



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ & ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΗΣ
ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΕΝΕΡΓΟ ΜΕΤΡΟ
ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ ΕΔΡΑΣΗΣ
ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

ΦΕΓΓΟΥΛΗ ΧΡΙΣΤΙΝΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: Χ. Πλατή, Επίκουρος Καθηγήτρια ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάδειξη του βαθμού επιρροής της μεταβολής του ποσοστού υγρασίας στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος. Αρχικά, γίνεται αναφορά στα εύκαμπτα οδοστρώματα με την χρήση τους να επιμερίζεται στα οδοστρώματα υψηλής κυκλοφορίας (HVR) και στα οδοστρώματα χαμηλής κυκλοφορίας (LVR). Στη συνέχεια, γίνεται εκτενής ανάλυση της έννοιας του ενεργού μέτρου ελαστικότητας, στους τρόπους προσδιορισμούς του, οι οποίοι μπορεί είναι εργαστηριακοί ή θεωρητικοί, καθώς και στην εξάρτηση του από διάφορες παραμέτρους. Αναλυτικότερα, περιγράφεται η εξάρτηση του ενεργού μέτρου ελαστικότητας από το ποσοστό υγρασίας της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος. Τέλος, ως επιστέγασμα των ανωτέρω, πραγματοποιείται περαιτέρω διερεύνηση του κατά πόσο η μεταβολή του ποσοστού υγρασίας των υλικών της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος μπορεί να επηρεάσει τη τιμή του ενεργού μέτρου ελαστικότητας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ανάπτυξης πειραματικής διαδικασίας στην οποία γίνεται εφαρμογή μη-γραμμικών μοντέλων προσδιορισμού του M_r σε τυπικές διατομές οδοστρωμάτων HVR και LVR. Η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων γίνεται συγκριτικά. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης στοιχειοθετούν τα συμπεράσματα της εργασίας και διαμορφώνουν το πεδίο για μελλοντική έρευνα.

ABSTRACT

This paper aims at highlighting the degree of influence of the change in the moisture content on the resilient modulus (M_r) of subgrade soils. Firstly, it presents and analyzes flexible pavements categorized as high volume roads (HVR) and low volume roads (LVR). Moreover, the paper provides an extensive analysis of the term “resilient modulus”, the ways of its determination, which may be characterized as laboratory or theoretical, and its dependence on various parameters. More specifically, it describes the correlation between the resilient modulus and the moisture content of subgrade soils. Finally, further investigation is carried out, through an experimental process employing nonlinear modeling to M_r on HVR and LVR, which focuses on what extent the change in the moisture content of the material of subgrade soils can affect the value of the resilient modulus. Conclusions regarding the correlation between the resilient modulus and the moisture content are drawn, and suggestions regarding further research are provided.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1.	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ.....	1
1.2.	ΣΤΟΧΟΣ – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	2
1.3.	ΔΟΜΗ	3
2.	ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	4
2.1.	ΓΕΝΙΚΑ	4
2.2.	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	5
2.2.1.	ΟΡΙΣΜΟΙ	5
2.2.2.	ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΥΨΗΛΗΣ ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ (HVR και LVR)	12
3.	ΤΑΣΕΙΣ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	17
3.1.	ΓΕΝΙΚΑ	17
3.2.	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΗΣ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	21
3.2.1.	ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΑΣΥΝΕΧΟΥΣ ΜΕΣΟΥ	21
3.2.2.	ΕΠΙΠΕΔΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ – ΣΧΕΣΕΙΣ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ	22
3.2.3.	ΓΕΩΣΤΑΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ	27
3.3.	ΘΕΩΡΙΑ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	28
3.4.	ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ.....	31
4.	ΕΝΕΡΓΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (Mr).....	34
4.1.	ΟΡΙΣΜΟΣ.....	34
4.2.	ΤΡΟΠΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ.....	37
4.2.1.	ΓΕΝΙΚΑ	37
4.2.2.	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ	39
4.2.3.	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ	42
4.3.	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΟΥ Mr	49
5.	Η ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΥΓΡΑΣΙΑ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	83
5.1.	ΓΕΝΙΚΑ	83
5.2.	ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	84

5.3.	ΕΝΕΡΓΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΥΓΡΑΣΙΑ.....	85
5.3.1.	ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΒΑΣΗΣ.....	86
5.3.2.	ΣΤΡΩΣΗ ΕΔΡΑΣΗΣ.....	91
6.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	105
6.1.	ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	105
6.2.	ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ HVR	110
6.3.	ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ LVR	123
6.4.	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ HVR και LVR	134
7.	ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	138
8.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	142

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2. 1 Γαιώδες επίχωμα	5
Εικόνα 2. 2 Όρυγμα	5
Εικόνα 2. 3 Δύσκαμπτο οδόστρωμα	6
Εικόνα 2. 4 Ημι-άκαμπτο/Ημι-εύκαμπτο οδόστρωμα	7
Εικόνα 2. 5 Εύκαμπτο οδόστρωμα	8
Εικόνα 2. 6 Νομογράφημα μεθόδου AASHTO	11
Εικόνα 2. 7 Δεξιά: οδόστρωμα χαμηλής κυκλοφορίας. Αριστερά: οδόστρωμα υψηλής κυκλοφορίας	12
Εικόνα 2. 8 Τυπική διατομή οδοστρώματος υψηλής κυκλοφορίας	13
Εικόνα 2. 9 Οδόστρωμα χαμηλής κυκλοφορίας	14
Εικόνα 2. 10 Τυπική διατομή οδοστρώματος χαμηλής κυκλοφορίας	15
Εικόνα 3. 1 Κατανομή του κυκλικού φορτίου στο οδόστρωμα	17
Εικόνα 3. 2 Μη-γραμμική σχέση τάσεων παραμορφώσεων αργίλου	18
Εικόνα 3. 3 Μεταβολή κατακόρυφης παραμόρφωσης με το χρόνο	20
Εικόνα 3. 4 Απόκριση δοκιμίου αργίλου αστράγγιστη επαναλαμβανόμενη φόρτιση	20
Εικόνα 3. 5 Συνιστώσες των τάσεων	22
Εικόνα 3. 6 Τάσεις σε τυχόν κεκλιμένο επίπεδο	23
Εικόνα 3. 7 Κύρια επίπεδα, κάτω από φορτίο τροχού	24
Εικόνα 3. 8 Ορθή πίεση με κυκλική επιφάνεια	26
Εικόνα 3. 9 Κατανομή τάσεων κάτω από κυκλικό φορτίο	26
Εικόνα 3. 10 Γεωστατικές τάσεις	27
Εικόνα 3. 11 Ο μετασχηματισμός του Odemark σε ένα πολύστρωτο έδαφος	29
Εικόνα 3. 12 Σχηματική περιγραφή του (α) υψηλής κυκλοφορίας οδόστρωμα και (β) χαμηλής κυκλοφορίας οδόστρωμα	31
Εικόνα 3. 13 Κατανομή κατακόρυφης τάσης για διάφορα πάχη ασφαλτικής στρώσης	32
Εικόνα 4. 1 Συσκευή δοκιμής τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου	41
Εικόνα 4. 2 Ιστόγραμμα δοκιμής τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου	52
Εικόνα 4. 3 Σύγκριση των παραμέτρων k_1 που υπολογίζονται θεωρητικά και των k_1 που προσδιορίζονται από τη δοκιμή τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου στα λεπτόκοκκα εδάφη	55
Εικόνα 4. 4 Προβλεπόμενες έναντι μετρημένες τιμές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας λεπτόκοκκων εδαφών	56

Εικόνα 4. 5 Σύγκριση των παραμέτρων k_i που υπολογίζονται θεωρητικά και των k_i που προσδιορίζονται από τη δοκιμή τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου στα μη πλάστιμα χονδρόκοκκα εδάφη.....	58
Εικόνα 4. 6 Προβλεπόμενες έναντι μετρημένες τιμές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας μη πλάστιμων χονδρόκοκκων εδαφών	59
Εικόνα 4. 7 Σύγκριση των παραμέτρων k_i που υπολογίζονται θεωρητικά και των k_i που προσδιορίζονται από τη δοκιμή τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου στα πλάστιμα χονδρόκοκκα εδάφη.....	60
Εικόνα 4. 8 Προβλεπόμενες έναντι μετρημένες τιμές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας πλάστιμων χονδρόκοκκων εδαφών	62
Εικόνα 4. 9 Προβλεπόμενες έναντι μετρημένες τιμές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας λεπτόκοκκων εδαφών χρησιμοποιώντας τα μοντέλα Wisconsin (a) και τα μοντέλα LTPP (b)	65
Εικόνα 4. 10 Προβλεπόμενες έναντι μετρημένες τιμές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας μη πλάστιμων χονδρόκοκκων εδαφών χρησιμοποιώντας τα μοντέλα Wisconsin (a) και τα μοντέλα LTPP (b)	66
Εικόνα 4. 11 Προβλεπόμενες έναντι μετρημένες τιμές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας πλάστιμων χονδρόκοκκων εδαφών χρησιμοποιώντας τα μοντέλα Wisconsin (a) και τα μοντέλα LTPP (b)	67
Εικόνα 4. 12 Μετρημένες έναντι προβλεπόμενες τιμές M_r/P_a για τα μοντέλα α) 1 β) 3	74
Εικόνα 4. 13 Μετρημένες έναντι προβλεπόμενες τιμές M_r/P_a για τα μοντέλα α) 4 β) 5	75
Εικόνα 4. 14 Μετρημένες έναντι προβλεπόμενες τιμές M_r/P_a από τα μοντέλα με σειρά 3 και 4	78
Εικόνα 4. 15 Μετρημένες έναντι προβλεπόμενες τιμές M_r/P_a από το μοντέλο 5.....	79
Εικόνα 4. 16 Έδαφος BC (black cotton soil).....	80
Εικόνα 5. 1 Βλάβες που προκλήθηκαν από την υγρασία στο οδόστρωμα α) αποφλοίωση β) λακκούβα.....	83
Εικόνα 5. 2 Το νερό και ο αέρας στους πόρους των κόκκων	86
Εικόνα 5. 3 Επιρροή της περιεκτικότητας σε υγρασία (w) στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας (M_r) και στη μόνιμη αξονική παραμόρφωση (A_{1c}) για 3 γαλλικά ασύνδετα υλικά	87
Εικόνα 5. 4 Η επίδραση της περιεκτικότητας σε υγρασία στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας σε ασύνδετα υλικά. (α) θραυστό χαλίκι Hrusica, (β) δολομίτης από το λατομείο Lukonica, (γ) δολομίτη από το λατομείο Kamna Gorica, (δ) χαλίκι από Hoce.....	88

Εικόνα 5. 5 Σύγκριση M_r με την κύρια τάση σ_3 για τρεις διαφορετικές τιμές υγρασίας στο α) GRB β) ασβεστόλιθο γ) βασάλτη.....	89
Εικόνα 5. 6 Ευαισθησία σε υγρασία ασύνδετων υλικών διαφορετικής προέλευσης	90
Εικόνα 5. 7 Ενεργό μέτρο ελαστικότητας ως συνάρτηση του βαθμού κορεσμού ($p = 100$ kPa και $\sigma_3 = 40$ kPa).....	91
Εικόνα 5. 8 Ενεργό μέτρο ελαστικότητας με το ποσοστό υγρασίας για το δοκίμιο HC1	94
Εικόνα 5. 9 Ενεργό μέτρο ελαστικότητας με το ποσοστό υγρασίας για το δοκίμιο SC1	95
Εικόνα 5. 10 Ενεργό μέτρο ελαστικότητας με το ποσοστό υγρασίας για το δοκίμιο SS1	96
Εικόνα 5. 11 Μεταβολές του M_r και των πλαστικών παραμορφώσεων σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία για μια αργιλώδη άμμο.....	96
Εικόνα 5. 12 Μεταβολές M_r και των μόνιμων αξονικών παραμορφώσεων σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία για μία ιλύς.....	97
Εικόνα 5. 13 Συσχέτιση $M_r - w$ για το εδαφικό δοκίμιο α.....	98
Εικόνα 5. 14 Συσχέτιση $M_r - w$ για το εδαφικό δοκίμιο β.....	99
Εικόνα 5. 15 Συσχέτιση $M_r - w$ για το εδαφικό δοκίμιο γ	100
Εικόνα 5. 16 Συσχέτιση $M_r - w$ για το εδαφικό δοκίμιο δ.....	100
Εικόνα 5. 17 Ετήσια μεταβολή του ενεργού μέτρου ελαστικότητας του αργιλικού εδάφους λόγω της εποχιακής μεταβολής της υγρασίας.....	102
Εικόνα 5. 18 Καταπόνηση της στρώσης έδρασης σε σχέση με την εποχιακή διακύμανση του M_r σε διαφορετικά βάθη	102
Εικόνα 6. 1 Διάγραμμα συσχέτισης του ενεργού μέτρου ελαστικότητας με το ποσοστό υγρασίας για το δοκίμιο 1 για οδόστρωμα HVR.....	107
Εικόνα 6. 2 Διάγραμμα συσχέτισης του ενεργού μέτρου ελαστικότητας με το ποσοστό υγρασίας για το δοκίμιο 2 για οδόστρωμα HVR.....	107
Εικόνα 6. 3 Διάγραμμα συσχέτισης του ενεργού μέτρου ελαστικότητας με το ποσοστό υγρασίας για το δοκίμιο 3 για οδόστρωμα HVR.....	108
Εικόνα 6. 4 Διάγραμμα συσχέτισης του ενεργού μέτρου ελαστικότητας με το ποσοστό υγρασίας για το δοκίμιο 4 για οδόστρωμα HVR.....	108
Εικόνα 6. 5 Τυπική διατομή οδοστρώματος υψηλής κυκλοφορίας (HVR)	110
Εικόνα 6. 6 Οι μεταβολές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας M_r σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία για το δοκίμιο 1 με $w_{opt}=13,8\%$	119
Εικόνα 6. 7 Οι μεταβολές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας M_r σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία για το δοκίμιο 2 με $w_{opt}=11\%$	120

Εικόνα 6. 8 Οι μεταβολές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας M_r σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία συγκριτικά για τα δύο δοκίμια μέσω των εξισώσεων LTPP	121
Εικόνα 6. 9 Οι μεταβολές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας M_r σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία συγκριτικά για τα δύο δοκίμια μέσω των εξισώσεων Wisconsin	121
Εικόνα 6. 10 Οι μεταβολές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας και των πλαστικών παραμορφώσεων σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία για μια αργιλώδη άμμο...	122
Εικόνα 6. 11 Τυπική διατομή οδοστρώματος χαμηλής κυκλοφορίας (LVR)	123
Εικόνα 6. 12 Οι μεταβολές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας M_r σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία για το δοκίμιο 1 με $w_{opt}=13,8\%$	130
Εικόνα 6. 13 Οι μεταβολές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας M_r σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία για το δοκίμιο 2 με $w_{opt}=11\%$	131
Εικόνα 6. 14 Οι μεταβολές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας, M_r σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία συγκριτικά για τα δύο δοκίμια μέσω των εξισώσεων LTPP	132
Εικόνα 6. 15 Οι μεταβολές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας, M_r σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία συγκριτικά για τα δύο δοκίμια μέσω των εξισώσεων Wisconsin	132
Εικόνα 6. 16 Οι μεταβολές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία για μία λύς.....	133
Εικόνα 6. 17 Σύγκριση τιμών των τάσεων για τα δύο οδοστρώματα HVR vs LVR.....	134
Εικόνα 6. 18 Μεταβολή του ενεργού μέτρου ελαστικότητας με την περιεκτικότητα σε υγρασία για τα δυο τυπικά οδοστρώματα και για μοντέλο μελέτης LTPP, για το δοκίμιο 1	135
Εικόνα 6. 19 Μεταβολή του ενεργού μέτρου ελαστικότητας με την περιεκτικότητα σε υγρασία για τα δυο τυπικά οδοστρώματα και για μοντέλο μελέτης Wisconsin, για το δοκίμιο 1...	135
Εικόνα 6. 20 Μεταβολή του ενεργού μέτρου ελαστικότητας με την περιεκτικότητα σε υγρασία για τα δυο τυπικά οδοστρώματα και για μοντέλο μελέτης LTPP, για το δοκίμιο 2	136
Εικόνα 6. 21 Μεταβολή του ενεργού μέτρου ελαστικότητας με την περιεκτικότητα σε υγρασία για τα δυο τυπικά οδοστρώματα και για μοντέλο μελέτης Wisconsin, για το δοκίμιο 2....	136

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4. 1 Τιμές των συντελεστών α_i στις εξισώσεις συσχετισμού	77
Πίνακας 5. 1 Χαρακτηριστικά υλικών	88
Πίνακας 6. 1 Δεδομένα δοκιμών 1, 2, 3 και 4	105
Πίνακας 6. 2 Τιμές ενεργού μέτρου ελαστικότητας για τα δοκίμια 1, 2 και 4	109
Πίνακας 6. 3 Φαινόμενο ειδικό βάρος και αντίστοιχο ποσοστό υγρασίας για κάθε εδαφικό δοκίμιο	112
Πίνακας 6. 4 Κύριες τάσεις συναρτήσει ποσοστού υγρασίας	115
Πίνακας 6. 5 Τάσεις θ και τ_{oct} συναρτήσει ποσοστού υγρασίας.....	116
Πίνακας 6. 6 Παράμετροι k_i συναρτήσει ποσοστού υγρασίας.....	118
Πίνακας 6. 7 Κύριες τάσεις συναρτήσει ποσοστού υγρασίας	127
Πίνακας 6. 8 Τάσεις θ και τ_{oct} συναρτήσει ποσοστού υγρασίας.....	128
Πίνακας 6. 9 Παράμετροι k_i συναρτήσει ποσοστού υγρασίας.....	129

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ

Με τη συνεχή βελτίωση των μεθόδων και των υλικών που χρησιμοποιούνται στην οδοποιία, έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι σχεδιασμού οδοστρωμάτων για να ληφθεί υπόψη η σημασία της στρώσης έδρασης στις διαδικασίες σχεδιασμού. Μέχρι προσφάτως, οι εμπειρικές μέθοδοι σχεδιασμού των οδοστρωμάτων θεωρούνταν παγκοσμίως η καλύτερη δυνατή λύση. Όμως με τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις στην οδοποιία, οι εμπειρικές διαδικασίες σχεδιασμού εμφάνισαν την ανάγκη τροποποίησης, αδυνατώντας να καλύψουν αβεβαιότητες που σχετίζονται με τις μεταβολές των κλιματικών συνθηκών και την επάρκεια του οδοστρώματος. Οι περιορισμοί αυτοί μαζί με άλλους παράγοντες, όπως η βελτίωση των τεχνικών κατασκευής, οι διαφορετικές συνθήκες ανά στρώση έδρασης και οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις που έχει το κλίμα και η γήρανση στο οδόστρωμα καθιστούν ασαφή την εφαρμογή της εμπειρικής σχεδίασης (Erlingsson, 2004). Για να μετριαστεί η δυσκολία που σχετίζεται με τις εμπειρικές μεθόδους, αναπτύχθηκαν μηχανιστικές - εμπειρικές μέθοδοι σχεδιασμού οδοστρώματος με στόχο την επαρκή πρόβλεψη της απόκρισης και της απόδοσης αυτού. Στις μηχανιστικές - εμπειρικές μεθόδους σχεδιασμού, οι βασικές αρχές της εδαφομηχανικής χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστούν οι δομές του οδοστρώματος και κυρίως για να χαρακτηριστεί η στρώση έδρασης.

Η εδραίωση των μηχανιστικών – εμπειρικών μεθόδων σχεδιασμού, κατέστησε τον χαρακτηρισμό των εδαφών της στρώσης έδρασης, μέσω της έννοιας του ενεργού μέτρου ελαστικότητας (M_r), ζωτικής σημασίας στοιχείο για τον σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Το ενεργό μέτρο ελαστικότητας μπορεί να προσδιοριστεί εργαστηριακά μέσω δοκιμών τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου, οι οποίες όμως χαρακτηρίζονται γενικά ως σύνθετες και χρονοβόρες. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην διεξαγωγή ερευνών που αποσκοπούσαν στην δημιουργία αξιόπιστων εξισώσεων προσδιορισμού του M_r της στρώσης έδρασης. Έτσι, με την πάροδο των ετών πολλά μη-γραμμικά μοντέλα αναπτύχθηκαν, ενσωματώνοντας την επίδραση του βαθμού καταπόνησης και των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους στο M_r . Ο περιορισμός των μοντέλων αυτών έγκειται στο γεγονός ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευρέως, αλλά δημιουργούν καλές συσχετίσεις απόδοσης μόνο για συγκεκριμένους τύπους εδάφους ανά περιοχή.

Επιπλέον, στην σχεδίαση, κατασκευή, λειτουργία και συντήρηση ενός εύκαμπτου οδοστρώματος, η υγρασία μπορεί να παίξει ένα πολύ σημαντικό ρόλο επηρεάζοντας τη φέρουσα ικανότητα και το λειτουργικό κόστος του οδοστρώματος. Τα υλικά των στρώσεων της βάσης, υπόβασης και της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος (ασύνδετα υλικά και συμπυκνωμένο φυσικό έδαφος) αποτελούνται ως γνωστόν από στερεούς κόκκους και από κενά, τα οποία μπορούν να καλύπτονται είτε από νερό είτε από αέρα. Αυτό κάνει σαφές το γεγονός, ότι η μηχανική απόκριση των στρώσεων εξαρτάται απόλυτα από την αλληλεπίδραση μεταξύ των κόκκων και του νερού, δηλαδή από το ποσοστό της υγρασίας (w%) σε αυτές.

Η υγρασία μπορεί να εισέλθει στο εσωτερικό μέσω επιφανειακών ρωγμών ή αρμών διακοπής εργασίας, προκαλώντας μείωση της αντοχής σε διάτμηση, σε δυσκαμψία και την εμφάνιση πλαστική παραμόρφωση. Επιπλέον, η αύξηση του ποσοστού υγρασίας στο έδαφος της στρώσης έδρασης προκαλεί μείωση του ενεργού μέτρου ελαστικότητας. Η εξ ορισμού συσχέτιση του ενεργού μέτρου ελαστικότητας με τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους (περιεκτικότητα σε υγρασία, ειδικό βάρος κ.α.) φανερώνει την έντονη εξάρτηση αυτού από το ποσοστό υγρασίας. Έτσι, με την σπουδαιότητα του ενεργού μέτρου ελαστικότητας στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων συνεπάγεται και η σημαντικότητα του ποσοστού υγρασίας.

1.2. ΣΤΟΧΟΣ – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Δεδομένων των ανωτέρω, στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάδειξη της επιρροής της μεταβολής του ποσοστού υγρασίας στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης. Η διερεύνηση αφορά τον προσδιορισμό της εξάρτησης του ενεργού μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος από το ποσοστό υγρασίας μέσω καταστατικών μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί στην πάροδο των χρόνων από διάφορους ερευνητές. Αυτά τα μοντέλα συσχετίζουν το ενεργό μέτρο ελαστικότητας με το ποσοστό υγρασίας της στρώσης έδρασης αλλά και με άλλες παραμέτρους.

Μεθοδολογικά, ακολουθείται η ενδεδειγμένη ανασκόπηση της βιβλιογραφίας μέσω της οποίας αναδεικνύονται μοντέλα προσδιορισμού του ενεργού μέτρου ελαστικότητας, μοντέλα για την πρόβλεψη των παραμέτρων αυτού και έρευνες που περιγράφουν την σχέση εξάρτησης του ενεργού μέτρου ελαστικότητας από το ποσοστό υγρασίας των υλικών της στρώσης έδρασης. Λαμβάνοντας υπόψη τα ευρήματα από την διεθνή ανασκόπηση πραγματοποιείται πειραματική διαδικασία μέσω της θεώρησης δύο διατομών οδοστρωμάτων μίας υψηλής κυκλοφορίας (HVR) και μίας χαμηλής κυκλοφορίας (LVR). Στη συνέχεια πραγματοποιείται

ανάπτυξη των μοντέλων πρόβλεψης για συγκεκριμένα εδαφικά δοκίμια της στρώσης έδρασης και για κάθε πειραματική διατομή οδοστρώματος. Ως επιστέγασμα, διερευνώνται και αξιολογούνται οι διαφοροποιήσεις που παρουσιάζουν οι υπό διερεύνηση διατομές κατά την εφαρμογή των καταστατικών μοντέλων προσδιορισμού του ενεργού μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης, σε σχέση με την εξάρτηση αυτού από το ποσοστό υγρασίας. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν, συγκρίθηκαν με τα δεδομένα που αντλήθηκαν από την διεθνή βιβλιογραφία.

1.3. ΔΟΜΗ

Η εργασία αυτή αποτελείται από οκτώ κύρια κεφάλαια. Συγκεκριμένα, πέραν του παρόντος, περιλαμβάνονται τα ακόλουθα:

Το δεύτερο κεφάλαιο, όπου γίνεται λεπτομερής αναφορά στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων, περιλαμβάνοντας την περιγραφή των οδοστρωμάτων υψηλής και χαμηλής κυκλοφορίας (HVR και LVR).

Το τρίτο κεφάλαιο, το οποίο αναφέρεται στις τάσεις που αναπτύσσονται κάτω από το φορτίο τροχού στο εσωτερικό ενός εύκαμπτου οδοστρώματος.

Το τέταρτο κεφάλαιο, το οποίο πραγματεύεται την έννοια του ενεργού μέτρου ελαστικότητας, καθώς και τον προσδιορισμό αυτού με την χρήση είτε εργαστηριακών, είτε θεωρητικών μεθόδων.

Το πέμπτο κεφάλαιο, στο οποίο διερευνάται βιβλιογραφικά η επίδραση της υγρασίας στο σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Συγκεκριμένα, διερευνάται ο βαθμός επιρροής της μεταβολής του ποσοστού υγρασίας της στρώσης έδρασης στη τιμή του ενεργού μέτρου ελαστικότητας που εμφανίζεται στην ίδια στρώση του οδοστρώματος.

Το έκτο κεφάλαιο, το οποίο παρουσιάζει την πειραματική διαδικασία που πραγματοποιείται στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

Το έβδομο κεφάλαιο το οποίο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία, καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Τέλος, το όγδοο κεφάλαιο, περιλαμβάνει τη διεθνή βιβλιογραφία-οδηγό για τη σύνταξη της παρούσας εργασίας.

2. ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

2.1. ΓΕΝΙΚΑ

Ο κλάδος του σχεδιασμού των οδοστρωμάτων είναι ένας κλάδος δυναμικός υπό την έννοια ότι οι μέθοδοι σχεδιασμού αλλάζουν συνεχώς, καθώς νέα στοιχεία γίνονται γνωστά. Γενικά υπάρχουν πολλές μέθοδοι σχεδιασμού, καθώς οι αντιλήψεις σχετικά με την καταλληλότητα τους ποικίλλουν από τόπο σε τόπο. Ειδικότερα, τα διαθέσιμα υλικά για την κατασκευή των οδοστρωμάτων επηρεάζουν σημαντικά το σχεδιασμό. Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν αρχές σχεδιασμού κοινές σε όλα τα προβλήματα, ανεξάρτητα από τις διαφορετικές συνθήκες.

Ο σχεδιασμός των οδοστρωμάτων προϋποθέτει τη μελέτη των εδαφών και των υλικών οδοστρώσεως, καθώς και τη συμπεριφορά τους έναντι φόρτισης, λαμβάνοντας υπόψη και τις καιρικές συνθήκες. Τα φορτία όλων των οδοστρωμάτων μεταβιβάζονται τελικά στο έδαφος (στρώση έδρασης) και για αυτό είναι απαραίτητη η γνώση της εδαφομηχανικής.

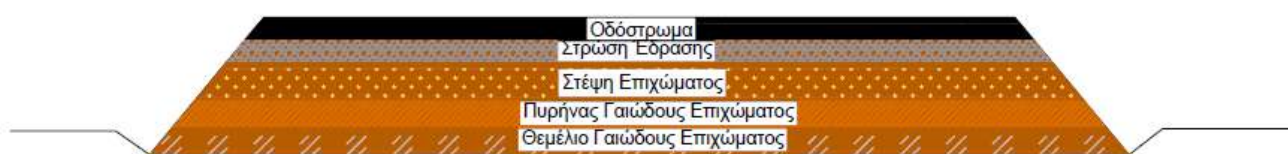
Κατά τα πρώτα στάδια της εξέλιξης, ο σχεδιασμός βασιζόταν σε εμπειρικούς κανόνες που στηρίζονταν στην προηγούμενη πείρα. Στην περίοδο 1920 μέχρι 1940 οι μηχανικοί έκαναν μία συγκροτημένη προσπάθεια εκτίμησης των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους, κυρίως για θεμελίωση κτιρίων και γεφυρών (Yoder και Witczak, 2011). Κατά το διάστημα αυτό συγκεντρώθηκε μία τεράστια ποσότητα πληροφοριών που επέτρεψε στο μηχανικό να σχεδιάσει θεμελιώσεις σε μία ορθολογική βάση. Εκείνη την εποχή, η εδαφομηχανική όπως εφαρμοζόταν στο σχεδιασμό οδοστρωμάτων περιοριζόταν κυρίως στη κατάταξη εδαφών, πράγμα που αποτελούσε ήδη ένα μεγάλο βήμα, αλλά όχι αρκετό. Οι μηχανικοί οδοποιίας γνωρίζουν πως η συμπεριφορά των οδοστρωμάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο του εδάφους πάνω στο οποίο κατασκευάζεται το οδόστρωμα. Έτσι, καταστρώθηκαν συσχετισμοί συμπεριφοράς οδοστρώματος με τύπους υπεδάφους. Οι έρευνες έδειξαν γενικά ότι οδοστρώματα που κατασκευάστηκαν πάνω σε συνεκτικά εδάφη, υπόκεινται σε μεγαλύτερη καταπόνηση από αυτά που κατασκευάστηκαν πάνω σε κοκκώδη εδάφη.

Παρόλα αυτά πολλές υπηρεσίες χρησιμοποιούσαν τυποποιημένες διατομές για τις περισσότερες οδούς. Αυτό σημαίνει, ότι ακόμη και αν υπήρχαν διαφορετικοί τύποι εδάφους για την διαμόρφωση της στρώσης έδρασης, το οδόστρωμα κατασκευαζόταν με σταθερό πάχος. Όμως, η ανάπτυξη των φορτίων κυκλοφορίας σε συνδυασμό με την μελέτη των υλικών και την επίδραση των καιρικών συνθηκών οδήγησε στην εξέλιξη της επιστήμης των οδοστρωμάτων.

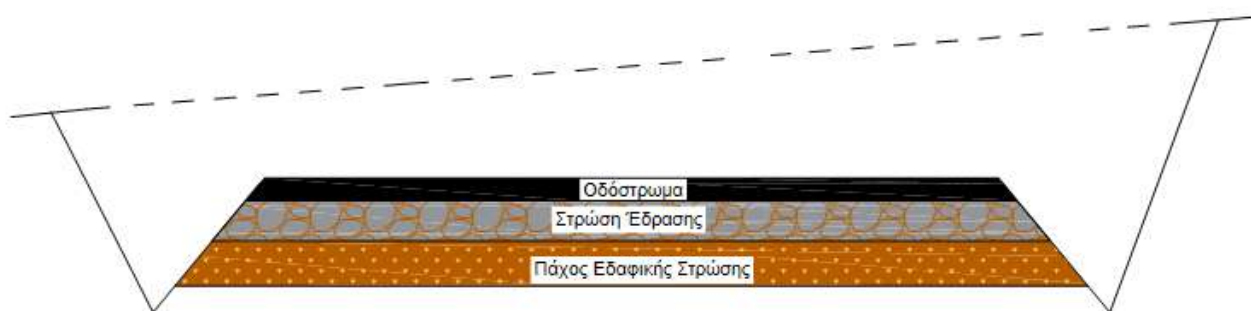
2.2. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

2.2.1. ΟΡΙΣΜΟΙ

Ως οδόστρωμα ορίζεται το σύνολο των επάλληλων στρώσεων πάνω από την στρώση έδρασης. Και όπως φαίνεται παρακάτω στην περίπτωση του **γαιώδες επιχώματος** (εικόνα 2.1) η στρώση έδρασης είναι η διαμορφωμένη επιφάνεια της στέψης του επιχώματος, ενώ στην περίπτωση του **ορύγματος** (εικόνα 2.2) είναι η διαμορφωμένη επιφάνεια του υπεδάφους.



Εικόνα 2. 1 Γαιώδες επίχωμα



Εικόνα 2. 2 Όρυγμα

Ιστορικά τα οδοστρώματα διακρίνονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, στα **Δύσκαμπτα**, στα **Ημι-άκαμπτα/Ημι-εύκαμπτα** και τέλος στα **Εύκαμπτα** οδοστρώματα που είναι και η κατηγορία στην οποία εστιάζει η παρούσα εργασία.

