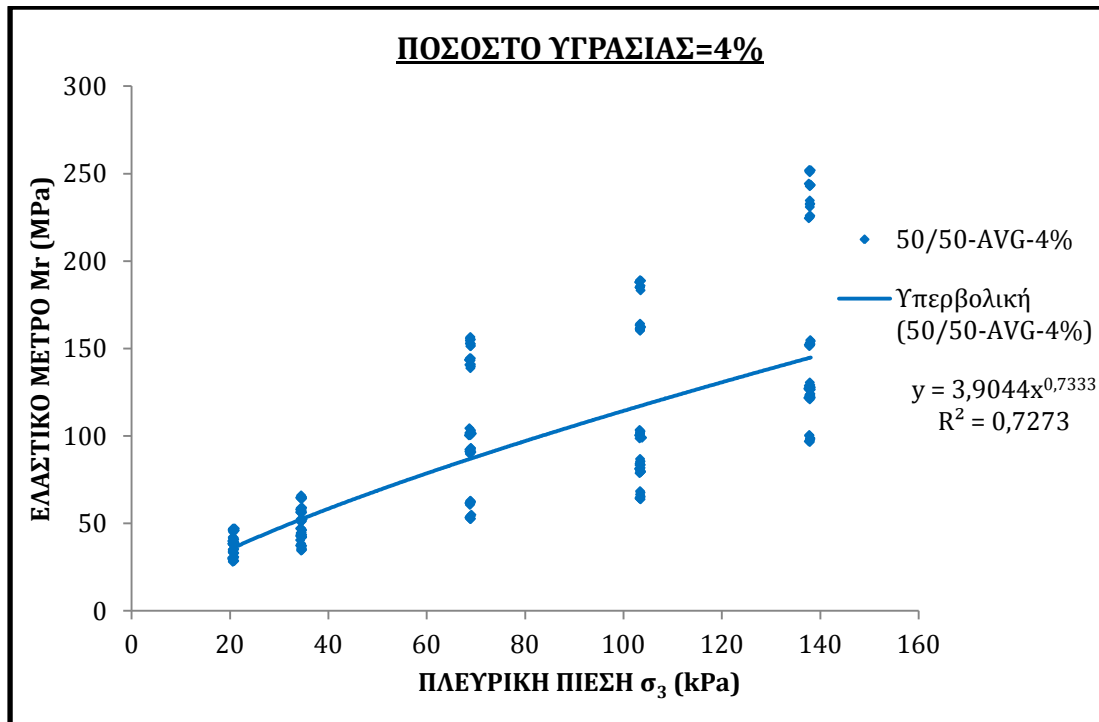


**ΣΧΗΜΑ 39:** Ελαστικό μέτρο  $M_r$  συναρτήσει της πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  του υλικού B, για ποσοστό υγρασίας 6%.

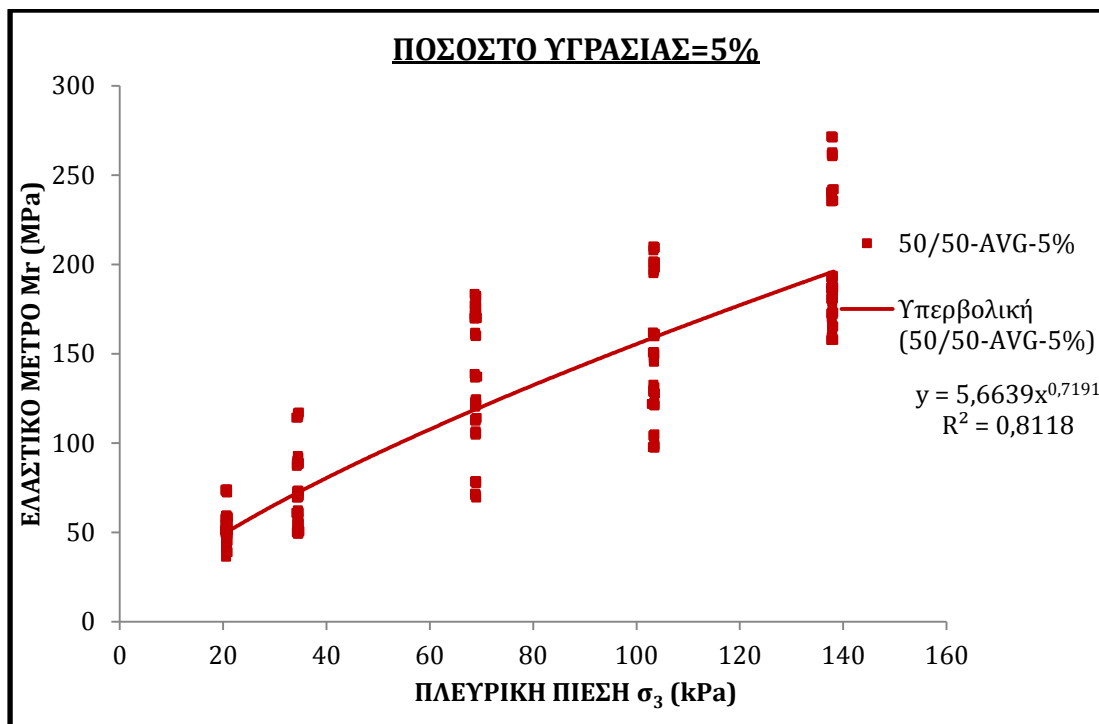


**ΣΧΗΜΑ 40:** Συγκριτικό γράφημα που παρουσιάζει το ελαστικό μέτρο  $M_r$  συναρτήσει της πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  του υλικού B, για διάφορες τιμές του ποσοστού υγρασίας.

ΥΛΙΚΟ Γ- 50/50 (3Α + RAP)

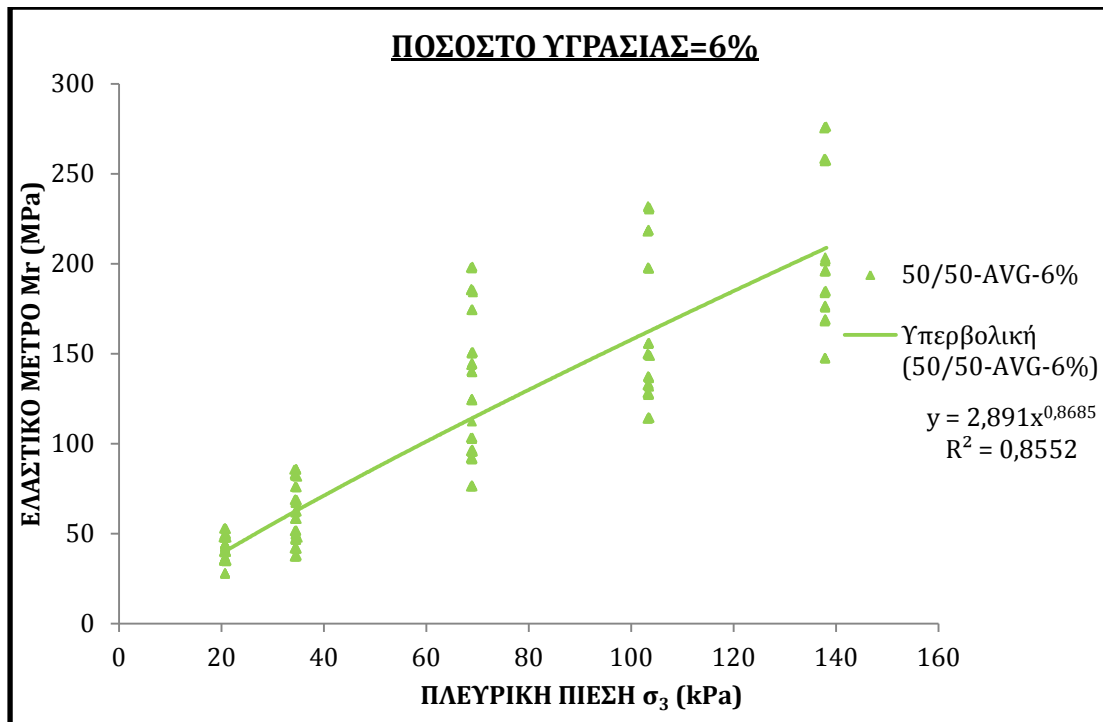


**ΣΧΗΜΑ 41:** Ελαστικό μέτρο Mr συναρτήσει της πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  του υλικού Γ, για ποσοστό υγρασίας 4%.

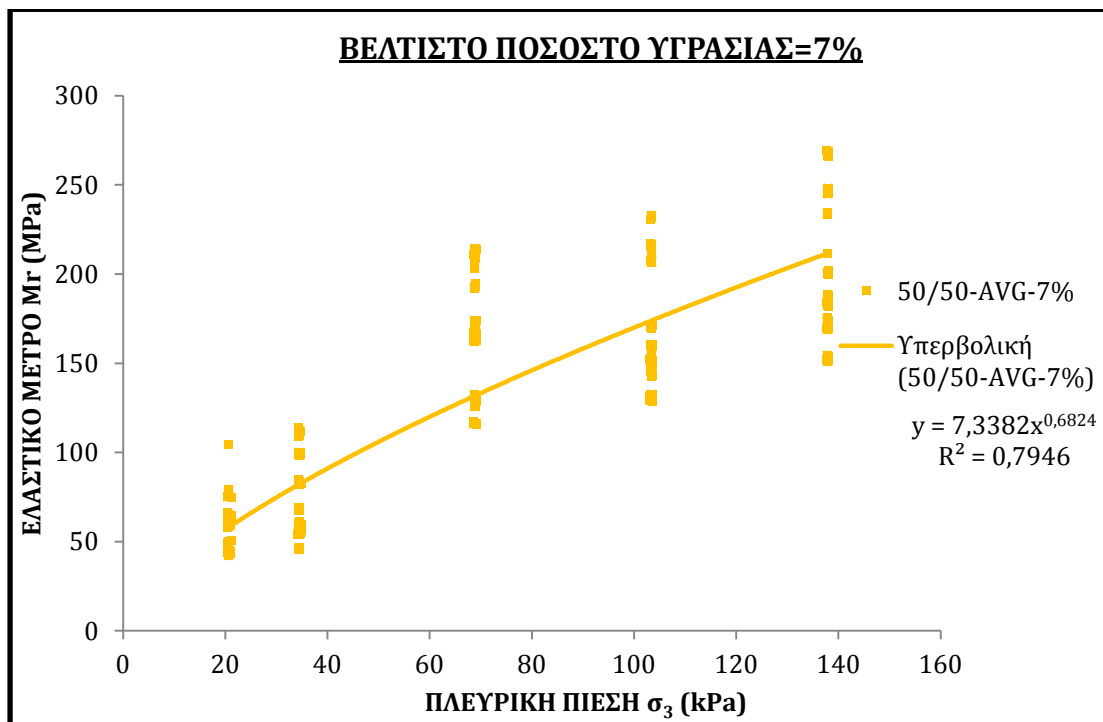


**ΣΧΗΜΑ 42:** Ελαστικό μέτρο Mr συναρτήσει της πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  του υλικού Γ, για ποσοστό υγρασίας 5%.

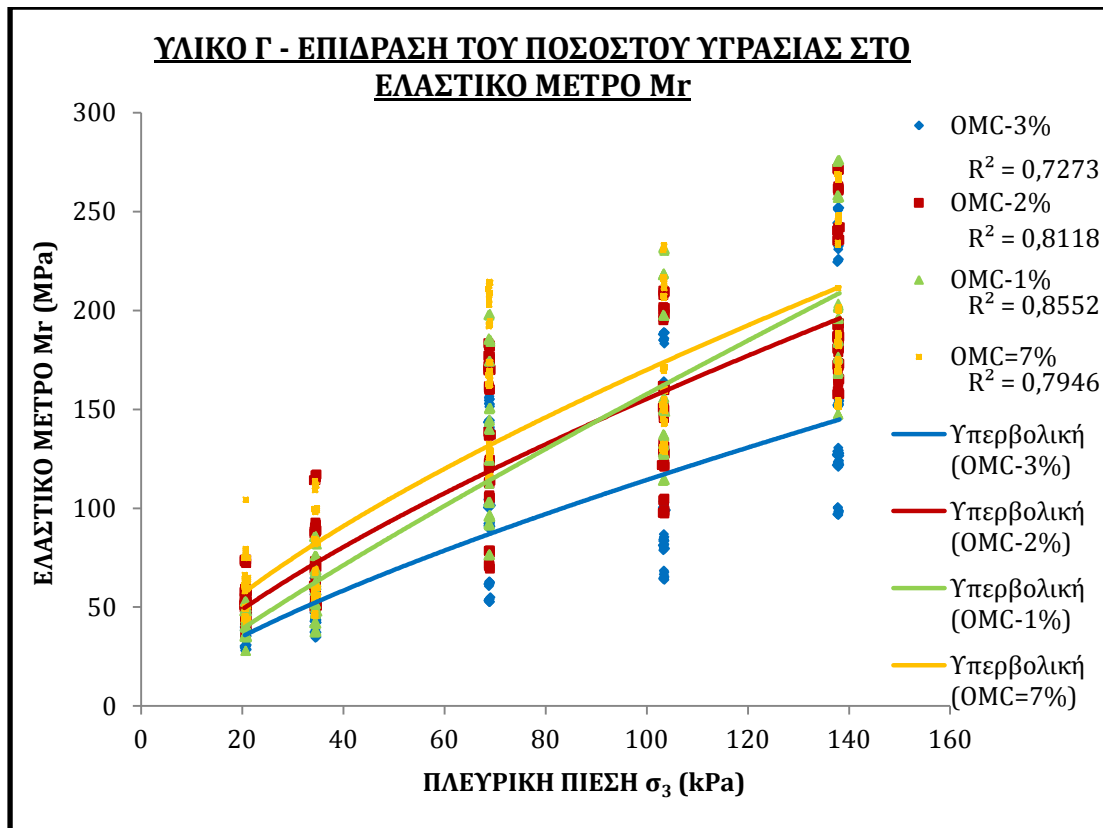
Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.



**ΣΧΗΜΑ 43:** Ελαστικό μέτρο  $M_r$  συναρτήσει της πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  του υλικού Γ, για ποσοστό υγρασίας 6%.



**ΣΧΗΜΑ 44:** Ελαστικό μέτρο  $M_r$  συναρτήσει της πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  του υλικού Γ, για το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας 7%.



**ΣΧΗΜΑ 45:** Συγκριτικό γράφημα που παρουσιάζει το ελαστικό μέτρο Mr συναρτήσει της πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  του υλικού Γ, για διάφορες τιμές του ποσοστού υγρασίας.

Όπως κάθε τυπικό κοκκώδες υλικό, έτσι και στην παρούσα μελέτη, το ελαστικό μέτρο Mr των τριών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν έχει την τάση να αυξάνεται, αυξανόμενης της πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$ , κάτι το οποίο αποδεικνύεται και από τα συγκριτικά γραφήματα 34, 40 και 45.

Παρατηρώντας το συγκριτικό γράφημα 34 για το υλικό Α-αμμοχάλικο 3Α με βέλτιστο ποσοστό υγρασίας 5% γίνεται αντιληπτό ότι για τιμές του ποσοστού υγρασίας μικρότερες της βέλτιστης τιμής (OMC-2%, OMC-1%) όλες οι τιμές του ελαστικού μέτρου Mr είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές που εμφανίζονται για το βέλτιστο ποσοστό. Αυτό σημαίνει ότι τα δοκίμια που συμπυκνώθηκαν σε τιμές του ποσοστού υγρασίας μικρότερες της βέλτιστης και υποβλήθηκαν σε τριαξονική δοκιμή, εμφανίζουν μεγαλύτερη δυσκαμψία για όλες τις τιμές της πλευρικής πίεσης. Δηλαδή, το ελαστικό μέτρο του



## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

συγκεκριμένου υλικού έχει την τάση να μειώνεται καθώς προσεγγίζεται η κατάσταση συμπύκνωσης υπό το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας, για σταθερά αυξανόμενες τιμές της πλευρικής πίεσης. Ακόμη, για τιμή του ποσοστού υγρασίας μεγαλύτερη της βέλτιστης τιμής (OMC+1%), το ελαστικό μέτρο του υλικού αυξάνεται παίρνοντας και πάλι μεγαλύτερες τιμές από ότι στη βέλτιστη κατάσταση. Το γεγονός αυτό ίσως να οφείλεται στο ότι από την τροποποιημένη δοκιμή συμπύκνωσης κατά Proctor για το υλικό A προέκυψε βέλτιστο ποσοστό υγρασίας ίσο με 5,5%. Για λόγους ευκολίας οι τριαξονικές δοκιμές εκτελέστηκαν για ακέραιες τιμές ποσοστών υγρασίας οπότε για το υλικό A θεωρήθηκε ως βέλτιστο ποσοστό υγρασίας το 5%. Εάν εξαιρέσουμε την αύξηση στο ελαστικό μέτρο που εμφανίζεται στα δοκίμια του υλικού A τα οποία συμπυκνώθηκαν σε ποσοστό υγρασίας 6% (OMC+1%) και για τα οποία μία λογική εξήγηση δόθηκε παραπάνω, μπορούμε να εξαγάγουμε ως συμπέρασμα ότι καθώς το ποσοστό υγρασίας αυξάνεται πέρα από τη βέλτιστη τιμή, το ελαστικό μέτρο μειώνεται για σταθερώς αυξανόμενες τιμές της πλευρικής πίεσης. Στα διαγράμματα ελαστικού μέτρου  $M_r$ -πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  του υλικού A (σχήματα 30 έως 34) για κάθε ποσοστό υγρασίας, τα αθροιστικά δεδομένα των τριαξονικών δοκιμών αντιπροσωπεύονται από την αντίστοιχη καμπύλη τάσης τύπου δύναμης (power line). Οι καμπύλες δύναμης, οι οποίες φαίνονται συγκεντρωτικά στο σχήμα 34, παρουσιάζουν την μη γραμμική σχέση μεταξύ ελαστικού μέτρου και πλευρικής πίεσης. Οι τιμές του ελαστικού μέτρου  $M_r$ , για όλα τα ποσοστά υγρασίας εμφανίζουν αποδεκτή συσχέτιση με την πλευρική πίεση  $\sigma_3$ , καθώς ο συντελεστής προσδιορισμού παίρνει τιμές μεγαλύτερες ή ίσες με 0,65 ( $R^2 \geq 0,65$ ). Όσο πιο κοντά στην τιμή 1 είναι ο συντελεστής προσδιορισμού τόσο καλύτερη είναι η συσχέτιση μεταξύ των εμπλεκόμενων μεταβλητών. Για δεδομένα που προέρχονται από εργαστηριακές μελέτες και για να διαπιστωθεί ότι δεν έγινε κάποιο ουσιώδες σφάλμα κατά την εκτέλεση, τιμές του συντελεστή προσδιορισμού μεγαλύτερες από 0.65 κρίνονται ικανοποιητικές. Τα δοκίμια του υλικού A που συμπυκνώθηκαν και ελέχθησαν σε τριαξονική δοκιμή με ποσοστό υγρασίας 3%, δηλαδή μακριά από το βέλτιστο ποσοστό, εμφανίζουν την μικρότερη συσχέτιση μεταξύ  $M_r$  και  $\sigma_3$  με  $R^2=0,6448$ . Αντίθετα τα δοκίμια που συμπυκνώθηκαν σε ποσοστά υγρασίας κοντά στη βέλτιστη τιμή έχουν μεγαλύτερους συντελεστές προσδιορισμού, με μεγαλύτερη τιμή, ακόμη και από

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

το βέλτιστο ( $BPIY_A=5,5\%$ ), για τα δοκίμια που συμπυκνώθηκαν σε ποσοστό υγρασίας 6% -  $R^2=0,7753$ .