Δύσκαμπτα οδοστρώματα

Ως δύσκαμπτο ορίζεται το οδόστρωμα το οποίο είναι κατασκευασμένο από μπετόν με τσιμέντο Portland και είναι δυνατόν να περιλαμβάνει ή όχι μία στρώση βάσης πάνω στο υπεδάφος. Μία τυπική διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος παρουσιάζεται στην εικόνα 2.3.



Εικόνα 2. 3 Δύσκαμπτο οδόστρωμα

Αναλυτικά αποτελείται από τις εξής στρώσεις με τα αντίστοιχα υλικά:

- Στρώση μπετόν που ουσιαστικά αποτελεί μία πλάκα σκυροδέματος.
- Στρώση βάσης που κατασκευάζεται από συμπυκνωμένο ασύνδετο ή κατεργασμένο με τσιμέντο αμμοχάλικο, με σκοπό κυρίως την ομοιόμορφη έδραση της πλάκας, αλλά και τη μείωση των υποχωρήσεων που αναπτύσσονται σε αυτή.

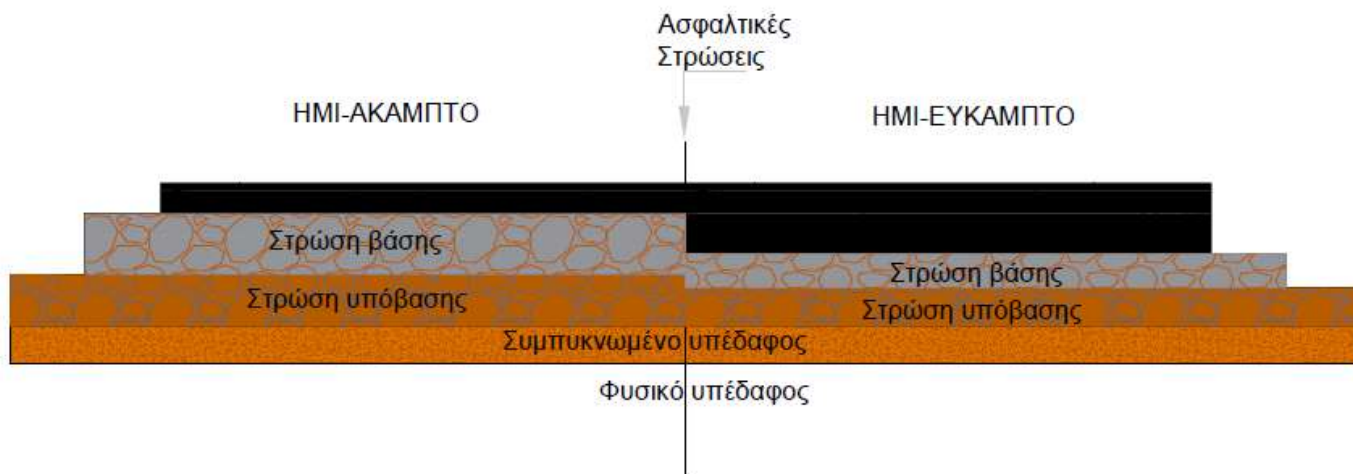
Το δύσκαμπτο οδόστρωμα, λόγω της ακαμψίας και του μεγάλου μέτρου ελαστικότητας, τείνει να κατανέμει τα φορτία πάνω σε μία σχετικά μεγάλη περιοχή του εδάφους. Έτσι, ένα μεγάλο μέρος της φέρουσας ικανότητας παρέχεται από την ίδια την πλάκα. Ο κυριότερος παράγοντας σχεδιασμού του δύσκαμπτου οδοστρώματος είναι η αντοχή του μπετόν. Για αυτό το λόγο μικροδιακυμάνσεις της αντοχής του υπεδάφους έχουν μικρή επίδραση πάνω στη φέρουσα αντοχή του οδοστρώματος.

Η στρώση βάσης παρέχει κάποια στατική αντοχή στο δύσκαμπτο οδόστρωμα, η συμβολή της όμως στη φέρουσα ικανότητα είναι σχετικά μικρή. Κάποιοι από τους λόγους για τους οποίους χρησιμοποιείται η στρώση βάσης είναι (1) ο έλεγχος ανάβλυσης, (2) ο έλεγχος επίδρασης παγετού, (3) η αποστράγγιση, (4) ο έλεγχος συστολής και διαστολής του υπεδάφους και τέλος (5) η ταχύτητα κατασκευής.

Ημι-άκαμπτα/Ημι-εύκαμπτα οδοστρώματα

Τα ημι-άκαμπτα/ημι-εύκαμπτα οδοστρώματα αποτελούνται από μία ή περισσότερες στρώσεις από Κατεργασμένο Θραυστό Αμμοχάλικο (ΚΘΑ). Η διαφορά ανάμεσα στους όρους

ημι-άκαμπτο και ημι-εύκαμπτο έγκειται στο πάχος των ασφαλτικών στρώσεων και της στρώσης βάσης/υπόβασης. Στη περίπτωση του ημι-εύκαμπτου παρουσιάζεται μεγαλύτερο πάχος ασφαλτικών στρώσεων. Τα ανωτέρω παρουσιάζονται και στην εικόνα 2.4.



Εικόνα 2. 4 Ημι-άκαμπτο/Ημι-εύκαμπτο οδόστρωμα

Αναλυτικά, αποτελείται από τις εξής στρώσεις με τα αντίστοιχα υλικά:

- Την ασφαλτική στρώση, που κατασκευάζεται από μία ή περισσότερες στρώσεις ασφαλτομίγματος.
- Τη στρώση βάσης, που κατασκευάζεται από αμμοχάλικο κατεργασμένο (σταθεροποιημένο) με υδραυλικές κονίες.
- Τη στρώση υπόβασης, που κατασκευάζεται από συμπυκνωμένο ασύνδετο αμμοχάλικο ορισμένης διαβάθμισης ή από κατεργασμένο αμμοχάλικο ή εδαφικό υλικό.
- Συμπυκνωμένο έδαφος ή διαφορετικά στρώση έδρασης που αποτελεί φυσικό εδαφικό υλικό μετά από συμπύκνωση.

Εύκαμπτα οδοστρώματα

Το εύκαμπτο οδόστρωμα αποτελείται Από ασφαλτικές στρώσεις και στρώσεις βάσης/υπόβασης από ασύνδετα υλικά, οι οποίες εδράζονται πάνω σε διαμορφωμένο – συμπυκνωμένο έδαφος. Μια τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος με τις στρώσεις που το αποτελούν παρουσιάζεται στην εικόνα 2.5.



Εικόνα 2. 5 Εύκαμπτο οδόστρωμα

Αναλυτικά, αποτελείται από τις εξής στρώσεις με τα αντίστοιχα υλικά:

- Τις ασφαλτικές στρώσεις, που κατασκευάζονται από στρώσεις ασφαλτομίγματος, οι οποίες διακρίνονται στην ανώτερη στρώση, που ονομάζεται επιφανειακή στρώση και είναι συνήθως αντιολισθηρή και στην συνδετήρια στρώση.
- Τη στρώση βάσης, που κατασκευάζεται από συμπυκνωμένο ασύνδετο αμμοχάλικο ορισμένης διαβάθμισης.
- Τη στρώση υπόβασης, που κατασκευάζεται από συμπυκνωμένο ασύνδετο, θραυστό ή φυσικό αμμοχάλικο ορισμένης διαβάθμισης.
- Συμπυκνωμένο έδαφος ή διαφορετικά στρώση έδρασης, που αποτελεί φυσικό εδαφικό υλικό μετά από συμπύκνωση.

Η φέρουσα ικανότητα ενός εύκαμπτου οδοστρώματος επιτυγχάνεται με την κατανομή των φορτίων και την απορρόφηση των τάσεων μέσω του συστήματος των στρώσεων. Έτσι, η αντοχή ενός εύκαμπτου οδοστρώματος επιτυγχάνεται με την κατασκευή στρώσεων κατάλληλου πάχους που κατανέμουν το φορτίο στο υπέδαφος. Το πάχος του οδοστρώματος επηρεάζεται από την αντοχή του υπεδάφους. Αν ένα ασφαλτικό οδόστρωμα παρουσιάζει μεγάλη ακαμψία ενδέχεται να συμπεριφερθεί ουσιαστικά σαν δύσκαμπτο και επομένως η κόπωση της επιφανειακής ή άλλης στρώσης είναι δυνατόν να γίνει κρίσιμη. Στις περιπτώσεις αυτές η μεθοδολογία σχεδιασμού προσεγγίζει αυτήν που ιστορικά έχει υιοθετηθεί για τα οδοστρώματα από μπετόν.

Οι στρώσεις βάσης και υπόβασης εκτείνονται κατά πλάτος μέχρι κάποια απόσταση πέρα από την άκρη της επιφανειακής στρώσης (ασφαλτικές στρώσεις). Αυτό εξασφαλίζει τη μεταβίβαση των φορτίων που ασκούνται στην άκρη του οδοστρώματος στις κατώτερες στρώσεις. Αν οι στρώσεις κατασκευάζονται με απότομα πρηνή και δεν υπάρχει διαφορά στο πλάτος στο οποίο εκτείνονται, τότε τα φορτία που ασκούνται στην επιφάνεια πιθανόν να

προκαλέσουν βλάβη λόγω έλλειψης υποστήριξης στην άκρη του οδοστρώματος. Οι στρώσεις βάσης γενικά εκτείνονται περίπου 30cm πέρα από την άκρη του οδοστρώματος, αν και σε ειδικές περιπτώσεις είναι δυνατόν να επεκταθούν περισσότερο.

Τρόποι σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων

Η διαστασιολόγηση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων συνίσταται στον υπολογισμό του πάχους της κάθε στρώσης, που όλες μαζί συνθέτουν το οδόστρωμα. Ο κύριος σκοπός της διαστασιολόγησης είναι, η κατασκευή του οδοστρώματος με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να εξυπηρετεί την κυκλοφορία για όλη τη διάρκεια ζωής του. Για να υλοποιηθεί αυτός ο σκοπός, πρέπει τα φορτία που κατανέμονται στο υπεδάφος να μην υπερβαίνουν την φέρουσα ικανότητα αυτού. Οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται σε κάθε στρώση, κατά τη φόρτιση, να μην είναι μεγαλύτερες από τις τάσεις που μπορούν να παραλάβουν τα υλικά της κάθε στρώσης. Έτσι, πέρα από την φέρουσα ικανότητα του υπεδάφους άλλα στοιχεία που επηρεάζουν τον σχεδιασμό του οδοστρώματος είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος, τα χαρακτηριστικά των υλικών της κάθε στρώσης, οι κλιματολογικές συνθήκες και φυσικά η επιθυμητή διάρκεια ζωής του οδοστρώματος και το κόστος κατασκευής.

Οι τρόποι σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται κυρίως σήμερα, διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις αναλυτικές μεθόδους και τις εμπειρικές μεθόδους.

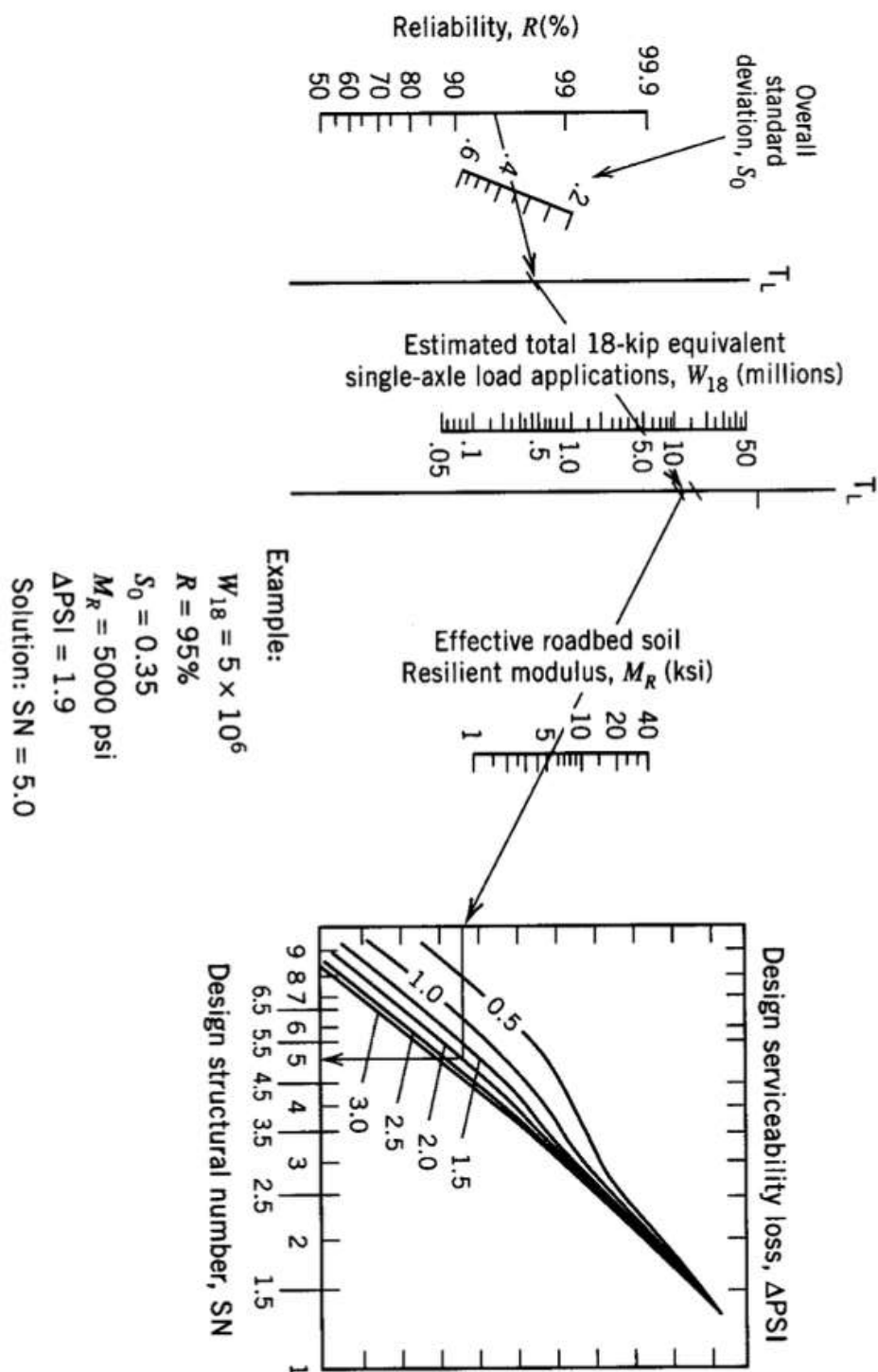
Με την **αναλυτική μέθοδο**, ο μελετητής υπολογίζει τις τάσεις και τις παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στα διάφορα κρίσιμα σημεία του οδοστρώματος. Στη συνέχεια, αφού υπολογιστούν τα δύο μεγέθη συγκρίνονται με τις αντίστοιχες μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές οι οποίες καθορίζονται από τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν, οι οποίες προσδιορίζονται μέσω εργαστηριακών δοκιμών. Ο καθορισμός του τελικού πάχους του οδοστρώματος επιτυγχάνεται με την ικανοποίηση της απαίτησης κατά την οποία, οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που θα αναπτυχθούν να μην υπερβαίνουν τις μέγιστες επιτρεπτές για τα προτεινόμενα πάχη των στρώσεων του οδοστρώματος.

Με την **εμπειρική μέθοδο** τα πάχη των στρώσεων υπολογίζονται από νομογραφήματα ή διαγράμματα, τα οποία δημιουργήθηκαν από αναλυτικούς υπολογισμούς ή από συνδυασμό αναλυτικών υπολογισμών και αποτελεσμάτων που προέκυψαν από πειραματικά οδοστρώματα. Μια τέτοια ημι-εμπειρική μέθοδος αποτελεί η μέθοδος AASHTO.

Η μέθοδος AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), είναι μία ημι-εμπειρική μέθοδος για τον σχεδιασμό και τη μελέτη των οδοστρωμάτων, και

προέρχεται από το οδικό πείραμα AASHO (1958-1961). Ένας από τους κύριους στόχους για τον οποίο πραγματοποιήθηκε το οδικό πείραμα AASHO ήταν να παραχθούν πληροφορίες που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη κριτηρίων και διαδικασιών σχεδιασμού οδοστρώματος. Κατά συνέπεια, μετά την ολοκλήρωση του οδικού πειράματος, η επιτροπή σχεδιασμού της AASHO, μέσω της θυγατρικής επιτροπής της, για τις πρακτικές σχεδιασμού οδοστρώματος, ανέπτυξε και κυκλοφόρησε το 1961 τον «Προσωρινό Οδηγό AASHO για τη διάβρωση άκαμπτων και εύκαμπτων οδοστρωμάτων». Ο υπόψιν οδηγός βασίστηκε στα αποτελέσματα του Οδικού Πειράματος AASHO λαμβάνοντας υπόψιν και τις υπάρχουσες διαδικασίες σχεδιασμού ενώ. Αφού, ο Οδηγός χρησιμοποιήθηκε για αρκετά χρόνια, με περαιτέρω σχετικές αναλύσεις και σε συνδυασμό με την εμπειρία προέκυψε τροποποίηση και βελτίωση της αρχικής μορφής της μεθόδου σε διάφορα στάδια (AASHTO 1986, AASHTO 1993, ASSHTO 1998, NCHRP 1-37^A, 2002). Είναι δε ευρέως διαδεδομένη όχι μόνο στην Αμερική αλλά και σε διεθνές επίπεδο.

Αναλυτικά, η εμπειρική μέθοδος AASHTO προσδιορίζει τη δομική επάρκεια ενός εύκαμπτου οδοστρώματος μέσω του δείκτη δομικής επάρκειας SN. Για τον προσδιορισμό της παραμέτρου SN, η μέθοδος προτείνει το νομογράφημα που ακολουθεί στην εικόνα 2.6.



Εικόνα 2. 6 Νομογράφημα μεθόδου AASHTO

Όπως βλέπουμε στο νομογράφημα της μεθόδου πέραν των άλλων παραμέτρων ζητείται και η τιμή του Resilient Modulus (M_r) ή διαφορετικά του ενεργού μέτρου ελαστικότητας, το οποίο αναπτύσσεται στο Κεφάλαιο 4.

2.2.2. ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΥΨΗΛΗΣ ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ (HVR και LVR)

Με βάση την ένταση της κυκλοφορίας που εξυπηρετούν τα εύκαμπτα οδοστρώματα χωρίζονται σε **Υψηλής Κυκλοφορίας Οδοστρώματα (HVR: High Volume Roads)** και **Χαμηλής Κυκλοφορίας Οδοστρώματα (LVR: Low Volume Roads)** (βλ. εικόνα 2.7). Ανάλογα με την τιμή της έντασης της κυκλοφορίας, όπως αυτή υπολογίζεται από τον υπεύθυνο μηχανικό κατά τη διάρκεια της μελέτης για την κατασκευή της οδού, ο αριθμός, το πάχος και η μορφή των στρώσεων του οδοστρώματος διαφοροποιείται. Είναι φανερό, ότι δεν μπορεί να δαπανηθεί ο ίδιος χρόνος κατασκευής, αλλά και το ίδιο κόστος κατασκευής, για ένα οδόστρωμα του οποίου ο κυκλοφοριακός φόρτος θα υπολογίζεται στα 100 οχήματα ανά ημέρα, με ένα οδόστρωμα του οποίου ο κυκλοφοριακός φόρτος θα αναμένεται στα 1000 οχήματα ανά ημέρα.

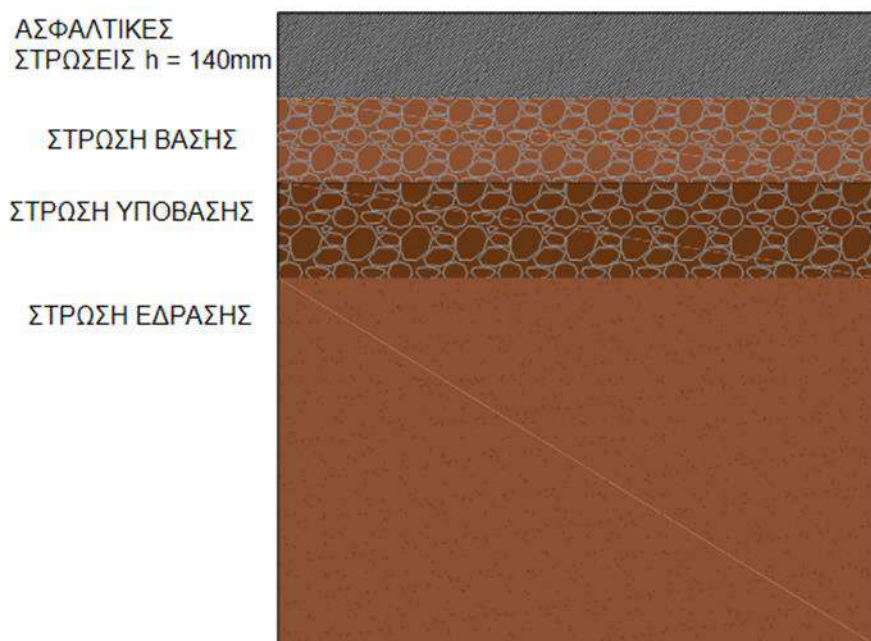


Εικόνα 2. 7 Δεξιά: οδόστρωμα χαμηλής κυκλοφορίας. Αριστερά: οδόστρωμα υψηλής κυκλοφορίας
Πηγή: Cornell Local Roads Program (CLRP), 2016

Με την πάροδο των χρόνων και με βάση την εμπειρία οι μηχανικοί κατέληξαν σε πρότυπες μορφές διατομών οδοστρωμάτων HVR και οδοστρωμάτων LVR. Οι διατομές των HVR συνυπολογίζοντας την μεγαλύτερη φθορά που θα δεχτούν σε ένα δεδομένο χρόνο, την

εξυπηρετικότητα και γενικά τις απαιτήσεις κυκλοφορίας δίνουν μεγαλύτερη έμφαση στη ασφατική στρώση σε αντίθεση με τις διατομές των LVR που αποτελούν συνήθως χωμάτινα οδοστρώματα.

Γενικά οι ορισμοί που περιγράφουν τα «υψηλής κυκλοφορίας οδοστρώματα» και τα «χαμηλής κυκλοφορίας οδοστρώματα» δεν είναι αυστηροί. Οι περισσότεροι συγγραφείς ορίζουν ως οδοστρώματα χαμηλής κυκλοφορίας αυτά με κυκλοφορία λιγότερη από 300 έως 400 οχήματα την ημέρα και λιγότερο από 1 όχημα το λεπτό κατά την ώρα αιχμής. Συνεπώς, ως οδοστρώματα υψηλής κυκλοφορίας, ορίζουν κάθε οδόστρωμα με επίπεδα κυκλοφορίας μεγαλύτερα αυτού του εύρους. Μια τυπική διατομή ενός οδοστρώματος υψηλής κυκλοφορίας παρουσιάζεται στην εικόνα 2.8.



Εικόνα 2. 8 Τυπική διατομή οδοστρώματος υψηλής κυκλοφορίας

Όπως γίνεται φανερό, η διατομή ενός οδοστρώματος υψηλής κυκλοφορίας θυμίζει μία συνηθισμένη διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος που αποτελείται από:

- Τις ασφαλτικές στρώσεις, πάχους μεγαλύτερου των 40mm (Dawson, 2007) και κατασκευάζονται, όπως και στα εύκαμπτα οδοστρώματα από στρώσεις ασφαλτομίγματος, οι οποίες διακρίνονται στην ανώτερη στρώση και στην συνδετήρια στρώση.
- Τη στρώση βάσης, που κατασκευάζεται από συμπυκνωμένο ασύνδετο αμμοχάλικο.

- Τη στρώση υπόβασης, που κατασκευάζεται από συμπυκνωμένο ασύνδετο υλικό, θραυστό ή φυσικό.
- Συμπυκνωμένο υπέδαφος ή διαφορετικά στρώση έδρασης.

Τα οδοστρώματα χαμηλής κυκλοφορίας, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, έχουν σχετικά χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο (μέση ημερήσια κυκλοφορία μικρότερη από 400 οχήματα ανά ημέρα), χαμηλές ταχύτητες σχεδιασμού (συνήθως λιγότερο από 80 χιλιόμετρα ανά ώρα) και αντίστοιχη γεωμετρία. Οι περισσότεροι δρόμοι σε αγροτικές περιοχές αποτελούνται από οδοστρώματα χαμηλής κυκλοφορίας όπως φαίνεται και από την εικόνα 2.9.

Παρέχουν συνδέσεις από σπίτια και αγροκτήματα με πιο κεντρικές περιοχές, πρώτες ύλες από δάση, ορυχεία έως μύλους. Παρέχουν πρόσβαση του κοινού σε βασικές ψυχαγωγικές εγκαταστάσεις και στην ύπαιθρο και τέλος, αποτελούν οδούς προσωρινής χρήσης για έργα σε δυσπρόσιτες περιοχές, όπως στην περίπτωση των ανεμογεννητριών. Λόγω των ανωτέρω διαπιστώνουμε, ότι η χρήση των οδοστρωμάτων αυτών μπορεί να γίνει συχνή για μικρού έως μεσαίου μεγέθους οχήματα αλλά και για βαρέα οχήματα.

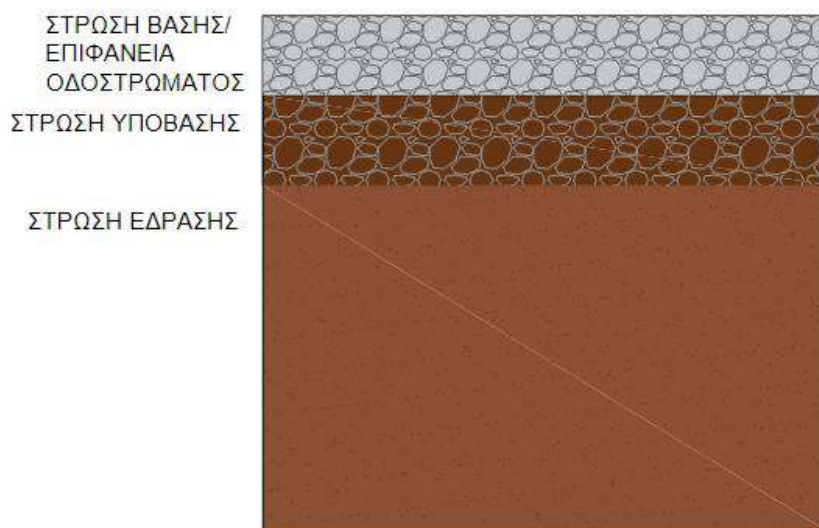


Εικόνα 2. 9 Οδόστρωμα χαμηλής κυκλοφορίας
Πηγή: Keller & Sherar, 2003

Με τη συνεχή αύξηση του μεγέθους και του αριθμού των οχημάτων και κυρίως των βαρέων οχημάτων που χρησιμοποιούν οδοστρώματα χαμηλής κυκλοφορίας, η κατασκευή και η συντήρηση αυτών των οδοστρώματων με οικονομικό τρόπο, με ανέξοδα υλικά και τεχνικές, έγινε απαραίτητη. Αν και οι όγκοι κυκλοφορίας σε αυτούς τους δρόμους παραμένουν σχετικά χαμηλοί σε σύγκριση με τους υπεραστικούς αυτοκινητόδρομους, τα φορτία των οχημάτων συνήθως απαιτούν ικανότητες σχετικά υψηλών επιδόσεων.

Τα οδοστρώματα χαμηλής κυκλοφορίας έχουν παρόμοια δομή με εκείνη των οδοστρώματων υψηλής κυκλοφορίας, εκτός από τις δεσμευμένες στρώσεις που συνήθως για τα οδοστρώματα υψηλής κυκλοφορίας έχουν μεγαλύτερο πάχος, και συνεπώς υψηλότερο κόστος. Στην υπόλοιπη δομή τους αποτελούνται, από στρώσεις ασύνδετων υλικών, που είναι παραδοσιακά οι πιο κατάλληλες στρώσεις, έτσι ώστε να κατανέμεται το φορτίο ομοιόμορφα και μειωμένα στη στρώση έδρασης.

Για τους παραπάνω λόγους, παρότι ένα οδόστρωμα χαμηλής κυκλοφορίας δεν καλύπτεται από ασφατική επίστρωση ή υπάρχει μια πολύ μικρού πάχους ασφατική στρώση, η διατομή αυτού ακολουθεί συγκεκριμένα πρότυπα. Αποτελείται από διάφορες στρώσεις με σκοπό την καλύτερη μεταφορά των φορτίων στη στρώση έδρασης, δηλαδή την αύξηση της φέρουσας ικανότητας αυτού και συνεπώς την βελτίωση της εξυπηρετικότητας. Μια τυπική διατομή ενός οδοστρώματος χαμηλής κυκλοφορίας παρουσιάζεται στην εικόνα 2.10.



Εικόνα 2. 10 Τυπική διατομή οδοστρώματος χαμηλής κυκλοφορίας

Μία τυπική διατομή οδοστρώματος χαμηλής κυκλοφορίας διαφέρει με αυτή ενός οδοστρώματος υψηλής κυκλοφορίας κυρίως στις ασφατικές στρώσεις και αποτελείται από:

- Τη στρώση βάσης, που κατασκευάζεται είτε από θραυστή πέτρα, χαλίκι ή χαλικιώδη εδάφη είτε από άμμο ή αμμώδεις αργίλους σταθεροποιημένους με τσιμέντο, ασβέστη ή πίσσα.
- Τη στρώση υπόβασης, που κατασκευάζεται, από υλικά που έχουν μικρότερη αντοχή και στερεότητα από εκείνα που χρησιμοποιούνται στη στρώση βάσης, δηλαδή χρησιμοποιούνται φυσικά ασύνδετα υλικά (μη θραυστά).
- Τη στρώση έδρασης, που δέχεται τελικά το φορτίο και αποτελείται από φυσικό εδαφικό υλικό μετά από συμπύκνωση.

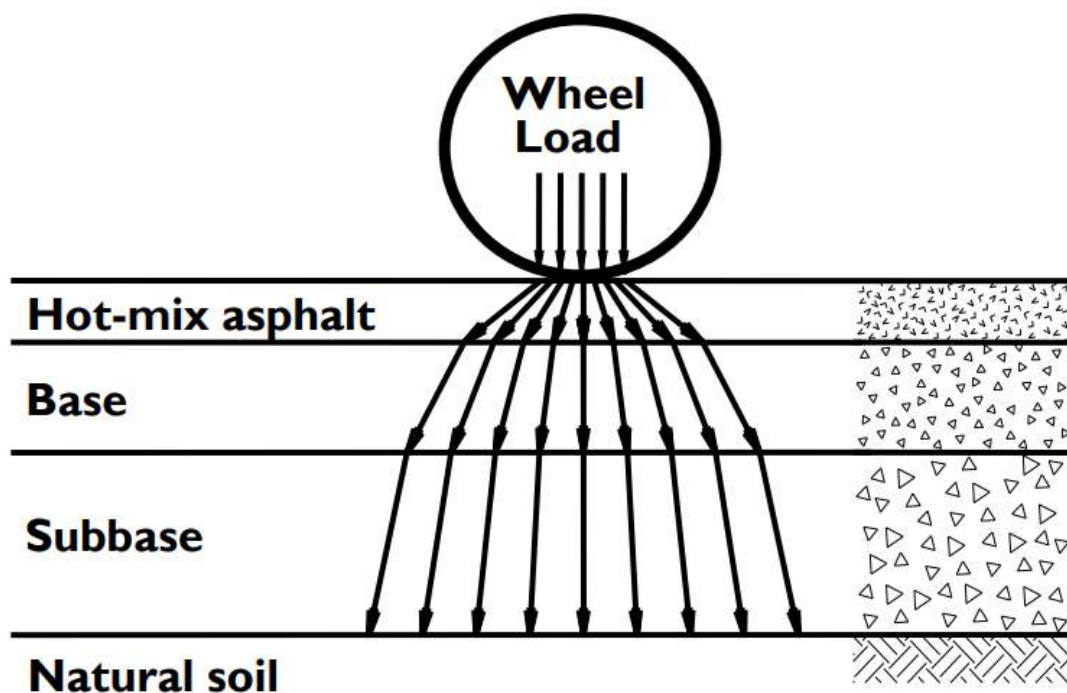
Σημειώνεται ότι τα οδοστρώματα LVR, με λεπτή ασφατική επίστρωση ή χωρίς, γενικά περιλαμβάνουν ένα μεγάλο μήκος οδικών δικτύων σε όλο τον κόσμο, ειδικά στις αναπτυσσόμενες χώρες, και ως εκ τούτου απαιτούν προσοχή. Συγκεκριμένα, στο Ηνωμένο Βασίλειο τα οδοστρώματα χαμηλής κυκλοφορίας αντιπροσωπεύουν το 95% του οδικού δικτύου (British Road Federation, 1999).

3. ΤΑΣΕΙΣ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

3.1. ΓΕΝΙΚΑ

Ο ρόλος της εδαφομηχανικής είναι η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο τα εδάφη και τα ασύνδετα υλικά ανταποκρίνονται στην επαναλαμβανόμενη φόρτιση και η εφαρμογή αυτής της γνώσης στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων. Η εφαρμογή αυτή επιτυγχάνεται με το κατάλληλο θεωρητικό υπόβαθρο και την κατανόηση των μηχανισμών αστοχίας.

Τα οδοστρώματα, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, αποτελούν πολύστρωτες δομές. Οι εκάστοτε στρώσεις αποτελούνται είτε από συνδεδεμένα υλικά (ασφαλτικές στρώσεις) είτε από ασύνδετα υλικά (κατώτερες στρώσεις). Το φορτίο του τροχού στην επιφάνεια μεταφέρεται μέσω αυτών των ενδιάμεσων στρώσεων στη στρώση έδρασης (φυσικό έδαφος), όπου γίνεται η παραλαβή τελικά του φορτίου, όπως φανερώνεται και στην εικόνα 3.1.

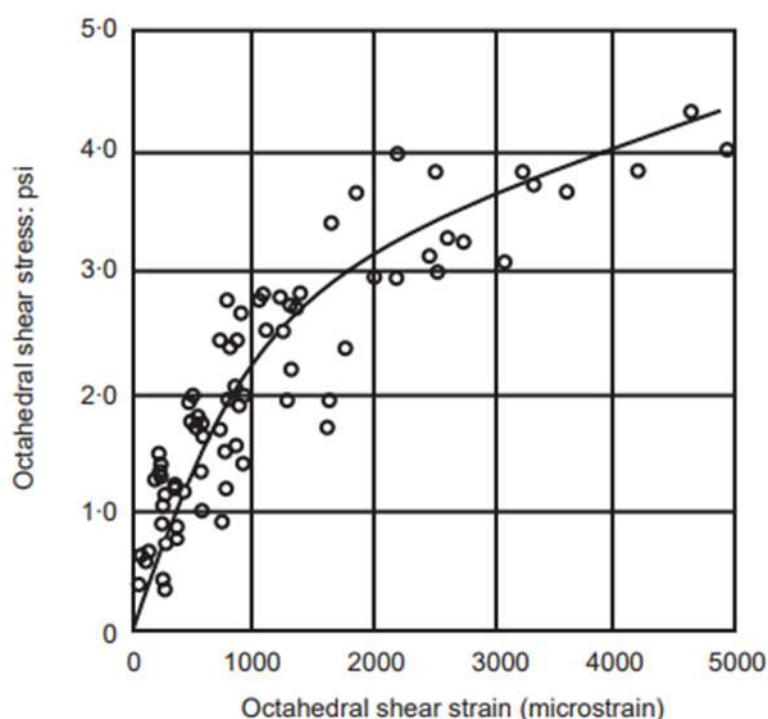


Εικόνα 3. 1 Κατανομή του κυκλικού φορτίου στο οδόστρωμα
Πηγή: Faizan, 2012

Η συμπεριφορά των στρώσεων βάσης/υπόβασης και της στρώσης έδρασης των οδοστρωμάτων χαρακτηρίζεται ως μη-γραμμική, η φόρτιση τους από τον τροχό είναι

παροδική, η στρώση έδρασης και οι στρώσεις των ασύνδετων υλικών έχουν αξιοσημείωτα μη-γραμμικές σχέσεις τάσεων παραμορφώσεων, οι οποίες επηρεάζονται από μια σειρά μεταβλητών, και οι ασφατικές στρώσεις έχουν ιδιότητες που είναι ευαίσθητες στον ρυθμό φόρτισης και στη θερμοκρασία.

Τα ασύνδετα υλικά φέρονται διαφορετικά από τα εδάφη στα φυσικά χαρακτηριστικά τους και επίσης στην απόκριση τους στο εφαρμοζόμενο κυκλικό φορτίο. Τα ασύνδετα υλικά είναι ένα συγκρότημα μεγάλου αριθμού μεμονωμένων σωματιδίων με διαφορετικά σχήματα και μεγέθη. Αυτά τα υλικά φέρουν μόνο μια πολύ μικρή ποσότητα εφελκυσμού (Wenzel, 1998). Με τα παραπάνω διαπιστώνουμε, ότι οι στρώσεις των οδοστρωμάτων αποτελούν ασυνεχή μέσα με μη-γραμμική συμπεριφορά, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα η εφαρμογή της θεωρίας της ελαστικότητας να μην οδηγεί στα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Η μη-γραμμικότητα φαίνεται και στο ακόλουθο διάγραμμα (εικόνα 3.2) τάσεων παραμορφώσεων μιας αργίλου, της οποίας τα δεδομένα έχουν προκύψει από επιτόπιες μετρήσεις.

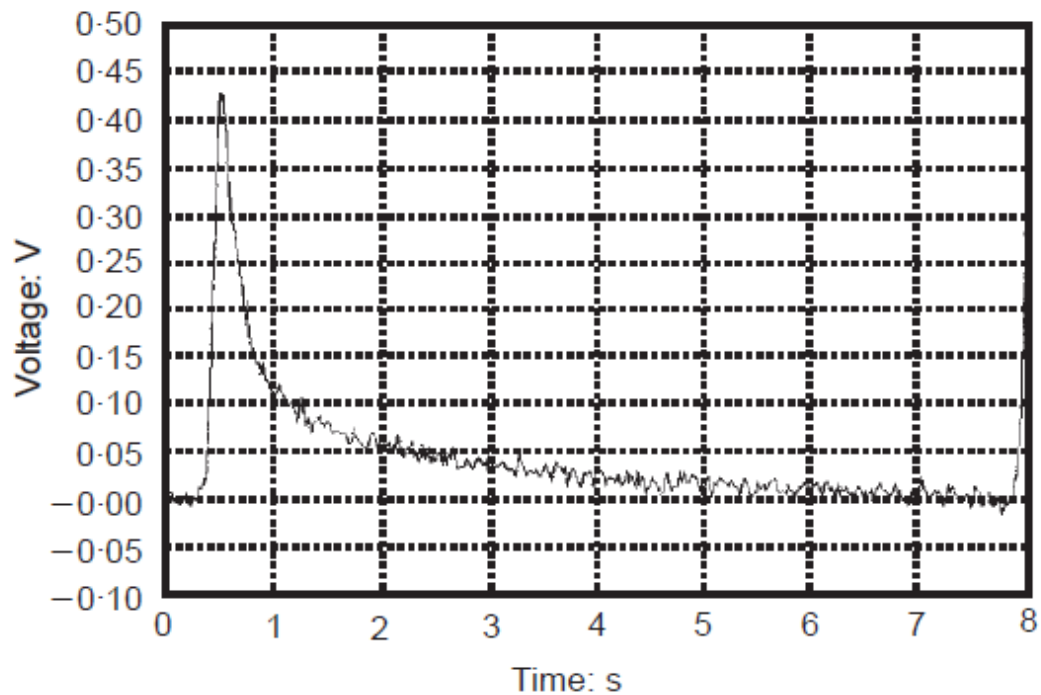


Εικόνα 3. 2 Μη-γραμμική σχέση τάσεων παραμορφώσεων αργίλου
Πηγή: Brown & Bush, 1972

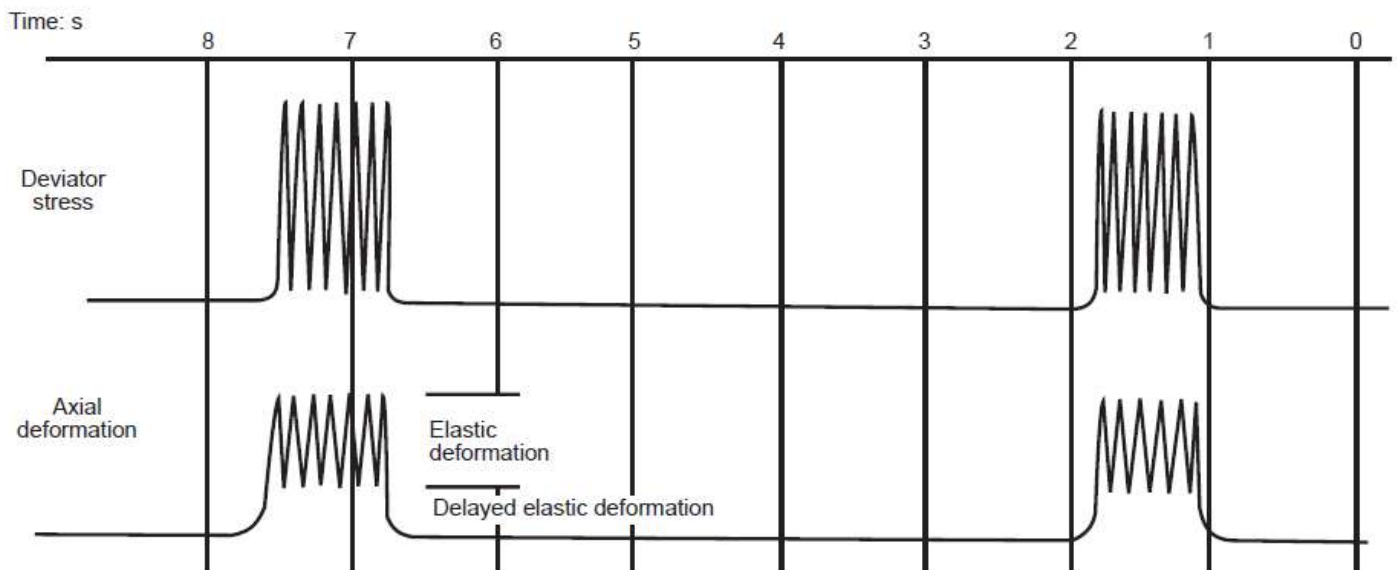
Ωστόσο, η θεωρία της ελαστικότητας έχει εκτεταμένη εφαρμογή στην ανάλυση των πολυστρωματικών συστημάτων οδοστρώσις. Η εξέλιξη του θεωρητικού υπόβαθρου, της τεχνολογίας και η μεγαλύτερη ευχέρεια που παρέχεται, για τον προσδιορισμό των πραγματικών ιδιοτήτων των υλικών των οδοστρωμάτων, έκαναν τη θεωρία της

ελαστικότητας ακόμη πιο χρήσιμη. Ο Burmister (1943) ανέπτυξε τις ουσιώδεις εξισώσεις και μετά τα πρώτα σύνολα των πινακοποιημένων λύσεων (π.χ., Now και Fox, 1951), αναπτύχθηκαν και διάφορα προγράμματα ηλεκτρονικών υπολογιστών για να βοηθήσουν στην επίτευξη αποτελεσμάτων σε μια πιο βολική μορφή.

Πέραν όλων αυτών, η βασική αιτιολόγηση για τη χρήση της θεωρίας της ελαστικότητας είναι, ότι κάτω από μια εφαρμογή σημειακού φορτίου, τα περισσότερα οδοστρώματα θα αποκρίνονται με ελαστικό τρόπο. Οποιοσδήποτε πλαστικές παραμορφώσεις θα είναι μικρές σε σχέση με τις αντίστοιχες ελαστικές. Αυτό φαίνεται και στις εικόνες 3.3, 3.4 όπου περιγράφεται αντίστοιχα η μεταβολή της κατακόρυφης παραμόρφωσης V (ε_v) με το χρόνο s στο εσωτερικό ενός οδοστρώματος, με ασφαλική επικάλυψη, ύστερα από φόρτιση τροχού στην επιφάνεια.



Εικόνα 3. 3 Μεταβολή κατακόρυφης παραμόρφωσης με το χρόνο
Πηγή: Brown, 1996



Εικόνα 3. 4 Απόκριση δοκιμίου αργίλου αστράγγιστη επαναλαμβανόμενη φόρτιση
Πηγή: Hyde, 1974

Από τα διαγράμματα των εικόνων 3.3 και 3.4 παρατηρούμε, ότι υπάρχει καθυστερημένη ελαστική απόκριση, αλλά δεν υπάρχει μόνιμη παραμόρφωση. Με όλα τα παραπάνω διαπιστώνουμε, ότι ενώ τα οδοστρώματα δεν φέρονται απόλυτα ελαστικά, για την σχεδιάσή τους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η θεωρία της ελαστικότητας. Τέλος, η εγκυρότητα της χρήσης

της γραμμικής ελαστικής θεωρίας ήταν και ο κύριος στόχος πολλών πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν κατά την διάρκεια των δεκαετιών 1960 - 1970.

3.2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΗΣ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

3.2.1. ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΑΣΥΝΕΧΟΥΣ ΜΕΣΟΥ

Τα οδοστρώματα, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3.1, φέρονται ως ασυνεχή μέσα. Τα φορτία που παραλαμβάνουν οι στρώσεις των οδοστρωμάτων μεταδίδονται στο εσωτερικό του με τους εξής μηχανισμούς:

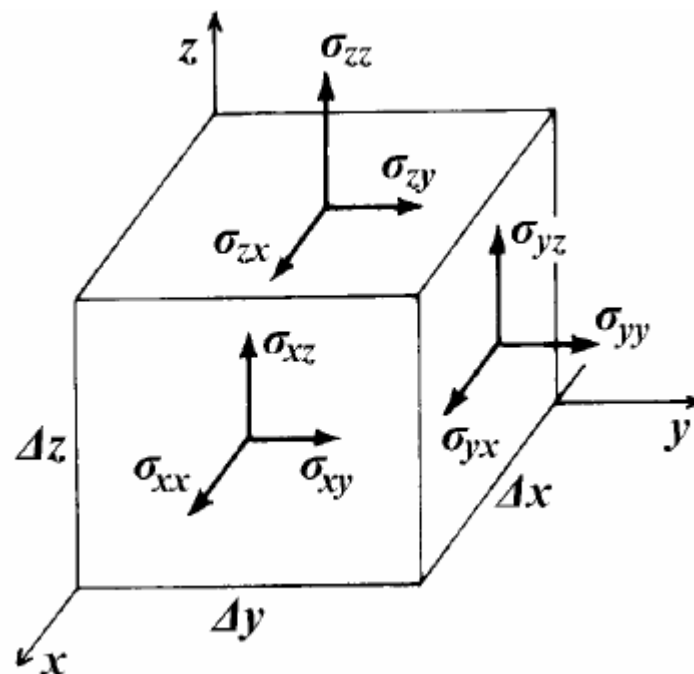
1. Με τη μηχανική επαφή μεταξύ των κόκκων. Η επαφή μεταξύ δύο κόκκων μπορεί να μεταδώσει μία ορθή (θλιπτική) και μία διατμητική δύναμη, με σημείο εφαρμογής το σημείο επαφής των κόκκων. Η μηχανική επαφή αποτελεί τον κύριο τρόπο μετάδοσης δυνάμεων στα ασύνδετα υλικά.
2. Στα συνεκτικά εδαφικά υλικά, που ενδεχομένως αποτελούν τη στρώση έδρασης, οι δυνάμεις μεταδίδονται και με τους εξής τρόπους:
 - i. Με την ηλεκτρική άπωση των διπλών στρώσεων.
 - ii. Με την ηλεκτρική έλξη μεταξύ ετερόνυμων φορτισμένων σημείων των αργιλικών πλακιδίων (αρνητικά φορτισμένη πλευρική επιφάνεια προς θετικά φορτισμένο σύνορο).
 - iii. Με τις ηλεκτροχημικές δυνάμεις Van der Waals, καθώς και άλλες δυνάμεις (έλξη κατά Bohr κλπ.).

Το σύνολο των ανωτέρω, παρά την πρόσθετη πολυπλοκότητα, μπορεί να καταλήξει στον ορισμό τάσεων ανάλογων με τις τάσεις στο εσωτερικό ενός συνεχούς μέσου, θεωρώντας στο εσωτερικό του οδοστρώματος ένα σημείο M και μία "μικρή" επίπεδη επιφάνεια ΔS , που διέρχεται απ' αυτό. Η επιφάνεια αυτή θα πρέπει να είναι αρκετά μικρή σε σχέση με την τυπική διάσταση της διατομής του οδοστρώματος αλλά και ταυτόχρονα αρκετά μεγάλη ως προς το τυπικό μέγεθος των κόκκων. Η επιφάνεια ΔS χωρίζει το οδόστρωμα σε δύο τμήματα, τα οποία ασκούν το ένα στο άλλο δυνάμεις, η συνισταμένη των οποίων αποτελεί ένα διάνυσμα $\Delta \vec{F}$. Μπορεί να θεωρηθεί ότι, επειδή η επιφάνεια ΔS είναι αρκετά μεγάλη ως προς το μέγεθος των κόκκων, η συνάρτηση του διανύσματος αυτού είναι συνεχής ως προς τις συντεταγμένες x, y, z . Κατά συνέπεια, ορίζεται και το όριο: $\vec{f} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{F}}{\Delta S}$ που δίνει

την ανηγμένη δύναμη κατά τρόπο ανάλογο με ένα συνεχές μέσο. Επομένως ο τανυστής των τάσεων μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\sigma \equiv \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Έτσι, τα υλικά των οδοστρωμάτων μπορούν να αντιμετωπιστούν ως συνεχή μέσα με την παρατήρηση, ότι με τον όρο τάση αναφερόμαστε στη μακροσκοπική τάση, δηλαδή τη δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας αρκετά μεγάλης σε σχέση με το μέγεθος των κόκκων. Στην εικόνα 3.5 παρουσιάζονται οι συνιστώσες του τανυστή των τάσεων.



Εικόνα 3. 5 Συνιστώσες των τάσεων
Πηγή: Καθβαδάς, 2009

Οι συνιστώσες του τανυστή των τάσεων εκφράζονται στα τρία επίπεδα που είναι κάθετα στους καρτεσιανούς άξονες και οι συνιστώσες ορίζονται ως εξής: **ορθές** συνιστώσες κάθετες στα επίπεδα και **διατμητικές** συνιστώσες κείνται επί των επιπέδων.

3.2.2. ΕΠΙΠΕΔΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ – ΣΧΕΣΕΙΣ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

Η επίπεδη παραμόρφωση αναπτύσσεται συχνά στα έργα μηχανικού, και αναφέρεται σε περιπτώσεις στις οποίες οι συνιστώσες των τάσεων δεν μεταβάλλονται κατά τη διεύθυνση ενός άξονα (π.χ. του y). Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε επιμήκεις κατασκευές όπως

αυτή των οδοστρωμάτων. Η μη μεταβολή μιας εκ των συνιστώσεων των τάσεων οδηγεί στο μηδενισμό των διατμητικών τάσεων $\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = \sigma_{zy} = \sigma_{yz} = 0$ και επιπλέον στην ικανότητα προσδιορισμού της τάσης σ_{yy} από τους κινηματικούς περιορισμούς του προβλήματος. Έτσι, πλέον οι τάσεις που μας απασχολούν είναι οι σ_{xx} , σ_{zz} , και $\sigma_{zx} = \sigma_{xz}$ και ο τανυστής των τάσεων γίνεται:

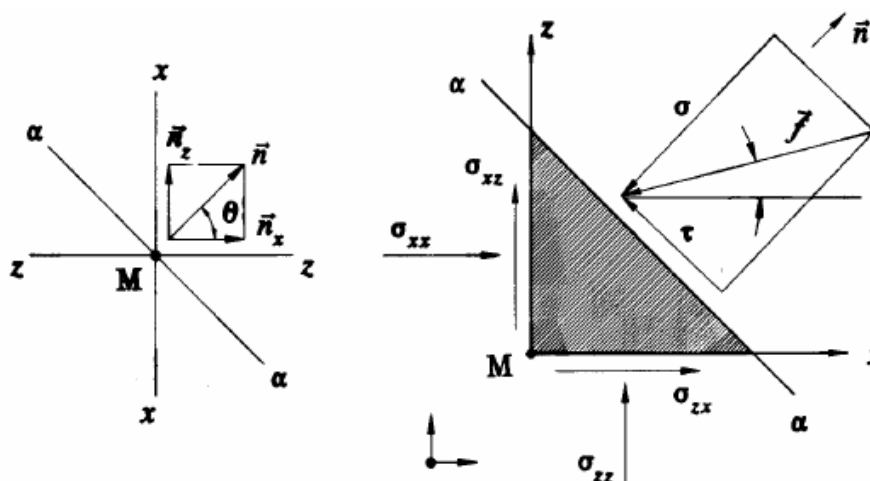
$$\sigma \equiv \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Έτσι, πλέον η ανηγμένη δύναμη, σε τυχόν επίπεδο παράλληλο στον άξονα y , αναλύεται σε δύο συνιστώσες, στην ορθή (κάθετη στο επίπεδο) συνιστώσα (σ) και στη διατμητική (επί του επιπέδου) συνιστώσα (τ), που δίνονται από τις σχέσεις:

$$\sigma = \sigma_{xx} (\cos \theta)^2 + \sigma_{zz} (\sin \theta)^2 + 2\sigma_{xz} \sin \theta \cos \theta \quad (3.3)$$

$$\tau = (\sigma_{xx} - \sigma_{zz}) \sin \theta \cos \theta + \sigma_{xz} ((\cos \theta)^2 - (\sin \theta)^2) \quad (3.4)$$

Οι τάσεις στο κεκλιμένο επίπεδο παρουσιάζονται στην ακόλουθη εικόνα 3.6:

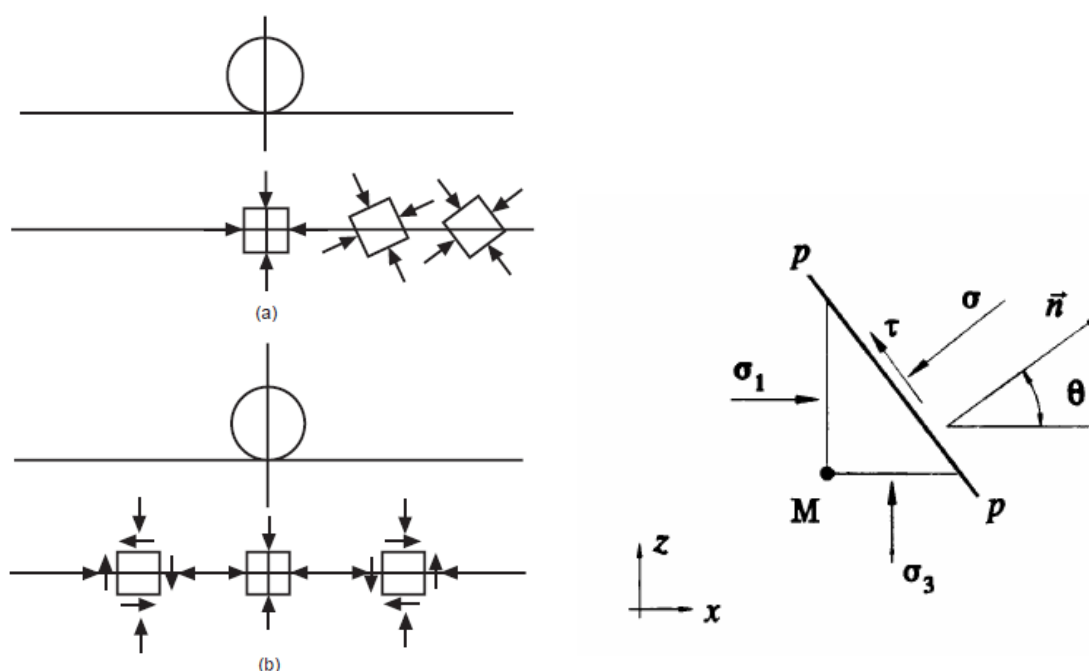


Εικόνα 3. 6 Τάσεις σε τυχόν κεκλιμένο επίπεδο
Πηγή: Καθβαδάς, 2009

Όπως έχουμε αναφέρει ήδη η διέλευση ενός φορτίου τροχού πάνω από ένα οδόστρωμα παράγει τάσεις και παραμορφώσεις σε όλες τις υποκείμενες στρώσεις. Οι τάσεις αυτές σε ένα σημείο εντός της μάζας του εδάφους προσδιορίζονται γενικά συναρτήσει του προσανατολισμού του επιπέδου που επιλέγεται για τον ορισμό των κυρίων τάσεων, ενώ οι παραμορφώσεις προσδιορίζονται συναρτήσει αυτών των τάσεων. Μπορεί να αποδειχθεί ότι, για οποιαδήποτε γενική κατάσταση καταπόνησης, σε οποιοδήποτε σημείο σε ένα σώμα, υπάρχουν τρία κάθετα επίπεδα στα οποία δεν υφίστανται τάσεις διατμήσεως, όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 3.7. Οι προκύπτουσες τάσεις σε αυτά τα επίπεδα ονομάζονται

κύριες τάσεις και συμβολίζονται σ_1 , σ_2 και σ_3 . Οι τάσεις αυτές είναι φυσικές αναλλοίωτες και ανεξάρτητες από την επιλογή του συντεταγμένου συστήματος (x,y,z).

Συγκεκριμένα, για την περίπτωση της επίπεδης παραμόρφωσης ή της μονοδιάστατης συμπίεσης, δηλαδή της φόρτισης της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος επιβάλλεται ορθή παραμόρφωση στον κατακόρυφο άξονα (z) με ταυτόχρονη παρεμπόδιση των ορθών παραμορφώσεων στους άξονες (x, y) με αποτέλεσμα η κύρια τάση σ_2 που ταυτίζεται με την σ_{yy} να μην μας απασχολεί άμεσα. Έτσι, και οι ακόλουθοι καταστατικοί νόμοι για την περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών των οδοστρωμάτων θα χρησιμοποιούν τις κύριες τάσεις σ_1 και σ_3 (με $\sigma_1 = \sigma_{xx}$ $\sigma_3 = \sigma_{zz}$).



Εικόνα 3. 7 Κύρια επίπεδα, κάτω από φορτίο τροχού
Πηγή: Brito, 2011

Ακολούθως, προκειμένου να απλουστευθεί η ανάλυση της τάσης και της καταπόνησης, οι εφαρμοζόμενες τάσεις μπορούν να χωριστούν σε **εκτροπική τάση q** και **μέση τάση p**. Ως αποτέλεσμα αυτού, η γενική κατάσταση των ορθών τάσεων σε ένα σύστημα μπορεί να δοθεί από τις ακόλουθες εκφράσεις (Schofield & Wroth, 1968):

$$p = \frac{1}{3(\sigma_1 + 2\sigma_3)} \quad (3.5)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (3.6)$$

Τέλος, για την περιγραφή της διατμητικής τάσης χρησιμοποιείται η έκφραση **οκταεδρική διατμητική τάση** τ_{oct} που δίνεται από την εξής σχέση:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad (3.7)$$

Η μηχανική συμπεριφορά των υλικών των οδοστρωμάτων εκφράζεται ποσοτικά με τους **καταστατικούς νόμους συμπεριφοράς**, οι οποίοι καθορίζουν τις σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων, δηλαδή τα μεγέθη των τάσεων που αναπτύσσονται κατά την παραμόρφωση του υλικού. Οι καταστατικοί νόμοι δεν είναι φυσικοί νόμοι, δεν έχουν δηλαδή τη γενική εφαρμογή των φυσικών νόμων, αλλά είναι συσχετίσεις που βασίζονται είτε στα θερμοδυναμικά αξιώματα (με κάποιες πρόσθετες παραδοχές), όπως π.χ. ο νόμος της γραμμικής ελαστικότητας, είτε σε φαινομενολογικές θεωρήσεις που προκύπτουν από πειραματικές κυρίως μετρήσεις της συμπεριφοράς των υλικών.

Ο απλούστερος καταστατικός νόμος συμπεριφοράς των εδαφών περιγράφεται από τις σχέσεις της γραμμικής ισότροπης ελαστικότητας. Κατά τη θεωρία αυτή, οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων εξαρτώνται από δύο θεμελιώδεις παραμέτρους (ιδιότητες του υλικού), το μέτρο ελαστικότητας (E) και το λόγο του Poisson (ν). Οι καταστατικές σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων της γραμμικής ισότροπης ελαστικότητας έχουν την ακόλουθη μορφή:

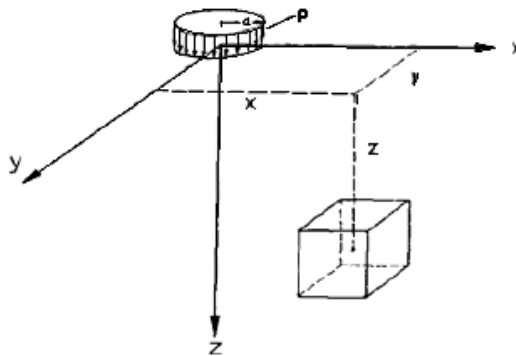
$$\Delta \varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} [\Delta \sigma'_{xx} - \nu (\Delta \sigma'_{yy} + \Delta \sigma'_{zz})] \quad (3.8)$$

$$\Delta \varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} [\Delta \sigma'_{yy} - \nu (\Delta \sigma'_{zz} + \Delta \sigma'_{xx})] \quad (3.9)$$

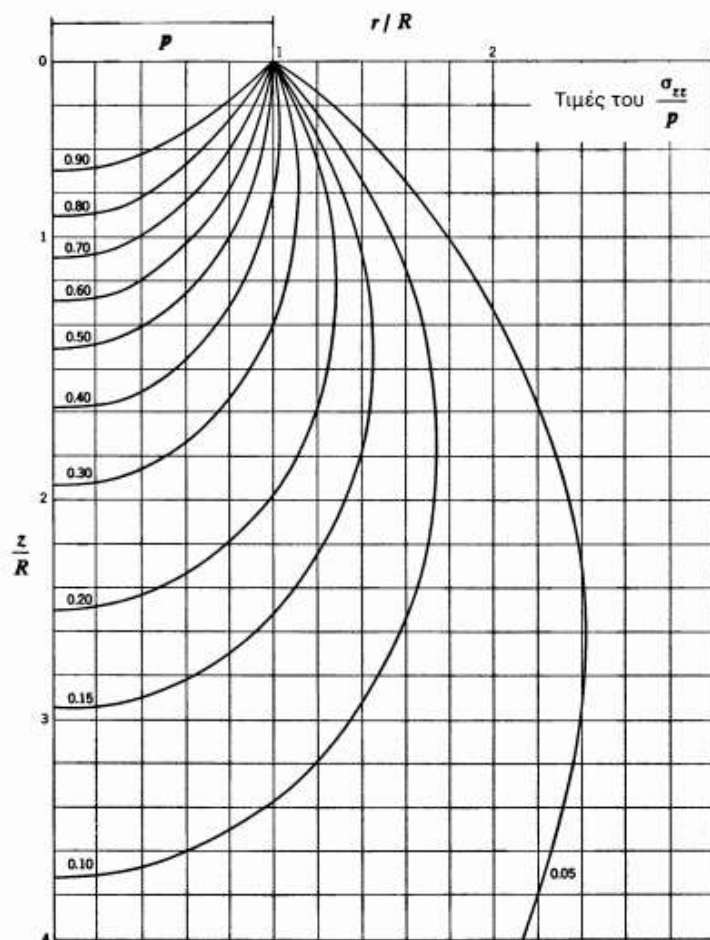
$$\Delta \varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} [\Delta \sigma'_{zz} - \nu (\Delta \sigma'_{xx} + \Delta \sigma'_{yy})] \quad (3.10)$$

Λόγω της υπερστατικότητας των εδαφικών σχηματισμών και των ασύνδετων υλικών, ο υπολογισμός των τάσεων που αναπτύσσονται στο οδόστρωμα συνήθως δεν είναι εφικτός μόνο με τη θεώρηση της στατικής ισορροπίας του εδάφους (γεωστατικές τάσεις). Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση των σχέσεων τάσεων-παραμορφώσεων (δηλαδή του καταστατικού νόμου συμπεριφοράς του υλικού). Επειδή όμως, όπως έχουμε αναφέρει, η συμπεριφορά των υλικών των οδοστρωμάτων είναι μη-γραμμική είναι απαραίτητο να γίνουν απλοποιητικές παραδοχές όσον αφορά τη μορφή των σχέσεων τάσεων-παραμορφώσεων, η απλούστερη από τις οποίες είναι η παραδοχή γραμμικής και ισότροπης συμπεριφοράς των υλικών.

Όταν ασκείται **ορθή πίεση με κυκλική επιφάνεια** στο οδόστρωμα (φορτίο τροχού), με φορτίο p και κάτοψης ακτίνας R , όπως παρουσιάζεται και στην εικόνα 3.8, για τις σχέσεις τάσεων - παραμορφώσεων δεν υπάρχει λύση με κλειστή αναλυτική μορφή, αλλά η αριθμητική επίλυση καταλήγει στις αδιάστατες κατανομές της πρόσθετης κατακόρυφης τάσης (σ_z), όπως φαίνονται στην εικόνα 3.9.