Αντίστοιχα συμπεράσματα με αυτά του υλικού A εξάγονται παρατηρώντας το συγκριτικό γράφημα 40 του υλικού B-RAP 100% με βέλτιστο ποσοστό υγρασίας (OMC) ίσο με 4%. Τα δοκίμια που συμπυκνώθηκαν με ποσοστά υγρασίας κοντά στη βέλτιστη τιμή (OMC-1%, OMC+1%) εμφανίζουν καμπύλες τάσεων μεταξύ ελαστικού μέτρου και πλευρικής πίεσης οι οποίες προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό την καμπύλη που αντιστοιχεί στο βέλτιστο ποσοστό υγρασίας, χωρίς να είναι εμφανής ο διαχωρισμός τους, γεγονός το οποίο πιθανότατα να οφείλεται στην παρεμφορή συμπίκνωση των δοκιμίων. Από την άλλη, τα δοκίμια με ποσοστά υγρασίας μακρύτερα από τη βέλτιστη τιμή (OMC-2%, OMC+2%) παράγουν καμπύλες τάσεων οι οποίες βρίσκονται εκατέρωθεν της καμπύλης του βέλτιστου ποσοστού. Πιο συγκεκριμένα, η καμπύλη που αντιστοιχεί στο μικρότερο ποσοστό υγρασίας (OMC-2%) εμφανίζει την καλύτερη συσχέτιση ( $R^2=0,9336$ ) μεταξύ ελαστικού μέτρου  $M_f$  και πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  ενώ οι τιμές του ελαστικού μέτρου είναι αισθητά μεγαλύτερες σε σχέση με τις τιμές που αντιστοιχούν στο βέλτιστο ποσοστό, για τις ίδιες σταθερώς αυξανόμενες τιμές της πλευρικής πίεσης. Η καμπύλη τάσης που αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο ποσοστό υγρασίας (OMC+2%) εμφανίζει πολύ πτωχή συσχέτιση μεταξύ ελαστικού μέτρου και πλευρικής πίεσης ( $R^2=0,4909$ ) κάτι το οποίο μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι για ποσοστό υγρασίας 6%, για το υλικό B, εκτελέστηκαν 2 τριαξονικές δοκιμές (κεφάλαιο 4-πίνακας 4) κατά τις οποίες τα δοκίμια αστόχησαν προτού ολοκληρωθούν τα (15) στάδια φόρτισης οπότε τα δεδομένα των ελαστικών μέτρων για τις μεγαλύτερες τιμές της πλευρικής πίεσης είναι ελλιπή. Δηλαδή, το υλικό B-RAP για τιμές του περιεχόμενου ποσοστού υγρασίας λίγο μεγαλύτερες της βέλτιστης τιμής γίνεται ασταθές. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο η μέγιστη τιμή του ελαστικού μέτρου που εμφανίζεται (περίπου 100 MPa) είναι κατά πολύ μικρότερος συγκριτικά με τις τιμές που εμφανίζονται στις υπόλοιπες δοκιμές.

Τελείως διαφορετικά σε σχέση με τα προαναφερθέντα υλικά A και B είναι τα συμπεράσματα που εξάγουμε παρατηρώντας το συγκριτικό σχήμα 45 του υλικού Γ - 50/50 (3A + RAP) με βέλτιστο ποσοστό υγρασίας 7%. Για το υλικό

## **Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

αυτό εκτελέστηκαν τριαξονικές δοκιμές για τιμές του ποσοστού υγρασίας μικρότερες από την βέλτιστη τιμή καθώς και για την βέλτιστη τιμή. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι καθώς αυξάνεται το ποσοστό υγρασίας οι αντίστοιχες τιμές του ελαστικού μέτρου αυξάνονται, αυξανομένων των τιμών των πλευρικών πιέσεων, με αποτέλεσμα η καμπύλη τάσης μεταξύ ελαστικού μέτρου και πλευρικής πίεσης για το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας να βρίσκεται υψηλότερα από κάθε άλλη καμπύλη του διαγράμματος. Βέβαια, πιθανόν θα υπάρχει μία τιμή του ποσοστού υγρασίας λίγο πάνω από την βέλτιστη τιμή για την οποία το ελαστικό μέτρο θα λαμβάνει μικρότερες τιμές και άρα η καμπύλη τάσης θα βρίσκεται χαμηλότερα σε σχέση με την βέλτιστη, καθώς το επιπρόσθετο νερό θα αποδιοργανώνει τη δομή του δοκιμίου μειώνοντας την δυσκαμψία του. Μία πιθανή εξήγηση για την συμπεριφορά του υλικού Γ που εξετάστηκε στην παρούσα μελέτη (μείγμα αμμοχάλικου 3Α και ανακυκλώσιμου ασφαλτικού υλικού) θα μπορούσε να είναι ότι το νερό δρα ευεργετικά στο ελαστικό μέτρο μέχρι ενός ποσοστού υγρασίας διότι αποδιοργανώνει το αμμοχάλικο που εμπεριέχεται στο μείγμα με αποτέλεσμα το χονδρόκοκκο υλικό του ανακυκλωμένου ασφαλτικού υλικού να έρχεται σε επαφή (το αμμοχάλικο είναι σε θέση να απορροφήσει περισσότερο νερό σε σχέση με το ασφαλτικό υλικό διότι η άσφαλτος που περιβάλλει τους κόκκους του RAP δεν του επιτρέπει να απορροφήσει νερό), αναλαμβάνοντας μεγαλύτερη αξονική τάση μέσω των χονδρών κόκκων και άρα το δοκίμιο έχει μικρότερη αξονική παραμόρφωση, δηλαδή εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές ελαστικού μέτρου. Οι τιμές του ελαστικού μέτρου  $M_r$ , για όλα τα ποσοστά υγρασίας εμφανίζουν αποδεκτή συσχέτιση με την πλευρική πίεση  $\sigma_3$ , καθώς ο συντελεστής προσδιορισμού παίρνει τιμές μεγαλύτερες ή ίσες με 0,72 ( $R^2 \geq 0,72$ ).

### **5.3 Σύγκριση της σχέσης ελαστικού μέτρου $M_r$ και πλευρικής πίεσης $\sigma_3$ των τριών υλικών υπό τα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας τους.**

Στο παρακάτω σχήμα 46 γίνεται μία προσπάθεια σύγκρισης των ελαστικών μηχανικών χαρακτηριστικών και για το λόγο αυτό παρουσιάζονται τα δεδομένα ελαστικών μέτρων-πλευρικών πιέσεων όπως προέκυψαν από εργαστηριακές

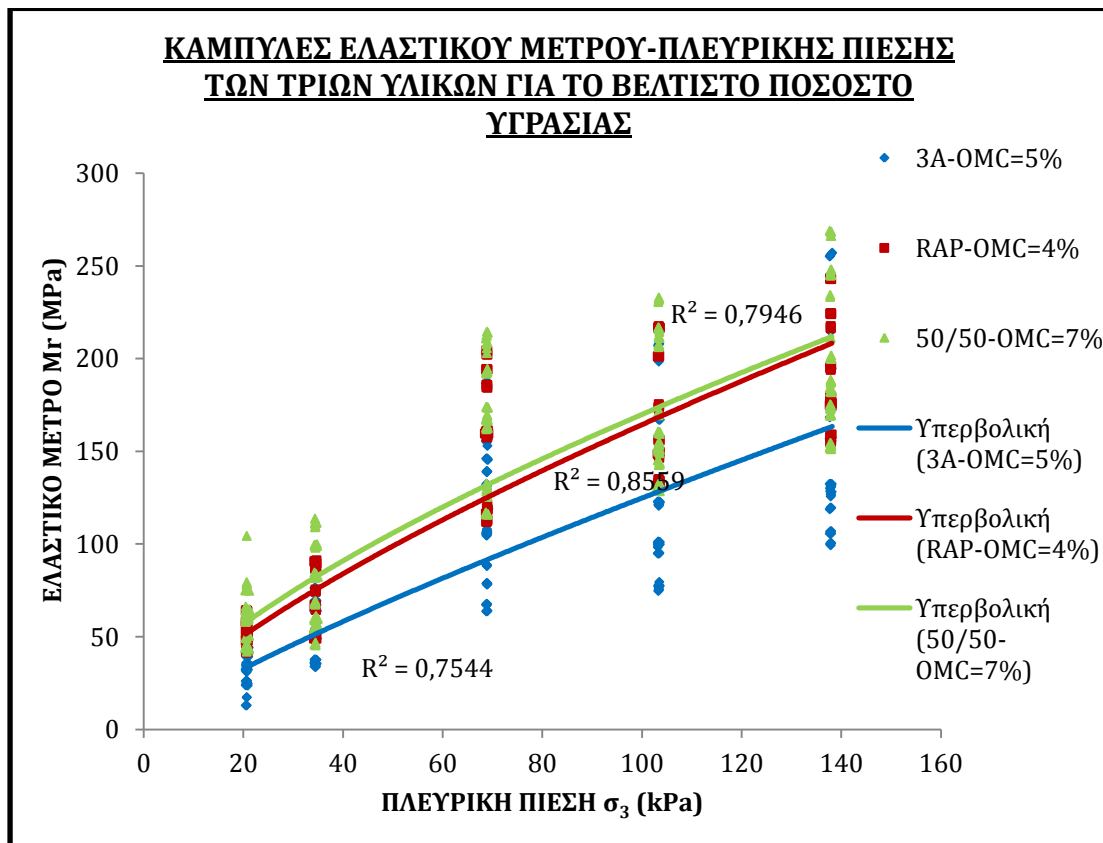
## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

τριαξονικές δοκιμές που εκτελέστηκαν σε δοκίμια των τριών υλικών που εξετάζονται στην παρούσα μελέτη. Αρχικά, ως μέτρο σύγκρισης χρησιμοποιείται η ελαστική απόκριση των τριών υλικών όταν αυτά παρασκευαστούν και συμπυκνωθούν σε δοκίμια που περιέχουν το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας τους. Επειδή για κάθε υλικό πραγματοποιήθηκαν περισσότερες από μία τριαξονικές δοκιμές με το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας τους, χρησιμοποιήθηκαν όλες οι τιμές των ελαστικών μέτρων των τελευταίων πέντε κύκλων (95-100) για κάθε στάδιο φόρτισης (1-15) και για σταθερώς αυξανόμενες τιμές της πλευρικής πίεσης. Τα δεδομένα που προέκυψαν για κάθε υλικό φαίνονται στο σχήμα 46 και προσομοιώνονται από τις αντίστοιχες καμπύλες τάσεων τύπου δύναμης.

Για το υλικό Α (αμμοχάλικο 3Α) με βέλτιστο ποσοστό υγρασίας 5%, οι τιμές του ελαστικού μέτρου κυμαίνονται μεταξύ 30 και 250 MPa καθώς αυξάνεται η πλευρική πίεση. Το υλικό Β (RAP-100%) με βέλτιστο ποσοστό υγρασίας 4% κυμαίνεται από 40 έως 250 MPa, ενώ το υλικό Γ (50/50) με βέλτιστο ποσοστό υγρασίας 7% κυμαίνεται από 40 έως 280 MPa. Ως γενική παρατήρηση και για τα τρία υλικά μπορούμε να πούμε ότι το ελαστικό μέτρο  $M_r$  αυξάνεται καθώς αυξάνεται η πλευρική πίεση  $\sigma_3$ . Όπως φαίνεται και στο γράφημα τα δεδομένα ελαστικού μέτρου για το υλικό Α, για περίπου σταθερές τιμές της πλευρικής πίεσης (20.7, 34.5, 68.9, 103.4, 137.9 kPa), κατανέμονται σε μεγαλύτερο εύρος σε σχέση με τα άλλα δύο υλικά, με αποτέλεσμα η καμπύλη τάσης που αντιστοιχεί σε αυτά να βρίσκεται χαμηλότερα από τις αντίστοιχες καμπύλες των άλλων δύο υλικών. Ακόμη παρατηρώντας το γράφημα συμπεραίνουμε ότι το υλικό Γ έχει την καλύτερη ελαστική απόκριση από τα τρία υλικά, δηλαδή εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές ελαστικού μέτρου κατά μήκος των αυξανόμενων τιμών της πλευρικής πίεσης που αναπαριστάται από τον άξονα χ του διαγράμματος. Αυτό βέβαια απεικονίζεται και με την καμπύλη τάσης η οποία βρίσκεται υψηλότερα από κάθε καμπύλη στο γράφημα. Αν θέλαμε να κατατάξουμε τα τρία υλικά της παρούσας μελέτης, με βάση το ελαστικό μέτρο τους, τότε το πιο δύσκαμπτο είναι το υλικό Γ (καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά), ακολουθεί το υλικό Β με περίπου όμοια χαρακτηριστικά και τέλος το χειρότερο, από αυτήν την σκοπιά, είναι το υλικό Α. Η προσθήκη στο μείγμα του υλικού Γ σε αναλογία 1/2, του ανακυκλωμένου ασφαλικού υλικού

### Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

προσδίδει αύξηση στο ελαστικό μέτρο του υλικού κατά περίπου 30% σε σχέση με το υλικό Α το οποίο αποτελείται καθαρά από αμμοχάλικο 3Α. Οι τιμές του ελαστικού μέτρου  $M_r$ , για όλα τα υλικά υπό τα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας εμφανίζουν αποδεκτή συσχέτιση με την πλευρική πίεση  $\sigma_3$ , καθώς ο συντελεστής προσδιορισμού παίρνει τιμές μεγαλύτερες ή ίσες με 0,75 ( $R^2 \geq 0,75$ ). Την καλύτερη συσχέτιση εμφανίζουν τα δεδομένα για το υλικό Β (RAP).

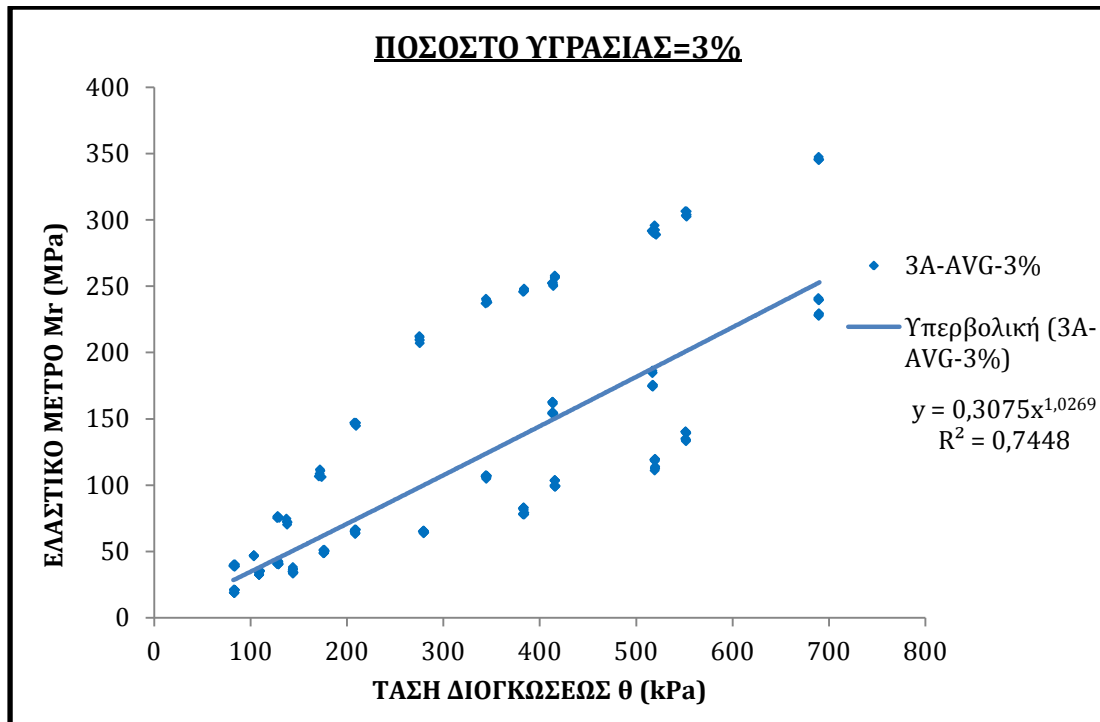


**ΣΧΗΜΑ 46:** Συγκριτικό γράφημα ελαστικού μέτρου  $M_r$ -πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  των τριών υλικών υπό τα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας τους.

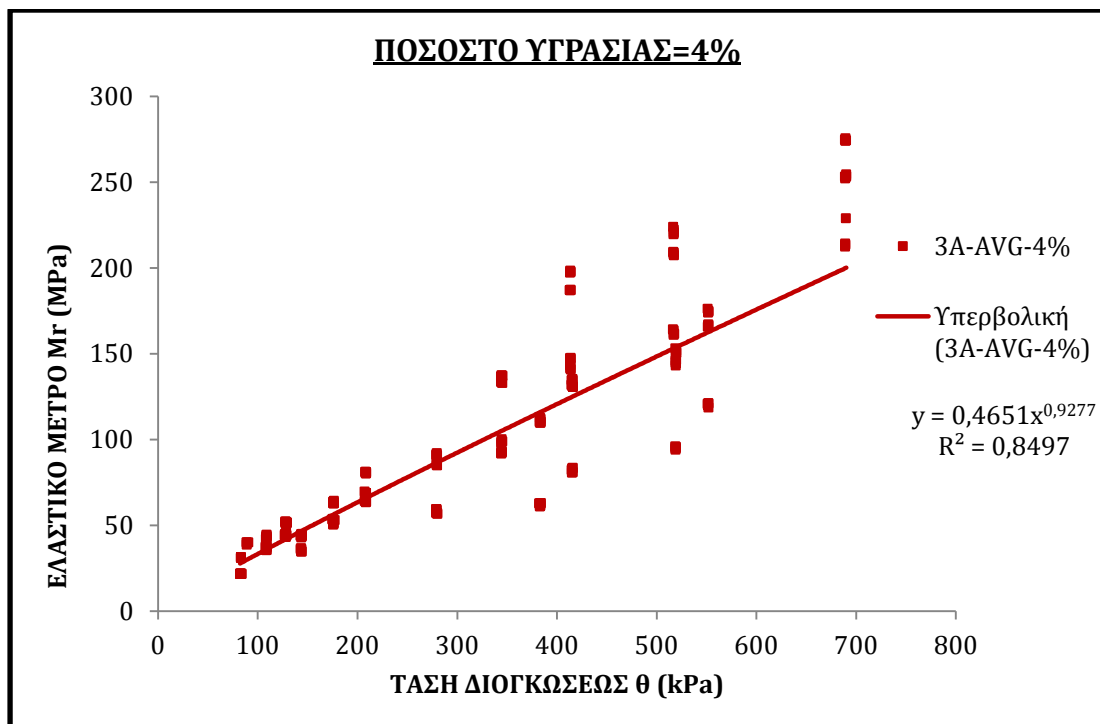
#### 5.4 Συσχέτιση ελαστικού μέτρου $M_r$ και τάσης διογκώσεως $\theta=3\sigma_3+\sigma_1$ (bulk stress).

Όπως προκύπτει και από τη βιβλιογραφία (Morgan 1966, Hicks και Monismith 1971, Brown and Hyde 1975, Sweere 1990, Kolisoja 1997), το ελαστικό μέτρο  $M_r$  των ασύνδετων, κοκκωδών υλικών όταν χρησιμοποιούνται ως στρώσεις βάσεων ή υποβάσεων είναι άμεσα εξαρτημένο από την εντατική κατάσταση (καθεστώς τάσεων) κάτι το οποίο αποτελεί συνάρτηση της θέσης των υλικών εντός της δομής του οδοστρώματος και της συχνότητας των φορτίσεων λόγω της κυκλοφορίας. Το ελαστικό μέτρο, γενικώς για κοκκώδη υλικά, αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ολική τάση διογκώσεως  $\theta$  και η πλευρική πίεση  $\sigma_3$ . Βέβαια, υπάρχουν και άλλοι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν το ελαστικό μέτρο των κοκκωδών υλικών όπως το περιεχόμενο ποσοστό σε λεπτόκοκκο υλικό, η σχετική πυκνότητα και το είδος του υλικού. Παρακάτω, παρουσιάζονται τα διαγράμματα ελαστικού μέτρου  $M_r$ -τάσης διογκώσεως  $\theta$  (άθροισμα της παρεκκλίνουσας τάσης και της πλευρικής πίεσης) για τα τρία υλικά της μελέτης για διάφορες τιμές του περιεχόμενου ποσοστού υγρασίας των δοκιμίων. Και τα τρία υλικά που ελέγχθηκαν συμβαδίζουν με την γενική παρατήρηση ότι το ελαστικό μέτρο αυξάνεται όταν εφαρμόζεται στο δοκίμιο μεγαλύτερη τιμή της τάσης διογκώσεως. Οι καμπύλες τάσεων και των τριών υλικών έχουν ανοδική πορεία και μάλιστα με μεγαλύτερη κλίση συγκριτικά με τα διαγράμματα  $M_r - \sigma_3$ , αλλά παρατηρώντας τις καμπύλες βλέπουμε ότι οι τιμές των δεδομένων ( $M_r$ - $\theta$ ) κατανέμονται ατάκτως κατά μήκος του άξονα της τάσης διογκώσεως. Οι Sweere (1990) και Kolisoja (1997) σε μελέτες που πραγματοποίησαν, παρατηρούν ότι το ελαστικό μέτρο  $M_r$  αυξάνεται απότομα καθώς αυξάνεται η τάση διογκώσεως  $\theta$ . Στα παρακάτω σχήματα 47 έως 62 παρουσιάζονται τα διαγράμματα ελαστικού μέτρου  $M_r$  και τάσεως διογκώσεως  $\theta$  των τριών υλικών για διάφορα ποσοστά υγρασίας όπως προέκυψαν από τα εργαστηριακά δεδομένα.