Εικόνα 3. 8 Ορθή πίεση με κυκλική επιφάνεια



Εικόνα 3. 9 Κατανομή τάσεων κάτω από κυκλικό φορτίο
Πηγή: Καθβαδάς, 2009

Η κατανομή των τάσεων σ_{zz} και σ_{rr} κατά μήκος του άξονα z (δηλαδή για $r = 0$) δίνεται από τις σχέσεις:

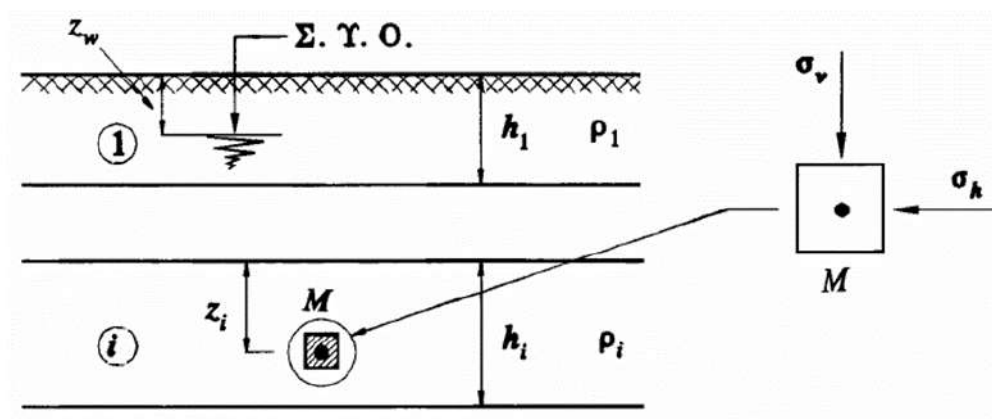
$$\sigma_z = p \left(1 - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{a}{z} \right)^2 \right)^{1,5}} \right) \quad (3.11)$$

$$\sigma_r = p \left(\frac{1+2\nu}{2} - \frac{1+\nu}{\left(1 + \left(\frac{a}{z} \right)^2 \right)^{0,5}} + \frac{1}{2} \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{a}{z} \right)^2 \right)^{1,5}} \right) \quad (3.12)$$

Οι σχέσεις αυτές χρησιμοποιούνται γενικά στον σχεδιασμό των οδοστρωμάτων αλλά και συγκεκριμένα στην παρούσα εργασία κατά την διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας.

3.2.3. ΓΕΩΣΤΑΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ

Ένα στοιχείο του εδάφους ή των ασύνδετων υλικών (σημείο) σε κάποιο βάθος κάτω από την επιφάνεια του οδοστρώματος υπόκειται σε ένταση από τα γειτονικά του στοιχεία. Σε μια τυχούσα επιφάνεια που διέρχεται από το σημείο αναπτύσσονται γενικά ορθές και διατμητικές τάσεις, τα μεγέθη των οποίων στις περισσότερες περιπτώσεις είναι δύσκολο να προσδιορισθούν χωρίς απλοποιητικές παραδοχές και αναλυτικούς υπολογισμούς. Σε μερικές όμως περιπτώσεις, ορισμένες συνιστώσες των τάσεων που αναπτύσσονται στο έδαφος μπορούν να υπολογισθούν με τη θεώρηση μόνο της στερεοστατικής ισορροπίας. Μια τέτοια περίπτωση είναι η γεωστατική κατάσταση που αναφέρεται σε έδαφος με οριζόντια επιφάνεια μεγάλης έκτασης και μια ή περισσότερες οριζόντιες στρώσεις, όπως στη περίπτωση της εικόνας 3.10 που θα μπορούσε να αποτελεί μια τυπική διατομή οδοστρώματος.



Εικόνα 3. 10 Γεωστατικές τάσεις

Πηγή: Καθβαδάς, 2009

Σε ένα τυχαίο σημείο M στο εσωτερικό του οδοστρώματος, με βάση τα ανωτέρω, ορίζεται η **οριζόντια θλιπτική τάση σ_h** και η **κατακόρυφη τάση σ_v** που αποτελούν τις **γεωστατικές τάσεις** του οδοστρώματος. Αυτές εξαρτώνται από το ειδικό βάρος της εκάστοτε στρώσης και το βάθος από την επιφάνεια του σημείου M. Επιπλέον, επειδή η τάση η οποία εκφράζει το σκελετό του εδαφικού υλικού, είναι η **ενεργός τάση**, σημαντικό ρόλο παίζει και η πίεση των πόρων u . Ως γνωστών ένα εδαφικό δοκίμιο αποτελείται από νερό, κενό και κόκκους. Έτσι ως **ενεργές τάσεις (σ')** ορίζονται αυτές οι οποίες αναλαμβάνονται αποκλειστικά από τους κόκκους και όχι από όλο το δοκίμιο. Δηλαδή, σε αυτές δεν συνυπολογίζονται οι τάσεις που αναλαμβάνει το νερό των πόρων (πίεση πόρων u) και προκύπτουν από την σχέση $\sigma'_v = \sigma_v - u$.

Σημαντική παράμετρος στον υπολογισμό των γεωστατικών τάσεων αποτελεί ο **συντελεστής οριζόντιας ώθησης**. Μεγάλος αριθμός εργαστηριακών μετρήσεων αποδεικνύει ότι ο λόγος σ'_h / σ'_v παραμένει σταθερός κατά τη φόρτιση και λαμβάνει τιμές μεταξύ 0.40 και 0.60 για διαφόρους τύπους εδαφών, όπου οι μεγαλύτερες τιμές αντιστοιχούν στα αργιλικά υλικά και οι μικρότερες στα αμμώδη. Ο λόγος αυτός συμβολίζεται με:

$$K_o \equiv \sigma'_h / \sigma'_v \quad (3.13)$$

και ονομάζεται συντελεστής οριζόντιας ώθησης με παρεμπόδιση της πλευρικής παραμόρφωσης. Σύμφωνα με τη θεωρία της γραμμικής ισότροπης ελαστικότητας, η τιμή του K_o ισούται με:

$$K_o = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (3.14)$$

Έτσι έχοντας υπολογίσει τις κατακόρυφες γεωστατικές τάσεις υπολογίζονται και οι οριζόντιες μέσω του συντελεστή οριζόντιας ώθησης και είναι $\sigma'_h = K_o \sigma'_v$.

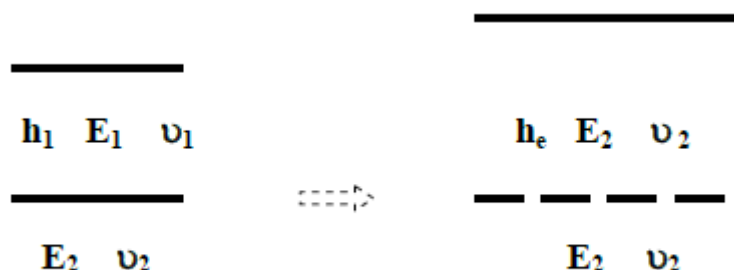
3.3. ΘΕΩΡΙΑ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Οι καταστατικοί νόμοι συμπεριφοράς των υλικών βασίζονται στη γραμμική ελαστική θεωρία και απευθύνονται σε ομοιογενές ισότροπο ημίκωρο. Ως γνωστόν τα οδοστρώματα αποτελούν πολυστρωματικές δομές με διαφορετικά υλικά ανά στρώση. Για την αντιμετώπιση αυτής της διαφοροποίησης ο Odemark ανέπτυξε μια προσεγγιστική μέθοδο για τον υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων στα συστήματα οδοστρωμάτων πολλών στρώσεων μετασχηματίζοντας αυτή τη δομή σε ένα ισοδύναμο σύστημα μίας στρώσης με ένα ισοδύναμο πάχος.

Αυτή η μέθοδος είναι γνωστή ως **μέθοδος ισοδύναμων στρώσεων** ή **μέθοδος του Odemark**. Η μέθοδος αυτή υποθέτει ότι οι τάσεις και οι παραμορφώσεις κάτω από μία στρώση εξαρτώνται μόνο από την ακαμψία αυτού του στρώματος. Αν το πάχος (h), το μέτρο ελαστικότητας (E) και ο λόγος Poisson (ν) μίας στρώσης αλλάξουν, αλλά η ακαμψία παραμένει αμετάβλητη, οι τάσεις και οι παραμορφώσεις κάτω από τη στρώση αυτή θα πρέπει επίσης να παραμείνουν (σχετικά) αμετάβλητες. Σύμφωνα με τον Odemark, η ακαμψία μίας στρώσης οδοστρώματος είναι ανάλογη προς τον ακόλουθο όρο :

$$\frac{h^3 E}{1 - \nu^2}$$

Ο μετασχηματισμός του Odemark φαίνεται στην εικόνα 3.11. Μέσω αυτού του μετασχηματισμού προκύπτει το ισοδύναμο πάχος " h_e " που μπορεί να υπολογιστεί από τις εξισώσεις που ακολουθούν.



Εικόνα 3. 11 Ο μετασχηματισμός του Odemark σε ένα πολύστρωτο έδαφος
Πηγή: El-Badawy & Kamel, 2015

$$\frac{h_1^3 E_1}{1 - \nu_1^2} = \frac{h_e^3 E_2}{1 - \nu_2^2} \quad (3.15)$$

ή

$$h_e = h_1 \sqrt[3]{\frac{E_1 (1 - \nu_2^2)}{E_2 (1 - \nu_1^2)}} \quad (3.16)$$

Για την περίπτωση ενός συστήματος δύο στρώσεων με ίση αναλογία Poisson, το ισοδύναμο πάχος μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο ($\nu_1 = \nu_2$):

$$h_e = h_1 \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}} \quad (3.17)$$

Γενικά παρατηρήθηκε ότι οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που υπολογίστηκαν με την μέθοδο του Odemark διαφέρουν από αυτές που υπολογίστηκαν με την θεωρία της ελαστικότητας.

Προκειμένου τα αποτελέσματα μεταξύ των δυο μεθόδων να μην έχουν μεγάλες αποκλίσεις, στην παραπάνω εξίσωση εφαρμόστηκε επιπλέον ο διορθωτικός συντελεστής " f " ως εξής:

$$h_e = f x h_1 \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}} \quad (3.18)$$

Για τον διορθωτικό συντελεστή " f " χρησιμοποιούνται οι τιμές 0.80 και 0.90. Για σύστημα δυο στρώσεων η τιμή του διορθωτικού συντελεστή λαμβάνεται 0.90 ενώ για σύστημα πολλαπλών στρώσεων λαμβάνεται τιμή ίση με 0.80 με εξαίρεση την πρώτη διαχωριστική επιφάνεια όπου η τιμή του διορθωτικού συντελεστή είναι 1.00.

Για ένα σύστημα πολλαπλών στρώσεων n το ισοδύναμο πάχος των ανώτερων στρώσεων $n-1$ μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$h_{e,n} = f x \sum_{i=1}^{n-1} h_i \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_n}} \quad (3.19)$$

όπου:

$h_{e,n}$: ισοδύναμο πάχος της στρώσης ενδιαφέροντος (στρώση n).

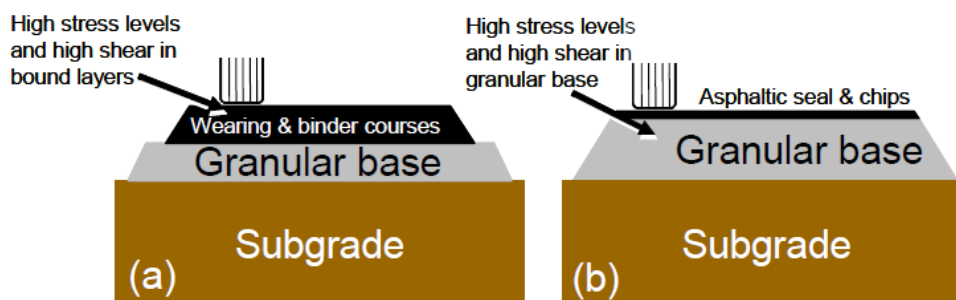
h_i : πάχος στρώσης i .

f : διορθωτικός συντελεστής.

E_i, E_n : μέτρο ελαστικότητας των στρώσεων.

3.4. ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ

Τα οδοστρώματα χαμηλής κυκλοφορίας έχουν παρόμοια δομή με εκείνη των οδοστρωμάτων υψηλής κυκλοφορίας. Οι κύριες διαφορές εντοπίζονται στα πάχη των επιμέρους στρώσεων και στην στρώση από συνδετικά υλικά (ασφαλτικές στρώσεις), (βλ. εικόνα 3.12). Οι στρώσεις από ασύνδετα υλικά είναι παραδοσιακά οι πιο κατάλληλες στρώσεις έτσι ώστε να κατανέμεται το φορτίο ομοιόμορφα και μειωμένα στη στρώση έδρασης.



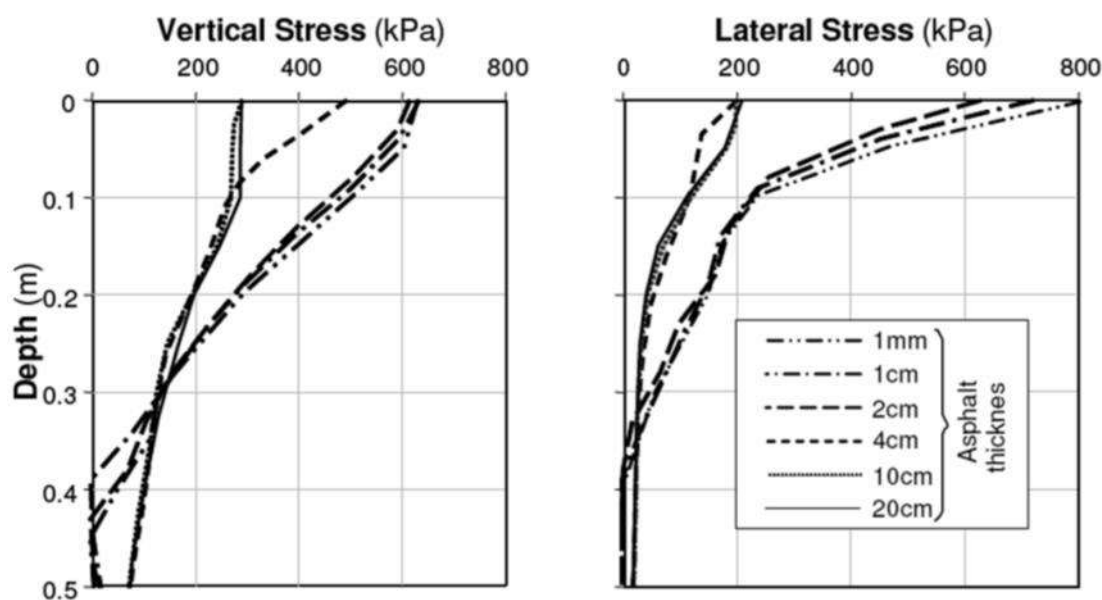
Εικόνα 3. 12 Σχηματική περιγραφή του (α) υψηλής κυκλοφορίας οδόστρωμα και (β) χαμηλής κυκλοφορίας οδόστρωμα

Πηγή: Brito, 2011

Συγκεκριμένα η δομή ενός οδοστρώματος χαμηλής κυκλοφορίας μπορεί απλά να αποτελείται από την στρώση έδρασης και από μία ή περισσότερες στρώσεις ασύνδετων υλικών. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια ασφαλτική επίστρωση για την αύξηση της ποιότητας του οδοστρώματος. Εάν χρησιμοποιούνται μόνο στρώσεις ασύνδετων υλικών στο οδόστρωμα, τότε οι κατακόρυφες και οριζόντιες τάσεις είναι θετικές (θλίψη), δεδομένου ότι τα ασύνδετα υλικά δεν φέρουν τάσεις εφελκυσμού. Μόνο με πάχος μεγαλύτερο από ένα συγκεκριμένο όριο ασφαλτικού υλικού ή με άλλο συγκολλημένο μίγμα μπορεί να εμφανιστούν αρνητικές τάσεις (εφελκυσμός).

Ο Dawson (2007) υπογραμμίζει την αρχή της κατανομής των τάσεων στα οδοστρώματα χαμηλής κυκλοφορίας: στην περίπτωση των οδοστρωμάτων αυτών που περιέχουν ασφαλτικές επιφάνειες, η επιφάνεια πρέπει να είναι μεγαλύτερη από ένα ελάχιστο πάχος, περίπου 40mm, προκειμένου να επιτευχθεί αποτελεσματική κατανομή των τάσεων και να μειωθεί σημαντικά η πίεση στη στρώση έδρασης. Παρατηρήθηκε, ότι η μέγιστη κατακόρυφη τάση σ_{vmax} στην οποία υποβάλλεται η στρώση βάσης, είναι σχεδόν η ίδια είτε για ένα 1 mm ασφαλτικής στρώσης, είτε για 10mm ή 20mm. Με πάχος 40mm, το σ_{vmax} μειώνεται κατά περίπου 40%, ενώ για τα 200mm η σ_{vmax} μειώνεται κατά περίπου 65%. Στην εικόνα 3.13

φαίνεται η κατανομή της κατακόρυφης και οριζόντιας τάσης ενός οδοστρώματος με διάφορα πάχη ασφαλτικής στρώσης.



Εικόνα 3. 13 Κατανομή κατακόρυφης τάσης για διάφορα πάχη ασφαλτικής στρώσης
Πηγή: Dawson, 2007

Οι Coghlan (1999), Visser και Hall (2003) και El abd et al. (2004) επιβεβαίωσαν ότι τα παραδοσιακά πρότυπα μηχανικής οδοποιίας ενδέχεται να μην είναι κατάλληλα για τον σχεδιασμό των οδοστρωμάτων χαμηλής κυκλοφορίας. Οι περισσότερες μέθοδοι σχεδιασμού οδοστρώματος βασίζονται σε γραμμικούς ελαστικούς υπολογισμούς. Τέτοιες μέθοδοι δίνουν καλά αποτελέσματα μόνο για μεγαλύτερης διατομής οδοστρώματα, εκτός εάν ληφθεί υπόψιν κατά προσέγγιση η μη-γραμμική συμπεριφορά, όπως αναφέρεται παρακάτω στη γενική αναλυτική διαδικασία:

- Υποδιαίρεση των πραγματικών στρώσεων σε υποστρώσεις. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των στρώσεων, τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια.
- Εκτίμηση μιας τιμής του μέτρου ελαστικότητας για κάθε στρώση. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει μια ενιαία τιμή για όλες τις στρώσεις ασύνδετων υλικών και μια διαφορετική τιμή για την στρώση έδραση.
- Υπολογισμός των τάσεων στο κέντρο κάθε στρώματος και κάτω ακριβώς από το φορτίο κυκλοφορίας. Και ως πιο κατάλληλη επιλογή, υπολογισμός των τάσεων με χρήση μη-γραμμικού μοντέλου.

- Υπολογισμός του ενεργού μέτρου ελαστικότητας για κάθε στρώση μέσω μη-γραμμικών μοντέλων.

Το ενεργό μέτρο ελαστικότητας ως βασική παράμετρος διερευνάται στην παρούσα εργασία και αναπτύσσεται στο επόμενο κεφάλαιο.

4. ΕΝΕΡΓΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (M_r)

4.1. ΟΡΙΣΜΟΣ

Η έννοια του ενεργού μέτρου ελαστικότητας ενός υλικού εισήχθη αρχικά από τους Seed et al. το 1962. Οι Seed et al. όρισαν το "ενεργό μέτρο ελαστικότητας" ως το λόγο της εφαρμοζόμενης τάσης αποκλίσεως ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$) προς την ελαστική παραμόρφωση (ε_r) υπό την άσκηση ενός επαναλαμβανόμενου φορτίου τροχού.

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (4.1)$$

όπου:

σ_d : ασκούμενη τάση αποκλίσεως $\sigma_1 - \sigma_3$.

ε_r : ελαστική παραμόρφωση.

Η έννοια του ενεργού μέτρου ελαστικότητας εντάχθηκε άμεσα στον σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, επειδή συγκεντρώθηκαν πολλά αποδεικτικά στοιχεία, ότι η ελαστική συμπεριφορά των οδοστρωμάτων περιγράφεται καλύτερα από το M_r σε σχέση με άλλες μεθόδους. Τις τελευταίες δεκαετίες, το ενεργό μέτρο ελαστικότητας έχει γίνει ένας καλά αναγνωρισμένος τρόπος χαρακτηρισμού των υλικών του οδοστρώματος για όλες τις στρώσεις αυτού (στρώση έδρασης, βάση και υπόβαση).

Παράγοντες που επηρεάζουν το ενεργό μέτρο ελαστικότητας των εδαφών της στρώσης έδρασης είναι η φυσική κατάσταση του εδάφους (περιεκτικότητα σε υγρασία και ειδικό βάρος), η τάση καταπόνησης και ο τύπος του εδάφους. Έχουν διεξαχθεί πολλές μελέτες για τη διερεύνηση της επιρροής αυτών των παραγόντων στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας.

Ο Zaman (1994) ανέφερε ότι, τα αποτελέσματα της δοκιμής τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου εξαρτώνται από τη κοκκομετρική διαβάθμιση του εδάφους, τη μέθοδο συμπύκνωσης, το μέγεθος του δείγματος, αλλά και το τρόπο εξέλιξης της δοκιμής. Η επίδραση ορισμένων από αυτούς τους παράγοντες στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας των εδαφών της στρώσης έδρασης είναι σημαντική. Οι Li και Selig (1994) ανέφεραν, ότι μπορεί να ληφθεί ένα εύρος τιμών του M_r μεταξύ 14 και 140 MPa για το ίδιο λεπτόκοκκο έδαφος της στρώσης έδρασης με αλλαγή παραμέτρων, όπως είναι η κατάσταση καταπόνησης ή η περιεκτικότητα σε υγρασία.

Ο George (2004) μελέτησε εδάφη της στρώσης έδρασης από το Μισισίπι και ανέπτυξε συσχετισμούς μεταξύ των ιδιοτήτων του Mr και του εδάφους. Η περιεκτικότητα σε υγρασία (w), ο βαθμός κορεσμού (S_r), ο δείκτης πλαστιμότητας (PI), το ποσοστό διερχόμενου από το κόσκινο #200 (P_{200}) και το ειδικό ξηρό βάρος (γ_d) χρησιμοποιούνται συχνά ως παράμετροι για την ανάπτυξη τέτοιων συσχετίσεων. Άλλες μεταβλητές όπως το όριο υδαρότητας (LL), το ποσοστό αργίλου, το ποσοστό ιλύς και το ποσοστό διερχομένου από το κόσκινο #40 (P_{40}) έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί σε κάποιες άλλες συσχετίσεις (Kim και Siddiki, 2006). Στην περίπτωση των εδαφών του Μισισίπι, τα w , P_{200} και PI βρέθηκαν να είναι οι σημαντικότερες ιδιότητες στην πρόβλεψη του Mr.

Οι Hopkins et al. (2004) μελέτησαν το Mr διαφορετικών εδαφών στο Κεντάκι που ανήκαν στις κατηγορίες A-4, A-6, A-7-5 και A-7-6. Αυτοί οι ερευνητές συμπλήρωσαν τα εργαστηριακά δείγματα στο 95% του **μέγιστου ξηρού ειδικού βάρους (γ_{dmax})** και της **βέλτιστης περιεκτικότητας σε υγρασία (w_{opt})**, σύμφωνα με το AASHTO T 99. Πάνω από 150 δοκιμές Mr πραγματοποιήθηκαν σε αργιλώδη εδάφη που συλλέχθηκαν από έξι διαφορετικές τοποθεσίες γύρω από την πολιτεία. Μεταξύ των διάφορων μαθηματικών μοντέλων που είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία οι ερευνητές παρατήρησαν, ότι το οκταεδρικό μοντέλο (εξ. 4.13) που βασίζεται στο βαθμό καταπόνησης (τάση) παρείχε καλύτερη προσαρμογή από τα άλλα.

Οι Khazanovich et al. (2006) ανέλυσαν τα δεδομένα του Mr και αξιολόγησαν τις τιμές των παραμέτρων k_1 , k_2 και k_3 από 23 λεπτόκοκκα δείγματα εδαφών της στρώσης έδρασης που ανήκουν σε τρεις τύπους εδάφους (A-7-6, A-6 και A-5-7) από διαφορετικές τοποθεσίες στη Μινεσότα. Αυτοί οι ερευνητές χρησιμοποίησαν το οκταεδρικό μοντέλο Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG) (εξ. 4.17) και ανέφεραν ότι οι σταθερές των υλικών ποικίλλουν σε ένα ευρύ φάσμα.

Οι Richardson et al. (2009) μελέτησαν τον Mr από 27 δοκίμια εδαφών της στρώσης έδρασης στο Μιζούρι. Αυτά τα δοκίμια ελέγχθηκαν στη βέλτιστη υγρασία w_{opt} και σε αυξημένη περιεκτικότητα σε υγρασία (w). Οι σταθερές υλικών (k_1 , k_2 και k_3) για κάθε ένα από τα δείγματα προσδιορίστηκαν σύμφωνα με το οκταεδρικό μοντέλο. Παρατηρήθηκε, ότι οι τιμές R^2 μιας πλειοψηφίας των δειγμάτων, μετά την αφαίρεση των απομειώσεων, ήταν μεγαλύτερες από 0,90. Παρατηρήθηκε επίσης, ότι τα επαναλαμβανόμενα δείγματα ήταν ομοιόμορφα σε σχέση με τις ιδιότητές τους.

Οι Souliman et al. (2010) μελέτησαν το μοντέλο MEPDG για δοκίμια της στρώσης έδρασης στην Αριζόνα. Αυτοί οι ερευνητές σύγκριναν τις τιμές του Mr από τα εδάφη της στρώσης

έδρασης που προέκυψαν από τις εξισώσεις του δείκτη CBR με τις τιμές του Mr που προέκυψαν από το μοντέλο MEPDG.

Έρευνες έδειξαν επίσης ότι η περιεκτικότητα σε υγρασία και το ειδικό ξηρό βάρος (ή η πυκνότητα) έχουν σημαντική επίδραση στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης. Το Mr της στρώσης έδρασης μειώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία ή του βαθμού κορεσμού (Barksdale 1972, Fredlund 1977, Drumm et.al., 1997, Huang 2001, Butalia 2003 και Heydinger 2003). Οι Butalia et al. (2003) διερεύνησαν τις επιδράσεις της περιεκτικότητας σε υγρασία και της πίεσης των πόρων στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης των εδαφών του Οχάιο. Οι δοκιμές σε ακόρεστα συνεκτικά εδάφη έδειξαν ότι το Mr μειώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία.

Οι Drumm et al. (1997) μελέτησαν τη μεταβολή του ενεργού μέτρου ελαστικότητας με την αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία σε ένα συμπτυκνωμένο δοκίμιο. Τα δείγματα εδάφους συμπίεστηκαν σε μέγιστο ξηρό ειδικό βάρος και στη βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία, κατόπιν αυξήθηκε η περιεκτικότητα σε υγρασία. Τα εξεταζόμενα εδάφη παρουσίασαν μείωση του Mr με την αύξηση του κορεσμού. Ο Heydinger (2003) δήλωσε, ότι η περιεκτικότητα σε υγρασία είναι η κύρια μεταβλητή για την πρόβλεψη της εποχιακής μεταβολής του ενεργού μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης.

Η επίδραση του ειδικού ξηρού βάρους (γ_d) στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας των εδαφών της στρώσης έδρασης έχει επίσης διερευνηθεί σε μεγάλο βαθμό (π.χ. Smith και Nair 1973, Chou 1976, Allen 1996, Drumm 1997). Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν, ότι το ενεργό μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται με την αύξηση του ξηρού ειδικού βάρους (πυκνότητα) του εδάφους. Ωστόσο, αυτό το αποτέλεσμα είναι μικρότερης σημασίας σε σύγκριση με την επίδραση της περιεκτικότητας σε υγρασία και του βαθμού καταπόνησης στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας (Rada και Witczak 1981). Για οποιαδήποτε τιμή του ειδικού ξηρού βάρους (πυκνότητα), το ενεργό μέτρο ελαστικότητας έχει δύο τιμές: μία όταν η δοκιμή πραγματοποιείται σε ξηρή κατάσταση με τη βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία και άλλη τιμή, όταν η δοκιμή πραγματοποιείται σε κορεσμένο δοκίμιο και με τη βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία. Το ενεργό μέτρο ελαστικότητας του εδάφους στη ξηρή κατάσταση είναι μεγαλύτερο από αυτό στην υγρή. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 5.

Εργαστηριακές έρευνες για την επίδραση του ιστορικού καταπόνησης (διαδρομή τάσεων) στα αποτελέσματα του ενεργού μέτρου ελαστικότητας έδειξαν ότι το Mr αυξάνεται με την αύξηση του επαναλαμβανόμενου αριθμού φορτίσεων. Η αύξηση αυτή οφείλεται κυρίως στη

μείωση της περιεκτικότητας σε υγρασία του εδάφους. Το AASHTO T 307 (βλ. κεφάλαιο 4.2.2.) απαιτεί το δείγμα να υποβληθεί σε 500-1000 κύκλους ρύθμισης πριν από τη δοκιμή για να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη επαφή μεταξύ του δείγματος εδάφους και των πλακών κορυφής και πυθμένα. Ωστόσο, ο Pezo et al. (1992), ο Nazarian και ο Feliberti (1993) ανέφεραν, ότι η προετοιμασία των δειγμάτων επηρέασε το ενεργό μέτρο ελαστικότητας του δείγματος και έδειξε, ότι το ιστορικό καταπόνησης παίζει σημαντικό ρόλο στη τιμή του M_r του εδάφους.

Οι περισσότερες εργαστηριακές μελέτες σε εδάφη της στρώσης έδρασης και σε ασύνδετα υλικά δείχνουν ότι το ενεργό μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται με την αύξηση της εκτροπικής τάσης q (βλ. Κεφάλαιο 2), (Seed et.al. 1962, Thomson και Robnett 1976, Rada και Witczak 1981 και Pezo και Hudson 1994). Οι Thompson και Robnett (1979) κατέληξαν στο συμπέρασμα, ότι το ενεργό μέτρο ελαστικότητας των λεπτόκοκκων εδαφών δεν εξαρτάται από την εκτροπική τάση. Γενικά, η επίδραση της τάσης είναι πιο σημαντική στα κοκκώδη εδάφη απ' ότι στα λεπτόκοκκα εδάφη. Για τα κοκκώδη υλικά, η αύξηση της εκτροπικής τάσης μπορεί να αυξήσει σημαντικά το ενεργό μέτρο ελαστικότητας (Rada και Witczak 1981), ενώ για τα λεπτόκοκκα εδάφη, η αύξηση της μέσης τάσης p μπορεί να μειώσει τη τιμή του M_r (Maher et al., 2000).

Εκτός από τους προαναφερθέντες παράγοντες, διερευνήθηκαν επίσης και άλλοι παράγοντες μικρότερων επιπτώσεων στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης. Οι Pezo και Hudson (1994) συσχέτισαν το ενεργό μέτρο ελαστικότητας με την ηλικία του εδαφικού δείγματος και με τον δείκτη πλαστιμότητας. Έδειξαν, ότι όσο παλαιότερο είναι το δείγμα κατά τη στιγμή της δοκιμής, τόσο μικρότερη είναι η ελαστική παραμόρφωση, γεγονός που οδηγεί σε υψηλότερες τιμές για το ενεργό μέτρο ελαστικότητας. Όλα αυτά οδήγησαν στην ανάγκη δημιουργίας αξιόπιστων μεθόδων προσδιορισμού του ενεργού μέτρου ελαστικότητας είτε εργαστηριακά είτε θεωρητικά.

4.2. ΤΡΟΠΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ

4.2.1. ΓΕΝΙΚΑ

Ο χαρακτηρισμός των εδαφών της στρώσης έδρασης βάσει του ενεργού μέτρου ελαστικότητας (M_r) έχει καταστεί ζωτικής σημασίας για το σχεδιασμό του οδοστρώματος. Για τον σχεδιασμό νέου οδοστρώματος, οι τιμές του M_r γενικά λαμβάνονται μέσω της διεξαγωγής δοκιμών τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου σε μη διαταραγμένα κυλινδρικά δοκίμια. Επειδή η δοκιμή είναι σύνθετη και χρονοβόρα, αναπτύχθηκε η ανάγκη

δημιουργίας αξιόπιστων εξισώσεων συσχετισμού. Το M_r μπορεί να ληφθεί από εξισώσεις συσχέτισης που περιλαμβάνουν υπόψιν την κατάσταση καταπόνησης και τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους. Έχουν προταθεί αρκετές εμπειρικές εξισώσεις για την εκτίμηση του ενεργού μέτρου ελαστικότητας. Το κύριο μέλημα των διάφορων μελετών είναι να τεκμηριωθεί η προβλεψιμότητα των υφιστάμενων εξισώσεων και να αξιολογηθεί η σκοπιμότητα της χρήσης μιας ή περισσότερων από αυτές τις εξισώσεις στην πρόβλεψη του ενεργού μέτρου ελαστικότητας των εδαφών.

Ο Οδηγός AASHTO του 1993 για το σχεδιασμό των οδοστρωμάτων απαριθμεί τέσσερις διαφορετικές προσεγγίσεις για τον προσδιορισμό μιας τιμής του ενεργού μέτρου ελαστικότητας. Η πρώτη προσέγγιση είναι η εργαστηριακή δοκιμή, μια άλλη προσέγγιση είναι ο εκ των υστέρων υπολογισμός μέσω μη καταστρεπτικών δοκιμών (NDT), η τρίτη προσέγγιση συνίσταται στην εκτίμηση του ενεργού μέτρου ελαστικότητας από τις συσχετίσεις με άλλες ιδιότητες και η τελευταία είναι από τα αρχικά δεδομένα σχεδίασης και κατασκευής. Το 1995, οι Darter et al. ανέφεραν, ότι περίπου το 75% των κρατικών υπηρεσιών αυτοκινητόδρομων στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, χρησιμοποιούν είτε τις εκδόσεις του AASHTO του 1986 είτε του 1993. Ωστόσο, οι περισσότεροι οργανισμοί δεν μετρούν συνήθως το M_r στο εργαστήριο, αλλά υπολογίζουν την τιμή αυτού από την εμπειρία ή από άλλες υλικές ή εδαφικές ιδιότητες, δηλαδή, τιμή CBR (California Bearing Ratio), R-value ή φυσικές ιδιότητες.

Οι περισσότερες από αυτές τις μεθόδους, οι οποίες χρησιμοποιούν είτε την μέθοδο CBR είτε την SSV (Soil Support Value), δεν αντιπροσωπεύουν τις συνθήκες ενός οδοστρώματος που έχει υποστεί επαναλαμβανόμενη φόρτωση. Γενικά, η δοκιμή τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου απαιτεί καλά εκπαιδευμένο προσωπικό και ακριβό εργαστηριακό εξοπλισμό και θεωρείται επίσης σχετικά χρονοβόρα. Όμως ο υπολογισμός του M_r μέσω μη καταστρεπτικών δοκιμών (NDT) μπορεί να παράγει ασυνεπή αποτέλεσμα ενεργού μέτρου ελαστικότητας όταν επιλέγονται διαφορετικά προγράμματα υπολογισμού.

Αναγνωρίζοντας αυτή την ανεπάρκεια, οι οδηγοί σχεδιασμού του 1986 και των επακόλουθων κατασκευαστών του AASHTO του 1993 συνέστησαν τη χρήση του ενεργού μέτρου ελαστικότητας (M_r) για τον χαρακτηρισμό των εδαφών της βάσης - υπόβασης και της στρώσης έδρασης κατά τον σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Το ενεργό μέτρο ελαστικότητας υπολογίζει την παραμόρφωση του εδάφους υπό επαναλαμβανόμενη κυκλοφοριακή φόρτωση, λαμβάνοντας υπόψιν τις εποχιακές μεταβολές των συνθηκών υγρασίας.

Όπως προτείνεται στον Οδηγό AASHTO του 1993, το ενεργό μέτρο ελαστικότητας μπορεί επίσης να προβλεφθεί απευθείας από τις εξισώσεις συσχετισμού που αφορούν τις φυσικές ιδιότητες του εδαφικού υλικού. Διάφοροι ερευνητές έχουν επίσης αναπτύξει εξισώσεις συσχετισμού για να προβλέψουν το ενεργό μέτρο ελαστικότητας από τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους.

4.2.2. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ

Ο Οδηγός AASHTO του 1986 όρισε, και ο Οδηγός MEPDG του 2002 επιβεβαίωσε, ότι το Mr είναι η παράμετρος για τον χαρακτηρισμό της στρώσης έδρασης. Ανταποκρινόμενοι στην ανάγκη, προτάθηκε η εργαστηριακή δοκιμή AASHTO T278-82 για να περιγραφεί η συμπεριφορά των υλικών του οδοστρώματος που υπόκεινται σε φόρτιση. Το 1991, η AASHTO τροποποίησε τη διαδικασία δοκιμής T278-82 όσον αφορά την προετοιμασία του δείγματος, το μέγεθος του φορτίου και την εφαρμογή του φορτίου. Με την αναθεώρηση αυτή η ονομασία της δοκιμής άλλαξε σε TP292-92I. Αργότερα, το TP46-94, ένα "εναρμονισμένο" πρωτόκολλο δοκιμής του Mr, προτάθηκε στο πρόγραμμα National Cooperative Research Program 1-28^A (NCHRP 1-28^A, 1994). Το πρόγραμμα Long Term Pavement Performance (LTPP) το 1996 πρότεινε τη διαδικασία δοκιμής P46 όπου, τα ανασυσταθέντα δείγματα χυτεύονται στο εργαστήριο για να επιτευχθεί επιθυμητή πυκνότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία αντιπροσωπευτική του πεδίου. Το δείγμα της δοκιμής τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου υποβάλλεται σε συνδυασμό τριών τιμών της τάσης σ_3 και πέντε της τάσης σ_d , αποδίδοντας έτσι 15 τιμές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας για κάθε δείγμα. Στη συνέχεια το πρόγραμμα LTPP (1999) πρότεινε τη διαδικασία δοκιμής AASHTO T307 η οποία βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη διαδικασία δοκιμής P46.

Παρά τις διάφορες βελτιώσεις που έγιναν με τα χρόνια, οι Seed et al. (1962) ανέφεραν τις ακόλουθες αβεβαιότητες καθώς και τους περιορισμούς που σχετίζονται με τη διαδικασία δοκιμής.

1. Το εργαστηριακό δείγμα δεν είναι εντελώς αντιπροσωπευτικό των επιτόπιων συνθηκών εξαιτίας της διαταραχής του δείγματος και των διαφορών στον προσανατολισμό των αδρανών, την περιεκτικότητα σε υγρασία και το βαθμό συμπίκνωσης.
2. Οι εγγενείς ατέλειες του εξοπλισμού του εργαστηρίου καθιστούν δύσκολη την προσομοίωση της κατάστασης φόρτισης του υλικού επί τόπου.

3. Τα έμφυτα ελαττώματα των οργάνων μέτρησης δημιουργούν αβεβαιότητα στη μέτρηση της παραμόρφωσης του δείγματος.
4. Η έλλειψη πανομοιότυπου εξοπλισμού, διαδικασιών βαθμονόμησης και επαλήθευσης, μπορεί να οδηγήσει σε διαφορές μεταξύ των εργαστηρίων και εντός συγκεκριμένου εργαστηρίου.

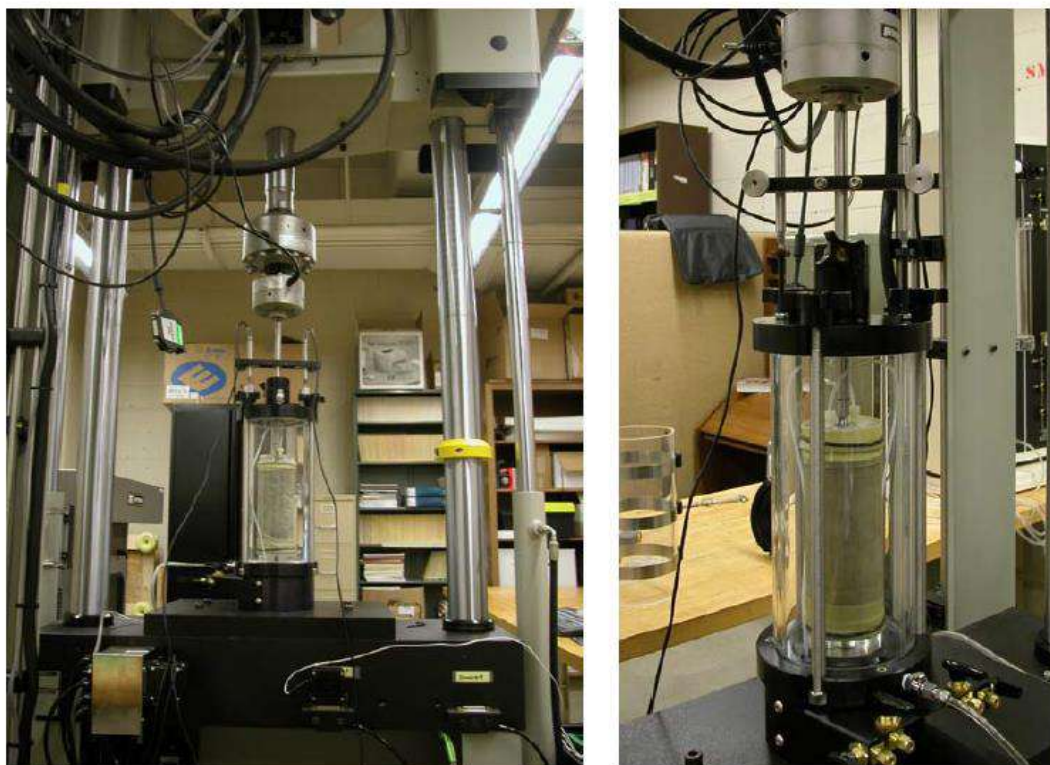
Συνολικά, τα θέματα αυτά οδήγησαν στο να μην είναι γενικά αποδεκτή η δοκιμή του Mr από τους ερευνητές. Παρόλα αυτά και δεδομένου ότι τα υλικά του οδοστρώματος υποβάλλονται σε μια σειρά διαφορετικών παλμικών φορτίσεων, είναι επιθυμητός ένας εργαστηριακός έλεγχος που να αντιγράφει αυτή την κατάσταση. Η δοκιμή τύπου τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου έχει χρησιμοποιηθεί για πολλά χρόνια για να προσομοιώσει τη φόρτιση του οχήματος. Σε αυτή τη δοκιμή, κυλινδρικά δείγματα εδάφους υποβάλλονται σε μια σειρά παλμών φορτίου που εφαρμόζονται με μια περίοδο ανάπαυσης, προσομοιώνοντας τις καταπονήσεις που προκαλούνται από πολλαπλούς τροχούς που κινούνται πάνω στο οδόστρωμα. Μια σταθερή ορθή κύρια τάση (σ_3) που εφαρμόζεται στο δοκίμιο προσομοιώνει τις πλευρικές καταπονήσεις που προκαλούνται από την πίεση υπερκείμενου φορτίου και το εφαρμοζόμενο φορτίο τροχού. Η ολική ελαστική απόκριση αξονικής παραμόρφωσης του δείγματος στους μετρημένους παλμούς τάσης χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ενεργού μέτρου ελαστικότητας του υλικού. Αναφέρονται παρακάτω δύο λόγοι που ευνοούν την χρήση της δοκιμής τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου για τον προσδιορισμό του Mr και οδήγησαν στη καθίδρυσή της και στη γενική αποδοχή από τους ερευνητές καθώς και από τους οργανισμούς μελέτης οδοστρωμάτων.

- Στην τριαξονική δοκιμή, προκαθορισμένες κύριες τάσεις σ_1 και σ_3 εφαρμόζονται στο δοκίμιο. Συνεπώς, οι συνθήκες καταπόνησης που εφαρμόζονται είναι στην πραγματικότητα εκείνες που αναπτύσσονται όταν ασκείται ένα απομονωμένο φορτίο τροχού στο οδόστρωμα ακριβώς πάνω από το στοιχείο του προσομοιωμένου υλικού στη δοκιμή.
- Για τα τελευταία 35 χρόνια η δοκιμή τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου ήταν η βασική διαδικασία δοκιμής για την αξιολόγηση του ενεργού μέτρου ελαστικότητας συνεκτικών και κοκκωδών υλικών για εφαρμογές στο σχεδιασμό οδοστρωμάτων.

Διαδικασία δοκιμής

Κατά την τριαξονική δοκιμή ένα κυλινδρικό δοκίμιο τοποθετείται εντός κυψέλης πληρωμένης με νερό και υποβάλλεται με αυτόν τον τρόπο σε σταθερή πίεση καθ' όλη την επιφάνειά του όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 4.1. Επιπλέον, φορτίζεται αξονικά μέχρι τη θραύση του. Το κελί φόρτισης είναι εγκατεστημένο μέσα στην κυψέλη για να εξαλειφθεί η τριβή του εμβόλου και να προκύψουν ακριβείς μετρήσεις. Το κελί φόρτισης είναι για το σκοπό αυτό αδιάβροχο και κατασκευασμένο από ανοξείδωτο ατσάλι. Ο ρυθμός φόρτισης εφαρμόζεται από έναν σερβομηχανισμό και κινείται στο εύρος: 0,00001 – 9,99999 mm/min. Η κυψέλη είναι κατασκευασμένη από υψηλής αντοχής plexiglass ειδικά σχεδιασμένο για αυτή τη συσκευή και έχει πάχος 10 mm. Είναι εφοδιασμένη με δύο ελεγκτές πίεσης-όγκου οι οποίοι ταυτόχρονα ελέγχουν και μετράνε τις αλλαγές του όγκου στην κυψέλη και το δείγμα. Οι ελεγκτές ελέγχονται πλήρως από ηλεκτρονικό υπολογιστή με ειδικό λογισμικό το οποίο διατίθεται μαζί με τη συσκευή.

Η συσκευή και το δείγμα που χρησιμοποιούνται στην κυλινδρική τριαξονική φόρτιση παρουσιάζονται στην εικόνα 4.1.



Εικόνα 4. 1 Συσκευή δοκιμής τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου
Πηγή: Titi, 2006

Η μέτρηση της πίεσης γίνεται από έναν μετατροπέα (transducer) ακρίβειας ο οποίος στέλνει τα δεδομένα απευθείας στο ηλεκτρονικό σύστημα λήψης δεδομένων. Το σύστημα αυτό, συλλέγει τα δεδομένα από όλους τους αισθητήρες (δυναμοκυψέλη, μετατροπέας πίεσης, ηλεκτρονικά συστήματα μέτρησης θέσης κ.λπ.) τα αναλύει και τα στέλνει σε ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω σύνδεσης USB. Η δεξαμενή νερού περιλαμβάνει μαγνητικό αναδευτήρα για την απαέρωση του νερού πριν το διοχετεύσει στο σύστημα. Η διάταξη αυτή μειώνει σημαντικά τον χρόνο κορεσμού του δείγματος.

Τέλος το δείγμα της επαναλαμβανόμενης τριαξονικής δοκιμής υποβάλλεται σε συνδυασμό τριών κύριων οριζόντιων τάσεων και πέντε τάσεων αποκλίσεως, αποδίδοντας έτσι 15 τιμές ενεργού μέτρου ελαστικότητας για κάθε δείγμα. Στη συνέχεια, επιλέγεται ένα μοντέλο που περιλαμβάνει τη σχέση του M_r και της τάσης, περιγράφοντας την ελαστική ιδιότητα του υλικού. Το μοντέλο αυτό στη συνέχεια προσαρμόζεται στα δεδομένα κάθε δείγματος έτσι ώστε να μπορεί να ληφθεί η τιμή του M_r για μια επιθυμητή κατάσταση καταπόνησης.

4.2.3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ

Δεδομένου, ότι ο εργαστηριακός προσδιορισμός του ενεργού μέτρου ελαστικότητας είναι δαπανηρός, χρονοβόρος και πολύπλοκος, αναπτύχθηκαν διάφορα εμπειρικά μοντέλα για την πρόβλεψη του ενεργού μέτρου ελαστικότητας για διάφορες περιοχές του κόσμου, σύμφωνα με την βάση δεδομένων των ιδιοτήτων των τοπικών εδαφών. Αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν για τη συσχέτιση του M_r με τις τάσεις και τις θεμελιώδεις ιδιότητες του εδάφους. Πολλά μη-γραμμικά μοντέλα έχουν προταθεί με την πάροδο των ετών με σκοπό την ενσωμάτωση των επιδράσεων του βαθμού καταπόνησης στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας αλλά και άλλων παραμέτρων. Ένα έγκυρο μοντέλο για το M_r θα πρέπει να αντιπροσωπεύει και να αντιμετωπίζει τους περισσότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη τιμή του ενεργού μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης.

Το ενεργό μέτρο ελαστικότητας των λεπτόκοκκων εδαφών δεν είναι μια σταθερή ιδιότητα, αλλά εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως τη κατάσταση καταπόνησης, τον τύπο του εδάφους και τη δομή του, η οποία εξαρτάται κυρίως από τη μέθοδο συμπίεσης και συμπύκνωσης του νέου δοκιμίου της στρώσης έδρασης. Προηγούμενες μελέτες δείχνουν ότι η τάση σ_d είναι πιο σημαντική από τη τάση σ_3 για τα λεπτόκοκκα εδάφη. Το ενεργό μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται με μείωση της περιεκτικότητας σε υγρασία και αύξηση της πυκνότητας και μειώνεται με την αύξηση της τάσης σ_d . Για τα χονδρόκοκκα εδάφη, το M_r επηρεάζεται κυρίως από την κατάσταση καταπόνησης, τον βαθμό κορεσμού και τον βαθμό συμπύκνωσης (πυκνότητα). Μελέτες έχουν επίσης δείξει, ότι υπάρχει ένας κρίσιμος βαθμός

κορεσμού κοντά στο 80-85%, πάνω από το οποίο το κοκκώδες υλικό καθίσταται ασταθές και υφίσταται ταχεία υποβάθμιση υπό επαναλαμβανόμενη φόρτωση. Οι Lekarp et al. (2000) και άλλοι ερευνητές συμφωνούν, ότι το M_r των κοκκωδών υλικών αυξάνεται με την αύξηση της τάσης σ_3 και το άθροισμα των κύριων τάσεων, αλλιώς γνωστό ως τάση θ , και ελαφρώς αυξάνεται με την αύξηση της τάσης σ_d .

Ορισμένα από τα μαθηματικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν για τον υπολογισμό του ενεργού μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει του βαθμού καταπόνησης για τα διάφορα είδη εδάφους παρουσιάζονται ακολούθως:

Μοντέλο k- θ

Η τάση θ είναι το άθροισμα των κύριων τάσεων σ_1 , σ_2 και σ_3 . Η τάση θ θεωρείται σημαντικός παράγοντας για την εκτίμηση του ενεργού μέτρου ελαστικότητας των κοκκωδών εδαφών. Το M_r μπορεί να εκτιμηθεί με τη χρήση της τάσης θ από την ακόλουθη εξίσωση:

$$M_r = k_1 \theta^{k_2} \quad (4.2)$$

Όπου:

M_r είναι το ενεργό μέτρο ελαστικότητας.

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3.$$

k_1 και k_2 είναι υλικές σταθερές.

Αν και αυτό το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για να χαρακτηρίσει το ενεργό μέτρο ελαστικότητας των κοκκωδών εδαφών, δεν λαμβάνει υπόψιν την διατμητική τάση, τη παραμόρφωση και την ογκομετρική παραμόρφωση. Ο Uzan (1985) έδειξε, ότι το μοντέλο k- θ δεν περιγράφει επαρκώς τη συμπεριφορά των κοκκωδών υλικών.

Οι May και Witczak (1981) τροποποίησαν το μοντέλο k- θ προσθέτοντας έναν νέο παράγοντα ως εξής:

$$M_r = K_1 k_1 \theta^{k_2} \quad (4.3)$$

όπου το K_1 προκύπτει σε συνάρτηση της δομής του οδοστρώματος, του φορτίου δοκιμής και της ανεπτυγμένης τάσης διάτμησης.

Μοντέλο σ_d

Η τάση σ_d είναι η διαφορά των κύριων τάσεων σ_1 και σ_3 ως ακολούθως:

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (4.4)$$

Το ενεργό μέτρο ελαστικότητας των συνεκτικών εδαφών είναι συνάρτηση της τάσης σ_d , καθώς μειώνεται με την αύξηση αυτής. Το μοντέλο σ_d συνιστάται από την AASHTO για την εκτίμηση του ενεργού μέτρου ελαστικότητας των συνεκτικών εδαφών. Το ανωτέρω μοντέλο εκφράζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$M_r = k_3 \sigma_d^{k_4} \quad (4.5)$$

όπου σ_d είναι η διαφορά των κυρίων τάσεων και k_3 και k_4 είναι υλικές σταθερές.

Οι Li και Selig (1994) ανέφεραν, ότι για τα λεπτόκοκκα εδάφη η επίδραση της τάσης σ_d είναι λιγότερο σημαντική από την επίδραση της τάσης σ_3 . Ωστόσο, τα συνεκτικά εδάφη που υπόκεινται σε κυκλοφοριακό φόρτο επηρεάζονται από την κύρια τάση σ_3 της τριαξονικής επαναλαμβανόμενης κυκλικής φόρτισης.

Μοντέλο Dunlap

Το 1963, ο Dunlap πρότεινε την ακόλουθη σχέση για τον προσδιορισμό του ενεργού μέτρου ελαστικότητας των εδαφών της στρώσης έδρασης:

$$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{k_2} \quad (4.6)$$

όπου σ_3 η κύρια τάση, P_a η ατμοσφαιρική πίεση και k_1 και k_2 είναι οι υλικές σταθερές.

Αυτή η σχέση, όπως είναι εμφανές, δεν λαμβάνει υπόψιν την επίδραση της τάσης σ_d στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας και αυτό δεν την καθιστά ιδανική.

Μοντέλο Seed

Ο Seed et al. (1962) πρότεινε μια σχέση όπου το ενεργό μέτρο ελαστικότητας είναι συνάρτηση της τάσης θ , γνωστό και ως K- θ μοντέλο. Αυτό το μοντέλο, που γενικά υιοθετείται για τα κοκκώδη εδάφη, χρησιμοποιεί το θ ως κύριο χαρακτηριστικό στο μοντέλο. Το κύριο μειονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι, ότι δεν λαμβάνει υπόψιν τις διατμητικές τάσεις και τη διατμητική παραμόρφωση που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της φόρτισης και, ως εκ τούτου, ισχύει μόνο στην περιοχή τιμών χαμηλής έντασης. Ο Brown και ο Pappin σημείωσαν, ότι αυτό το μοντέλο δεν χειρίζεται σωστά την ογκομετρική παραμόρφωση ή τη διασταλτική συμπεριφορά των εδαφών.

$$M_r = k_1 \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \quad (4.7)$$

Μοντέλο k-σ_d

Οι Moossazadeh και Witczak (1981) πρότειναν μια σχέση γνωστή ως μοντέλο K-σ_d. Χρησιμοποιούν τη τάση σ_d ως κύριο και μοναδικό χαρακτηριστικό του μοντέλου. Αν και αυτό το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη την επίδραση της τάσης σ₃ στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας, για τα αργιλώδη εδάφη, αυτή η πτυχή εξακολουθεί να θεωρείται ασήμαντη, αφού τα συνεκτικά εδάφη αποδίδουν τη συνολική τους δύναμη κυρίως από τη συνοχή και όχι από τα χαρακτηριστικά τριβής.

$$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2} \quad (4.8)$$

Μοντέλο k-θ τροποποιημένο

Ένα παρόμοιο απλό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε σε αρκετές μελέτες για τον υπολογισμό του M_r κοκκωδών υλικών συμπεριλαμβανομένων των ασύνδετων υλικών είναι το βασισμένο στο βαθμό καταπόνησης μοντέλο k-θ.

$$M_r = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \quad (4.9)$$

Μοντέλο δύο παραμέτρων

Το βασικό μοντέλο δύο παραμέτρων που προήλθε από τον Andrei et al. (2004), το οποίο βασίζεται στις τάσεις σ₃ και σ_d, χρησιμοποιείται από διάφορους κρατικούς οργανισμούς σχεδίασης οδοστρωμάτων, συμπεριλαμβανομένης της Βιρτζίνιας.

$$M_r = k_1 P_a \left[\frac{\sigma_3}{P_a} \right]^{k_2} \left[\frac{\sigma_d}{P_a} \right]^{k_3} \quad (4.10)$$

Μοντέλο Uzan

Ο Uzan (1985) μελέτησε και ανέλυσε διάφορα υπάρχοντα μοντέλα για την εκτίμηση του ενεργού μέτρου ελαστικότητας. Ανέπτυξε ένα μοντέλο για να ξεπεράσει τους περιορισμούς του μοντέλου k-θ, ενσωματώνοντας τη τάση σ_d για να υπολογίσει την πραγματική καταπόνηση της στρώσης. Το μοντέλο ορίζει το ενεργό μέτρο ελαστικότητας ως εξής:

$$M_r = k_1 \theta^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (4.11)$$

όπου k₁, k₂ και k₃ είναι υλικές σταθερές.

Ο Uzan το 1988 πρότεινε ένα μοντέλο για να περιγράψει τη μη-γραμμική συμπεριφορά που αποκαλύφθηκε μέσω της δοκιμής τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου. Αυτό το μοντέλο εξετάζει τα αποτελέσματα της διατμητικής τάσης και των ορθών τάσεων σ₃ και σ_d με

αποτέλεσμα να διαμορφώνεται με τις τάσεις θ και σ_d . Με την κανονικοποίηση του ενεργού μέτρου ελαστικότητας και των τάσεων στο αρχικό μοντέλο Uzan οδηγούμαστε στην ακόλουθη εξίσωση:

$$M_r = k_1 P_a \left[\frac{\theta}{P_a} \right]^{k_2} \left[\frac{\sigma_d}{P_a} \right]^{k_3} \quad (4.12)$$

όπου P_a είναι η ατμοσφαιρική πίεση, εκφρασμένη στην ίδια μονάδα με τον M_r , σ_d και θ .

Ο Uzan πρότεινε επίσης, ότι το παραπάνω μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλους τους τύπους εδαφών. Με τον καθορισμό του k_3 στο μηδέν επιτυγχάνεται το μοντέλο k- θ .

Μοντέλο οκταεδρικής διατμητικής τάσης τ_{oct} .

Το μοντέλο Uzan τροποποιήθηκε από τους Witzak και Uzan (1988) αντικαθιστώντας την σ_d με την οκταεδρική διατμητική τάση ως εξής:

$$M_r = k_1 P_a \left[\frac{\theta}{P_a} \right]^{k_2} \left[\frac{\tau_{oct}}{P_a} \right]^{k_3} \quad (4.13)$$

όπου τ_{oct} είναι η οκταεδρική διατμητική τάση, P_a είναι η ατμοσφαιρική πίεση, και k_1 , k_2 και k_3 είναι υλικές σταθερές.

Η οκταεδρική διατμητική τάση ορίζεται γενικά ως:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \quad (4.14)$$

Για την αξονοσυμμετρική καταπόνηση (τριαξονική) είναι, $\sigma_2 = \sigma_3$ και $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_d$ (τάση απόκλισης), επομένως η οκταεδρική διατμητική τάση μετατρέπεται ως:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad (4.15)$$

και

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} (\sigma_d) \quad (4.16)$$

Μοντέλο MEPDG

Η γενική εξίσωση που αναπτύχθηκε μέσω του έργου NCHRP 1-37^A το 2002 (National Cooperative Highway Research Program) επιλέχθηκε για εφαρμογή στον Οδηγό Σχεδιασμού AASHTO για το σχεδιασμό νέων και την αποκατάσταση υπαρχόντων οδοστρωμάτων και αναφέρεται ως μοντέλο MEPDG (Mechanistic Empirical Pavement Design Guide). Το μοντέλο του ενεργού μέτρου ελαστικότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλους τους τύπους εδαφών της στρώσης έδρασης. Το μοντέλο ορίζεται ως εξής:

$$M_r = k_1 P_a \left[\frac{\theta}{P_a} \right]^{k_2} \left[\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right]^{k_3} \quad (4.17)$$

Όπου:

M_r : το ενεργό μέτρο ελαστικότητας.

P_a : η ατμοσφαιρική πίεση.

θ : το άθροισμα των κύριων τάσεων $= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$.

τ_{oct} : οκταεδρική διατμητική τάση.

k_1 , k_2 και k_3 : παράμετροι μοντέλου (σταθερές υλικών).

Το αποτέλεσμα του NCHRP 1-37^A είναι ο "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures". Ο νέος μηχανισμός-εμπειρικός Οδηγός χρησιμοποιεί πολλές παραμέτρους σχεδιασμού που δεν είχαν προηγουμένως αξιολογηθεί για το σχεδιασμό των οδοστρώματων. Για εύκαμπτα οδοστρώματα, αυτό περιλαμβάνει τον προσδιορισμό του ενεργού μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης ως παράμετρος εισόδου. Αυτή η παράμετρος μπορεί να προσδιοριστεί με τη διεξαγωγή ενός εργαστηριακού προγράμματος δοκιμών ακολουθώντας τη διαδικασία AASHTO T 307.

Ο νέος Οδηγός μηχανικής-εμπειρικής σχεδίασης προσδιορίζει επίσης τρία επίπεδα παραμέτρων εισόδου σχεδιασμού με ιεραρχικό τρόπο. Αυτό παρέχει στον σχεδιαστή του οδοστρώματος ευελιξία στην επίτευξη του σχεδιασμού με διαθέσιμους πόρους που βασίζονται στη σημασία του έργου. Τα τρία επίπεδα παραμέτρων εξαρτώνται από τον χαρακτηρισμό της κυκλοφορίας, τις ιδιότητες των υλικών και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα παρακάτω είναι μια περιγραφή αυτών των επιπέδων:

1. Επίπεδο 1: Αυτές οι παράμετροι σχεδιασμού πρέπει να χαρακτηρίζονται από την υψηλότερη αξιοπιστία και το χαμηλότερο επίπεδο αβεβαιότητας. Απαιτούν από τον σχεδιαστή να πραγματοποιήσει εργαστηριακές δοκιμές για το συγκεκριμένο έργο που εξελίσσεται. Αυτό απαιτεί εκτεταμένες προσπάθειες και αύξηση του κόστους.
2. Επίπεδο 2: Όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι για την επίτευξη των δοκιμών του επιπέδου 1, τότε οι εισοδοί επιπέδου 2 παρέχουν ένα ενδιάμεσο επίπεδο ακρίβειας για το σχεδιασμό του οδοστρώματος. Μπορούν να αναπτυχθούν συσχετίσεις μεταξύ διάφορων μεταβλητών, όπως η εκτίμηση του ενεργού μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης από τα αποτελέσματα βασικών δοκιμών εδάφους.

3. Επίπεδο 3: Παράμετροι εισόδου που παρέχουν το υψηλότερο επίπεδο αβεβαιότητας και το χαμηλότερο επίπεδο ακρίβειας. Είναι συνήθως τυπικές μέσες τιμές για την περιοχή. Οι εισοδοί επιπέδου 3 μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε έργα που οι επιπτώσεις σε ενδεχόμενη αστοχία θα είναι μικρές, όπως οδοστρώματα χαμηλής κυκλοφορίας (LVR).

Αρκετά μοντέλα είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία για την εκτίμηση ή την πρόβλεψη του ενεργού μέτρου ελαστικότητας στο επίπεδο 1 απαιτώντας τον προσδιορισμό των παραμέτρων του μοντέλου (τιμές k_i) που προσδιορίζονται από αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών.

Επίσης, έχουν αναπτυχθεί εξισώσεις συσχετισμού για την πρόβλεψη του ενεργού μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης από βασικές ιδιότητες του εδάφους. Κάποιες από αυτές παρουσιάζονται ενδεικτικά ακολούθως:

Ο Carmichael και ο Stuart το 1985 μελέτησαν τις ιδιότητες των εδαφών πραγματοποιώντας μελέτες παλινδρόμησης για μεμονωμένους τύπους εδάφους σύμφωνα με το διεθνές σύστημα ταξινόμησης του εδάφους. Δύο μοντέλα αναπτύχθηκαν, ένα για λεπτόκοκκα εδάφη και ένα για χονδρόκοκκα εδάφη.

Για χονδρόκοκκα εδάφη

$$\log M_r = 0.523 - 0.025(w) + 0.544(\log \theta) + 0.173(SM) + 0.197(GR) \quad (4.18)$$

Όπου:

M_r : ενεργό μέτρο ελαστικότητας.

w : ποσοστό υγρασίας (%).

θ : τάση $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$.

SM : 1 για εδάφη SM (ταξινόμηση του εδάφους), 0 για οποιοδήποτε άλλο.

GR : 1 για εδάφη GR (GM, GW, GC or GP), 0 για οποιοδήποτε άλλο.

Για λεπτόκοκκα εδάφη

$$M_r = 37.431 - 0.4566(PI) - 0.6179(w) - 0.1424(P_{200}) + 0.1791(\sigma_3) - 0.3248(\sigma_d) + 36.722(CH) + 17.097(MH) \quad (4.19)$$

Όπου:

PI : δείκτης πλαστιμότητας (%).

CH : 1 για εδάφη CH, 0 για οποιοδήποτε άλλο.

MH: 1 για εδάφη MH, 0 για οποιοδήποτε άλλο.

Οι Ashraf και George (2004) διερεύνουν τη συνάφεια των ιδιοτήτων του εδάφους στην πρόβλεψη του ενεργού μέτρου ελαστικότητας των εδαφών του Μισισίπι. Δύο εξισώσεις, προτάθηκαν, μία για λεπτόκοκκα εδάφη και μία για χονδρόκοκκα εδάφη.

Για λεπτόκοκκα εδάφη

$$M_r = 16.75 \left((LL/w \gamma_{dmax})^{2.06} \right) + \left((P_{200}/100)^{-0.50} \right) \quad (4.20)$$

Για χονδρόκοκκα εδάφη

$$M_r = 307.4 (\gamma_{dmax}/w)^{0.86} + (P_{200}/\log c_u)^{-0.46} \quad (4.21)$$

Όπου:

γ_{dmax} : μέγιστο ειδικό ξηρό βάρος.

c_u : αστράγγιστη διατμητική αντοχή.