ΥΛΙΚΟ Α- ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟ 3Α

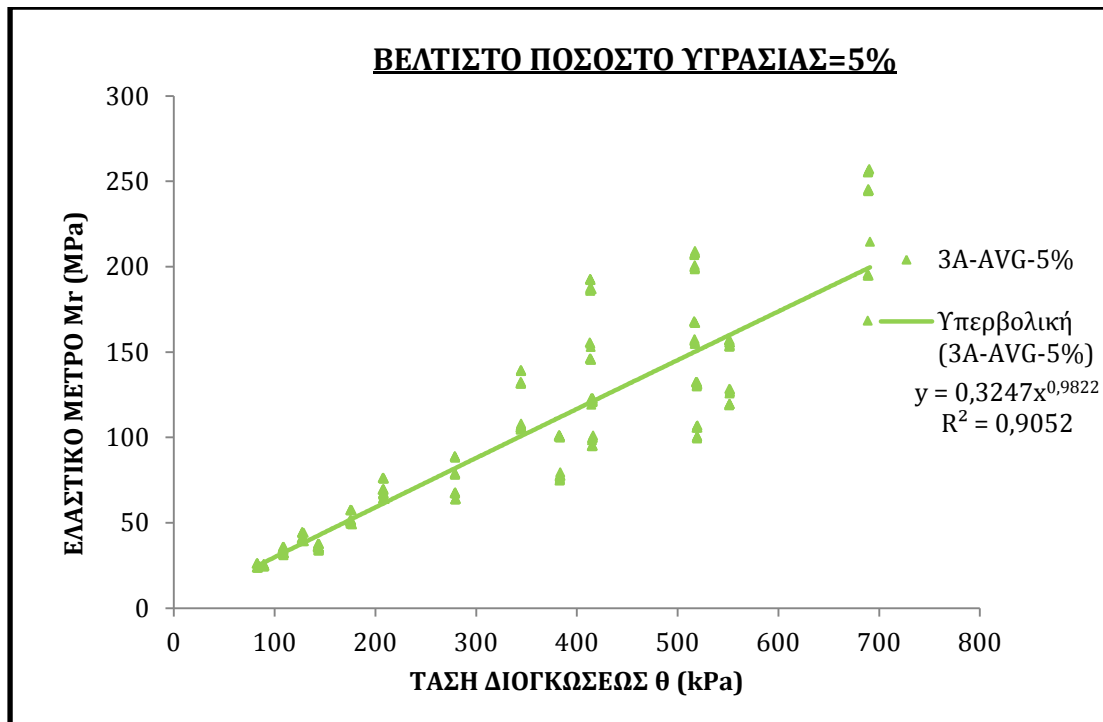


**ΣΧΗΜΑ 47:** Ελαστικό μέτρο Mr συναρτήσσει της τάσης διογκώσεως θ του υλικού Α, για ποσοστό υγρασίας 3%.

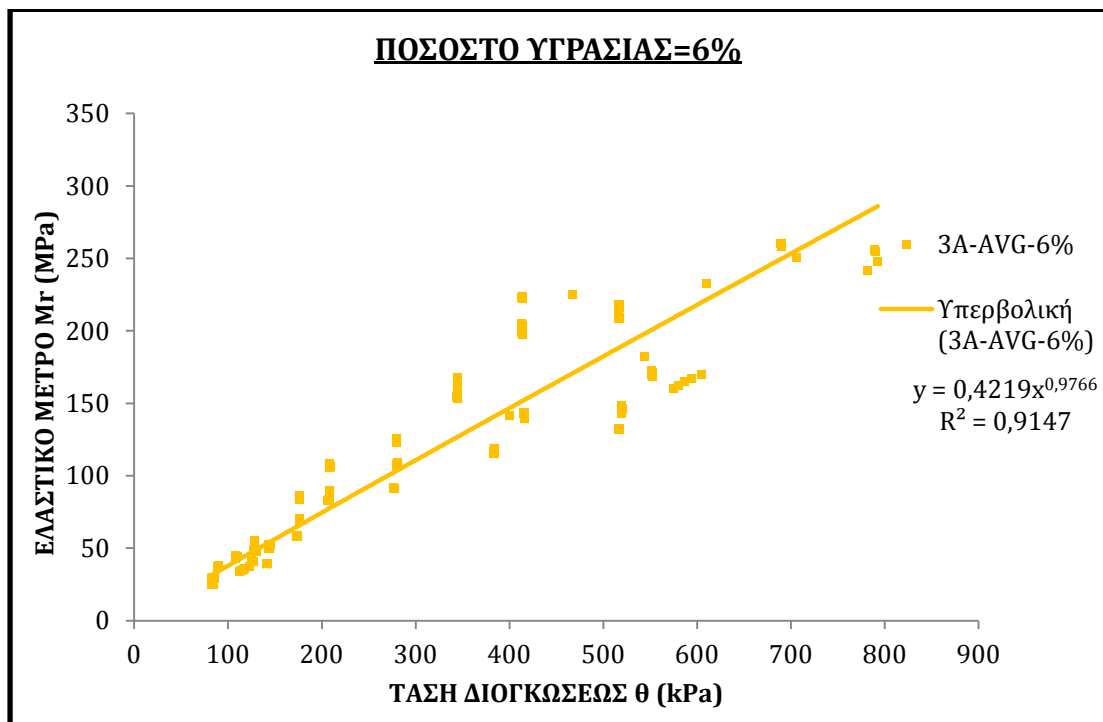


**ΣΧΗΜΑ 48:** Ελαστικό μέτρο Mr συναρτήσσει της τάσης διογκώσεως θ του υλικού Α, για ποσοστό υγρασίας 4%.

Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.



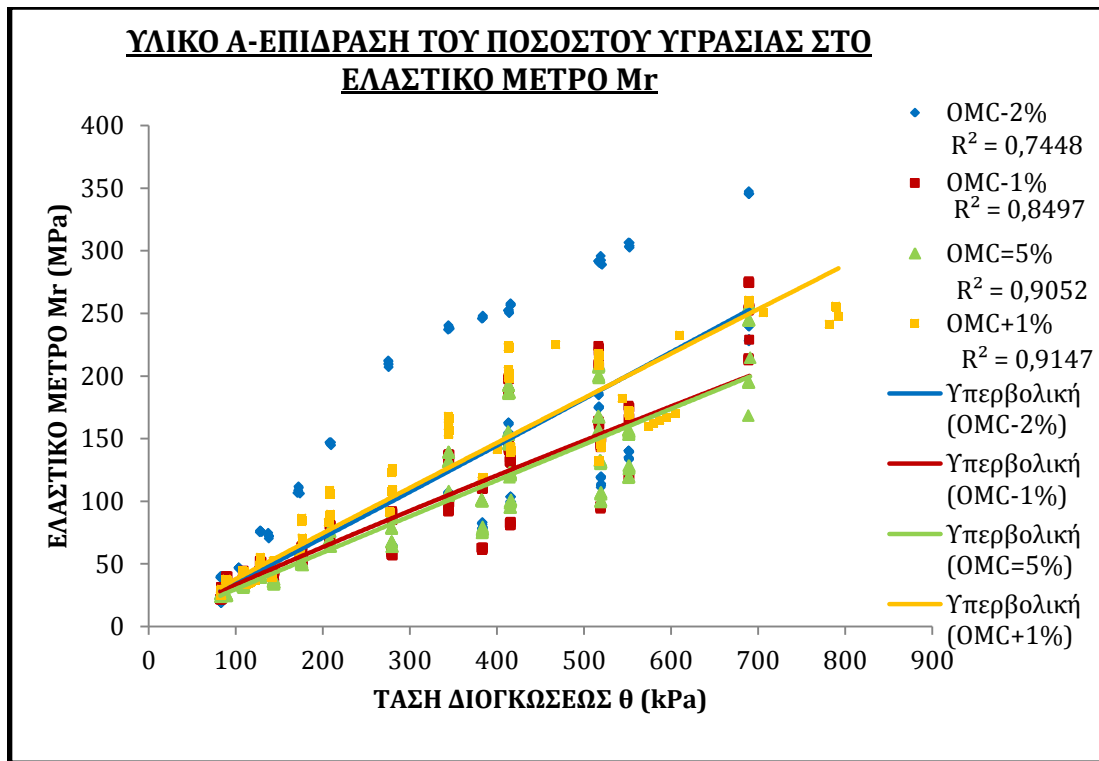
**ΣΧΗΜΑ 49:** Ελαστικό μέτρο Mr συναρτήσσει της τάσης διογκώσεως θ του υλικού Α, για το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας 5%.



**ΣΧΗΜΑ 50:** Ελαστικό μέτρο Mr συναρτήσσει της τάσης διογκώσεως θ του υλικού Α, για ποσοστό υγρασίας 6%.

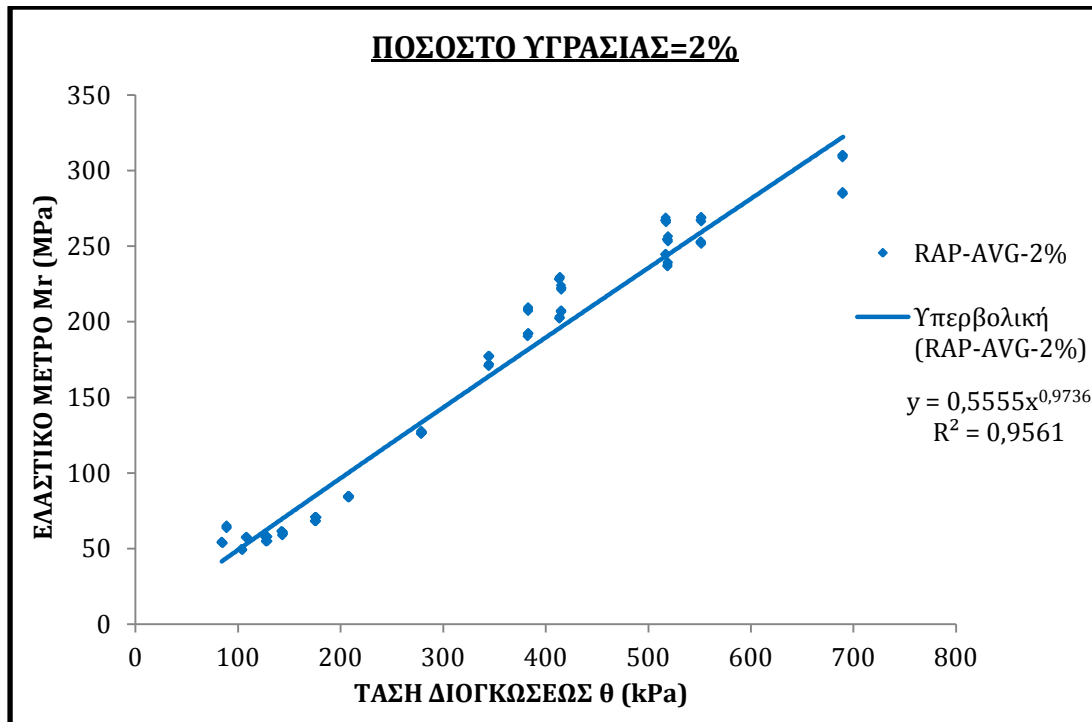


Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

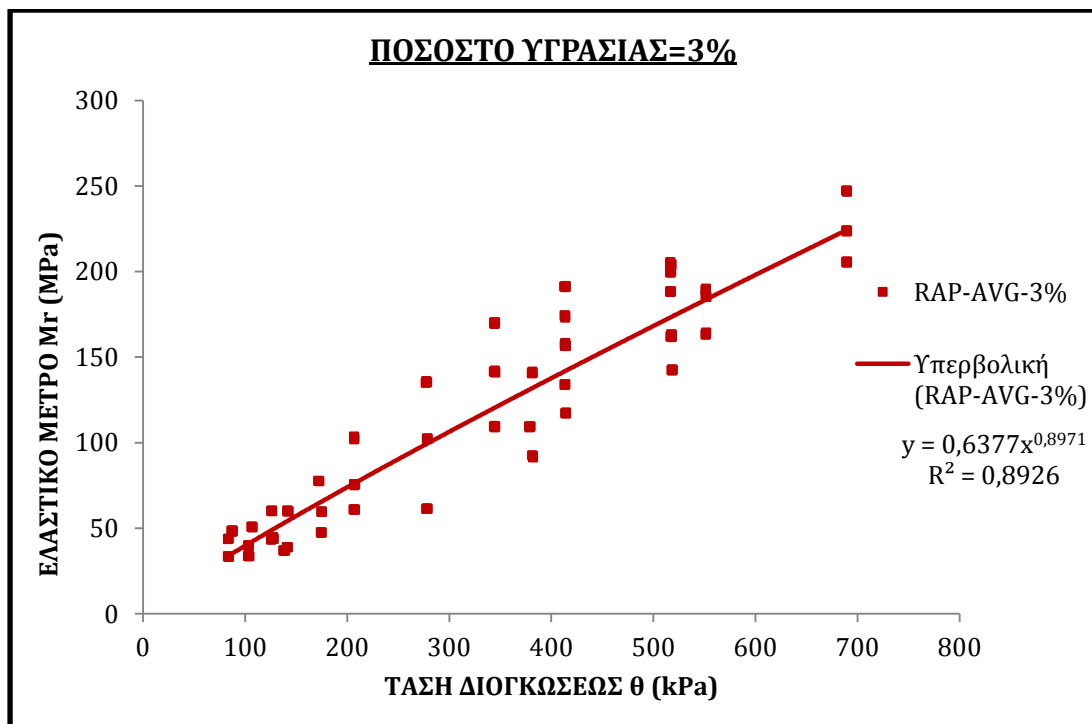


**ΣΧΗΜΑ 51:** Συγκριτικό γράφημα που παρουσιάζει το ελαστικό μέτρο  $M_r$  συναρτήσει της τάσης διογκώσεως  $\theta$  του υλικού Α, για διάφορες τιμές του ποσοστού υγρασίας.

ΥΛΙΚΟ Β- RAP(100%)