4.3. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΟΥ M_r

Το ενεργό μέτρο ελαστικότητας των εδαφών της στρώσης έδρασης εξαρτάται από τη φυσική κατάσταση του εδάφους (περιεκτικότητα σε υγρασία και ειδικό βάρος), τη τάση καταπόνησης και το τύπο του εδάφους. Οι εξισώσεις που έχουν προκύψει κατά καιρούς για τον υπολογισμό του M_r , συσχετίζουν τις τάσεις καταπόνησης του εδάφους της στρώσης έδρασης και τις παραμέτρους k_i . Οι παράμετροι k_i για κάθε μοντέλο προκύπτουν εργαστηριακά μέσω της δοκιμής τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου.

Έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί με σκοπό την δημιουργία σχέσεων που να αποδίδουν τις τιμές των παραμέτρων αυτών, βασιζόμενες στις φυσικές ιδιότητες του εδάφους. Το γεγονός αυτό διευκολύνει το έργο των μηχανικών για την σχεδίαση νέων οδοστρωμάτων αλλά και την βελτίωση υπαρχόντων οδοστρωμάτων, καθώς μειώνει το χρόνο και το κόστος παραγωγής. Ωστόσο, οι μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι στιγμής δημιουργούν καλές συσχετίσεις απόδοσης των παραμέτρων k_i μόνο για τα συγκεκριμένα εδαφικά δοκίμια ανά περιοχή. Οι σχέσεις που έχουν καλές στατιστικές περιορίζονται γενικά σε συγκεκριμένους τύπους εδαφών. Άλλες μελέτες που χρησιμοποίησαν ένα ευρύ φάσμα εδαφών και συνθηκών είχαν ως αποτέλεσμα κακές συσχετίσεις. Αυτό κάνει φανερό το γεγονός ότι δεν υπάρχει μια σχέση απόδοσης των παραμέτρων k_i που να εφαρμόζεται και να αναγνωρίζεται γενικά από μελετητές και από αντίστοιχες κρατικές οργανώσεις.

Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθεται ένας αριθμός μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί σε εδαφικά δοκίμια της στρώσης έδρασης και οδηγούν σε σχέσεις απόδοσης των τιμών των παραμέτρων k_i για διάφορες εξισώσεις του ενεργού μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης. Στις μελέτες παρουσιάζονται αναλυτικά, ο εργαστηριακός προσδιορισμός των παραμέτρων k_i και οι τελικές εξισώσεις συσχέτισης.

- **Hani et al., 2006**

Ένα πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών διεξήχθη σε δεκαεννέα εδάφη, τα οποία περιελάμβαναν κοινά εδάφη στρώσεων έδρασης στο Wisconsin. Το πρόγραμμα δοκιμών διεξήχθη στο Εργαστήριο Γεωτεχνικής και Οδοστρωσίας στο Πανεπιστήμιο Wisconsin-Milwaukee. Τα δείγματα εδάφους υποβλήθηκαν σε διαφορετικές δοκιμές για τον προσδιορισμό των φυσικών τους ιδιοτήτων, των χαρακτηριστικών συμπύκνωσης και του ενεργού μέτρου ελαστικότητας. Τα συλλεγόμενα εδάφη υποβλήθηκαν σε τυποποιημένες εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό των φυσικών τους ιδιοτήτων και των χαρακτηριστικών συμπύκνωσης. Ο έλεγχος του εδάφους περιελάμβανε τα ακόλουθα: κοκκομετρική διαβάθμιση (αναλύσεις κόσκινου και υδρομέτρου), όρια Atterberg (όριο υδαρότητας, LL και όριο πλαστιμότητας, PL) και ειδικό βάρος (γ_s). Τα εδάφη υποβλήθηκαν επίσης σε δοκιμασία Standard Proctor για να προσδιοριστεί η βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία (w_{opt}) και το μέγιστο ξηρό ειδικό βάρος (γ_{dmax}).

Το ενεργό μέτρο ελαστικότητας των εδαφών που ερευνήθηκαν προσδιορίστηκε από τη δοκιμή τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου μετά τη διαδικασία AASHTO T 307. Το εργαστηριακό πρόγραμμα δοκιμών παρήγαγε μια υψηλής ποιότητας και συνεπής βάσης δεδομένων αποτελέσματα δοκιμών. Τα αποτελέσματα των δοκιμών υψηλής ποιότητας εξασφαλίστηκαν μέσω μελέτης επαναληψιμότητας και επίσης διεξάγοντας δύο δοκιμές σε κάθε δείγμα εδάφους στις καθορισμένες φυσικές συνθήκες. Οι μη καταστρεπτικές μέθοδοι δοκιμών με τη χρήση του Dynaflect και του Falling Weight Deflectometer (FWD) χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του ενεργού μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης κάτω από τα υπάρχοντα οδοστρώματα.

Για τον προσδιορισμό του ενεργού μέτρου ελαστικότητας επιλέχθηκε η εξίσωση που υιοθετήθηκε κατά το πρόγραμμα NCHRP 1-37^A (εξ. 4.17). Διεξήχθη εκτεταμένη στατιστική ανάλυση για την ανάπτυξη συσχετίσεων μεταξύ των βασικών ιδιοτήτων του εδάφους και των παραμέτρων του ενεργού μέτρου ελαστικότητας k_i .

Σε μία από τις δοκιμές εξετάστηκαν δύο δοκίμια με 95% γ_{dmax} και $w > w_{opt}$ και έδειξε μείωση του ενεργού μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με το ποσοστό σε υγρασία. Και τα δύο δείγματα

είχαν παρόμοιες τιμές ειδικού βάρους ($\gamma_d = 17,3 \text{ kN} / \text{m}^3$) και διαφορετική περιεκτικότητα σε υγρασία. Το δείγμα με τη χαμηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία εμφάνισε υψηλότερες τιμές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με το άλλο δείγμα με υψηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία με πάντα ίδια τιμή του γ_d . Η επίδραση της αυξημένης περιεκτικότητας σε υγρασία του εδάφους στη μείωση του ενεργού μέτρου ελαστικότητας είναι σημαντική. Το δείγμα εδάφους που δοκιμάστηκε για γ_{dmax} και w_{opt} εμφάνισε τιμές M_r μικρότερες από το δείγμα που συμπυκνώθηκε για 95% του γ_{dmax} και $w < w_{opt}$ (ξηρή πλευρά). Αυτό οφείλεται κυρίως στην περιεκτικότητα σε υγρασία, αφού το δείγμα που έχει συμπιεσθεί με τη βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία έχει 4% περισσότερη υγρασία. Παρατηρήθηκε, ότι η επίδραση της περιεκτικότητας σε υγρασία ξεπερνά την επίδραση του ειδικού βάρους.

Για πολλά από τα εδάφη που ερευνήθηκαν, οι τιμές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας των εδαφών που συμπυκνώθηκαν στο 95% του γ_{dmax} στην ξηρή πλευρά είναι υψηλότερες από τις τιμές του ίδιου εδάφους που συμπυκνώνονται στο γ_{dmax} και στη βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία. Το έδαφος συμπιεσμένο σε περιεκτικότητα υγρασίας μικρότερη από τη βέλτιστη και στο 95% του γ_{dmax} επέδειξε σκλήρυνση και έδειξε υψηλότερες τιμές ενεργού μέτρου ελαστικότητας με την αύξηση της τάσης σ_d . Το έδαφος συμπιεσμένο σε ειδικό βάρος 95% του γ_{dmax} στην υγρή πλευρά παρουσίασε χαμηλές τιμές M_r σε σύγκριση με το ίδιο έδαφος συμπιεσμένο σε βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία.

Επαναλαμβανόμενες δοκιμές τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου διεξήχθησαν κατά μέσο όρο έξι φορές σε κάθε τύπο εδάφους σε τρία διαφορετικά επίπεδα περιεκτικότητας σε υγρασία και δύο επίπεδα ξηρού βάρους μονάδας (δηλ. 95% γ_{dmax} και γ_{dmax}).

Στατιστική ανάλυση με βάση την πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του μοντέλου του ενεργού μέτρου ελαστικότητας k_1 , k_2 και k_3 . Προκειμένου να προσδιοριστούν τα k_1 , k_2 και k_3 χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών, το μοντέλο του M_r με εξίσωση:

$$M_r = k_1 P_a \left[\frac{\theta}{P_a} \right]^{k_2} \left[\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right]^{k_3} \quad (4.17)$$

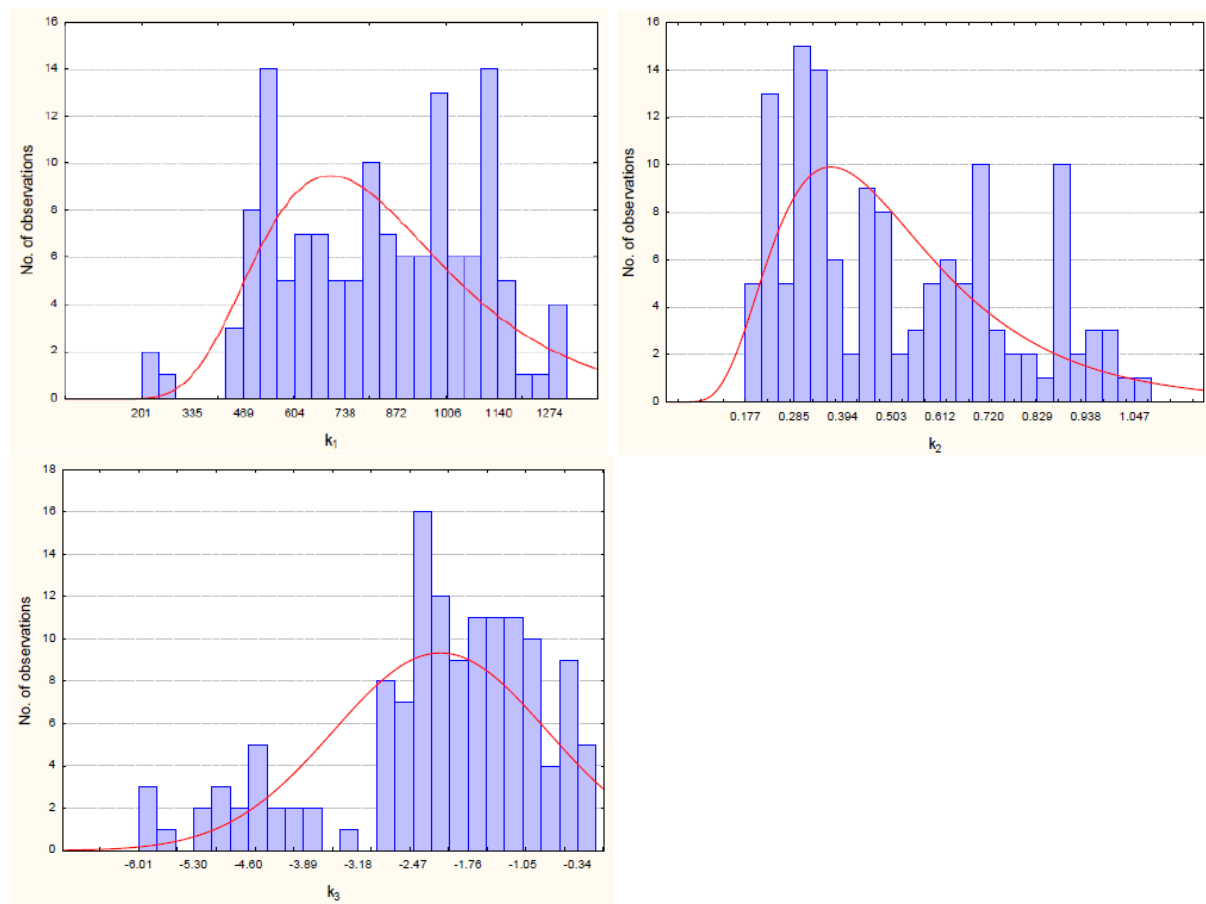
μετατράπηκε σε:

$$\log \left(\frac{M_r}{P_a} \right) = \log k_1 + k_2 \log \frac{\sigma_d}{P_a} + k_3 \log \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right) \quad (4.22)$$

Στο παραπάνω, το ενεργό μέτρο ελαστικότητας αντιμετωπίζεται ως εξαρτημένη μεταβλητή, ενώ ως ανεξάρτητες μεταβλητές χρησιμοποιούνται οι τάσεις θ και τ_{oct} . Η ανάλυση έγινε για

κάθε τύπο εδάφους για να αξιολογηθούν οι παράμετροι του μοντέλου (k_1 , k_2 και k_3) από τα αποτελέσματα των 15 συνδυασμών τάσεων που εφαρμόστηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου (15 σειρές φορτίου σύμφωνα με το AASHTO T 307).

Η ανάλυση έδειξε, ότι το k_1 κυμαίνεται από 201,2 έως 1318,7 με μέση τιμή 826,8. Το μέγεθος του k_1 ήταν πάντοτε μεγαλύτερο του μηδενός, δεδομένου ότι το ενεργό μέτρο ελαστικότητας πρέπει πάντα να είναι μεγαλύτερο από το μηδέν. Η παράμετρος k_2 κυμαίνεται μεταξύ 0,176 και 1,083 με μέση τιμή 0,517. Οι τιμές του k_2 ήταν επίσης μεγαλύτερες από το μηδέν, καθώς το ενεργό μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται με την αύξηση της τάσης θ (περιορισμός). Εφόσον το M_r μειώνεται με την αύξηση της τάσης σ_d , η παράμετρος k_3 κυμαίνεται από -6,013 έως -0,105 με μέση τιμή -2,142. Οι παράμετροι k_i που προκύπτουν από τη στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων της δοκιμής τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου παρουσιάζονται σε ιστογράμματα στην εικόνα 4.2.



Εικόνα 4. 2 Ιστογράμματα δοκιμής τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου
Πηγή: Titi, 2006

Οι παράμετροι του μοντέλου του ενεργού μέτρου ελαστικότητας k_1 , k_2 και k_3 προσδιορίστηκαν για όλους τους τύπους εδάφους. Αυτές οι παράμετροι στη συνέχεια συσχετίστηκαν με τις βασικές ιδιότητες του εδάφους χρησιμοποιώντας ανάλυση παλινδρόμησης. Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου (k_1 , k_2 και k_3) χρησιμοποιήθηκαν εναλλακτικά ως εξαρτημένες μεταβλητές ενώ διάφορες θεμελιώδεις ιδιότητες του εδάφους αντιμετωπίστηκαν ως ανεξάρτητες μεταβλητές. Διάφοροι συνδυασμοί ιδιοτήτων εδάφους (ανεξάρτητες μεταβλητές) χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση παλινδρόμησης. Το γενικό μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης εκφράζεται ως:

$$k_i = \beta_o + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (4.23)$$

όπου:

k_i : η εξαρτημένη μεταβλητή για την παλινδρόμηση (παράμετροι μοντέλου k_1 , k_2 ή k_3).

β_o : σημείο μηδενισμού του επιπέδου παλινδρόμησης.

β_i : συντελεστή παλινδρόμησης.

x_i : η ανεξάρτητη μεταβλητή, (σε αυτή τη μελέτη, η ιδιότητα του εδάφους ή ένας συνδυασμός ιδιοτήτων του εδάφους).

ϵ : τυχαίο σφάλμα.

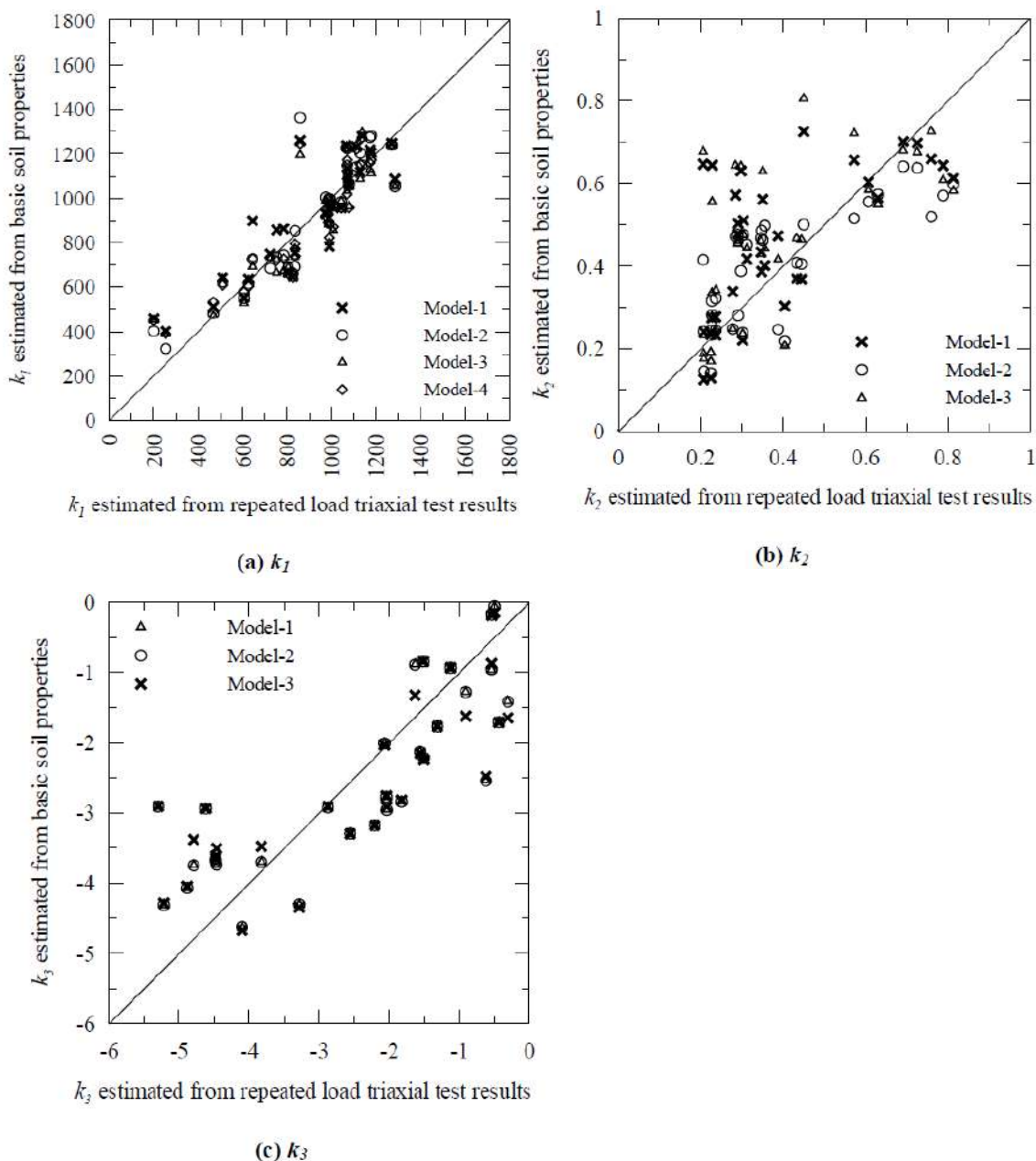
Το ενεργό μέτρο ελαστικότητας χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της ακαμψίας δεσμευμένων και αδέσμευτων υλικών. Ως γνωστόν, παράγοντες που επηρεάζουν το ενεργό μέτρο ελαστικότητας είναι η κατάσταση καταπόνησης, ο τύπος του εδάφους και οι περιβαλλοντικές συνθήκες του εδάφους που επηρεάζουν τη φυσική κατάσταση του εδάφους (ειδικό βάρος και περιεκτικότητα σε υγρασία). Η κατάσταση καταπόνησης εκφράζεται στο μοντέλο του Mr, συμπεριλαμβάνοντας τις τάσεις θ και τ_{oct} . Ο τύπος του εδάφους και η τρέχουσα φυσική κατάσταση του εδάφους θα πρέπει να συμπεριλαμβάνονται σε απόπειρες συσχέτισμού προκειμένου να ληφθεί έγκυρη εκτίμηση / πρόβλεψη του Mr.

Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που είναι διαθέσιμες από βασικές δοκιμές εδάφους και αντιπροσωπεύουν τον τύπο του εδάφους και την τρέχουσα φυσική κατάσταση του εδάφους είναι: το ποσοστό διερχόμενο κοσκίνου # 4 ($P_{No.4}$), το ποσοστό διερχόμενου κόσκινου # 40 ($P_{No.40}$), το όριο υδαρότητας (LL), το όριο πλαστιμότητας (PL), ο δείκτης πλαστιμότητας (PI), ο δείκτης υδαρότητας (LI), το ποσοστό άμμου (% άμμου), το ποσοστό υγρασίας (w) και το ξηρό ειδικό βάρος (γ_d). Περιλαμβάνονται επίσης η βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία ($w_{opt.}$), το μέγιστο ξηρό ειδικό βάρος (γ_{dmax}) και τέλος ο συνδυασμός των μεταβλητών.

Η πρώτη ανάλυση έδωσε κακές συσχετίσεις του M_f με το ποσοστό υγρασίας καθώς οι τιμές R^2 ήταν πολύ χαμηλές και τα μοντέλα δεν απέδιδαν καλές τιμές για την πρόβλεψη των παραμέτρων του μοντέλου M_f . Έτσι, σε μία άλλη προσπάθεια ανάλυσης διαχωρίστηκαν και αναλύθηκαν ανεξάρτητα τα λεπτόκοκκα και τα χονδρόκοκκα εδάφη.

Λεπτόκοκκα εδάφη

Χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές βασικές ιδιότητες εδάφους για να ληφθούν συσχετίσεις με τις παραμέτρους k_1 , k_2 και k_3 . Κάθε συσχέτιση εξετάστηκε τόσο από φυσική όσο και από στατιστική άποψη. Η εικόνα 4.3 απεικονίζει συγκρίσεις μεταξύ των τιμών k_i που λαμβάνονται από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της δοκιμής τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου (που θεωρούνται εδώ ως μετρημένες τιμές) και των τιμών k_i που υπολογίζονται από τις βασικές ιδιότητες του εδάφους χρησιμοποιώντας τους προτεινόμενους συσχετισμούς. Η εξέταση των σχημάτων δείχνει, ότι αυτά τα μοντέλα είναι συνεπή με τη φυσική συμπεριφορά των εδαφών. Τα μεγέθη του R^2 για τους συσχετισμούς του k_1 κυμαίνονται μεταξύ 0,83 και 0,88, το οποίο θεωρείται αποδεκτό ενώ για τα k_2 και k_3 λήφθηκαν κατώτερες τιμές για το R^2 .



Εικόνα 4. 3 Σύγκριση των παραμέτρων k_i που υπολογίζονται θεωρητικά και των k_i που προσδιορίζονται από τη δοκιμή τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου στα λεπτόκοκκα εδάφη

Πηγή: Titi, 2006

Με βάση τη στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων των εξεταζόμενων λεπτόκοκκων εδαφών, οι παράμετροι του μοντέλου του ενεργού μέτρου ελαστικότητας (k_i) μπορούν να εκτιμηθούν από τις βασικές ιδιότητες του εδάφους χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες εξισώσεις:

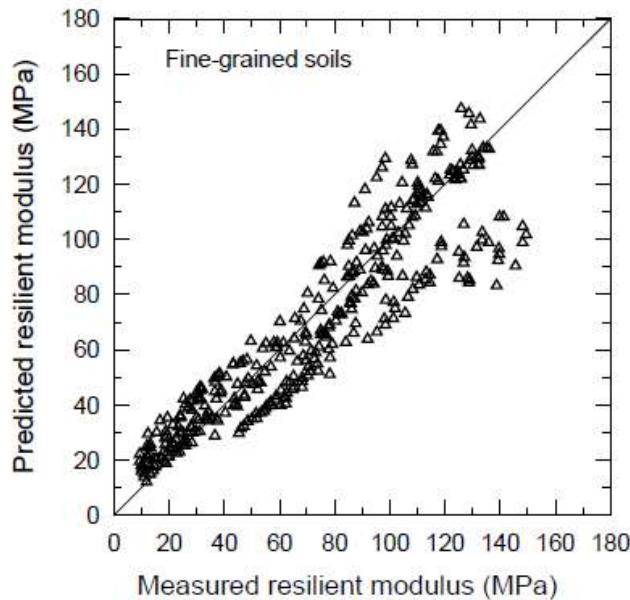
$$k_1 = 404.166 + 42.933PI + 52.260\gamma_d - 987.353 \left(\frac{w}{w_{opt}} \right) \quad (4.24)$$

$$k_2 = 0.25113 - 0.0292PI + 0.5573 \left(\frac{w}{w_{opt}} \right) \times \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}} \right) \quad (4.25)$$

$$k_3 = -0.20772 + 0.23088PI + 0.00367\gamma_d - 5.4238 \left(\frac{w}{w_{opt}} \right) \quad (4.26)$$

Όπου PI είναι ο δείκτης πλαστιμότητας, w είναι η περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους, w_{opt} είναι η βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία, γ_d είναι το ξηρό ειδικό βάρος και το γ_{dmax} είναι το μέγιστο ξηρό ειδικό βάρος.

Οι ανωτέρω εξισώσεις σε συνδυασμό με την εξίσωση MEPDG του Mr , χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του ενεργού μέτρου ελαστικότητας των εξεταζόμενων λεπτόκοκκων εδαφών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην εικόνα 4.4, η οποία απεικονίζει τις προβλεπόμενες έναντι των μετρημένων τιμών του ενεργού μέτρου ελαστικότητας. Η ανάλυση της εικόνας 4.4 δείχνει, ότι το ενεργό μέτρο ελαστικότητας των συμπιεσμένων λεπτόκοκκων εδαφών μπορεί να εκτιμηθεί από την εξίσωση του Mr και τις συσχετίσεις που προτείνονται από τις εξισώσεις των k_i με λογική ακρίβεια.

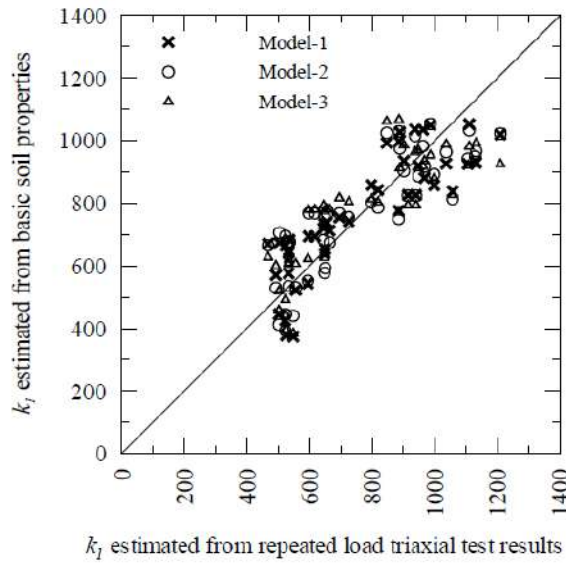


Εικόνα 4. 4 Προβλεπόμενες έναντι μετρημένες τιμές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας λεπτόκοκκων εδαφών
Πηγή: Titi, 2006

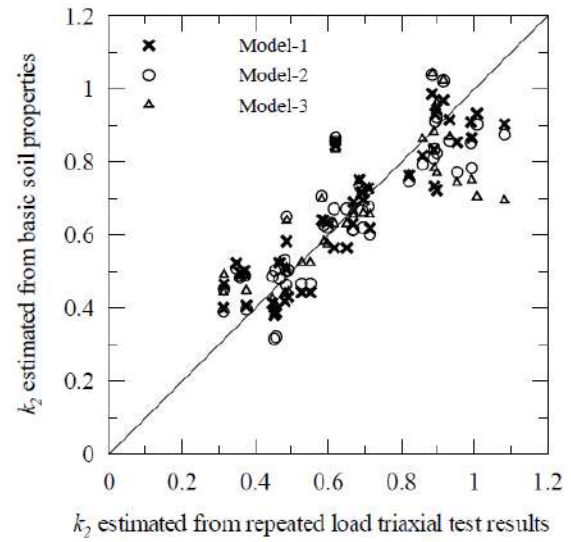
Χονδρόκοκκα εδάφη

Η ανάλυση παλινδρόμησης που διεξήχθη στα αποτελέσματα των δοκιμών των χονδρόκοκκων εδαφών οδήγησε σε κακή συσχέτιση μεταξύ των τιμών k_i και των βασικών ιδιοτήτων του εδάφους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μερικά από τα εξεταζόμενα χονδρόκοκκα εδάφη δεν έχουν χαρακτηριστικά πλαστιμότητας. Ως εκ τούτου, τα χονδρόκοκκα εδάφη χωρίστηκαν σε δύο ομάδες για στατιστική ανάλυση: πλάστιμα χονδρόκοκκα εδάφη και μη πλάστιμα χονδρόκοκκα εδάφη. Έτσι, επιπρόσθετα στην ανάλυση συμπεριλήφθηκαν οι παράμετροι που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά μεγέθους κόκκων στα χονδρόκοκκα εδάφη, όπως ο συντελεστής καμπυλότητας (C_c), ο συντελεστής ανομοιομορφίας (C_u) και το μέγεθος κόκκου από το οποίο το 10% του υλικού έχει μικρότερο μέγεθος (D_{10}). Αυτές οι παράμετροι δεν βελτίωσαν τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης και συνεπώς αποκλείστηκαν.

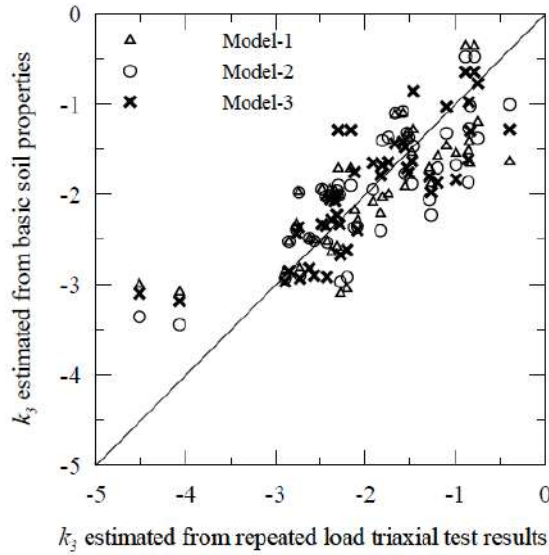
Η εικόνα 4.5 απεικονίζει συγκρίσεις μεταξύ των τιμών k_i που λαμβάνονται από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της δοκιμής τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου και των τιμών k_i που υπολογίζονται από τις βασικές ιδιότητες του εδάφους χρησιμοποιώντας τους προτεινόμενους συσχετισμούς. Μια εξέταση της εικόνας 4.5 δείχνει ότι τα μοντέλα πρόβλεψης των k_i είναι αποδεκτά με τις τιμές του R^2 να κυμαίνονται από 0.59 έως 0.79.



(a) k_1



(b) k_2



(c) k_3

Εικόνα 4. 5 Σύγκριση των παραμέτρων k_i που υπολογίζονται θεωρητικά και των k_i που προσδιορίζονται από τη δοκιμή τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου στα μη πλάστιμα χονδρόκοκκα εδάφη
Πηγή: Titi, 2006

Βάσει της στατιστικής ανάλυσης στα εξεταζόμενα **μη πλάστιμα χονδρόκοκκα εδάφη**, οι παράμετροι του μοντέλου του ενεργού μέτρου ελαστικότητας (k_i) μπορούν να εκτιμηθούν από τις βασικές ιδιότητες του εδάφους χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες εξισώσεις:

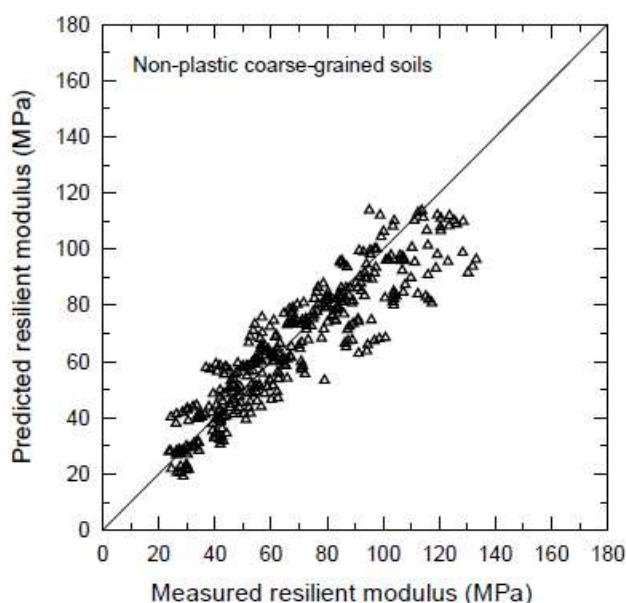
$$k_1 = 809.547 + 10.568P_{No.4} - 6.112P_{No.40} - 578.337 \left(\frac{w}{w_{opt}} \right) \times \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}} \right) \quad (4.27)$$

$$k_2 = 0.5661 + 0.006711P_{No.40} - 0.02423P_{No.200} + 0.05849(w - w_{opt}) + 0.001242(w_{opt}) \times (\gamma_{dmax}) \quad (4.28)$$

$$k_3 = -0.5079 - 0.041411P_{No.40} + 0.14820P_{No.200} - 0.1726(w - w_{opt}) - 0.01214(w_{opt}) \times (\gamma_{dmax}) \quad (4.29)$$

όπου το $P_{No.4}$ είναι το ποσοστό διερχόμενου που περνάει το κόσκινο #4, το $P_{No.40}$ είναι το ποσοστό που περνάει το κόσκινο #40, το $P_{No.200}$ είναι το ποσοστό διερχόμενου από το #200, w είναι η περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους, w_{opt} είναι η βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία, γ_d είναι το ειδικό ξηρό βάρος και το γ_{dmax} είναι το μέγιστο ειδικό ξηρό βάρος.