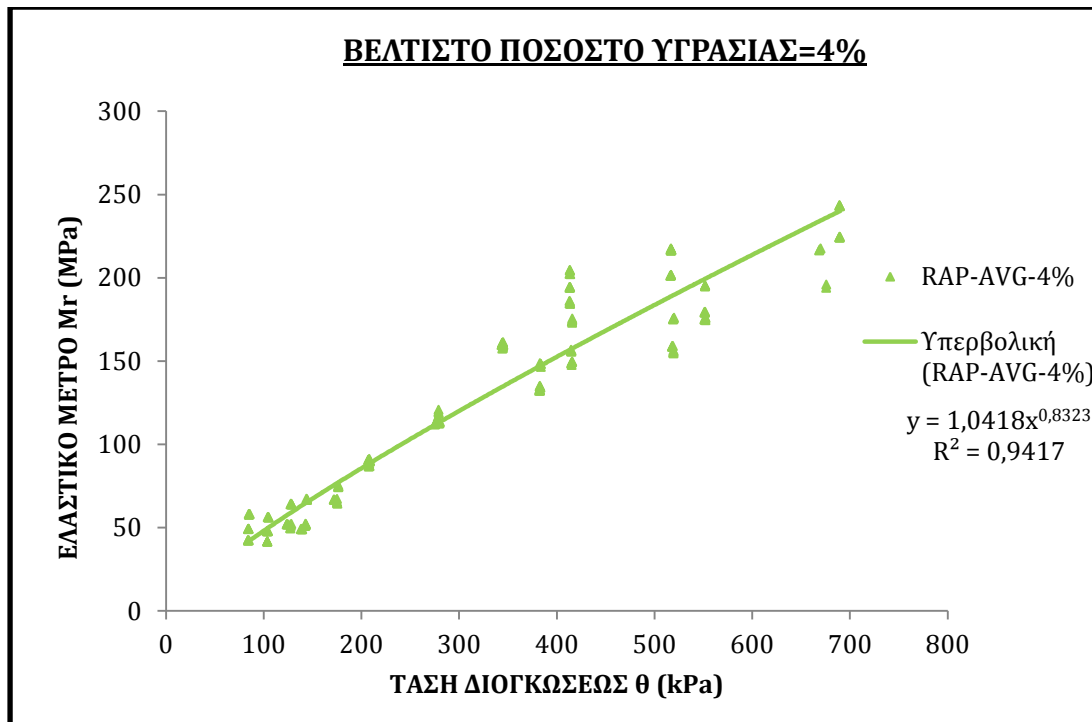


**ΣΧΗΜΑ 52:** Ελαστικό μέτρο  $M_r$  συναρτήσκει της τάσης διογκώσεως  $\theta$  του υλικού Β, για ποσοστό υγρασίας 2%.

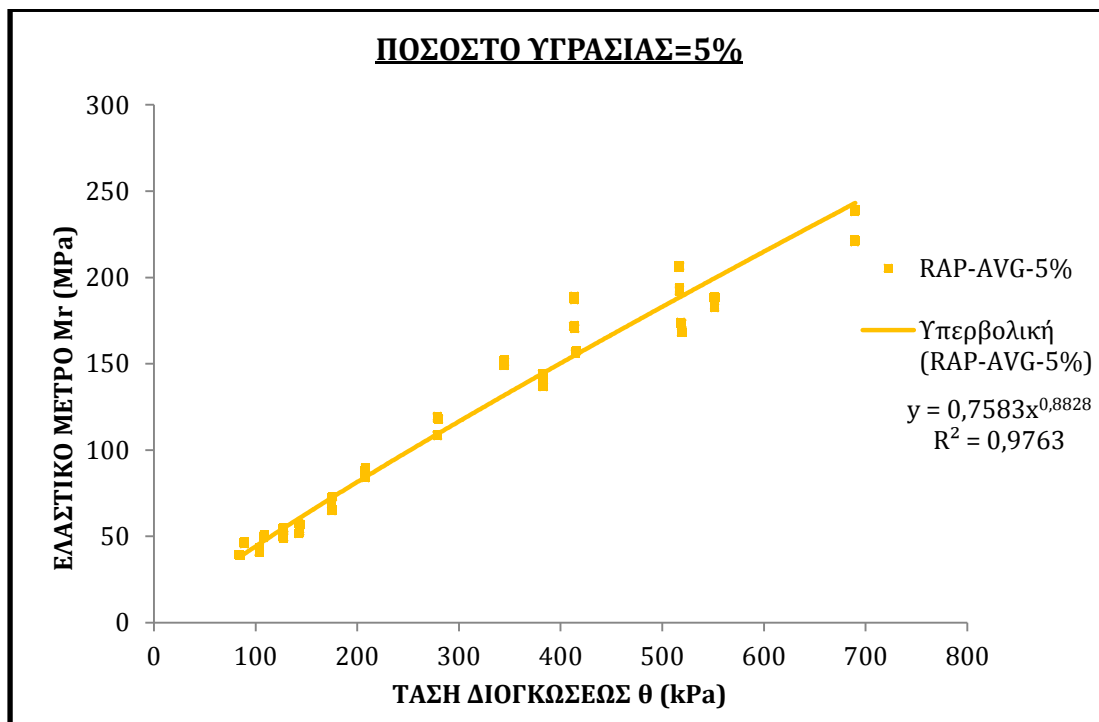


**ΣΧΗΜΑ 53:** Ελαστικό μέτρο  $M_r$  συναρτήσκει της τάσης διογκώσεως  $\theta$  του υλικού Β, για ποσοστό υγρασίας 3%.

Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

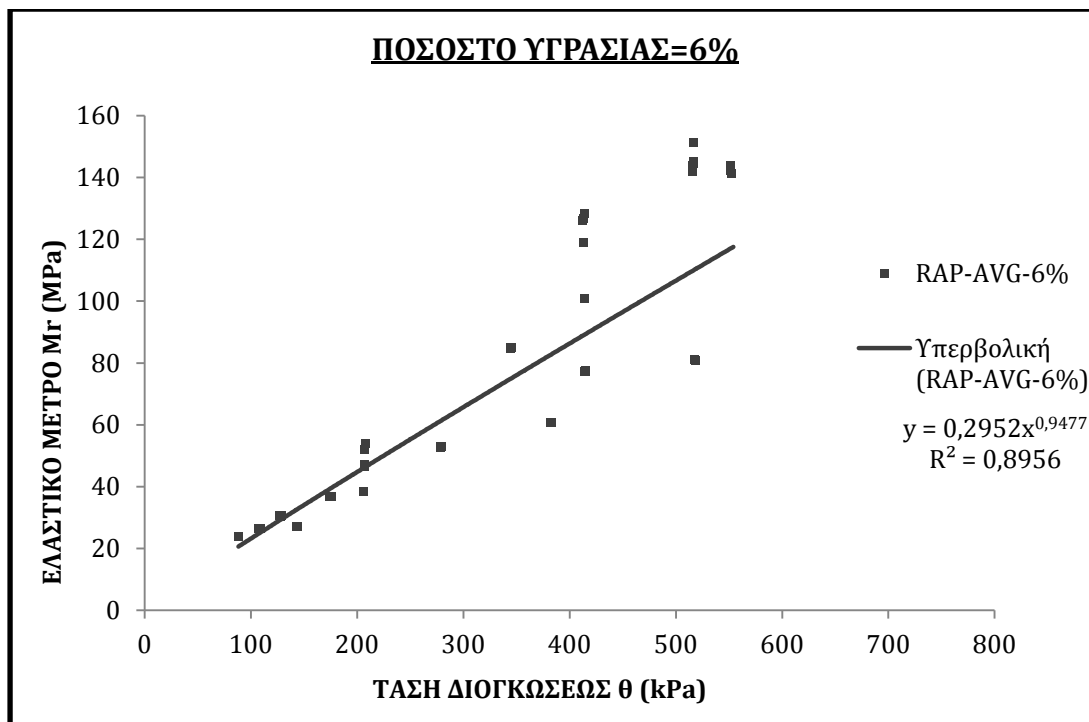


**ΣΧΗΜΑ 54:** Ελαστικό μέτρο Mr συναρτήσει της τάσης διογκώσεως  $\theta$  του υλικού B, για ποσοστό υγρασίας 4%.

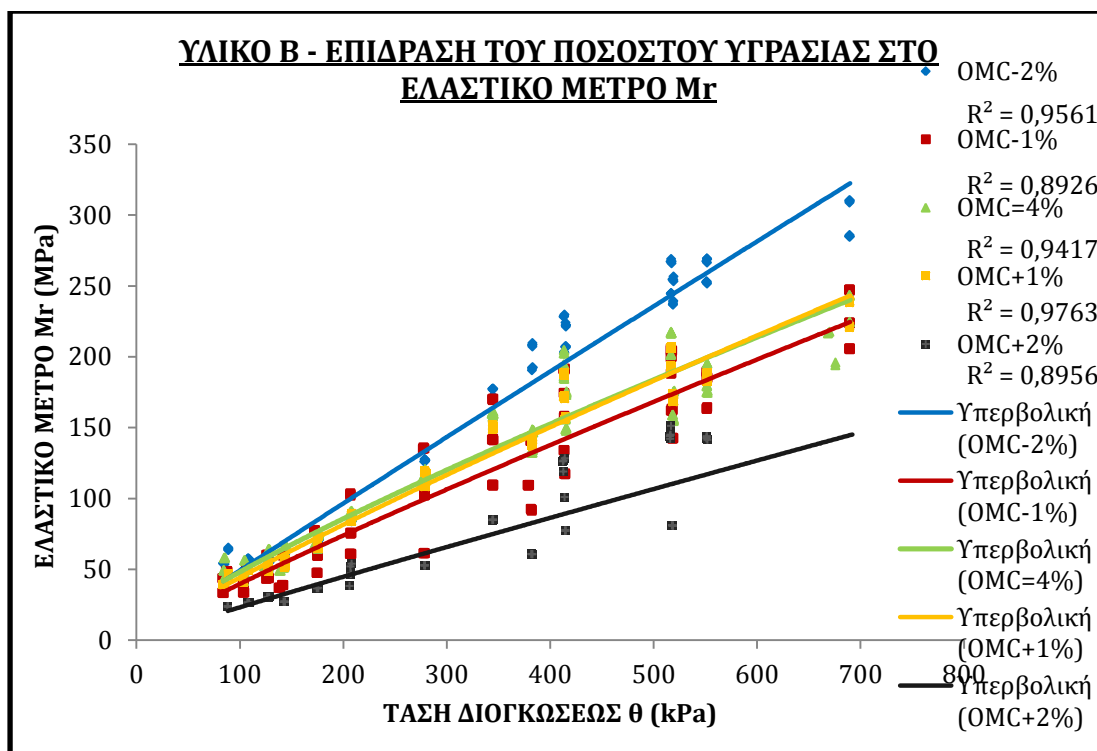


**ΣΧΗΜΑ 55:** Ελαστικό μέτρο Mr συναρτήσει της τάσης διογκώσεως  $\theta$  του υλικού B, για ποσοστό υγρασίας 5%.

Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

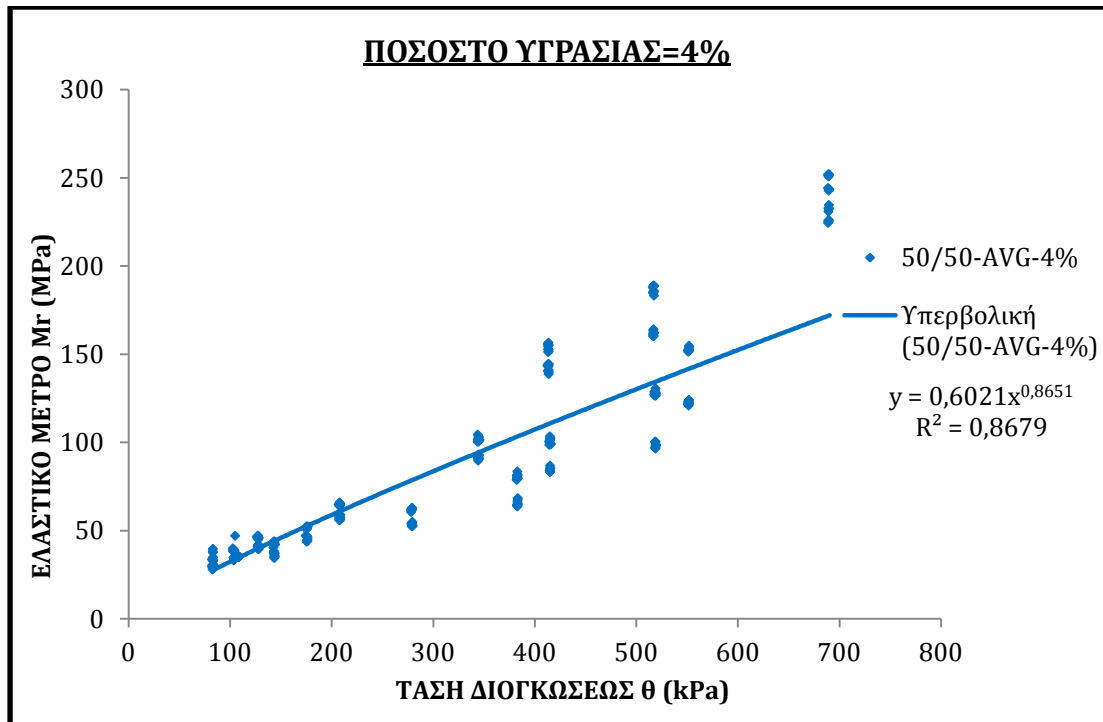


**ΣΧΗΜΑ 56:** Ελαστικό μέτρο Mr συναρτήσσει της τάσης διογκώσεως θ του υλικού B, για ποσοστό υγρασίας 6%.

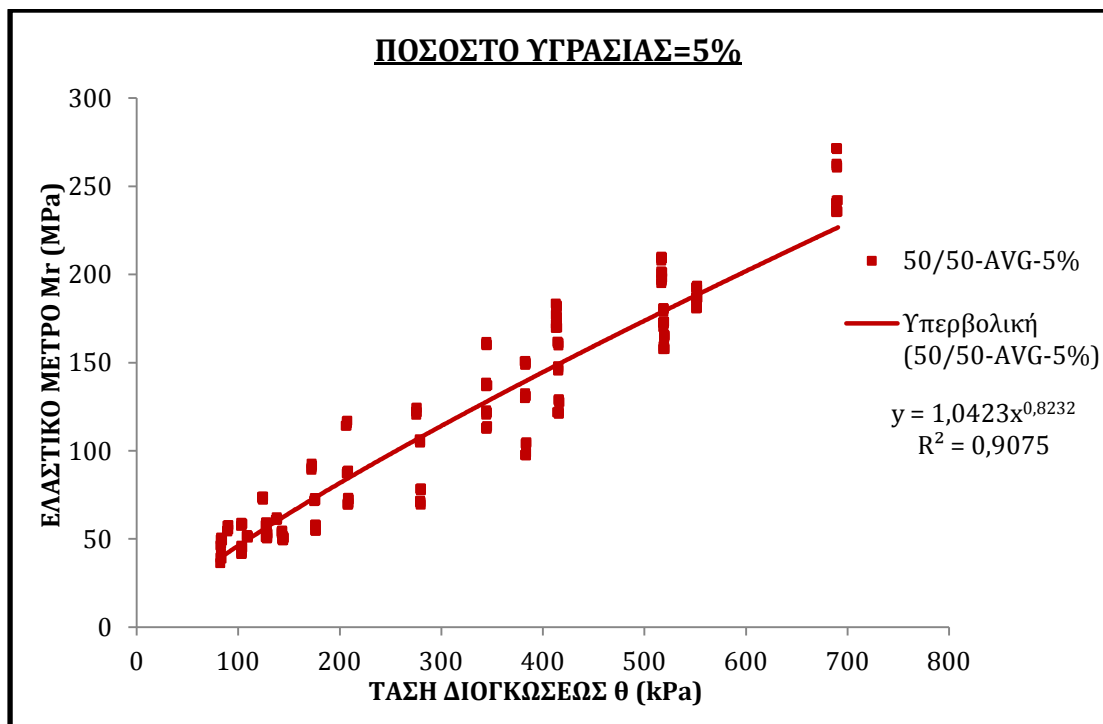


**ΣΧΗΜΑ 57:** Συγκριτικό γράφημα που παρουσιάζει το ελαστικό μέτρο Mr συναρτήσσει της τάσης διογκώσεως θ του υλικού B, για διάφορες τιμές του ποσοστού υγρασίας.

ΥΛΙΚΟ Γ- 50/50 (3A + RAP)

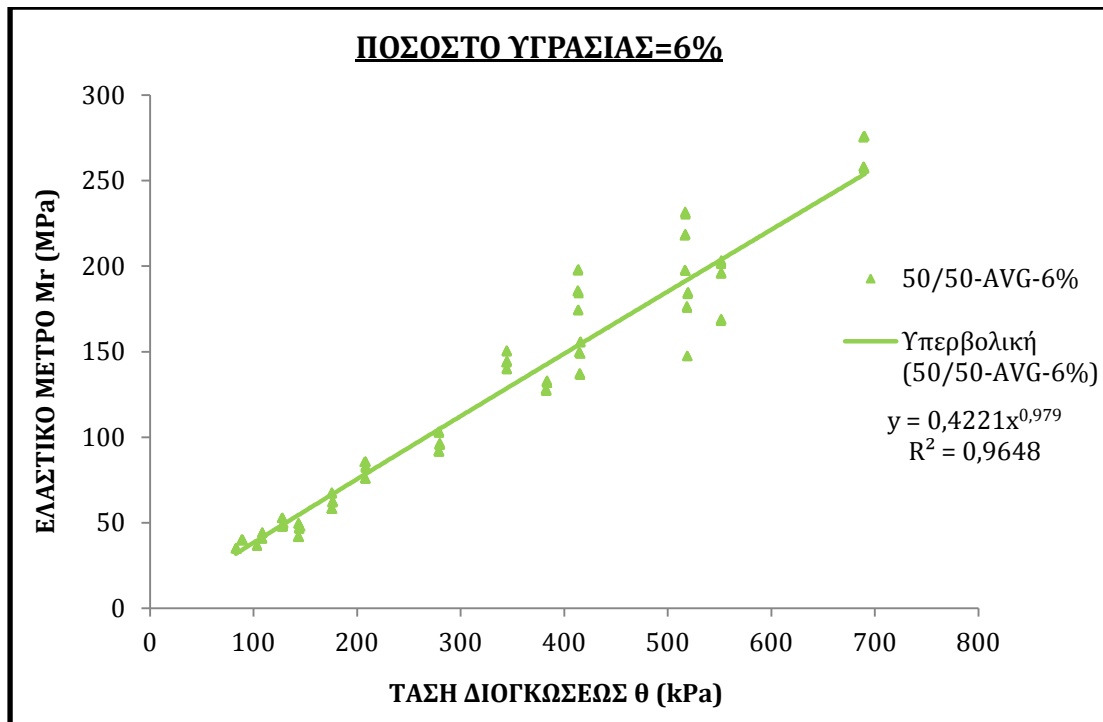


**ΣΧΗΜΑ 58:** Ελαστικό μέτρο Mr συναρτήσσει της τάσης διογκώσεως  $\theta$  του υλικού Γ, για ποσοστό υγρασίας 4%.

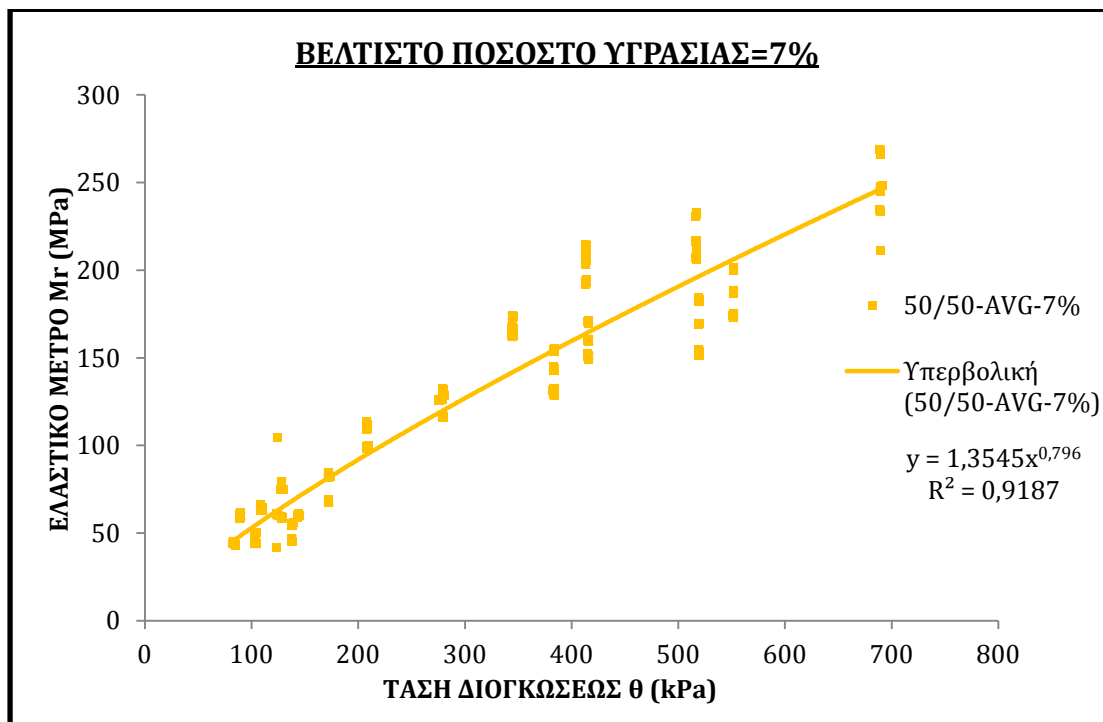


**ΣΧΗΜΑ 59:** Ελαστικό μέτρο Mr συναρτήσσει της τάσης διογκώσεως  $\theta$  του υλικού Γ, για ποσοστό υγρασίας 5%.

Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

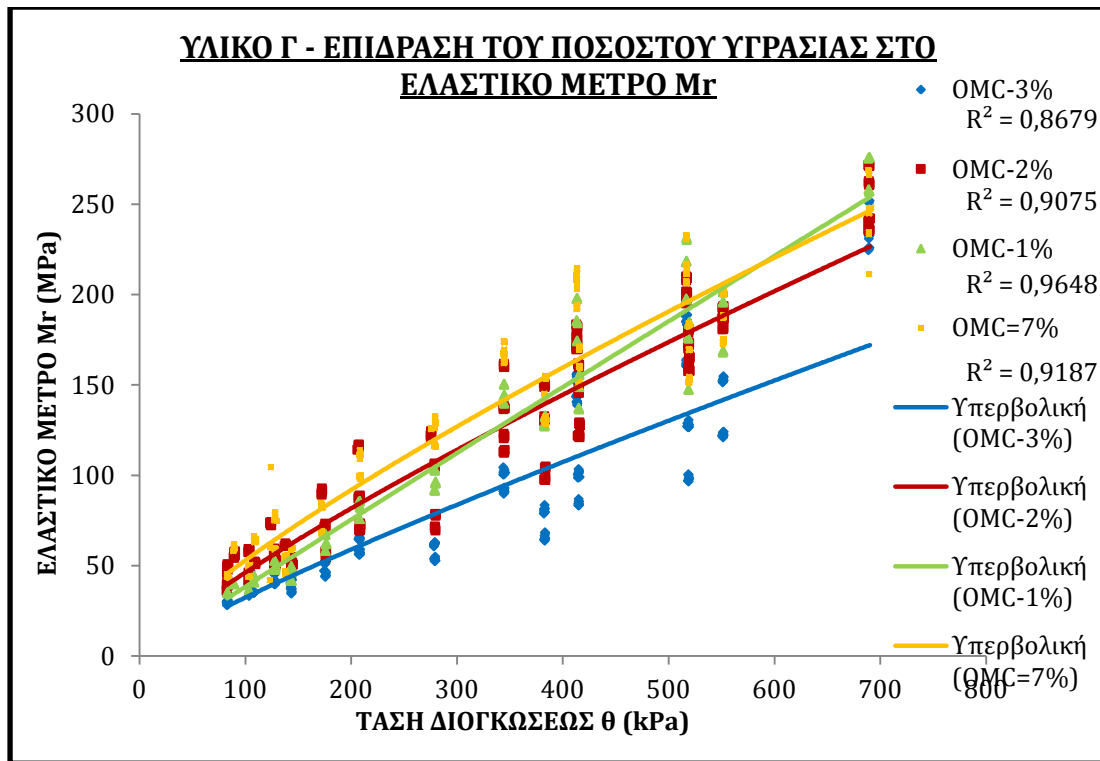


**ΣΧΗΜΑ 60:** Ελαστικό μέτρο Mr συναρτήσκει της τάσης διογκώσεως θ του υλικού Γ, για ποσοστό υγρασίας 6%.



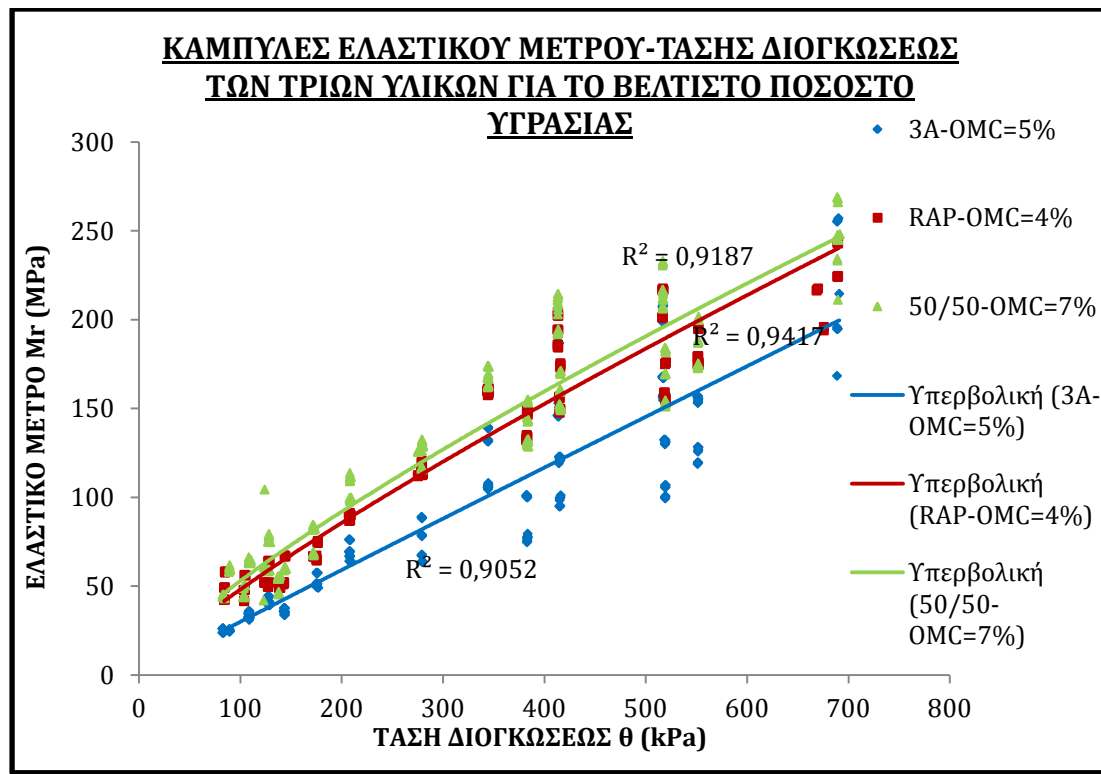
**ΣΧΗΜΑ 61:** Ελαστικό μέτρο Mr συναρτήσκει της τάσης διογκώσεως θ του υλικού Γ, για το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας 7%.

Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.



**ΣΧΗΜΑ 62:** Συγκριτικό γράφημα που παρουσιάζει το ελαστικό μέτρο  $M_r$  συναρτήσει της τάσης διογκώσεως  $\theta$  του υλικού Γ, για διάφορες τιμές του ποσοστού υγρασίας.

## 5.5 Σύγκριση της σχέσης ελαστικού μέτρου $M_r$ και τάσης διογκώσεως $\theta$ των τριών υλικών υπό τα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας τους.



**ΣΧΗΜΑ 63:** Συγκριτικό γράφημα ελαστικού μέτρου  $M_r$ -τάσης διογκώσεως  $\theta$  των τριών υλικών υπό τα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας τους.

Στο παραπάνω σχήμα 63 γίνεται μία προσπάθεια σύγκρισης των χαρακτηριστικών και των μέτρων ελαστικότητας των τριών υλικών της παρούσας μελέτης. Παρουσιάζονται τα δεδομένα ελαστικών μέτρων  $M_r$ -τάσεων διόγκωσης  $\theta$  όπως προέκυψαν από εργαστηριακές τριαξονικές δοκιμές που εκτελέστηκαν σε δοκίμια των τριών υλικών. Ως μέτρο σύγκρισης χρησιμοποιείται η ελαστική απόκριση των τριών υλικών όταν αυτά παρασκευαστούν και συμπυκνωθούν σε δοκίμια που περιέχουν το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας τους. Επειδή για κάθε υλικό πραγματοποιήθηκαν περισσότερες από μία τριαξονικές δοκιμές με το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας τους, χρησιμοποιήθηκαν όλες οι τιμές των ελαστικών μέτρων των τελευταίων πέντε κύκλων (95-100) για κάθε στάδιο φόρτισης (1-15) και για σταθερώς αυξανόμενες τιμές της τάσεως διόγκωσης. Τα δεδομένα που προέκυψαν για



## **Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

κάθε υλικό φαίνονται στο σχήμα 63 και προσομοιώνονται από τις αντίστοιχες καμπύλες τάσεων. Η μορφή των καμπυλών μοιάζει αρκετά με τις καμπύλες του διαγράμματος 46 αφού η τάση διόγκωσης αποτελεί παράγωγο μέγεθος της πλευρικής πίεσης ( $3\sigma_3 + \sigma_d$ ). Προφανώς οι παρατηρήσεις του σχήματος 46 ισχύουν και εδώ. Αυτό που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι οι τασικές καμπύλες δύναμης του παραπάνω διαγράμματος και φυσικά τα δεδομένα όπου αυτές αντιπροσωπεύουν, εμφανίζουν πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ ελαστικού μέτρου και τάσης διογκώσεως με τιμές μεγαλύτερες ή ίσες με 0,90 ( $R^2 \geq 0,90$ ), κάτι για το οποίο ευθύνεται η διάταξη των σημείων των δεδομένων στο διάγραμμα. Αντίθετα με το σχήμα 46 όπου όλες οι τιμές των ελαστικών μέτρων αντιστοιχούσαν σε περίπου 5 σταθερές τιμές της πλευρικής πίεσης (20.7, 34.5, 68.9, 103.4, 137.9 kPa) εδώ τα δεδομένα (ζεύγη τιμών) λαμβάνουν περισσότερες τιμές τάσης διογκώσεως λόγω των 15 σταδίων φόρτισης της μεθόδου, όσον αφορά τον άξονα  $\chi$  του διαγράμματος, με αποτέλεσμα την διάσπαρτη κατανομή τους. Και πάλι το υλικό B (RAP) παρουσιάζει την καλύτερη συσχέτιση μεταξύ  $M_r$  και  $\theta$ , ενώ το υλικό με τις μεγαλύτερες τιμές ελαστικού μέτρου σε όλα τα στάδια φόρτισης είναι το υλικό Γ (50/50-3A/RAP).

### **5.6 Μεταβολή του ελαστικού μέτρου $M_r$ συναρτήσει της εντατικής κατάστασης για τα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας των τριών υλικών.**

Τα παρακάτω σχήματα 64 έως 66 απεικονίζουν το ελαστικό μέτρο  $M_r$  συναρτήσει της παρεκκλίνουσας κατακόρυφης τάσης, για διαφορετικές σταθερές τιμές της πλευρικής πίεσης περιορισμού  $\sigma_3$ , όταν τα δοκίμια των τριών υλικών της μελέτης έχουν συμπυκνωθεί υπό τα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας τους. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η εντατική κατάσταση είναι ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν την ελαστική συμπεριφορά και τις ιδιότητες ενός κοκκώδους υλικού. Γενικώς, και για τα τρία υλικά ισχύει ότι καθώς αυξάνεται η παρεκκλίνουσα τάση, αυξάνεται και το ελαστικό μέτρο (stress-hardening behavior). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει κυρίως το υλικό B (RAP-100%) όπου για χαμηλές τιμές της πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  της τάξεως των

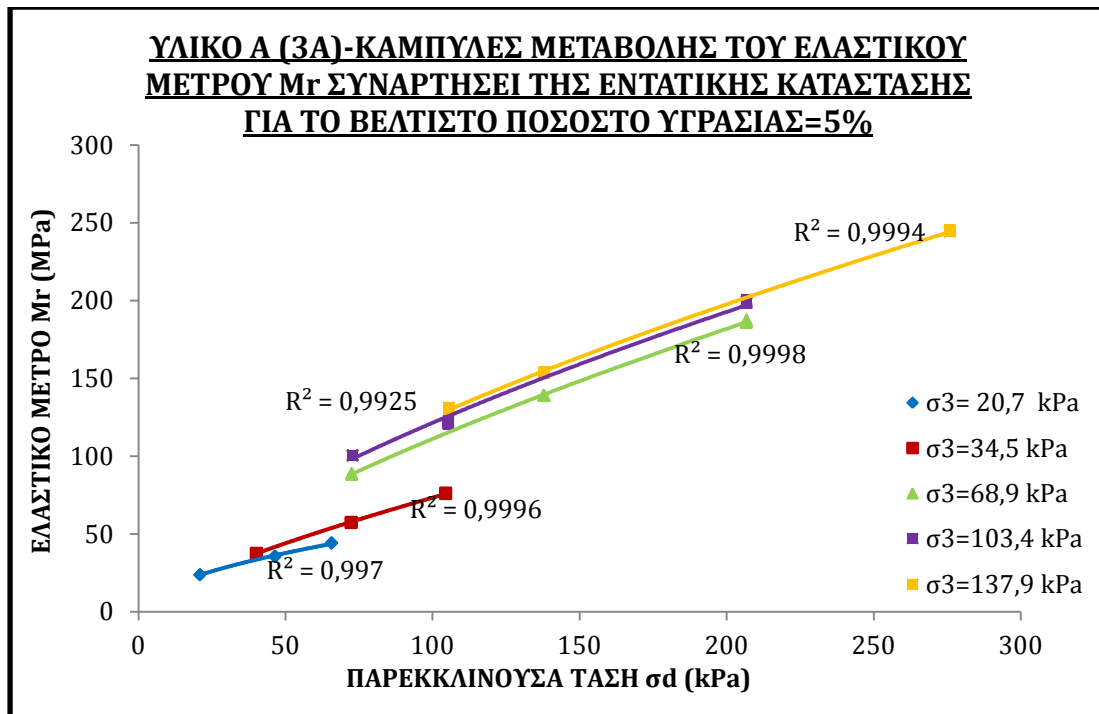
## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

20 kPa, καθώς αυξάνεται η παρεκκλίνουσα τάση, το ελαστικό μέτρο φαίνεται να έχει την τάση να μειωθεί ή καλύτερα παραμένει περίπου σταθερό στα 50 MPa. Παρόμοια συμπεριφορά αλλά σε μικρότερο βαθμό φαίνεται να παρουσιάζει και το υλικό Γ που περιέχει ανακυκλωμένο ασφαλτικό υλικό σε αναλογία 50% με την διαφορά ότι το αμμοχάλικο του μείγματος προσδίδει λίγο μεγαλύτερες τιμές στο ελαστικό μέτρο. Αυτό ίσως οφείλεται στο ότι το λεπτόκοκκο υλικό του αμμοχάλικου γεμίζει τα κενά μεταξύ των επικαλυμμένων με άσφαλτο κόκκων, προσδίδοντας στο μείγμα περισσότερες πιέσεις επαφής μεταξύ των κόκκων όταν αυτό υποβάλλεται σε κατακόρυφη φόρτιση, άρα μεγαλύτερη δυσκαμψία και τελικώς λίγο μεγαλύτερες τιμές του ελαστικού μέτρου σε σχέση με το υλικό Β που αποτελείται μόνο από ανακυκλωμένο ασφαλτικό υλικό. Μία άλλη σημαντική παρατήρηση η οποία φαίνεται να ισχύει και στα τρία υλικά είναι ότι για χαμηλές τιμές παρεκκλίνουσας τάσης και κατά την μετάβαση της πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  από περίπου 34,5 kPa σε περίπου 69 kPa το ελαστικό μέτρο των υλικών αυξάνεται απότομα δημιουργώντας την εικόνα 'σκαλοπατιού' μεταξύ των σταδίων φόρτισης. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην συμπύκνωση των μειγμάτων, δηλαδή οι κόκκοι των υλικών πλησιάζουν μεταξύ τους, επέρχεται θραύση των ατελειών των κόκκων και τελικά επιτυγχάνεται ένα είδος αλληλοκλειδώματος μεταξύ των κόκκων εκτινάσσοντας έτσι την δυσκαμψία των υλικών σε μεγαλύτερες τιμές. Αντίθετα για μεγαλύτερες τιμές της παρεκκλίνουσας τάσης, καθώς αυξάνεται η πλευρική πίεση, το ελαστικό μέτρο και των τριών υλικών αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό σε σχέση με την μεταβολή που πραγματοποιείται στις μικρές τιμές παρεκκλίνουσας τάσης. Τέλος, στο συγκριτικό γράφημα 72 φαίνεται ότι για ίδιες τιμές παρεκκλίνουσας και πλευρικής τάσης το ελαστικό μέτρο του υλικού Γ (μείγμα 50/50) λαμβάνει τις μεγαλύτερες τιμές, ακολουθούμενο από το υλικό Β (RAP-100%), ενώ το φτωχότερο όσον αφορά την δυσκαμψία είναι το υλικό Α (αμμοχάλικο 3Α). Για λεπτομερέστερη σύγκριση μεταξύ των τριών υλικών παρατίθενται παρακάτω τα διαγράμματα 67 έως 71 όπου παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ ελαστικού μέτρου και παρεκκλίνουσας τάσης για περίπου σταθερές τιμές της πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  (20.7, 34.5, 68.9, 103.4 και 137.9 kPa). Στο σχήμα 67, για πλευρική πίεση ίση με 20,7 kPa και καθώς αυξάνεται η παρεκκλίνουσα κατακόρυφη τάση τα υλικά Α (3Α) και Γ (50/50) τα οποία περιέχουν αμμοχάλικο τείνουν να

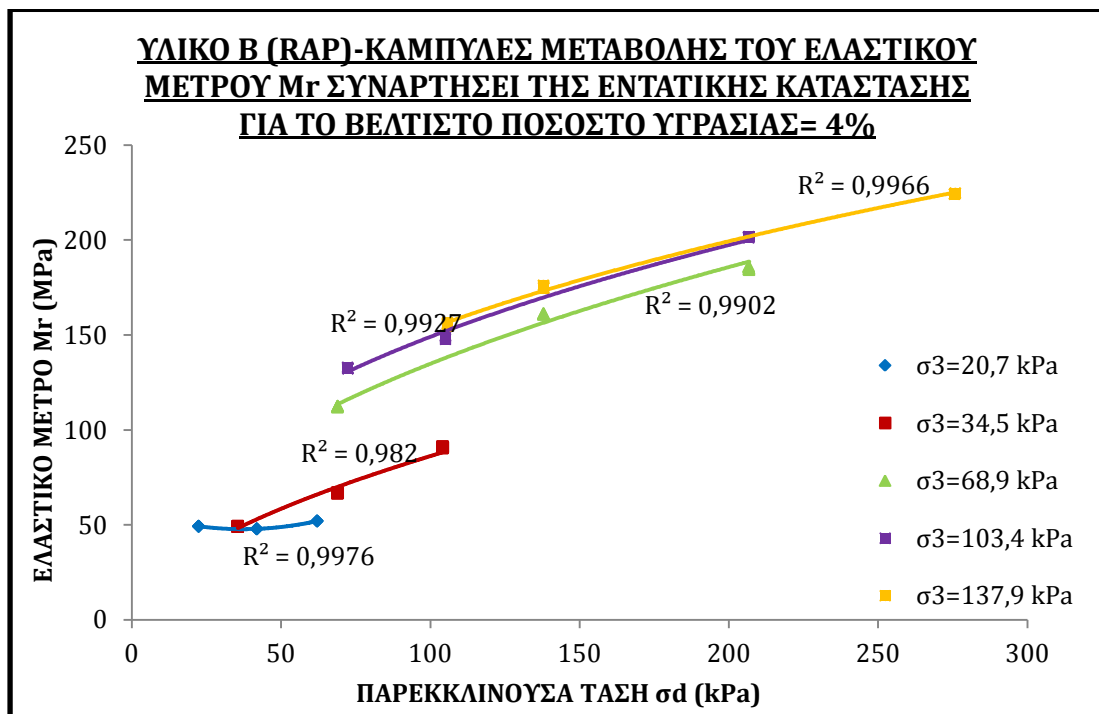
## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

αυξήσουν το μέτρο ελαστικότητας τους, σε αντίθεση με το υλικό Β (RAP-100%) το οποίο διατηρεί περίπου σταθερό ελαστικό μέτρο. Μόλις όμως αυξηθούν η πλευρική πίεση σε 34,5 kPa και η κατακόρυφη παρεκκλίνουσα τάση τότε και το υλικό Β εμφανίζει αυξανόμενο ελαστικό μέτρο (σχήμα 68). Σε αυτό το στάδιο πλευρικής πίεσης ( $\sigma_3=34,5$  kPa) τα τρία υλικά έχουν σχεδόν παράλληλες καμπύλες τάσεων, δηλαδή εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά στην αύξηση του ελαστικού μέτρου, με διαφορά βέβαια ως προς την δυσκαμψία τους, όπου το υλικό Γ υπερισχύει. Στα σχήματα 69 και 70 για πλευρική πίεση  $\sigma_3$  ίση με 68,9 και 103,4 kPa αντίστοιχα, τα δεδομένα και οι καμπύλες τάσεων που αντιστοιχούν στο ελαστικό μέτρο των τριών υλικών έχουν σχεδόν πανομοιότυπη μορφή και τιμές για περίπου ίδιες τιμές παρεκκλινουσών τάσεων. Δηλαδή το ελαστικό μέτρο και των τριών υλικών δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την πλευρική πίεση αυτών των δύο επιπέδων όταν τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά φόρτισης ομοιάζουν. Αυτό όμως που έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι ότι σε αυτά τα δύο επίπεδα πλευρικής πίεσης, τα υλικά Β και Γ, τα οποία περιέχουν ανακυκλωμένο ασφατικό υλικό έχουν καμπύλες τάσεων αύξησης του ελαστικού μέτρου με παρεμφερή κλίση, σε αντίθεση με το υλικό Α το οποίο έχει καμπύλη τάσης με μεγαλύτερη κλίση, δηλαδή το ελαστικό μέτρο του υλικού Α αυξάνεται γρηγορότερα. Στο σχήμα 71, για μέγιστη τιμή πλευρικής πίεσης ίση με 137,9 kPa, φαίνεται ακόμη καλύτερα αυτή η συμπεριφορά του αμμοχάλικου 3Α, δηλαδή να αυξάνεται ταχύτερα το ελαστικό του μέτρο όταν υποβάλλεται σε μεγαλύτερες πλευρικές πιέσεις. Σε αυτό το επίπεδο πλευρικής πίεσης, και καθώς αυξάνεται και η κατακόρυφη παρεκκλίνουσα τάση, βλέπουμε ότι το ελαστικό μέτρο του υλικού Α ξεπερνάει το ελαστικό μέτρο του υλικού Β και μεγιστοποιείται εκεί όπου εμφανίζει μέγιστη τιμή ελαστικού μέτρου το υλικό Γ. Στην ουσία η κλίση των καμπυλών, για σταθερές τιμές της πλευρικής πίεσης μας δείχνει την επιπρόσθετη επιρροή που επιφέρει το κατακόρυφο φορτίο σε κάθε υλικό.

Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

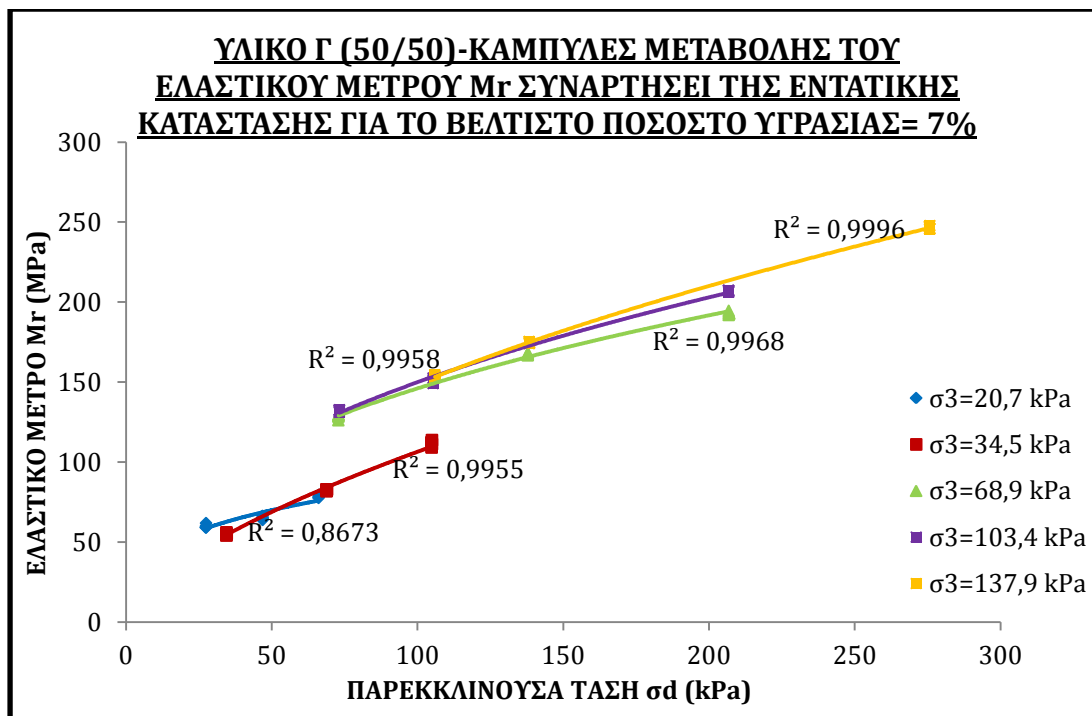


**ΣΧΗΜΑ 64:** Καμπύλες ελαστικού μέτρου  $M_r$  και παρεκκλίνουσας τάσης  $\sigma_d$ , υπό σταθερές τιμές πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  του υλικού Α για το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας του με τιμή 5%.

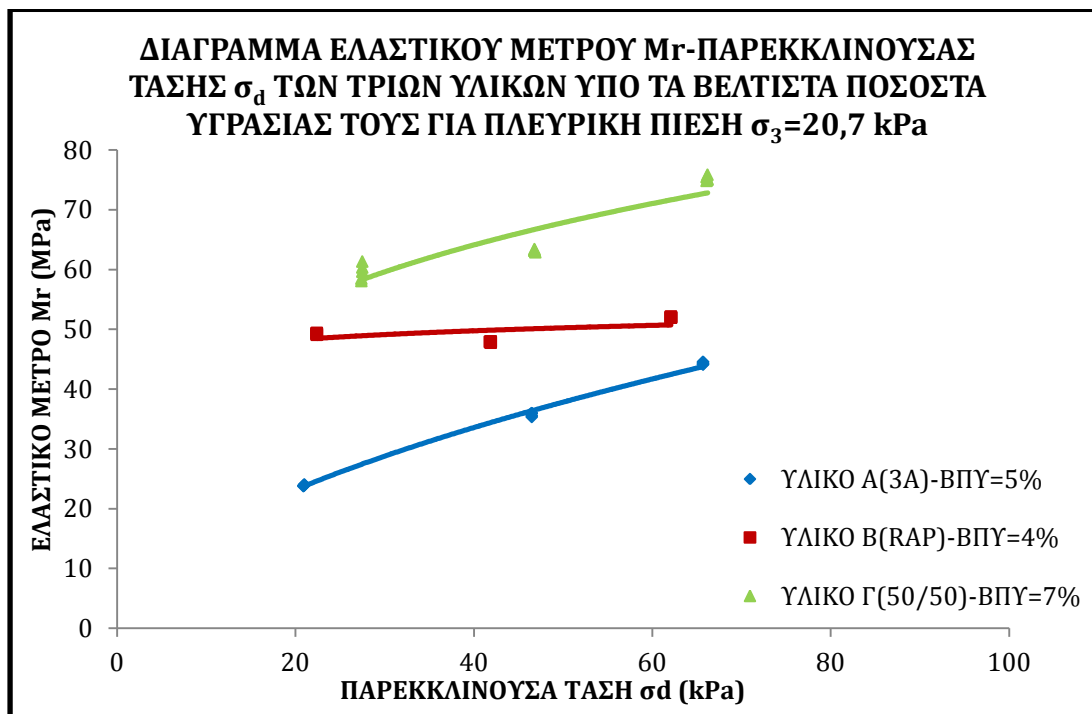


**ΣΧΗΜΑ 65:** Καμπύλες ελαστικού μέτρου  $M_r$  και παρεκκλίνουσας τάσης  $\sigma_d$ , υπό σταθερές τιμές πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  του υλικού Β για το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας του με τιμή 4%.

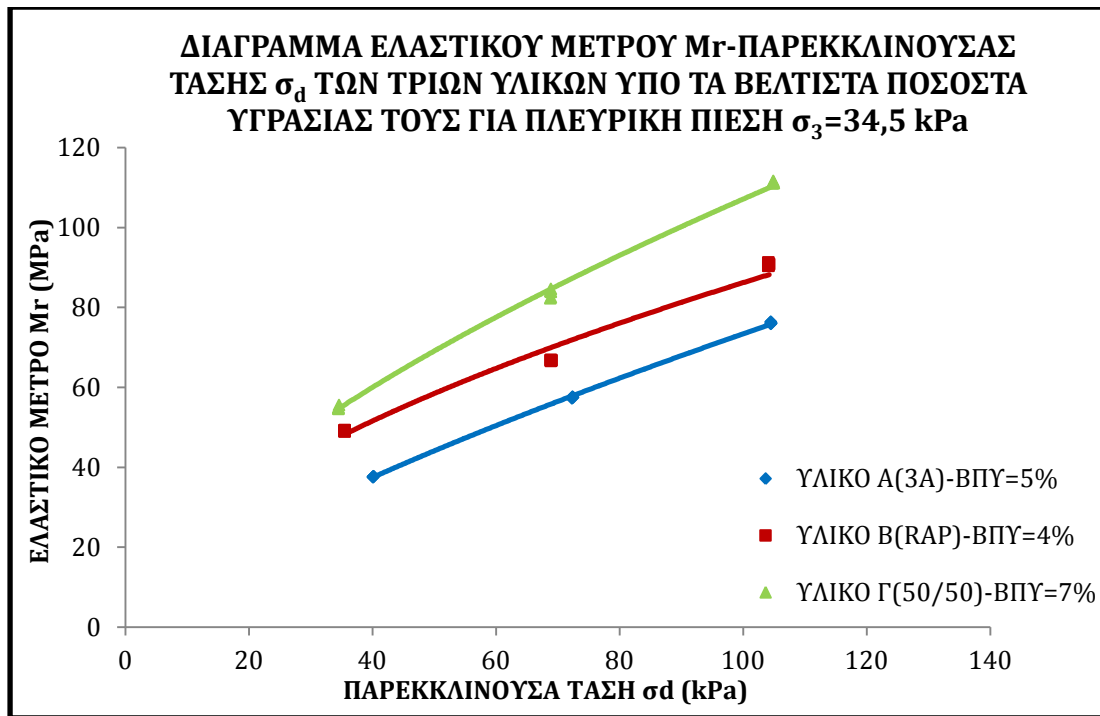
Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.



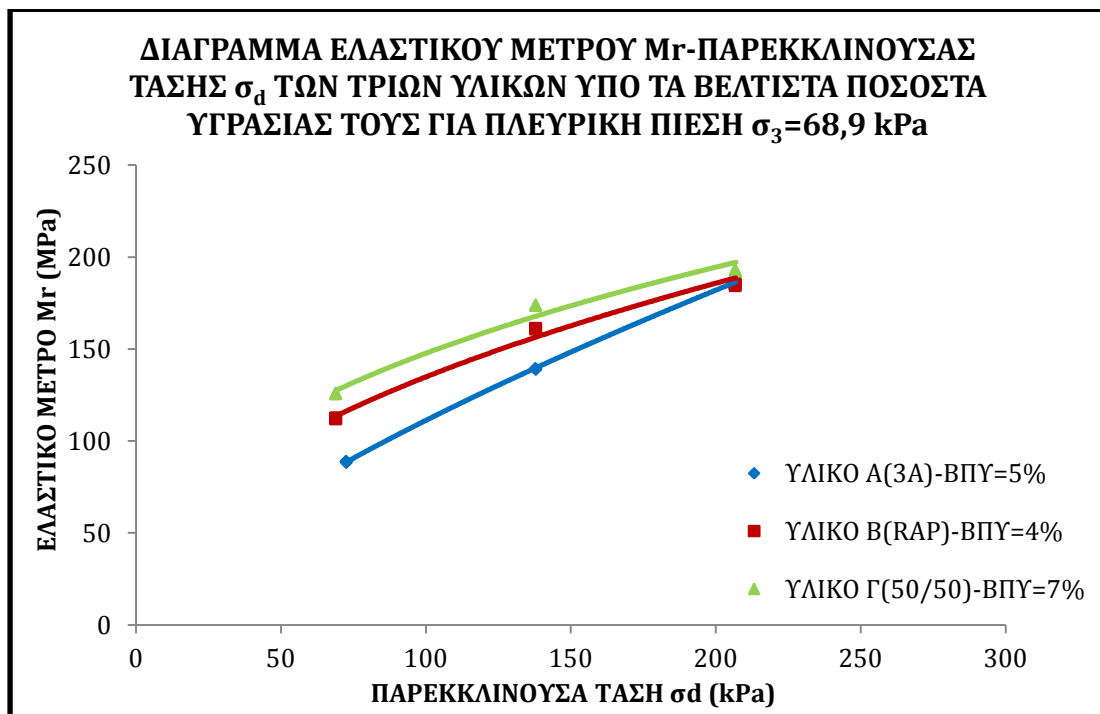
**ΣΧΗΜΑ 66:** Καμπύλες ελαστικού μέτρου  $M_r$  και παρεκκλίνουσας τάσης  $\sigma_d$ , υπό σταθερές τιμές πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  του υλικού Γ για το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας του με τιμή 7%.



**ΣΧΗΜΑ 67:** Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικού μέτρου  $M_r$ -εντατικής κατάστασης των τριών υλικών υπό τα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας τους για περίπου σταθερή πλευρική πίεση  $\sigma_3=20,7$  kPa.

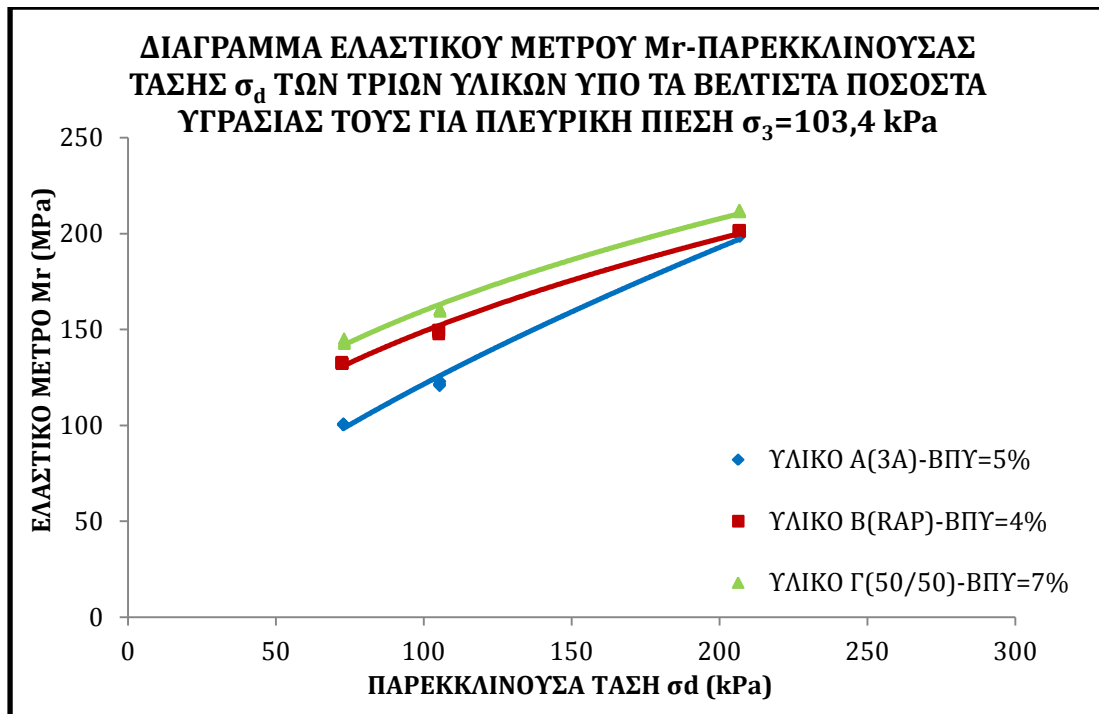


**ΣΧΗΜΑ 68:** Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικού μέτρου  $M_r$ -εντατικής κατάστασης των τριών υλικών υπό τα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας τους για περίπου σταθερή πλευρική πίεση  $\sigma_3=34,5$  kPa.

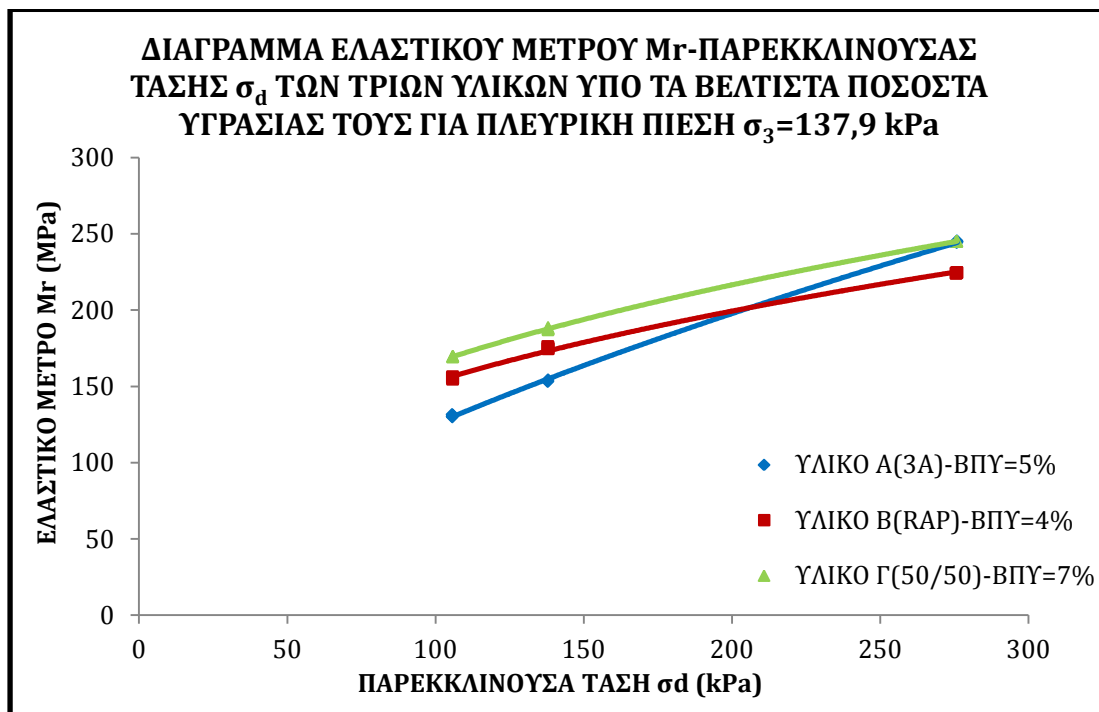


**ΣΧΗΜΑ 69:** Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικού μέτρου  $M_r$ -εντατικής κατάστασης των τριών υλικών υπό τα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας τους για περίπου σταθερή πλευρική πίεση  $\sigma_3=68,9$  kPa.

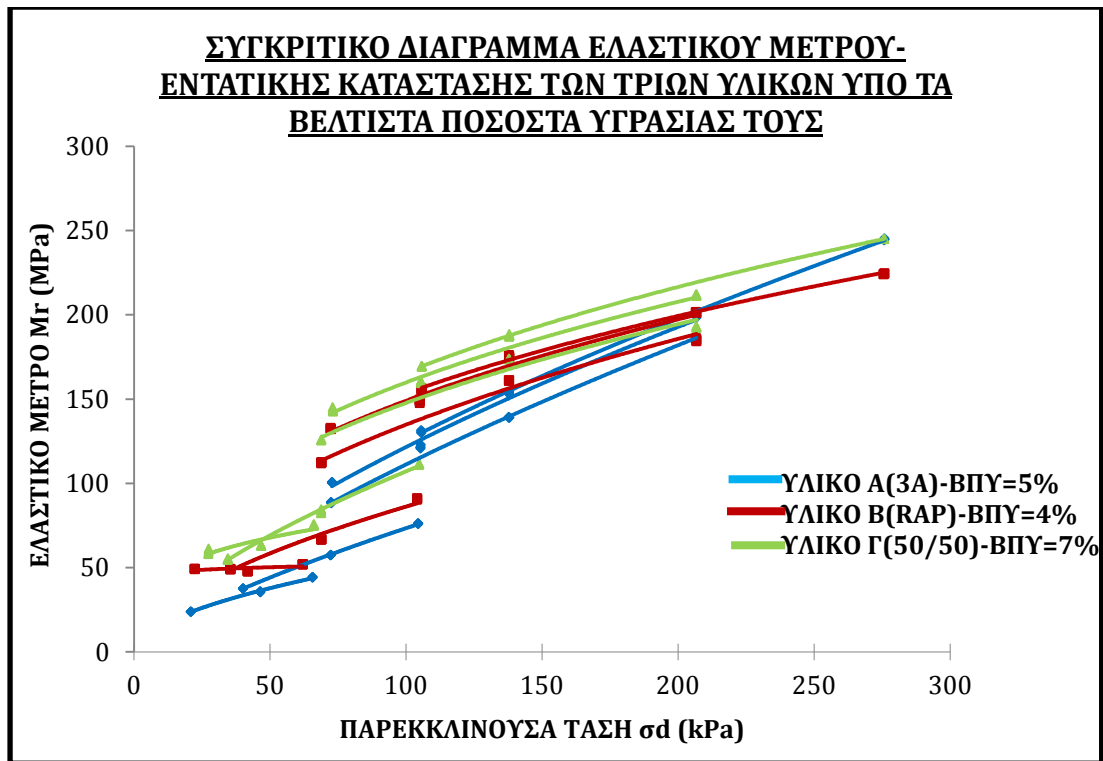
Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.



**ΣΧΗΜΑ 70:** Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικού μέτρου  $M_r$ -εντατικής κατάστασης των τριών υλικών υπό τα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας τους για περίπου σταθερή πλευρική πίεση  $\sigma_3=103,4$  kPa.



**ΣΧΗΜΑ 71:** Συγκριτικό διάγραμμα ελαστικού μέτρου  $M_r$ -εντατικής κατάστασης των τριών υλικών υπό τα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας τους για περίπου σταθερή πλευρική πίεση  $\sigma_3=137,9$  kPa.



**ΣΧΗΜΑ 72:** Συγκριτικό ολικό διάγραμμα ελαστικού μέτρου  $M_r$ -εντατικής κατάστασης των τριών υλικών υπό τα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας τους.

### 5.7 Στατιστική ανάλυση δεδομένων.

Στην παρούσα έρευνα πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές τριαξονικές δοκιμές σε τρία υλικά για διάφορα ποσοστά υγρασίας, με στόχο των προσδιορισμό του ελαστικού μέτρου των υλικών αυτών. Επειδή για κάθε τιμή του περιεχόμενου ποσοστού υγρασίας με τα οποία συμπυκνώθηκαν τα δοκίμια, έγιναν παραπάνω από μία δοκιμές καθίσταται αναγκαία η στατιστική ανάλυση των δεδομένων. Ως μέτρο σύγκρισης ελήφθη ο μέσος συντελεστής μεταβλητότητας (coefficient of variation-COV), ο οποίος αποτελεί ένα τυποποιημένο μέτρο της διασποράς της κατανομής των δεδομένων. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε για τα δεδομένα των ελαστικών μέτρων  $M_r$  των τριών υλικών τόσο με γνώμονα την πλευρική πίεση  $\sigma_3$  όσο και την τάση διογκώσεως  $\theta$ . Για κάθε υλικό, για κάθε ποσοστό υγρασίας και για κάθε δοκιμή που εκτελέστηκε, υπολογίστηκε για περίπου σταθερές τιμές πλευρικής πίεσης  $\sigma_3$  (20.7, 34.5, 68.9, 103.4 και 137.9 kPa) ο συντελεστής μεταβλητότητας επί τοις εκατό των τιμών των ελαστικών μέτρων



**Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

(COVi), ο οποίος ορίζεται ως το πηλίκο της τυπικής απόκλισης προς τον μέσο όρο του δείγματος. Έπειτα, για κάθε ποσοστό υγρασίας υπολογίστηκε ο μέσος όρος των παραπάνω συντελεστών ώστε να προκύψει ο μέσος συντελεστής μεταβλητότητας (COV), ο οποίος αντιπροσωπεύει την διασπορά των δεδομένων των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν επί του ίδιου ποσοστού υγρασίας. Οι παραπάνω τιμές των μέσων συντελεστών μεταβλητότητας των τριών υλικών, για κάθε ποσοστό υγρασίας παρουσιάζονται συνοπτικώς στον πίνακα 7. Παρόμοια διαδικασία διεξήχθη και για τον υπολογισμό των μέσων συντελεστών μεταβλητότητας των ελαστικών μέτρων  $M_T$  από την σκοπιά της τάσεως διόγκωσης  $\theta$ . Για τα δεδομένα από όλες τις δοκιμές με περίπου όμοιες τιμές τάσης διόγκωσης υπολογίστηκε ο συντελεστής μεταβλητότητας και στην συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος των μεμονωμένων συντελεστών των δειγμάτων για κάθε ποσοστό υγρασίας. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα των μέσων συντελεστών μεταβλητότητας παρουσιάζονται στον πίνακα 8.