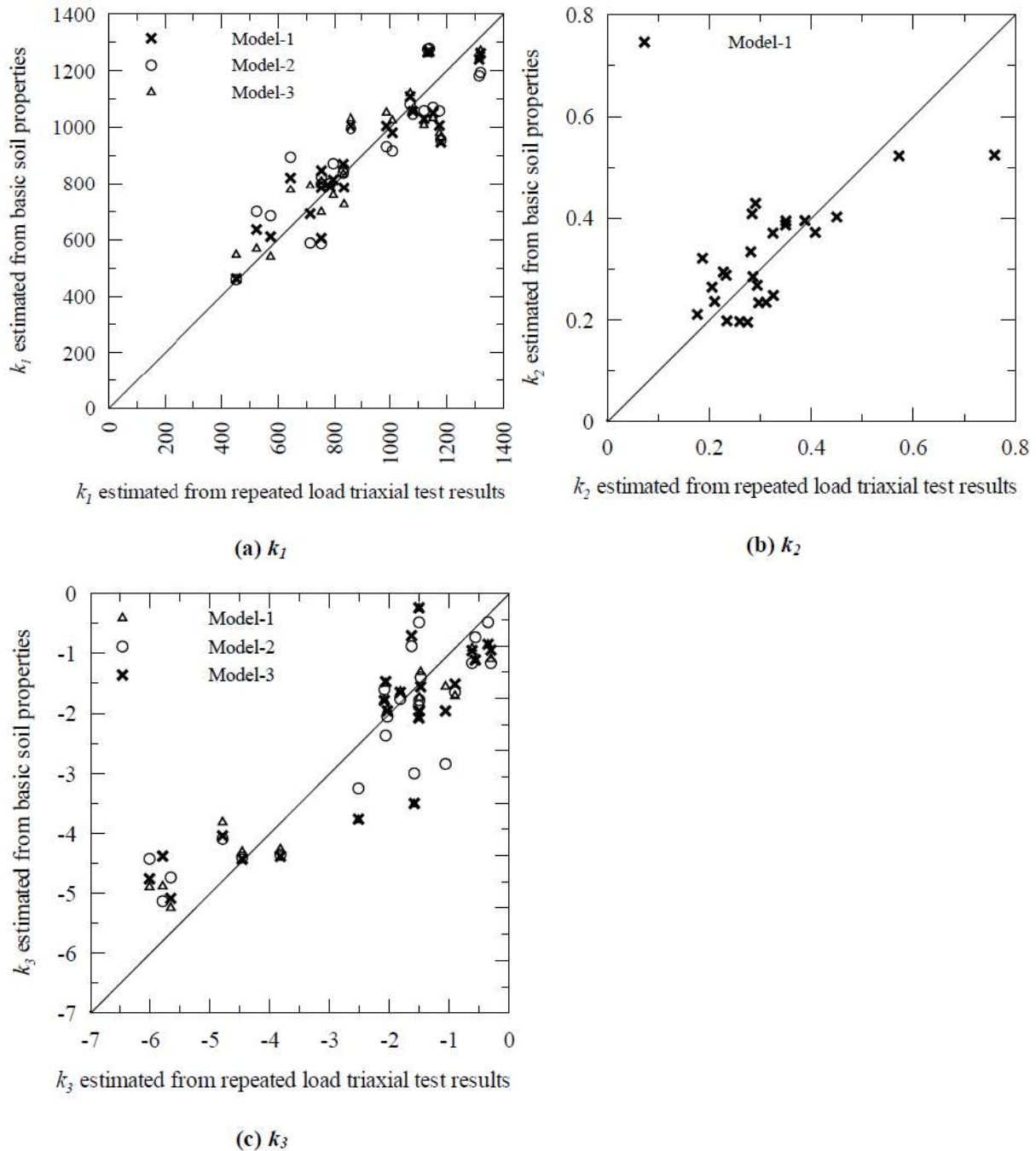
Οι εξισώσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν για να εκτιμηθεί το ενεργό μέτρο ελαστικότητας των εξεταζόμενων μη πλάστιμων χονδρόκοκκων εδαφών. Η εικόνα 4.6 απεικονίζει τη σύγκριση των προβλεπόμενων ως προς τις μετρημένες τιμές ενεργό μέτρο ελαστικότητας χρησιμοποιώντας αυτές τις εξισώσεις. Η εξέταση της εικόνας 4.6 καταδεικνύει, ότι οι εκτιμώμενες τιμές του M_r των συμπαγών μη πλάστιμων χονδρόκοκκων εδαφών είναι σύμφωνες με τις τιμές που λαμβάνονται από τα αποτελέσματα των δοκιμών τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου.



Εικόνα 4. 6 Προβλεπόμενες έναντι μετρημένες τιμές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας μη πλάστιμων χονδρόκοκκων εδαφών
Πηγή: Titi, 2006

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης σε πλάστιμα χονδρόκοκκα εδάφη παρουσιάζονται στην εικόνα 4.7, το οποίο απεικονίζει συγκρίσεις μεταξύ των τιμών k_i που λαμβάνονται από την ανάλυση των αποτελεσμάτων τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου και των τιμών k_i που υπολογίζονται από τις βασικές ιδιότητες του εδάφους. Η

ανάλυση της εικόνας 4.7 δείχνει, ότι η προβλεπόμενη τιμή του k_i είναι συνεπής με τις τιμές που λαμβάνονται από τα αποτελέσματα των δοκιμών. Ο συντελεστής R^2 για τους συσχετισμούς κυμαίνεται μεταξύ 0,58 και 0,83.



Εικόνα 4. 7 Σύγκριση των παραμέτρων k_i που υπολογίζονται θεωρητικά και των k_i που προσδιορίζονται από τη δοκιμή τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου στα πλαστίμα χονδρόκοκκα εδάφη
Πηγή: Titi, 2006

Με βάση τη στατιστική ανάλυση στα εξεταζόμενα **πλάστιμα χονδρόκοκκα εδάφη**, οι παράμετροι του μοντέλου του ενεργού μέτρου ελαστικότητας (k_i) μπορούν να εκτιμηθούν από τις βασικές ιδιότητες του εδάφους χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες εξισώσεις:

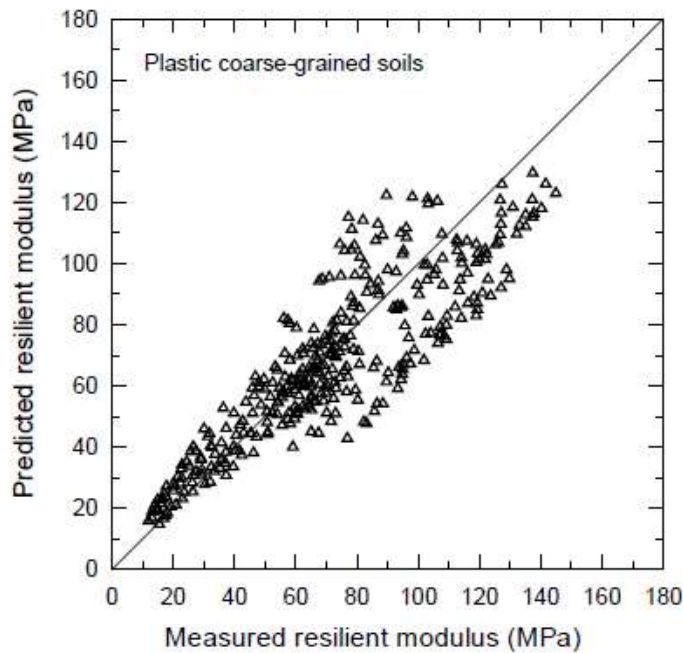
$$k_1 = 8642.873 + 132.643P_{No.200} - 428.067(\%Silt) - 254.685PI + 197.230\gamma_d - 381.400\left(\frac{w}{w_{opt}}\right) \quad (4.30)$$

$$k_2 = 2.3250 - 0.00853P_{No.200} + 0.02579LL - 0.06224PI - 1.73380\left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}}\right) + 0.20911\left(\frac{w}{w_{opt}}\right) \quad (4.31)$$

$$k_3 = -32.5449 + 0.7691P_{No.200} - 1.1370(\%Silt) + 31.5542\left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}}\right) - 0.4128(w - w_{opt}) \quad (4.32)$$

Όπου το $P_{No.200}$ είναι το ποσοστό διερχόμενου του κόσκινου #200, $\%Silt$ είναι η ποσότητα της αργιλίου στο έδαφος, LL είναι το όριο υδαρότητας, PI είναι ο δείκτης πλαστιμότητας, w είναι η περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους, w_{opt} είναι η βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία, γ_d είναι το ξηρό ειδικό βάρος και το γ_{dmax} είναι το μέγιστο ειδικό ξηρό βάρος.

Οι εξισώσεις χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του ενεργού μέτρου ελαστικότητας των εξεταζόμενων πλάστιμων χονδρόκοκκων εδαφών. Η εικόνα 4.8 δείχνει μια σύγκριση των προβλεπόμενων ως προς τις μετρημένες τιμές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας χρησιμοποιώντας αυτές τις εξισώσεις. Μια ανάλυση της εικόνας 4.8 οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι οι εκτιμώμενες τιμές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας των πλάστιμων χονδρόκοκκων εδαφών συνάδουν με τις τιμές που λαμβάνονται από τις δοκιμές τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου.



Εικόνα 4. 8 Προβλεπόμενες έναντι μετρημένες τιμές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας πλαστικών χονδρόκοκκων εδαφών
Πηγή: Titi, 2006

Στο εξής στην παρούσα εργασία τα μοντέλα πρόβλεψης των παραμέτρων k_i που προέκυψαν από την έρευνα των Hani et al. (2006) θα αναφέρονται ως μοντέλα Wisconsin. Αξίζει να σημειωθεί ότι το περιεχόμενο της έρευνας που διεξήγαγαν οι Hani et al. δεν αντικατοπτρίζει απαραίτητα τις επίσημες απόψεις του Υπουργείου Μεταφορών του Wisconsin.

- **Yau και Von Quintus, 2004**

Το μοντέλο των Yau και Von Quintus (2004) χρησιμοποιήθηκαν για την πρόβλεψη του ενεργού μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης εδαφών του Wisconsin. Το μοντέλο αυτό θα αναφέρονται στο εξής ως μοντέλο LTPP. Οι τιμές του M_r που προβλέπονται από το μοντέλο LTPP στη συνέχεια συγκρίνονται με τις τιμές που λήφθηκαν από τα αποτελέσματα των δοκιμών και με τις τιμές που προβλέπονται από το μοντέλο Wisconsin.

Οι συντελεστές k_1 , k_2 και k_3 είναι σταθερές, εξαρτημένες από τον τύπο του υλικού και τις φυσικές ιδιότητες, και λαμβάνονται από την ανάλυση παλινδρόμησης. Δεδομένου ότι ο συντελεστής k_1 είναι ανάλογος με το συντελεστή Young, πρέπει πάντα να είναι θετικός, καθώς το M_r δεν μπορεί ποτέ να είναι αρνητικό. Ο συντελεστής k_2 πρέπει να είναι θετικός, διότι η αύξηση της τάσης θ προκαλεί ακαμψία ή σκλήρυνση του υλικού, αποδίδοντας υψηλότερο συντελεστή. Ο συντελεστής k_3 θα πρέπει να είναι αρνητικός, επειδή μια αύξηση στην διατμητική τάση μαλακώνει το υλικό, αποδίδοντας έτσι χαμηλότερη τιμή. Εάν οι μη-

γραμμικοί συντελεστές ιδιοτήτων k_2 και k_3 είναι μηδενικοί, τότε το μοντέλο μπορεί να απλουστευθεί ως γραμμικό ελαστικό.

Τα μοντέλα πρόβλεψης LTPP (Yau και Von Quintus, 2004) που χρησιμοποιήθηκαν για την πρόβλεψη του Mr μέσω της εξίσωσης 4.17 παρουσιάζονται στις ακόλουθες εξισώσεις:

Εξισώσεις LTPP για αργιλώδη εδάφη

$$k_1 = 1.3577 + 0.0106(\%Clay) - 0.0437w \quad (4.33)$$

$$k_2 = 0.5193 - 0.0073P_{No.4} + 0.0095P_{No.40} - 0.0027P_{No.200} + 0.0030LL - 0.0049w_{opt} \quad (4.34)$$

$$k_3 = 1.4258 - 0.0288P_{No.4} + 0.0303P_{No.40} - 0.0521P_{No.200} + 0.0251(\%Silt) + 0.0535LL - 0.0672w_{opt} - 0.0026\gamma_{dmax} + 0.0025\gamma_d - 0.6055\left(\frac{w}{w_{opt}}\right) \quad (4.35)$$

Εξισώσεις LTPP για εδάφη από ιλύς

$$k_1 = 1.0480 + 0.0177(\%Clay) + 0.0279PI - 0.0370w \quad (4.36)$$

$$k_2 = 0.5097 - 0.0286PI \quad (4.37)$$

$$k_3 = -0.2218 + 0.0047(\%Silt) + 0.0849PI - 0.1399w \quad (4.38)$$

Εξισώσεις LTPP για αμμώδη εδάφη

$$k_1 = 3.2868 - 0.0412P_{3/8} + 0.0137(\%Clay) + 0.0083LL + 0.0379w_{opt} + 0.0004\gamma_d \quad (4.39)$$

$$k_2 = 0.5670 + 0.0045P_{3/8} - 2.98 \times 10^{-5}P_{No.4} - 0.0043(\%Silt) - 0.0102(\%Clay) - 0.0041LL + 0.0014w_{opt} - 3.14 \times 10^{-5}\gamma_d - 0.4582\left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}}\right) + 0.1779\left(\frac{w}{w_{opt}}\right) \quad (4.40)$$

$$k_3 = -3.5677 + 0.1142P_{3/8} - 0.0839P_{No.4} - 0.1249P_{200} + 0.1030(\%Silt) + 0.1191(\%Clay) - 0.0069LL - 0.0103w_{opt} + 0.0017\gamma_d + 4.3177\left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}}\right) - 1.1095\left(\frac{w}{w_{opt}}\right) \quad (4.41)$$

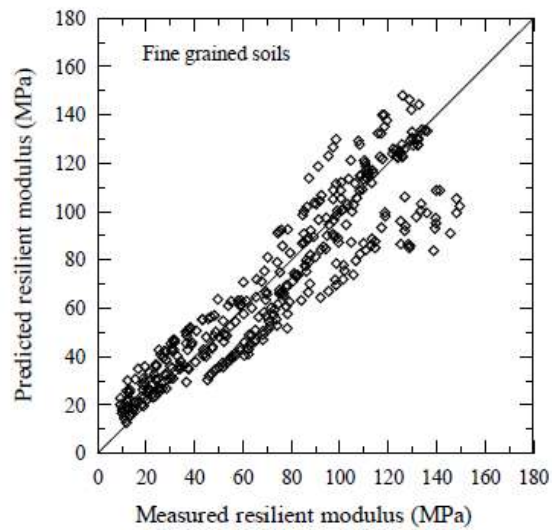
Εξισώσεις LTPP για όλα τα εδάφη

$$k_1 = 0.9848 - 0.0050P_{3/8} + 0.0011P_{No.4} + 0.0085(\%Clay) + 0.0089LL - 0.0094PI \\ - 0.0235w + 0.3290\left(\frac{w}{w_{opt}}\right) \quad (4.42)$$

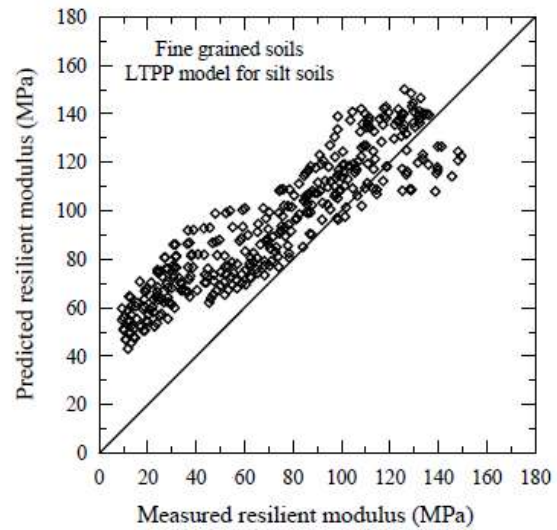
$$k_2 = 0.4808 - 0.0037P_{3/8} + 0.0062P_{No.4} - 0.0016P_{No.40} - 0.0008P_{200} \\ - 0.0018(\%Clay) - 0.0078LL + 0.0019PI + 0.0111w - 0.1232\left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}}\right) \\ - 0.0009\left(\frac{w}{w_{opt}}\right) \quad (4.43)$$

$$k_3 = 9.6691 - 0.0302P_{3/8} + 0.0065P_{No.4} + 0.0192P_{No.40} - 0.0115P_{200} \\ + 0.0040(\%Clay) + 0.0075LL + 0.0401PI + 0.0020w_{opt} - 0.0039\gamma_{dmax} \\ - 0.2750w - 0.7177\left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}}\right) + 1.0262\left(\frac{w}{w_{opt}}\right) + 5.28 \\ \times 10^{-6}\left(\frac{(\gamma_{dmax})^2}{P_{No.40}}\right) \quad (4.44)$$

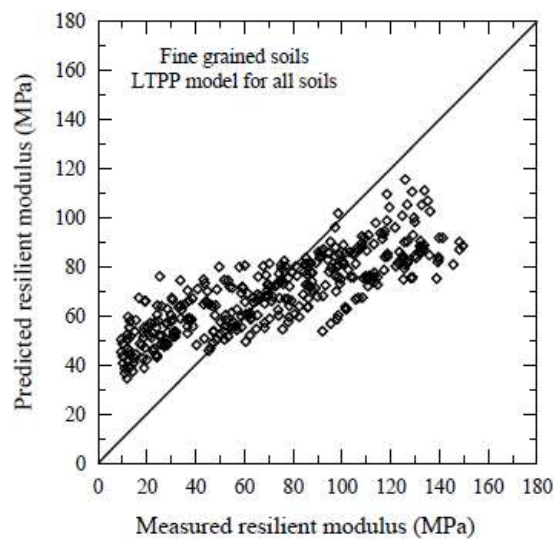
Οι εικόνες 4.9-4.11 παρουσιάζουν συγκρίσεις του προβλεπόμενου και μετρημένου ενεργού μέτρου ελαστικότητας λεπτόκοκκων εδαφών, μη πλάστιμων χονδρόκοκκων εδαφών και πλάστιμων χονδρόκοκκων εδαφών χρησιμοποιώντας τα μοντέλα LTPP (Yau και Von Quintus, 2004). Η ανάλυση των εικόνων 4.9-4.11 αποδεικνύει, ότι τα μοντέλα Wisconsin ήταν σε θέση να εκτιμήσουν καλύτερα το ενεργό μέτρο ελαστικότητας των εδαφών του Wisconsin από τα μοντέλα LTPP. Οι διαφορές στις διαδικασίες δοκιμής και οι λοιπές συνθήκες που σχετίζονται με την ανάπτυξη και των δύο μοντέλων συνέβαλαν στο συγκεκριμένο αποτέλεσμα.



(a) Using proposed model



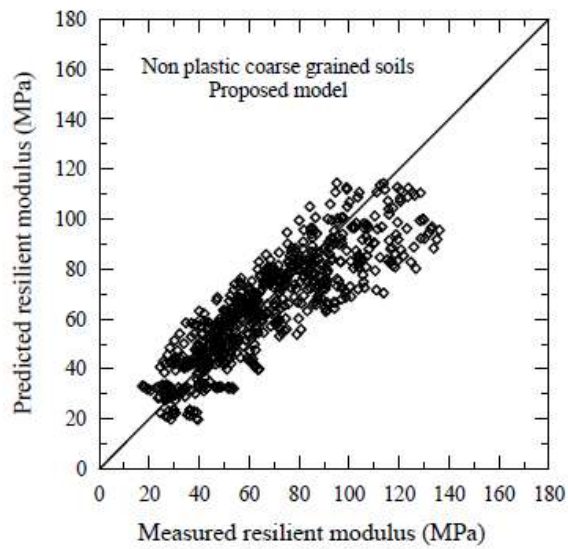
(b) Using LTPP silt model



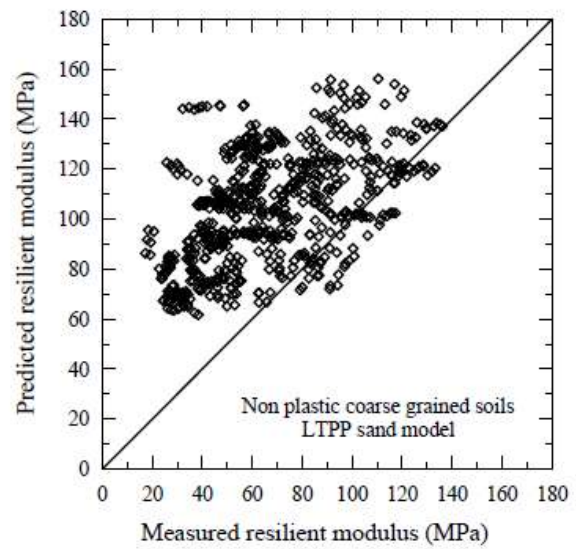
(c) Using LTPP model for combined (all) subgrade soils

Εικόνα 4. 9 Προβλεπόμενες έναντι μετρημένες τιμές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας λεπτόκοκκων εδαφών χρησιμοποιώντας τα μοντέλα Wisconsin (a) και τα μοντέλα LTPP (b)

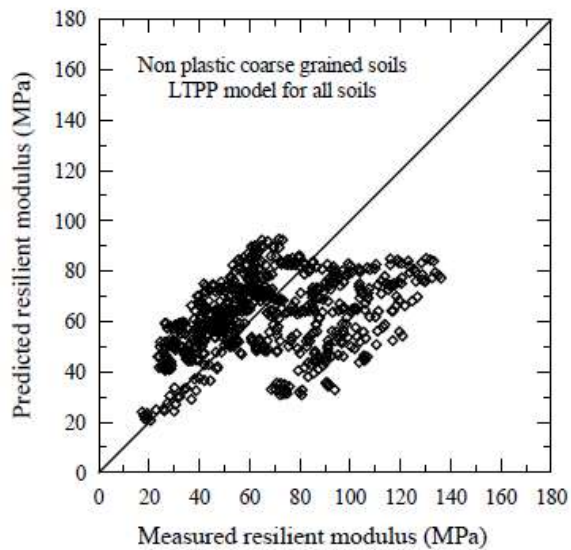
Πηγή: Titi, 2006



(a) Using proposed model



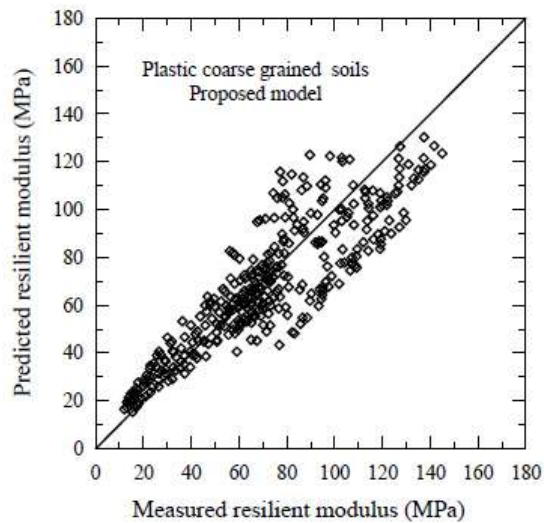
(b) Using LTPP sand model



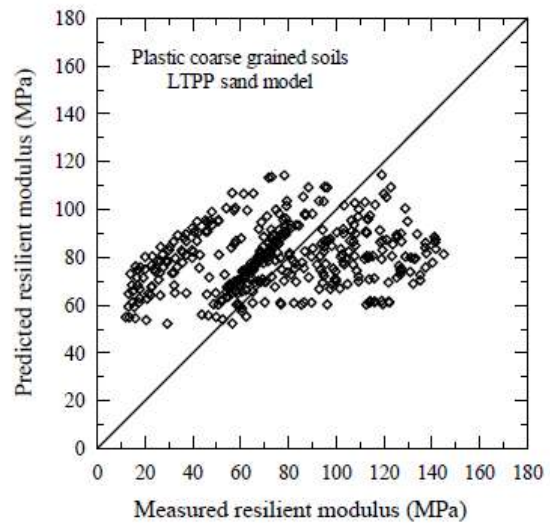
(c) Using LTPP model for combined (all) subgrade soils

Εικόνα 4. 10 Προβλεπόμενες έναντι μετρημένες τιμές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας μη πλαστικών χονδρόκοκκων εδαφών χρησιμοποιώντας τα μοντέλα Wisconsin (a) και τα μοντέλα LTPP (b)

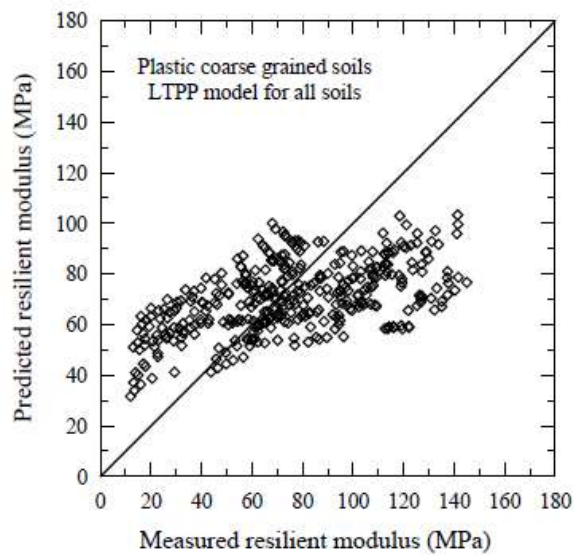
Πηγή: Titi, 2006



(a) Using proposed model



(b) Using LTPP sand model



(c) Using LTPP model for combined (all) subgrade soils

Εικόνα 4. 11 Προβλεπόμενες έναντι μετρημένες τιμές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας πλαστικών χονδρόκοκκων εδαφών χρησιμοποιώντας τα μοντέλα Wisconsin (a) και τα μοντέλα LTPP (b)

Πηγή: Titi, 2006

- **Santha, 1994**

Ο Santha του Τμήματος Μεταφορών της Γεωργίας συνέκρινε δύο γνωστά μοντέλα (μοντέλο k-θ και το MEPDG) στη μοντελοποίηση του εδάφους της στρώσης έδρασης καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι το M_r των κοκκωδών εδαφών περιγράφεται καλύτερα από το μοντέλο MEPDG. Μελετήθηκαν επίσης οι επιδράσεις των υλικών και των φυσικών ιδιοτήτων των εδαφών της στρώσης έδρασης στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας. Τα δείγματα εδάφους της στρώσης έδρασης ανασυστάθηκαν στο εργαστήριο και ελέγχθηκαν για το M_r σύμφωνα με τη διαδικασία AASHTO T 274-82.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι παραμέτρους k_i στην εξίσωση μπορούν να εκτιμηθούν χρησιμοποιώντας τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους και οι τιμές της παραμέτρου k_i ποικίλλουν σε ένα ευρύ φάσμα συνεκτικών και κοκκωδών εδαφών. Από τη μελέτη 14 συνεκτικών εδαφών και 15 κοκκωδών εδαφών αναπτύχθηκαν οι εξισώσεις συσχέτισης. Μια προσέγγιση πολλαπλής ανάλυσης χρησιμοποιήθηκε για να ληφθούν οι σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων k_i (εξαρτώμενη μεταβλητή) και των ιδιοτήτων του εδάφους όπως το ποσοστό διερχομένου από το κόσκινο #40, το ποσοστό διερχομένου από το κόσκινο #60, το ποσοστό αργίλου (%Clay), το ποσοστό ιλύς (%Silt), το ποσοστό διόγκωσης (SHD), το ποσοστό συμπίεσης (SH), το μέγιστο ξηρό βάρος (γ_{dmax}), η βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία (w_{opt}), ο δείκτης Καλιφόρνιας (CBR), η περιεκτικότητα σε υγρασία (w), η συμπύκνωση του δείγματος (% COMP) και το ποσοστό κορεσμού (SATU). Δύο εξισώσεις συσχετισμού αναπτύχθηκαν, μία για τα κοκκώδη εδάφη και μία για τα συνεκτικά εδάφη, και έχουν την ακόλουθη μορφή.

Για κοκκώδη εδάφη:

$$M_r = k_1 P_a \left[\frac{\theta}{P_a} \right]^{k_2} \left[\frac{\sigma_d}{P_a} \right]^{k_3} \quad (4.12)$$

Όπου:

$$\begin{aligned} \log k_1 = & 3.479 - 0.07w + 0.24w_{ratio} + 3.681COMP + 0.011(\%Silt) + 0.006(\%Clay) \\ & - 0.025SW - 0.039\gamma_d + 0.004 \left(\frac{SW^2}{\%Clay} \right) \\ & + 0.003 \left(\frac{\gamma_d^2}{P_{40}} \right) \end{aligned} \quad (4.45)$$

$$\begin{aligned}
k_2 = & 6.044 - 0.053w_{ratio} - 2.076COMP + 0.0053SATU - 0.0056(\%Clay) + 0.0088SW \\
& - 0.0069SH - 0.027\gamma_d + 0.012CBR + 0.003\left(\frac{SW^2}{\%Clay}\right) \\
& - 0.31\left(\frac{SW + SH}{\%Clay}\right)
\end{aligned} \tag{4.46}$$

$$\begin{aligned}
k_3 = & 3.752 - 0.068w + 0.309w_{ratio} - 0.006(\%Silt) + 0.0053(\%Clay) + 0.026SH \\
& - 0.033\gamma_d - 0.0009\left(\frac{SW^2}{\%Clay}\right) + 0.00004\left(\frac{SATU^2}{SH}\right) \\
& - 0.0026(CBR * SH)
\end{aligned} \tag{4.47}$$

Για συνεκτικά εδάφη:

$$M_r = k_1 P_a \left[\frac{\sigma_d}{P_a} \right]^{k_3}$$

Όπου:

$$\begin{aligned}
\log k_1 = & 19.813 - 0.045w_{opt} - 0.131w - 9.171COMP + 0.0337(\%Silt) + 0.015LL \\
& - 0.016PI - 0.021SW - 0.052\gamma_d \\
& + 0.00001(P_{40} * SATU)
\end{aligned} \tag{4.48}$$

$$\begin{aligned}
k_3 = & 10.274 - 0.097w_{opt} - 1.06w_{ratio} - 3.471COMP + 0.0088P_{40} - 0.0087PI \\
& + 0.014SH \\
& - 0.046\gamma_d
\end{aligned} \tag{4.49}$$

Όπου:

$$w_{ratio} = \frac{w}{w_{opt}}$$

- **Dai και Zollars, 2002**

Οι Dai et al., σε μια προσπάθεια να συγκρίνουν δύο από τα πιο γνωστά μοντέλα του M_r (μοντέλο MEPDG και μοντέλο τάσης σ_d) στην περιγραφή της ελαστικής συμπεριφοράς των εδαφών της στρώσης έδρασης και στη προσπάθεια μελέτης των επιδράσεων των ιδιοτήτων των υλικών στο M_r , ανέλυσαν επιλεγμένα δείγματα από έξι διαφορετικά τμήματα οδοστρώματος του σχεδίου οδικής έρευνας της Μινεσότα. Διεξήχθησαν δοκιμές τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου στα δείγματα εδάφους για τον προσδιορισμό του M_r στο εργαστήριο μαζί με κάποιες άλλες δοκιμές για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του εδάφους. Τα δεδομένα των δοκιμών για το M_r χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση

παλινδρόμησης για την ανάπτυξη εξισώσεων συσχέτισης μεταξύ των παραμέτρων του μοντέλου (k_1 , k_2 , k_3) και των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους. Οι εξισώσεις που αναπτύχθηκαν για να προβλέψει το ενεργό μέτρο ελαστικότητας και τις παραμέτρους k_i για μια κατάσταση καταπόνησης σύμφωνα με τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους παίρνουν την ακόλουθη μορφή:

$$M_r = k_1 \theta^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (4.11)$$

Όπου:

$$k_1 = 5770.8 - 520.98(\gamma_d)^{0.5} - 3941.8(w)^{0.5} + 33.1PI - 36.62LL - 17.93P_{200} \quad (4.50)$$

$$k_2 = -5.334 + 0.000316(\gamma_d)^3 + 9.686w - 0.054PI + 0.056LL + 0.022P_{200} \quad (4.51)$$

$$k_3 = 409.9 - 306.18(\gamma_d)^{0.1} - 82.63w + 0.033PI - 0.041LL + 0.138S \quad (4.52)$$

με S ο βαθμός κορεσμού %.