<b>ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ <math>\sigma_3</math></b>	<b>ΠΟΣΟΣΤΟ ΥΓΡΑΣΙΑΣ</b>	<b>ΜΕΣΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ COV(%)</b>
3A-100%	3%	44,22
	4%	31,52
	5%	29,72
	6%	27,20
RAP-100%	2%	12,95
	3%	24,34
	4%	17,94
	5%	15,95
	6%	30,95
50/50	4%	29,09
	5%	23,10
	6%	23,15
	7%	21,67

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7:** Τιμές του μέσου συντελεστή μεταβλητότητας των δεδομένων των ελαστικών μέτρων  $M_T$  για κάθε υλικό και για κάθε ποσοστό υγρασίας για το οποίο εκτελέστηκαν τριαξονικές δοκιμές, με βάση την πλευρική πίεση  $\sigma_3$ .

**Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

<b>ΤΑΣΗ ΔΙΟΓΚΩΣΕΩΣ <math>\theta</math></b>	<b>ΠΟΣΟΣΤΟ ΥΓΡΑΣΙΑΣ</b>	<b>ΜΕΣΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ COV(%)</b>
3A-100%	3%	39,18
	4%	17,21
	5%	11,14
	6%	11,07
RAP-100%	2%	3,67
	3%	17,50
	4%	8,11
	5%	5,07
	6%	18,33
50/50	4%	10,40
	5%	13,77
	6%	9,44
	7%	10,04

**ΠΙΝΑΚΑΣ 8:** Τιμές του μέσου συντελεστή μεταβλητότητας των δεδομένων των ελαστικών μέτρων  $M_r$  για κάθε υλικό και για κάθε ποσοστό υγρασίας για το οποίο εκτελέστηκαν τριαξονικές δοκιμές, με βάση την τάση διογκώσεως  $\theta$ .

Όπως φαίνεται και στα αποτελέσματα των δύο παραπάνω πινάκων 7 και 8 για το υλικό A (αμμοχάλικο 3A) με βέλτιστο ποσοστό υγρασίας 5%, οι μέσοι συντελεστές μεταβλητότητας (COV) των δεδομένων των ελαστικών μέτρων εμφανίζουν ανεκτές τιμές διασποράς τόσο αναφορικά με την πλευρική πίεση, όσο και για την τάση διόγκωσης για την οποία η διασπορά των δεδομένων είναι ακόμη καλύτερη. Γενικώς, ένα δείγμα μεταβλητών καλείται ομοιόμορφο όταν ο συντελεστής μεταβλητότητας λαμβάνει τιμές μικρότερες από 10%. Στην περίπτωση των δεδομένων της παρούσας μελέτης τα οποία έχουν προκύψει από εργαστηριακές δοκιμές οι τιμές των συντελεστών μεταβλητότητας και η αντίστοιχη διασπορά είναι ικανοποιητική. Εξάιρεση αποτελούν τα δεδομένα του υλικού που αφορούν την συμπύκνωση των δοκιμών με ποσοστό υγρασίας 3 %, μακριά δηλαδή από το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας, όπου οι μέσοι συντελεστές μεταβλητότητας λαμβάνουν τις μεγαλύτερες τιμές τους 44,22 και 39,18 % για

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

πλευρική πίεση και τάση διόγκωσης, αντίστοιχα, κάτι το οποίο φαίνεται και στο εύρος των δεδομένων του σχήματος 21. Αυτό ίσως να οφείλεται στο γεγονός ότι για το υλικό Α και για ποσοστό υγρασίας 3% εκτελέστηκαν τρεις τριαξονικές δοκιμές ενώ για τα υπόλοιπα ποσοστά υγρασίας, γύρω από το βέλτιστο, έγιναν από τέσσερις δοκιμές για λήψη λεπτομερέστερων στοιχείων σχετικά με την ελαστική απόκριση του υλικού. Το υλικό Β (RAP 100%) εμφανίζει τις καλύτερες τιμές μέσου συντελεστή μεταβλητότητας από όλα τα υλικά κυρίως για τα δεδομένα ελαστικού μέτρου που προέκυψαν και σχετίζονται με την τάση διόγκωσης θ. Οι εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για αυτό το υλικό παρουσίασαν παρόμοια συμπεριφορά, κρατώντας τη διασπορά των δεδομένων σε χαμηλές τιμές. Τέλος, η διασπορά των δεδομένων του ελαστικού μέτρου του υλικού Γ (μείγμα 50/50 αμμοχάλικου 3Α και ανακυκλωμένου ασφαλτικού υλικού) βρίσκεται και αυτή σε καλά επίπεδα (COV<30%) με μικρότερες τιμές για τα δεδομένα που αφορούν το ελαστικό μέτρο σε σχέση με την τάση διόγκωσης. Ως γενικές παρατηρήσεις, είμαστε σε θέση να πούμε ότι τα δεδομένα ελαστικού μέτρου που συλλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη κρίνονται ως αρκετά αξιόπιστα ενώ παρατηρώντας τους παραπάνω πίνακες μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα ότι τα δεδομένα ελαστικού μέτρου- πλευρικής πίεσης είναι πιο ευαίσθητα για αυτό εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές μέσου συντελεστή μεταβλητότητας.

## **6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ**

Σε αυτό το κεφάλαιο συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της παρούσας μελέτης ενώ παράλληλα παρουσιάζονται ορισμένες συστάσεις που αφορούν τα κυριότερα σημεία. Τα κυριότερα ευρήματα παρουσιάζονται ως γενικά συμπεράσματα αμέσως μετά τη γενική εισαγωγή. Οι κυριότερες συστάσεις αφορούν τον σχεδιασμό οδοστρωμάτων και ειδικότερα τον χαρακτηρισμό των ασύνδετων κοκκωδών υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή βάσεων και υποβάσεων, από την σκοπιά της μηχανικής συμπεριφοράς και αντοχής. Δηλαδή, κατά πόσο είναι εφικτή η συσχέτιση των δεδομένων που προκύπτουν από την εργαστηριακή ανάλυση, με τα μεγέθη σχεδιασμού και τις συνθήκες που επικρατούν σε ένα έργο επί τόπου.

### **6.1 Γενική εισαγωγή**

Με το πέρασμα των χρόνων, ο σχεδιασμός οδοστρωμάτων εξελίχθηκε σταδιακά. Από τις απλές εμπειρικές μεθόδους που χρησιμοποιούνταν παλαιότερα, πλέον έχουμε φτάσει στην εποχή όπου αναλυτικές-μηχανιστικές μέθοδοι σχεδιασμού υπερσχύουν λόγω της ευκολίας και ακρίβειας που αυτές προσφέρουν. Παρά την μεγάλη πρόοδο της θεωρίας που αντιμετωπίζει τον σχεδιασμό οδοστρωμάτων κατά στρώση και της υπέρμετρης ανάπτυξης εξειδικευμένων αναλυτικών εργαλείων και μηχανημάτων, ακόμη υπάρχει μεγάλο κενό και αβεβαιότητες που πρέπει να καλυφθούν μεταξύ θεωρίας και πράξης. Σε πολλές χώρες του κόσμου, όπως και στην Ελλάδα, η μεθοδολογία σχεδιασμού βασίζεται εν μέρει στην εμπειρία. Οι εμπειρικές αυτές μέθοδοι επιβάλλουν την αντιμετώπιση των στρώσεων βάσης και υπόβασης από κοκκώδη υλικά ως το κυριότερο συστατικό της δομής ενός οδοστρώματος. Έτσι, η αποσαφήνιση των χαρακτηριστικών αντοχής και δυσκαμψίας των κοκκωδών υλικών και η γενικότερη απόκριση-συνεισφορά τους στην συνολική απόδοση ενός οδοστρώματος, κρίνεται επιτακτική. Η αντιμετώπιση και ο σχεδιασμός εμπειρικά, πλέον δεν είναι σε θέση να δώσει λύσεις σε όλα τα προβλήματα διότι η κυκλοφορία οχημάτων έχει

## **Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

αυξηθεί τόσο σε όγκο όσο και σε βάρος. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η προσέγγιση του σχεδιασμού με αναλυτικές, μηχανικές μεθόδους σε συνδυασμό πάντα με τις εμπειρικές. Δηλαδή από τον εμπειρικό χαρακτηρισμό των ασύνδετων κοκκωδών υλικών περνάμε, σιγά σιγά στον χαρακτηρισμό των υλικών με μία νέα, καινοτόμα και πρωτοποριακή μέθοδο. Η παράμετρος η οποία αναμένεται να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο τα επόμενα χρόνια είναι το ελαστικό μέτρο  $M_r$ .

Για τον καθορισμό των βασικών δομικών παραμέτρων και χαρακτηριστικών μίας κοκκώδους στρώσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν εργαστηριακές δοκιμές και μεθοδολογίες από τις οποίες προκύπτουν τα απαραίτητα δεδομένα που θα σχηματίσουν τη βάση μίας μηχανιστικής μεθόδου χαρακτηρισμού των υλικών. Η κυκλική, εργαστηριακή, τριαξονική δοκιμή επαναλαμβανόμενης φόρτισης αποδεικνύεται ως η καταλληλότερη για τον χαρακτηρισμό της μηχανικής συμπεριφοράς ενός κοκκώδους υλικού. Δεν αποτελεί όμως μία εύκολη και καθημερινή εργασία. Για την εκτέλεση της απαιτείται επίπονη προεργασία και προετοιμασία των δοκιμών. Παρόλα αυτά όμως μέσω της δοκιμής αυτής προκύπτουν πολύ αξιόπιστα αποτελέσματα όσον αφορά την αντοχή και για αυτό το λόγο είναι η κύρια εργαστηριακή δοκιμή που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη.

### **6.2 Συμπεράσματα**

Εξετάστηκαν και συγκρίθηκαν τρία υλικά (υλικό Α-αμμοχάλικο 3Α, υλικό Β-RAP/100%, υλικό Γ-μείγμα 3Α και RAP σε αναλογία 50/50) με βάση τις φυσικές τους ιδιότητες αλλά και σύμφωνα με την συμπεριφορά που επέδειξαν κατά την υποβολή τους σε τριαξονική δοκιμή επαναλαμβανόμενης φόρτισης. Αξιολογήθηκε κυρίως η συμπεριφορά τους ως προς το περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας. Τα δοκίμια της εργαστηριακής δοκιμής κάθε υλικού συμπυκνώθηκαν για διάφορες τιμές του ποσοστού υγρασίας όπως επίσης και για το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας για το οποίο επιτυγχάνεται η μέγιστη ξηρή πυκνότητα. Μέσω των πειραματικών αποτελεσμάτων και της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

στην παρούσα μελέτη οδηγούμαστε σε μία σειρά από κύρια συμπεράσματα τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

- Η συμπεριφορά των τριών κοκκωδών υλικών που εξετάστηκαν στην μελέτη είναι μη γραμμική. Η φέρουσα ικανότητα των υλικών αυτών είναι αποτέλεσμα της διατμητικής αντίστασης του σκελετού τους δηλαδή μέσω της εμπλοκής των κόκκων του αδρανούς. Όταν τα υλικά φορτιστούν και μέχρι να πλησιάσουν οι κόκκοι αρκετά ώστε να έρθουν σε πλήρη επαφή το ελαστικό τους μέτρο αυξάνεται σχεδόν γραμμικά. Από εκεί και έπειτα, επιπλέον φόρτιση οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές του ελαστικού μέτρου με μη γραμμική σχέση μέχρι να επέλθει η τελική θραύση και αποδιοργάνωση των κόκκων των υλικών. Ακόμη, η σχέση που συνδέει ελαστικό μέτρο και φορτίο δεν είναι γραμμική.
- Το υλικό Β το οποίο αποτελείται αποκλειστικά από ανακυκλωμένο ασφαλτικό υλικό (RAP) εμφανίζει την μικρότερη τιμή βέλτιστου ποσοστού υγρασίας (4%) σε σχέση με τα άλλα δύο υλικά. Η ασφάλτος που περιβάλλει τους κόκκους του υλικού εισχωρεί στις κοιλότητες περιμετρικά των κόκκων και γενικά εμφανίζει υδροφοβική συμπεριφορά. Έτσι, το υλικό δεν είναι σε θέση να απορροφήσει πολύ νερό και για αυτό το λόγο το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας έχει μικρή τιμή.
- Το αμμοχάλικο 3Α (υλικό Α) έχει βέλτιστο ποσοστό υγρασίας με τιμή περίπου 5%. Το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας του υλικού Β (RAP-100%) είναι 4%. Όμως, το υλικό Γ το οποίο είναι μείγμα των δύο ανωτέρων υλικών σε αναλογία 50/50 εμφανίζει τιμή του βέλτιστου ποσοστού υγρασίας ίση με 7%, τιμή μεγαλύτερη από τις άλλες δύο. Δηλαδή, η προσθήκη υλικού RAP σε μείγμα θραυστού αμμοχάλικου 3Α οδηγεί στην αύξηση του βέλτιστου ποσοστού υγρασίας για το οποίο επιτυγχάνεται η βέλτιστη συμπύκνωση.
- Η μέγιστη ξηρή πυκνότητα για την οποία εμφανίζονται τα αντίστοιχα βέλτιστα ποσοστά υγρασίας των τριών υλικών είναι της ίδιας τάξης μεγέθους ( $\gamma_{dmaxA}=2245 \text{ kg/m}^3, \gamma_{dmaxB}=2079 \text{ kg/m}^3, \gamma_{dmax\Gamma}=2217 \text{ kg/m}^3$ ). Την μικρότερη τιμή εμφανίζει το υλικό Β-RAP, το οποίο λόγω της ελαστικότητας της ασφάλτου έχει την μικρότερη μάζα για τον ίδιο όγκο αναφοράς.

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

- Αποδείχθηκε ότι το ελαστικό μέτρο  $M_r$  και των τριών υλικών αυξάνεται καθώς αυξάνονται οι επιβαλλόμενες τάσεις (πλευρική πίεση και τάση διογκώσεως) στο δοκίμιο, συμπέρασμα το οποίο συμφωνεί πλήρως με την διεθνή υπάρχουσα βιβλιογραφία (stress-hardening materials). Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι δεν υπάρχει μία σταθερή τιμή για το ελαστικό μέτρο ενός κοκκώδους υλικού αλλά αυτό αποτελεί συνάρτηση του επιβαλλόμενου τασικού πεδίου, δηλαδή της θέσης του υλικού στη δομή του οδοστρώματος και της εφαρμοζόμενης φόρτισης από την κυκλοφορία.
- Η προσθήκη στο μείγμα του υλικού Γ σε αναλογία 1/2, του ανακυκλωμένου ασφαλτικού υλικού προσδίδει αύξηση στο ελαστικό μέτρο του υλικού κατά περίπου 30% σε σχέση με το υλικό Α το οποίο αποτελείται καθαρά από αμμοχάλικο 3Α.
- Ανάμεσα στους πολλούς παράγοντες που επηρεάζουν την ελαστική συμπεριφορά (από την σκοπιά του ελαστικού μέτρου  $M_r$ ) μίας κοκκώδους στρώσης, όπως η πυκνότητα, η προέλευση του κοκκώδους υλικού και το περιεχόμενο ποσοστό σε λεπτόκοκκο υλικό, αποδεικνύεται ότι το περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας και το επιβαλλόμενο καθεστώς τάσεων είναι οι σημαντικότεροι.
- Η επίδραση του ποσοστού υγρασίας στην ελαστική συμπεριφορά των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη σε συνδυασμό με τον βαθμό συμπύκνωσης είναι αξιοσημείωτη. Το ελαστικό μέτρο  $M_r$  των τριών υλικών της μελέτης και γενικά ενός κοκκώδους υλικού επηρεάζεται άμεσα από το ποσοστό υγρασίας. Αυτή είναι μία πολύ σημαντική και κρίσιμη διαπίστωση που αφορά κυρίως τον έλεγχο ποιότητας επί τόπου, γιατί καθώς το ποσοστό υγρασίας αυξάνεται (χειμερινούς μήνες), το ελαστικό μέτρο και συνεπώς η αντοχή μειώνεται αισθητά.
- Τα υλικά που περιείχαν ανακυκλωμένο ασφαλτόμιγμα (υλικά Β και Γ) εμφάνισαν καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά και είχαν συνολικώς μεγαλύτερη αντοχή και αντίσταση σε παραμόρφωση σε σχέση με το κοινό αμμοχάλικο.
- Το μείγμα αμμοχάλικου 3Α και RAP σε αναλογία 50/50 (υλικό Γ) εμφάνισε τις μεγαλύτερες τιμές ελαστικού μέτρου  $M_r$  και είχε γενικότερα την καλύτερη ελαστική συμπεριφορά. Πιθανότατα, η θραύση και το

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

αλληλοκλείδωμα των κόκκων που περιβάλλονταν από άσφαλτο γέμισε τα κενά μεταξύ των χονδρών κόκκων και λειτούργησε ευνοϊκά εκτινάσσοντας τις τιμές του ελαστικού μέτρου σε υψηλότερα επίπεδα.

- Από την στατιστική ανάλυση προκύπτει ότι τα δεδομένα που αφορούν την συσχέτιση ελαστικού μέτρου  $M_r$  και της αθροιστικής τιμής επιβολής τάσης στα δοκίμια, δηλαδή της τάσης διόγκωσης εμφανίζουν καλύτερη συσχέτιση μεταξύ τους από ότι οι τιμές του ελαστικού μέτρου με μόνο την επιρροή της πλευρικής πίεσης. Αυτό φαίνεται από τις τιμές των συντελεστών μεταβλητότητας.
- Η μεθοδολογία εκτέλεσης τριαξονικής δοκιμής σύμφωνα με το αμερικάνικο πρότυπο AASHTO T307-99 περιλαμβάνει μία ακολουθία ζευγών τιμών πλευρικής και παρεκκλίνουσας τάσης. Γενικώς, κατά την εφαρμογή αυτών των τιμών στα εξεταζόμενα δοκίμια των τριών υλικών το ελαστικό μέτρο είναι υψηλότερο, όταν ασκούνται ολόενα και μεγαλύτερες τιμές τάσεως διόγκωσης (άθροισμα παρεκκλίνουσας τάσης και πλευρικής πίεσης) όμως δεν φαίνεται να επηρεάζεται με τον ίδιο βαθμό καθώς αυξάνεται η παρεκκλίνουσα, κατακόρυφη τάση. Ωστόσο η επίδραση της εντατικής κατάστασης στις τιμές του ελαστικού μέτρου δεν δείχνει γραμμική συσχέτιση με την τάση διογκώσεως κάτι το οποίο φαίνεται και στην στατιστική ανάλυση που παρουσιάζεται στο πέμπτο κεφάλαιο.
- Οι τριαξονικές δοκιμές που εκτελέστηκαν στα τρία υλικά ήταν υπό στραγγιζόμενες συνθήκες. Ως συμπέρασμα λοιπόν μπορούμε να πούμε ότι όταν τα δοκίμια έχουν συμπυκνωθεί υπό το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας τους, οι προκύπτουσες τιμές ελαστικού μέτρου  $M_r$  για τον ορθό χαρακτηρισμό αφορούν την σωστή αποστράγγιση του οδοστρώματος. Όταν το νερό παγιδεύεται στις κοκκώδεις στρώσεις τότε προκύπτει υπερεκτιμημένη τιμή του ελαστικού μέτρου σε σχέση με την πραγματική.



### 6.3 Συστάσεις και μελλοντική έρευνα

Σύμφωνα με την πειραματική διερεύνηση και την ανάλυση που λαμβάνουν χώρα στο παρόν σύγγραμμα και σε συνδυασμό με την εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση που παρουσιάζεται προκύπτουν ορισμένες σημαντικές συστάσεις.

- Η χρήση ασύνδετων, κοκκωδών υλικών στις κατασκευές οδοστρωμάτων, η εξακρίβωση της πλήρους δομητικής τους ικανότητας και ο ορθός χαρακτηρισμός των υλικών επιβάλλει στις μηχανιστικές μεθοδολογίες σχεδιασμού την ενσωμάτωση κριτηρίων που αφορούν την αντοχή, την παραμόρφωση και την δυσκαμψία.
- Στρώσεις βάσεων και υποβάσεων από ασύνδετα κοκκώδη υλικά, είτε από αμμοχάλικο είτε από οποιοδήποτε άλλο υλικό, οι οποίες πρόκειται να εκτεθούν σε μεγάλα ποσοστά υγρασίας αναμένεται ότι θα εμφανίσουν ευαισθησία στις τιμές του ελαστικού μέτρου. Οπότε για τον έλεγχο της πραγματοποιούμενης αντοχής (σε σχέση με την αντοχή που προκύπτει κατά τον σχεδιασμό) στο πεδίο της κατασκευής και τον προσδιορισμό της μέγιστης συμπύκνωσης, πρέπει να καθοριστεί η επιρροή που επιφέρει το ποσοστό υγρασίας στο υπό εξέταση υλικό.
- Για την καλύτερη κατανόηση της απόκρισης ενός κοκκώδους υλικού που υποβάλλεται σε εργαστηριακή τριαξονική δοκιμή απαιτείται η εκτέλεση δοκιμών και σε δοκίμια διαφορετικών μεγεθών προκειμένου να γίνει αντιληπτή η επίδραση της συμπύκνωσης στην γενική μηχανική συμπεριφορά του υλικού. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στις μετρούμενες τιμές παραμόρφωσης.

Τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που εξάγονται παραπάνω αφορούν τα τρία υλικά και τις παραμέτρους που επηρεάζουν την μηχανική τους συμπεριφορά, τα οποία ελέχθησαν αναλυτικά στην μελέτη. Επομένως, απαιτείται μελλοντική μελέτη και έρευνα ακόμη περισσότερων μεταβλητών προκειμένου να μπορεί ο χαρακτηρισμός να κριθεί επαρκής. Πιο συγκεκριμένα:

## Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.

- Διαφορετικές τιμές περιεκτικότητας ανακυκλωμένων ασφαλτικών υλικών σε μείγματα με αμμοχάλικα οδηγούν σε διαφορετική μηχανική συμπεριφορά ανάλογα με την αναλογία ανάμειξης. Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε μείγμα αμμοχάλικου και RAP σε αναλογία 50/50. Μελλοντικά απαιτείται η εξέταση μειγμάτων με διαφορετικές αναλογίες ανάμειξης των δύο υλικών (π.χ 25%, 35% ή 60% σε RAP) προκειμένου να προσδιορισθεί η βέλτιστη αναλογία μείξης και τα μηχανικά χαρακτηριστικά αυτής. Ακόμη, αν και από την παρούσα μελέτη προέκυψε ότι το υλικό Γ-μείγμα 50/50 είναι καλύτερο σε σχέση με τα άλλα δύο υλικά που εξετάστηκαν, οι διαφορές με το υλικό Β-RAP/100% δεν είναι τόσο σημαντικές. Επομένως απαιτείται εξέταση περισσότερων υλικών, από διαφορετικές πηγές λήψης των μειγνυόμενων υλικών και σε περισσότερες τιμές του περιεχόμενου ποσοστού υγρασίας συμπίκνωσης ώστε να σχηματιστεί μία πλήρης εικόνα της ακριβής συμπεριφοράς του μείγματος.
- Απαιτείται περισσότερη έρευνα ώστε να διαπιστωθούν οι διαφορές μεταξύ μετρήσεων πεδίου και εργαστηρίου ώστε να καλυφθούν οι αβεβαιότητες σχετικά με την τελικά πραγματοποιούμενη αντοχή μίας κοκκώδους στρώσης υπό τις συνθήκες που επικρατούν σε μία περιοχή και τα διατιθέμενα υλικά.
- Η μετρούμενη παραμόρφωση κατά την εκτέλεση των τριαξονικών δοκιμών στα τρία υλικά είναι αποτέλεσμα της συσσώρευσης 100 κύκλων φόρτισης σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO που χρησιμοποιήθηκε. Το ίδιο ισχύει και για την επιβαλλόμενη πλευρική πίεση. Το τι συμβαίνει όμως μετά, για περισσότερους κύκλους φόρτισης ή για μεγαλύτερες τιμές της πλευρικής πίεσης παραμένει άγνωστο. Οπότε απαιτούνται συμπληρωματικές δοκιμές για να καθορισθεί πλήρως η ακολουθία φορτίσεων και η μεθοδολογία εκτέλεσης τριαξονικών δοκιμών στο εργαστήριο ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του υλικού που εξετάζεται.
- Μελλοντικά, είναι πολύ σημαντική η σύγκριση των μετρούμενων τιμών του ελαστικού μέτρου  $M_T$  στο εργαστήριο με τις προβλεπόμενες τιμές που προκύπτουν από τα υπάρχοντα στην βιβλιογραφία καταστατικά μοντέλα εκτίμησης του ελαστικού μέτρου, για να διαπιστωθεί η ορθότητα και η ακρίβεια των μετρήσεων. Η σύγκριση αυτή δεν πραγματοποιήθηκε στην

**Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

παρούσα μελέτη διότι δεν προσδιορίστηκε επακριβώς το καταλληλότερο υλικό οπότε εν μέρει θα ήταν άστοχη. Άρα, όταν καλυφθούν πλήρως οι αβεβαιότητες που ακολουθούν τα υλικά και την μηχανική συμπεριφορά τους, η σύγκριση με τα μοντέλα πρόβλεψης κρίνεται απαραίτητη.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. A. Araya Characterization of Unbound Granular Materials for Pavements, Road and Railway Engineering Section, Faculty of Civil Engineering and Geosciences Delft University of Technology, 2011
2. AASHO, The AASHO Road Test: Special Reports 61A - 61E. 1961, Highway Research Board: Washington D.C.
3. AASHOTO'S Standard Specification for Transportation Materials and Methods of Sample and Testing.
4. AASHTO M145. 1991. Standard specifications for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes. AASHOTO'S Standard Specification for Transportation Materials and Methods of Sample and Testing.
5. AASHTO T 292. 1991. Interim method of test for resilient modulus of subgrade soils and untreated base/subbase. AASHOTO'S Standard Specification for Transportation Materials and Methods of Sample and Testing.
6. AASHTO T 294. 1994. Standard method of test for resilient modulus of unbound granular base/subbase materials and subgrade soil-SHRP protocol P46. AASHOTO'S Standard Specification for Transportation Materials and Methods of Sample and Testing.
7. AASHTO T27. 2006. Sieve analysis of fine and coarse aggregates. AASHOTO'S Standard Specification for Transportation Materials and Methods of Sample and Testing.
8. AASHTO T307. 1999. Standard Method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials. AASHOTO'S Standard Specification for Transportation Materials and Methods of Sample and Testing.

**Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

9. AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures. 1993, American Association of State Highway and Transportation Officials: Washington, D.C., USA.
10. AASHTO, Guide for the Design of Pavement Structures. 1986, American Association of State Highway and Transportation Officials: Washington D.C.
11. Acikgoz, O. and Rauf, R., 2010. Analysis of Parameters Affecting Permanent Deformation in Road Pavement. Master Thesis, Chalmers University of Technology.
12. Allen, J. (1973). "The effect of non-constant lateral pressures of the resilient response of granular materials," PhD thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Ill
13. Allen, J.J. and M.R. Thompson, Resilient Response of Granular Materials Subjected to Time-Dependent Lateral Stresses. Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board 1974. 510: p. 1-13
14. American Association of State Highway and Transportation Officials. Guide for Design of 4 Pavement Structures. AASHTO GDPS-4. Washington, D.C., 1993.
15. ARA, Inc., ERES Consultants Division. Guide for the Mechanistic-Empirical Design of New & Rehabilitated Pavement Structures. NCHRP Project 1-37A. Transportation Research Board, Washington, D.C., 2004. [www.trb.org/mepdg/](http://www.trb.org/mepdg/). Accessed August 24, 2007.
16. ASTM, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)), in ASTM D 698 - 07, A.S.f.T.a. Materials, Editor. 2007: Philadelphia.
17. ASTM, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup>(2,700 kN-m/m<sup>3</sup>)), in ASTM D 1557- 07, A.S.f.T.a. Materials, Editor. 2007: Philadelphia.
18. Barksdale, R., The Aggregate Handbook. 1991, Washington DC: National Stone Association
19. Barksdale, R.D. and S.Y. Itani, Influence of aggregate shape on base behavior. Transportation Research Record, 1989(1227).

20. Barksdale, R.D. Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials. In 3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. 1972. London
21. Boyce, H. R. (1980). "A non-linear model for the elastic behavior of granular materials under repeated loading." Proc., Int. Symp. on Soils under Cyclic and Transient Loading, 285-294.
22. Boyce, J. R., Brown, S. F., and Pell, P. S. (1976). "The resilient behavior of a granular material under repeated loading." Proc., 8th ARRB Conf. Mat. Constr. and Maintenance, Vol. 8, Part 3, 1-12.
23. Brown, S. F., and Hyde, A. F. L. (1975). "Significance of cyclic confining stress in repeated-load triaxial testing of granular material." Transp. Res. Rec. 537, Transportation Research Board, Washington, D.C., 49- 58.
24. Brown, S. F., and Selig, E. T. (1991). "The design of pavement and rail track foundations." Cyclic loading of soils: From theory to design, M. P. O'Reilly and S. F. Brown, eds., Blackie and Son Ltd., Glasgow, Scotland, 249-305
25. Brown, S.F., 36th Rankin Lecture: Soil mechanics in pavement engineering. Géotechnique, 1996. 46(3): p. 383-426.
26. CEN, Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 2: Test methods for the determination of the laboratory reference density and water content - Proctor compaction, in EN 13286-2. 2004, European Committee for Standardization (CEN): Brussels
27. CEN, Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures, in EN 13286-7. 2004, European Committee for Standardization (CEN): Brussels
28. Chan, F.W.K., Permanent deformation resistance of granular layers in pavements. 1990, University of Nottingham.
29. Chen, J.S., Huang, C.C., and Chang, Y.J., 2009. Mechanical Responses and Modeling of Rutting in Flexible Pavements, Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.7
30. Dawson, A. R., Thom, N. H., and Paute, J. L. (1996). "Mechanical characteristics of unbound granular materials as a function of condition." Flexible Pavements, Proc., Eur. Symp. Euroflex 1993, A. G. Correia, ed., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 35-44.

**Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

31. De Beer, M., Aspects of the design and behavior of road structures incorporating lightly cementitious layers. 1990, University of Pretoria: Pretoria, South Africa
32. Dehlen, G. L. (1969). "The effect of non-linear material response on the behavior of pavements subjected to traffic loads," PhD thesis, University of California, Berkeley, Berkeley, Calif
33. EDWARD J. HOPPE, D. STEPHEN LANE, G. MICHAEL FITCH, SAMEER SHETTY Feasibility of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Use As Road Base and Subbase Material. Final Report VCTIR 15-R6, VIRGINIA CENTER FOR TRANSPORTATION INNOVATION AND RESEARCH, 2015 January
34. Edwards, J.P., Laboratory Characterization of Pavement Foundation Materials, in Centre for Innovative and Collaborative Engineering (CICE). 2007, Loughborough University: Loughborough
35. Elliott, R.P. and M.R. Thompson, Mechanistic design concepts for conventional flexible pavements. 1985, University of Illinois: Urbana, Illinois.
36. Gray, J. E. (1962). "Characteristics of graded base course aggregates determined by triaxial tests." Engrg. Res. Bull., No. 12, National Crushed Stone Association.
37. Haynes, J. G., and Yoder, E. J. (1963). "Effects of repeated loading on gravel and crushed stone base course materials used in the AASHO Road Test." Hwy. Res. Rec. 39.
38. Heydinger, A. G., Xie, Q. L., Randolph, B. W., and Gupta, J. D. (1996). "Analysis of resilient modulus of dense and open-graded aggregates." Transp. Res. Rec. 1547, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1-6.
39. Hicks, R. G. (1970). "Factors influencing the resilient properties of granular materials," PhD thesis, University of California, Berkeley, Berkeley, Calif.
40. Hicks, R.G. and C.L. Monismith, Factors Influencing the Resilient Response of Granular Materials. Highway Research Record: Highway Research Board, 1971. 354: p. 15-31.
41. Hveem, F.N. and H.E. Davis, Some concepts concerning triaxial compression testing of asphaltic paving mixtures and subgrade materials, in A compilation of papers Presented at the First Pacific Area National Meeting, San Francisco,

**Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

- 10 October 1949 and Fifty-Third Annual Meeting, Atlantic City 28 June, 1950. 1950, ASTM: Philadelphia. p. 25-54.
42. Jorenby, B. N., and Hicks, R. G. (1986). "Base course contamination limits." *Trans. Res. Rec.* 1095, Transportation Research Board, Washington, D.C., 86–101
43. Kamal, M. A., Dawson, A. R., Farouki, O. T., Hughes, D. A. B., and Sha'at, A. A. (1993). "Field and laboratory evaluation of the mechanical behavior of unbound granular materials in pavements." *Transp. Res. Rec.* 1406, Transportation Research Board, Washington, D.C., 88– 97.
44. Kolisoja, P. (1997). "Resilient deformation characteristics of granular materials," PhD thesis, Tampere University of Technology, Publ. No. 223, Tampere, Finland.
45. Kuo, C.Y., et al., Three-dimensional image analysis of aggregate particles from orthogonal projections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1996. 1526(-1): p. 98-103.
46. Lekarp, F., Resilient and Permanent Deformation Behavior of Unbound Aggregates under Repeated Loading. 1999, Kungliga Tekniska Högskolan (KTH): Stockholm.
47. Lekarp, F., U. Isacsson, and A. Dawson, State of the Art. I: Resilient Response of Unbound Aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, 2000. 126(1): p. 66-75.
48. Luong 1982. Stress-strain aspects of cohesive less soils under cyclic and transient loading. *International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading* ,315-324, Swansea
49. Marek, C.R. and T.R. Jones. Compaction - an essential ingredient for good base performance. in *Conference on Utilization of Graded Aggregate Base Materials in Flexible Pavements 1974*: Oak Brook.
50. May, R. W., and Witczak, M. W. (1981). "Effective granular modulus to model pavement responses." *Transp. Res. Rec.* 810, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1–9.
51. Mayhew, H. C. (1983). "Resilient properties of unbound road base under repeated triaxial loading." *Lab. Rep.* 1088, TRRL, Crowthorne, U.K.



**Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

52. Mitry, F. G. (1964). "Determination of the modulus of resilient deformation of untreated base course materials," PhD thesis, University of California, Berkeley, Berkeley, Calif.
53. Molenaar, A.A.A., Road Materials I: Cohesive and Non-cohesive Soils and Unbound Granular Materials for Bases and Sub-bases in Roads, in Lecture Note. 2005, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology: Delft
54. Monismith, C. L., Seed, H. B., Mitry, F. G., and Chan, C. K. (1967). "Prediction of pavement deflections from laboratory tests." Proc., 2<sup>nd</sup> Int. Conf. Struct. Des. of Asphalt Pavements, 109-140.
55. Monismith, C.L., Evaluation of Long-Lasting Asphalt Pavement design Methodology: A Perspective. 2004, Distinguished Lecture International Society for Asphalt Pavements, Auburn University, Alabama.
56. Moore, W. M., Britton, S. C., and Schrivner, F. H. (1970). "A laboratory study of the relation of stress to strain for a crushed limestone base material." Res. Rep. 99-5F, Study 2-8-65-99, Texas Transp. Inst., Texas A&M University, College Station, Tex.
57. Morgan, J. R. (1966). "The response of granular materials to repeated loading." *Proc., 3rd Conf.*, ARRB, 1178-1192.
58. Paige-Green, P., A comparative study of the grading coefficient, a new particle size distribution parameter. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1999. 57(3): p. 215-223.
59. Plaistow, L. C. (1994). "Non-linear behavior of some pavement unbound aggregates," MS thesis, Dept. of Civ. Engrg., University of Nottingham, Nottingham, England.
60. Raad, L., G.H. Minassian, and S. Gartin, Characterization of saturated granular bases under repeated loads. *Transportation Research Record*, 1992(1369): p. 73- 73.
61. Rada, G. and M.W. Witczak, Comprehensive evaluation of laboratory resilient moduli results for granular material. *Transportation Research Record*, 1981. 810: p. 23-33.

**Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

62. Rolt, J., Structural Design of Asphalt Pavements, in Road Engineering for Development, R. Robinson and B. Thagesen, Editors. 2004, TJ International Ltd.:Padstow, Cornwall
63. Seed, H. B., Mitry, F. G., Monismith, C. L., and Chan, C. K. (1965). "Predictions of pavement deflection from laboratory repeated load tests." Rep. No. TE-65-6, Soil Mech. and Bituminous Mat. Res. Lab., University of California, Berkeley, Berkeley, Calif
64. Seed, H.B., C.K. Chan, and C.L. Monismith. *Effects of repeated loading on the strength and deformation of a compacted clay.* in *Highway Research Board.* 1955
65. Seed, H.C., C.C. K., and L.C. E. Resilient Characteristics of Subgrade Soils and Their Relation to Fatigue Failures in Asphalt Pavements. in International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. 1962. University of Michigan
66. Semmelink, C.J., The use of the DRTT K-mould to determine the elastic and shear properties of pavement materials. 1991, Division of Roads and Transport Technology, CSIR: Pretoria
67. Semmelink, The effect of material properties on the compactability of some untreated roadbuilding materials, in Department of Civil Engineering Faculty of Engineering. 1991, University of Pretoria: Pretoria
68. Smith, W. S., and Nair, K. (1973). "Development of procedures for characterization of untreated granular base coarse and asphalt-treated base course materials." Rep. No. FHWA-RD-74-61, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
69. Strahan, C.M., A Study of Gravel, Top Soil and Sand-Clay Roads in Georgia. *Public Roads*, 1929. 10(7): p. 117-136.
70. Sweere, G.T.H., Unbound Granular Base for Roads, in Faculty of Civil Engineering and Geosciences. 1990, Delft University of Technology: Delft.
71. THE UNBOUND AGGREGATE PAVEMENT BASE A R DAWSON The University of Nottingham, England, 2003
72. Thom, N. H., and Brown, S. F. (1987). "Effect of moisture on the structural performance of a crushed-limestone road base." *Transp. Res. Rec.* 1121, Transportation Research Board, Washington, D.C., 50-56.

**Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

73. Thom, N., J.P. Edwards, and A. Dawson, A Practical Test for Laboratory Characterization of Pavement Foundation Materials, in International Center for Aggregate Research Conference (ICAR). 2005: Austin, Texas.
74. Thom, N.H. and S.F. Brown, The effect of grading and density on the mechanical properties of a crushed dolomitic limestone, in 14th ARRB Conference. 1988. p. 94-100.
75. Trollope, E. H., Lee, I. K., and Morris, J. (1962). "Stresses and deformation in two-layer pavement structures under slow repeated loading." Proc., ARRB, Vol. 1, Part 2, 693-718.
76. Uthus, L., Deformation Properties of Unbound Granular Aggregates, in Department of Civil and Transport Engineering. 2007, Norwegian University of Science and Technology: Trondheim.
77. Uzan, J. (1985). "Characterization of granular material." Transp. Res. Rec. 1022, Transportation Research Board, Washington, D.C., 52-59.
78. Van Niekerk, A.A., Mechanical Behavior and Performance of Granular Bases and Subbases in Pavements, in Road and Railway Engineering, Faculty of Civil Engineering 2002, Delft University of Technology: Delft.
79. Vuong, B. (1992). "Influence of density and moisture content on dynamic stress-strain behavior of a low plasticity crushed rock." Rd. And Transp. Res., 1(2), 88-100.
80. Werkmeister, S., A. Dawson, and F. Wellner, Permanent Deformation Behavior of Granular Materials and the Shakedown Concept. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2001. 1757(-1): p. 75-81.
81. Witczak, M. W., and Uzan, J. (1988). "The universal airport pavement design system, Report I of IV: Granular material characterization." University of Maryland, College Park, Md
82. ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-05-03-05-01:2009-ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ
83. Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής δημοκρατίας, τεύχος 2<sup>ο</sup> ,αρ. φύλλου 386, 20 Μαρτίου 2007
84. Λοΐζος, Α., 1990. Μόνιμες παραμορφώσεις εύκαμπτων οδοστρωμάτων, Σεμινάριο, *Νεότερες εξελίξεις στην κατασκευή οδοστρωμάτων*, ΤΕΕ.

**Εκτίμηση της επιρροής του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης.**

85. Λοΐζος, Α., 2008. Οδοστρώματα, Σημειώσεις Μαθημάτων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
86. Λοΐζος, Α., 2013. Οδοστρώματα, Σημειώσεις Μαθημάτων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
87. Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές, ΠΕΤΕΠ 05-03-03-00, Έκδοση 1, Μάιος 2006