- **Mohammad et al., 1999**

Προκειμένου να επικυρωθεί το μοντέλο οκταεδρικής διατμητικής τάσης στο χαρακτηρισμό του ενεργού μέτρου ελαστικότητας, οι Mohammad et al., επέλεξαν οκτώ διαφορετικά εδάφη που αντιπροσωπεύουν σημαντικούς τύπους εδάφους στη Λουϊζιάνα και δοκιμάστηκαν για το προσδιορισμό του M_r στο εργαστήριο. Διεξήχθη επιπλέον ανάλυση για την ανάπτυξη συσχετίσεων μεταξύ των παραμέτρων του μοντέλου και των ιδιοτήτων του εδάφους. Διεξήχθη ανάλυση πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ των σταθερών του μοντέλου της εξίσωσης και των βασικών ιδιοτήτων του εδάφους. Οι εξισώσεις που αναπτύχθηκαν είναι οι εξής:

$$M_r = k_1 P_a \left[\frac{\sigma_{oct}}{P_a} \right]^{k_2} \left[\frac{\tau_{oct}}{P_a} \right]^{k_3} \quad (4.53)$$

όπου k_1 , k_2 , k_3 είναι οι παράμετροι του μοντέλου που προκύπτουν από στις παρακάτω εξισώσεις:

$$\begin{aligned} \log k_1 = & -0.679 + 0.0922w + 0.00559\gamma_d + 3.54 \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}} \right) + 2.47w_{ratio} \\ & + 0.00676LL + 0.011PL + 0.0022(\%Sand) \\ & + 0.0182(\%Silt) \end{aligned} \quad (4.54)$$

$$\begin{aligned}\log k_2 = & -0.887 + 0.0044w + 0.00934\gamma_d + 0.264\left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}}\right) + 0.305w_{ratio} \\ & + 0.00877LL + 0.00665PL + 0.0116(\%Sand) \\ & + 0.00429(\%Silt)\end{aligned}\quad (4.55)$$

$$\begin{aligned}\log k_3 = & -0.638 + 0.00252w + 0.00207\gamma_d + 0.61\left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}}\right) + 0.152w_{ratio} \\ & + 0.00049LL + 0.00416PL + 0.00311(\%Sand) \\ & + 0.00143(\%Silt)\end{aligned}\quad (4.56)$$

Όπου:

σ_{oct} : οκταεδρική ορθή τάση = $\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$

τ_{oct} : οκταεδρική διατμητική τάση.

PL: όριο πλαστιμότητας (%).

Για να καταγραφούν τα αποτελέσματα της ευαισθησίας του Mr στο βαθμό καταπόνησης, στη κατανομή των τάσεων και των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους μέσω των εξισώσεων που δημιουργήθηκαν από τους Dai και Zollars (2002), Santha (1994), Mohammad et al. (1999) και Yau και Von Quintus (2004), πραγματοποιήθηκε μία μελέτη από το τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου του Μισισίπι (K. P. George, 2004), σε συνεργασία με το Υπουργείο Μεταφορών του Μισισίπι (MDOT), το Υπουργείο Μεταφορών των ΗΠΑ, και την Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αυτοκινητοδρόμων (FHWA).

Η ισχύς των εξισώσεων συσχέτισης επιβεβαιώνεται με τη σύγκριση του Mr, που προκύπτει μέσω της εργαστηριακής διαδικασίας με το Mr των εξισώσεων. Επιπροσθέτως, οι αναμενόμενες παραλλαγές στο προβλεπόμενο Mr λόγω της εγγενούς μεταβλητότητας των ιδιοτήτων του εδάφους μελετήθηκε με τη μέθοδο των σημειακών εκτιμήσεων. Μια μελέτη ευαισθησίας αυτών των εξισώσεων υποδηλώνει, ότι οι πέντε κορυφαίες ιδιότητες του εδάφους που επηρεάζουν το Mr περιλαμβάνουν την περιεκτικότητα σε υγρασία, τον βαθμό κορεσμού, το ποσοστό διερχόμενου από το κόσκινο #200, το δείκτη πλαστικότητας και την πυκνότητα.

Στην εργαστηριακή διαδικασία υπολογισμού τα δείγματα της δοκιμής τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου υποβλήθηκαν σε συνδυασμό τριών τιμών κύριων τάσεων σ_3 και πέντε τάσεων αποκλίσεως σ_d , αποδίδοντας έτσι 15 τιμές ενεργού μέτρου ελαστικότητας Mr για κάθε δείγμα. Στη συνέχεια, επιλέχθηκε κάποιο από τα συστατικά μοντέλα του ενεργού μέτρου ελαστικότητας. Το μοντέλο αυτό στη συνέχεια προσαρμόστηκε στα δεδομένα κάθε

δείγματος έτσι ώστε να μπορεί να ληφθεί η τιμή του M_r για μια επιθυμητή κατάσταση καταπόνησης. Τέλος, η τιμή αυτή συγκρίθηκε με τα αποτελέσματα του M_r από την εργαστηριακή διαδικασία.

Η προκαταρκτική ανάλυση του μοντέλου αποκάλυψε, ότι οι παραπάνω εξισώσεις ήταν ακατάλληλες για την πρόβλεψη του ενεργού μέτρου ελαστικότητας των εδαφών του Μισισίπι και ότι μόνο οι εξισώσεις LTPP (Yau και Von Quintus, 2004) είναι κατάλληλες για την πρόβλεψη του ενεργού μέτρου ελαστικότητας των εδαφών της στρώσης έδρασης του Μισισίπι με καλύτερα αποτελέσματα αυτά των λεπτόκοκκων εδαφών. Τα συμπεράσματα και τα ευρήματα που εκφράζονται για τις εξισώσεις του M_r είναι αυτά του συγγραφέα και όχι απαραίτητα αυτά του Υπουργείου Μεταφορών του Μισισίπι ή της Ομοσπονδιακής Αυτοδιοίκησης.

- **Hossain et al., 2011**

Στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους Hossain et al. το 2011, 712 δειγμάτων εδάφους από 39 διαφορετικές κομητείες στην Οκλαχόμα, συλλέχθηκαν και αξιολογήθηκαν για τον προσδιορισμό του ενεργού μέτρου ελαστικότητας. Τα δείγματα εδάφους ταξινομήθηκαν σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης AASHTO (AASHTO M 145) και το USCS (ASTM D 2487). Με βάση το σύστημα ταξινόμησης εδάφους AASHTO, η πλειονότητα των δειγμάτων ταξινομήθηκε ως A-2-4, A-4, A-6 και A-7-6. Σύμφωνα με το σύστημα USCS, τα δείγματα αυτά ταξινομήθηκαν ως CH, CL, CL-ML, ML, SC και SM. Για κάθε δείγμα εδάφους, παρασκευάστηκαν δύο δείγματα: ένα δείγμα συμπίεστηκε στην βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία w_{opt} και στο 95% του γ_{dmax} και το άλλο με υγρασία κατά 2% μεγαλύτερη του w_{opt} και στη τιμή του γ_{dmax} . Οι δοκιμές του M_r διεξήχθησαν σύμφωνα με τη μέθοδο AASHTO T 307. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, υπάρχουν 15 αλληλουχίες M_r με διαφορετικά επίπεδα καταπόνησης.

Το περιεχόμενο της έρευνας των Hossain et al. δεν αντικατοπτρίζει απαραίτητα τις επίσημες απόψεις του Υπουργείου Μεταφορών της Οκλαχόμα κατά τη στιγμή της δημοσίευσης και δεν αποτελεί πρότυπο, προδιαγραφή ή κανονισμό.

Τα μοντέλα που αξιολογήθηκαν στη κανονικοποιημένη τους μορφή ως προς το P_a είναι τα ακόλουθα:

$$\text{Μοντέλο 1} \quad M_r = k_1 P_a \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2} \quad (4.57)$$

$$\text{Μοντέλο 2} \quad M_r = k_1 P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{k_2} \quad (4.58)$$

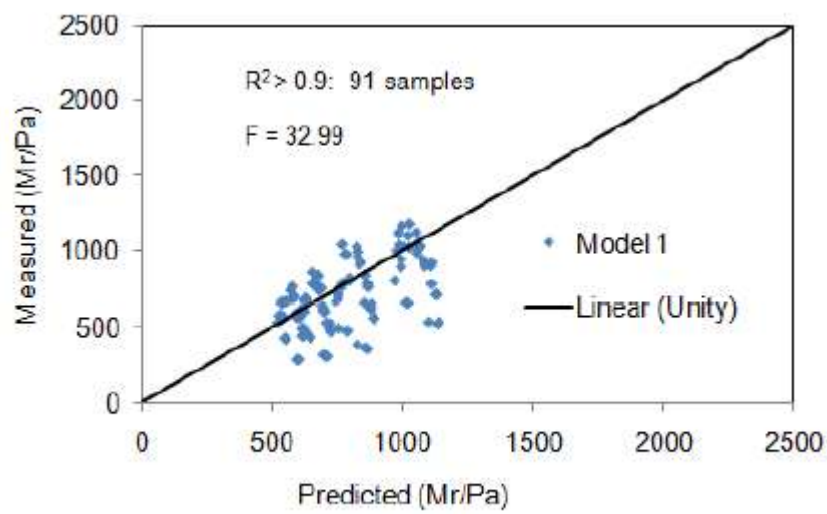
$$\text{Μοντέλο 3} \quad M_r = k_1 P_a \left[\frac{\sigma_3}{P_a} \right]^{k_2} \left[\frac{\sigma_d}{P_a} \right]^{k_3} \quad (4.59)$$

$$\text{Μοντέλο 4} \quad M_r = k_1 P_a \left[\frac{\theta}{P_a} \right]^{k_2} \left[\frac{\sigma_d}{P_a} \right]^{k_3} \quad (4.60)$$

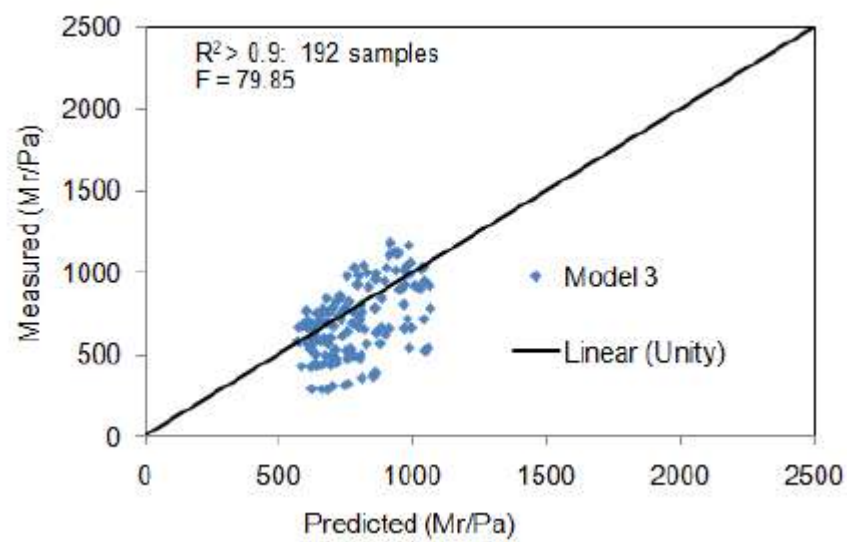
$$\text{Μοντέλο 5} \quad M_r = k_1 P_a \left[\frac{\theta}{P_a} \right]^{k_2} \left[\frac{\tau_{oct} + 1}{P_a} \right]^{k_3} \quad (4.61)$$

Για την εκτέλεση μιας μη-γραμμικής μοντελοποίησης που βασίζεται σε περιορισμούς, χρησιμοποιήθηκε μια διαδοχική τετραγωνική μέθοδος προγραμματισμού. Οι παράμετροι του μοντέλου για κάθε δείγμα εδάφους υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας μια επαναληπτική διαδικασία. Δείγματα με αξιοπιστία (R^2) μεγαλύτερο από 0,9 θεωρήθηκαν ικανά για την επικύρωση των μοντέλων παλινδρόμησης.

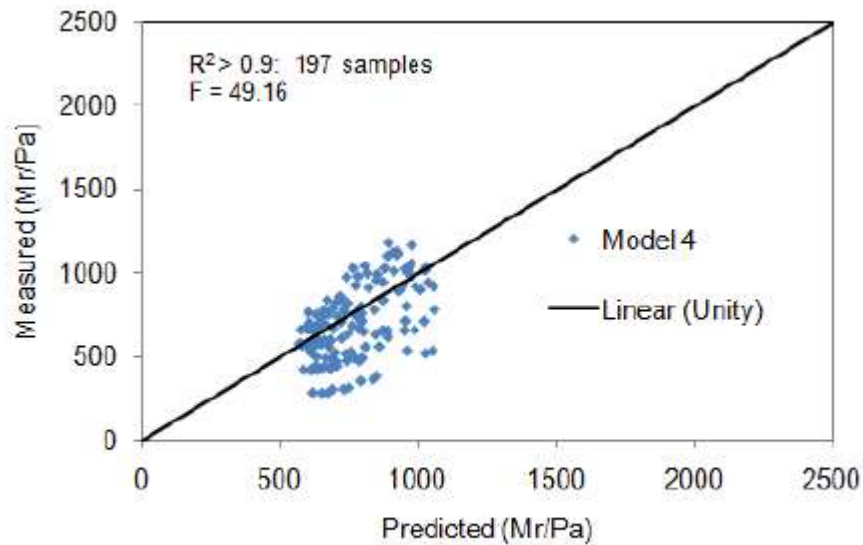
Ο αριθμός των δειγμάτων στο σύνολο δεδομένων ανάπτυξης που ικανοποιούν το κριτήριο R^2 είναι τα εξής: Μοντέλο 1: 91 δείγματα, Μοντέλο 2: 3 δείγματα, Μοντέλο 3: 192 δείγματα, Μοντέλο 4: 197 δείγματα και Μοντέλο 5: 188 δείγματα. Για το Μοντέλο 2 ήταν λογικό να παρουσιάζουν κακές επιδόσεις, επειδή αυτό το μοντέλο συνιστάται αρχικά για κοκκώδη εδάφη και τα μη πλάσιμα δείγματα εδάφους δεν εξετάστηκαν για αξιολόγηση. Επομένως, το μοντέλο 2 δεν εξετάστηκε για περαιτέρω αξιολόγηση ή συσχέτιση. Ομοίως, το Μοντέλο 1 δεν εξετάστηκε στην ανάπτυξη συσχετίσεων, καθώς μικρότερος αριθμός δειγμάτων ικανοποίησε το κριτήριο R^2 σε σύγκριση με τα υπόλοιπα τρία μοντέλα (Μοντέλα 3, 4 και 5). Οι εικόνες 4.12 και 4.13 που ακολουθούν παρουσιάζουν τα διαγράμματα συσχέτισης των μετρούμενων έναντι των προβλεπόμενων τιμών M_r/P_a χρησιμοποιώντας τα μοντέλα 1,3,4,5 για το έδαφος A-6.



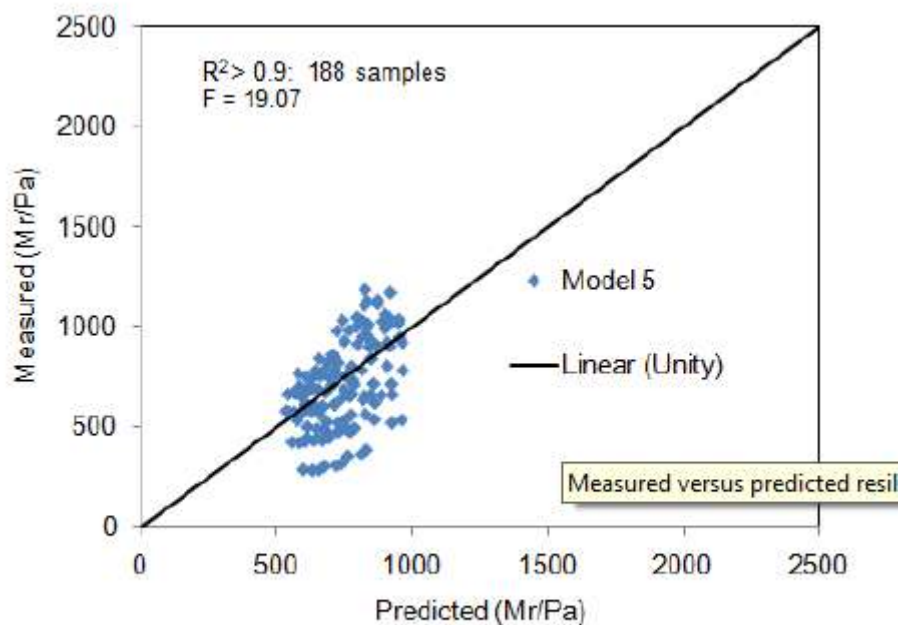
(a)



Εικόνα 4. 12 Μετρημένες έναντι προβλεπόμενες τιμές Mr/Pa για τα μοντέλα α) 1 β) 3
Πηγή: Hossain, 2011



(a)



(b)

Εικόνα 4. 13 Μετρημένες έναντι προβλεπόμενες τιμές Mr/Pa για τα μοντέλα α) 4 β) 5
Πηγή: Hossain, 2011

Όπως αναμένεται, τα μοντέλα πολλαπλών παραμέτρων (Μοντέλα 3, 4 και 5) έχουν καλύτερη απόδοση από τα μοντέλα μονής παραμέτρου (Μοντέλα 1 και 2). Το μοντέλο 4 βρέθηκε, ότι είναι το καλύτερο μοντέλο για την εκτίμηση των σταθερών υλικών για την ανάλυση και το σχεδιασμό επιπέδου 1 των εδαφών της Οκλαχόμα. Το μοντέλο 5 κατατάχθηκε ως το δεύτερο

καλύτερο, ακολουθούμενο από το Μοντέλο 3. Το Μοντέλο 1 κατατάχθηκε ως το χειρότερο μοντέλο, ενώ το Μοντέλο 2 δεν συνίσταται καθόλου.

Τα μοντέλα για την πρόβλεψη των παραμέτρων των μοντέλων 3,4,5. Παρουσιάζονται ακολούθως:

Μοντέλο 3:

$$\log k_1 = a_0 + a_1 \log\left(\frac{UCS}{P_a}\right) + a_2 \log(OMC) + a_3 \log\left(\frac{MDD}{\gamma_w}\right) + a_4 \log(PI) + a_5 \log(SSA) + a_6 \log(Al_2O_3) + a_7 \log(P_{325}) \quad (4.62)$$

$$k_2 = a_0 \log\left(\frac{UCS}{P_a}\right) + a_1 \log(pH) + a_2 \log(PA) \quad (4.63)$$

$$\log k_3 = a_0 \log\left(\frac{UCS}{P_a}\right) + a_1 \log(OMC) + a_2 \log\left(\frac{MDD}{\gamma_w}\right) + a_3 \log(PI) + a_4 \log(SSA) + a_5 \log(PA) + a_6 \log(C_aO) + a_7 \log(FL) + a_8 \log(LOI) \quad (4.64)$$

Μοντέλο 4:

$$\log k_1 = a_0 + a_1 \log\left(\frac{UCS}{P_a}\right) + a_2 \log(OMC) + a_3 \log\left(\frac{MDD}{\gamma_w}\right) + a_4 \log(PI) + a_5 \log(SSA) + a_6 \log(Al_2O_3) + a_7 \log(P_{325}) \quad (4.65)$$

$$k_2 = a_0 + a_1 \log(pH) + a_2 \log(PA) + a_3 \log(OMC) + a_4 \log\left(\frac{MDD}{9.8}\right) + a_5 \log\left(\frac{UCS}{P_a}\right) \quad (4.66)$$

$$k_3 = a_0 \log\left(\frac{UCS}{P_a}\right) + a_1 \log(OMC) + a_2 \log\left(\frac{MDD}{\gamma_w}\right) + a_3 \log(P_{200}) \quad (4.67)$$

Μοντέλο 5:

$$\log k_1 = a_0 + a_1 \log\left(\frac{UCS}{P_a}\right) + a_2 \log(OMC) + a_3 \log\left(\frac{MDD}{9.8}\right) + a_4 \log(pH) + a_5 \log(PA) + a_6 \log(SiO_2) + a_7 \log(SiO_2 + Al_2O_3 + IronOxide) \quad (4.68)$$

$$\log k_2 = a_0 \log\left(\frac{UCS}{P_a}\right) + a_1 \log(OMC) + a_2 \log(PA) + a_3 \log\left(\frac{MDD}{9.8}\right) + a_4 \log(PI) \quad (4.69)$$

$$\log k_3 = a_0 \log\left(\frac{UCS}{P_a}\right) + a_1 \log(OMC) + a_2 \log(CC) + a_3 \log(SSA) + a_4 \log(LOI) \quad (4.70)$$

όπου UCS = 28 ημερών αντοχή σε θλίψη υπό στραγγιζόμενες συνθήκες, P_a = ατμοσφαιρική πίεση, OMC = βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία, PA = πρόσθετη ουσία, P200 = ποσοστό

διερχομένου από το κόσκινο No.200, P325 = ποσοστό διερχομένου από το κόσκινο No.325, CC = περιεκτικότητα σε άργιλο, PI = δείκτης πλαστιμότητας, pH = το pH του σκελετού του εδάφους, MDD = μέγιστη ξηρή πυκνότητα, SSA = ειδική επιφάνεια του εδάφους, SiO₂ = περιεκτικότητα σε διοξείδιο του πυριτίου στο έδαφος, Al₂O₃ = περιεκτικότητα σε οξείδιο του αργιλίου στο έδαφος, FL = ελεύθερη ποσότητα ασβεστίου που περιέχεται στο έδαφος, LOI = απώλεια πολλαπλασιαστική, CaO = περιεκτικότητα σε πρόσθετο οξείδιο του ασβεστίου, IronOxide = περιεκτικότητα σε σίδηρο, γ_w = πυκνότητα του νερού, και a_i = 0 έως 9 συντελεστές παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις συσχέτισης (βλ. Πίνακα 4.1).

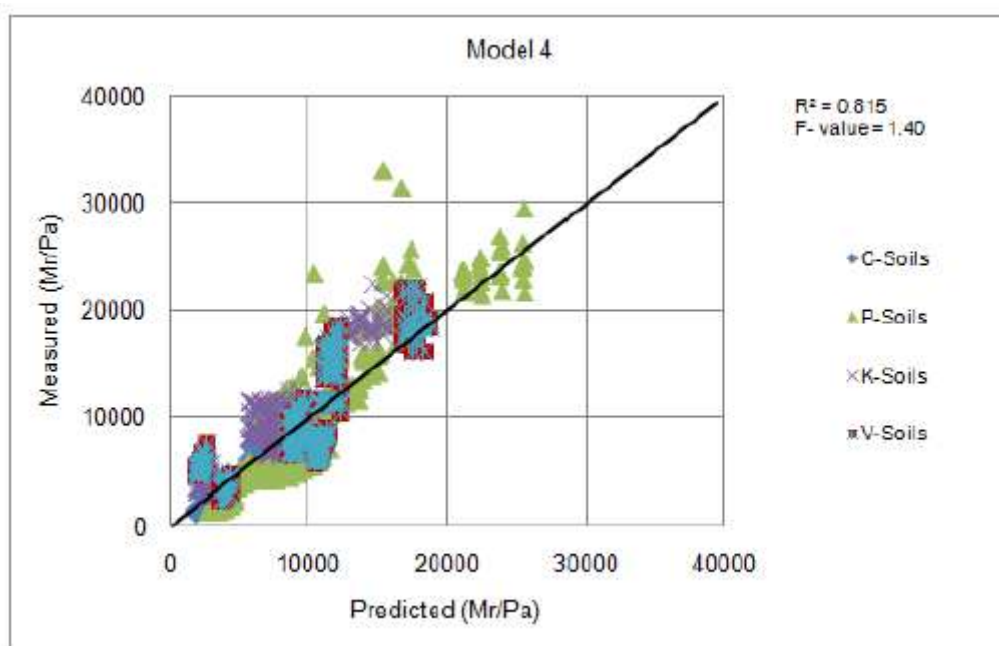
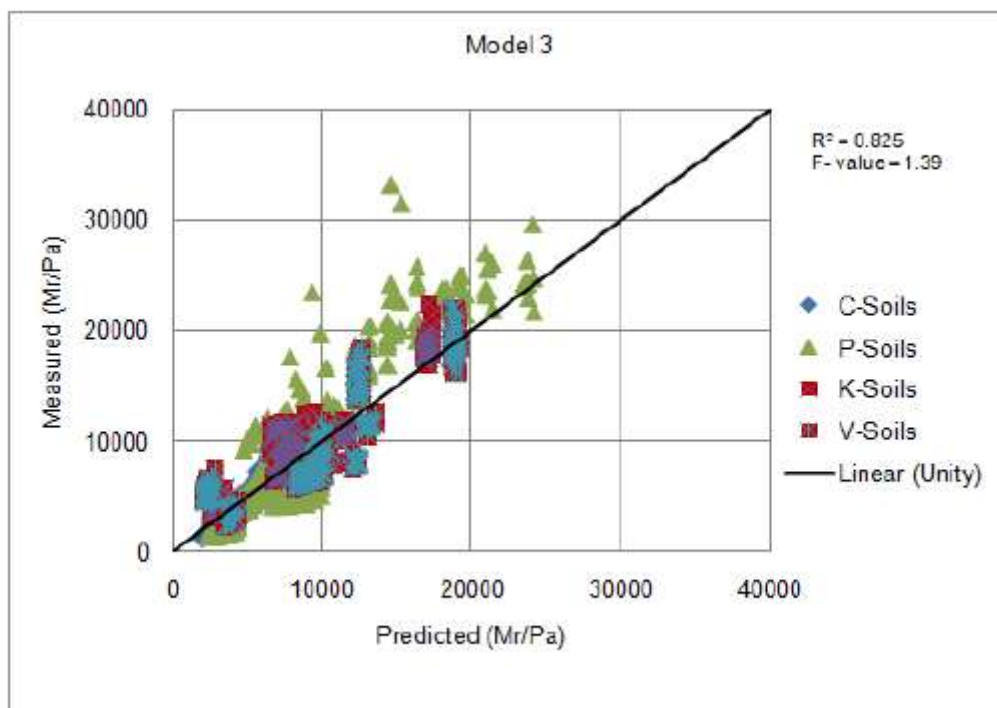
Πίνακας 4. 1 Τιμές των συντελεστών a_i στις εξισώσεις συσχέτισμού

Πηγή: Hossain, 2011

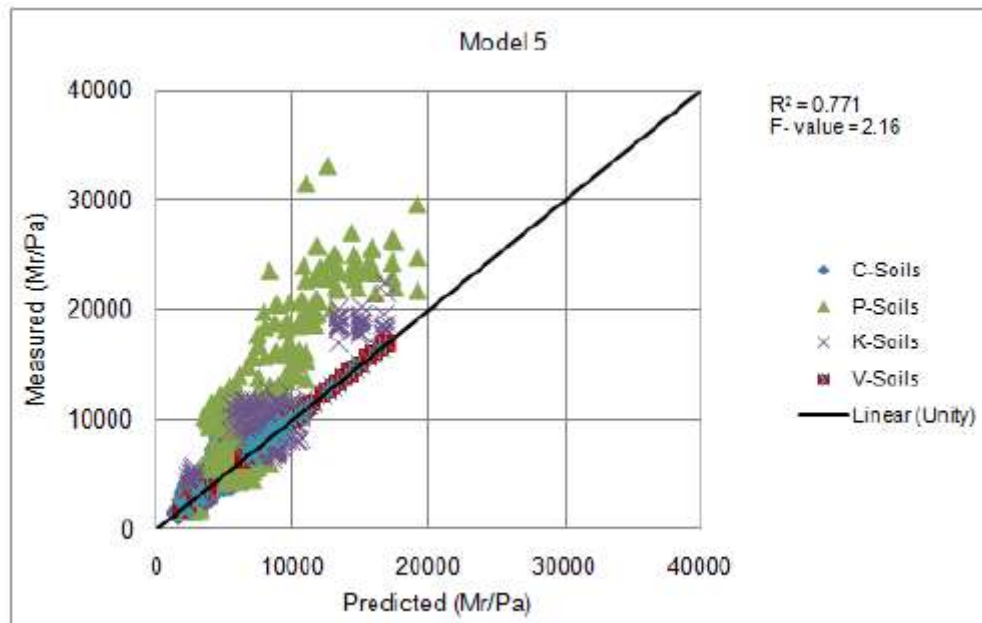
Model No	Parameter	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
Model 2	k_1	-2.350	1.014	.824	2.389	2.570	-.499	-.040	-.204	-.116
	k_2	.147	.033	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	k_3	.145	.120	-3.093	.126	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Model 3	k_1	13.312	1.261	2.940	10.508	.127	-.319	-.340	-8.080	N/A
	k_2	-.381	.237	.154	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	k_3	.414	3.388	12.509	.174	.129	-.062	-5.233	1.096	-.153
Model 4	k_1	16.08	.925	-.260	-1.833	.002	-.522	-.218	-5.534	N/A
	k_2	1.856	.045	.045	-.836	-2.555	-.307	N/A	N/A	N/A
	k_3	1.477	1.555	-20.435	.083	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Model 5	k_1	4.452	.955	-.763	-1.926	.226	.066	-.047	-.029	.100
	k_2	-.388	-.052	.098	.587	-.106	N/A	N/A	N/A	N/A
	k_3	.272	2.146	1.404	-2.620	-.103	N/A	N/A	N/A	N/A

N/A denotes the coefficient does not exist in the correlation equation of the corresponding model.

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις συσχέτισης, υπολογίστηκαν οι τιμές του Mr για τα μοντέλα 3, 4 και 5. Οι εικόνες 4.14 και 4.15 δείχνουν μια σύγκριση μεταξύ των μετρημένων και των προβλεπόμενων τιμών του Mr για αυτά τα μοντέλα. Συνολικά, παρατηρήθηκαν καλές συσχετίσεις με τιμές R² να κυμαίνονται από 0,77 έως 0,83. Με βάση τις τιμές του R² το μοντέλο 3 και το μοντέλο 4 βρέθηκαν να ξεπερνούν το μοντέλο 5 με τιμή R² 0,83. Μπορεί επίσης να φανεί, ότι η κατανομή δεδομένων για το Μοντέλο 4 είναι καλύτερη από αυτή του Μοντέλου 3. Συνεπώς, το Μοντέλο 4 συνίσταται για χρήση στην ανάλυση και το σχεδιασμό. Παρόμοιες παρατηρήσεις έγιναν και από τους Solanki et al. (2009).



Εικόνα 4. 14 Μετρημένες έναντι προβλεπόμενες τιμές Mr/Pa από τα μοντέλα με σειρά 3 και 4
 Πηγή: Hossain, 2011



Εικόνα 4. 15 Μετρημένες έναντι προβλεπόμενες τιμές Mr/Pa από το μοντέλο 5
Πηγή: Hossain, 2011

- **Mamatha και Dinesh, 2017**

Οι Mamatha και Dinesh στη προσπάθεια διερεύνησης της ελαστικής συμπεριφοράς εδαφών από διασταλτική άργιλο, ως εδάφη της στρώσης έδρασης και στη προσπάθεια μελέτης των επιδράσεων των ιδιοτήτων των υλικών στο Mr , διεξήγαγαν δοκιμές τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου στα δείγματα εδάφους για τον προσδιορισμό του Mr στο εργαστήριο. Τέλος, προέκυψαν εξισώσεις συσχετισμού που αποδίδουν τις τιμές των παραμέτρων k_i του ενεργού μέτρου ελαστικότητας.

Η διασταλτική άργιλος που ονομάζεται αλλιώς μαύρο βαμβάκι (έδαφος black cotton BC), όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 4.16, βρίσκεται σε πολλά μέρη της Ινδίας και χαρακτηρίζεται από χαμηλή αντοχή και υψηλή συμπίεστότητα. Το έδαφος αυτό παρουσιάζει διόγκωση - συρρίκνωση κατά την ύγρανση και τη ξήρανση και αυτό είναι προβληματικό. Το έδαφος αυτό παρουσιάζει επίσης συμπεριφορά κατάρρευσης κατά την ύγρανση και επομένως η ισχύς του εδάφους πρέπει να βελτιωθεί. Τα σταθεροποιητικά πρόσθετα υλικά έχει βρεθεί, ότι είναι πολύ αποτελεσματικά στη σταθεροποίηση του εδάφους BC και γενικά χρησιμοποιείται ασβέστης για τη βελτίωση της αντοχής και της ανθεκτικότητας του.

Τα αποτελέσματα της έρευνας των Mamatha και Dinesh (2017) έδειξαν, ότι το έδαφος BC δεν ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις των εδαφών της στρώσης έδρασης και δείχνει συμπεριφορά κατάρρευσης υπό συνθήκες διαβροχής. Για να ξεπεραστεί αυτό, έγινε πρόσθεση ασβεστίου

για τη βελτίωση της αντοχής του εδάφους και έγιναν δοκιμές τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου σύμφωνα με το AASHTO T 307-99 για τον προσδιορισμό του M_r . Τα αποτελέσματα έδειξαν, ότι τα δείγματα σταθεροποιούνται κάτω από τις συνθήκες Proctor με τιμές του M_r να κυμαίνονται από 36 MPa έως 388 MPa για περιεκτικότητα σε ασβέστη 2,5% και περίοδο σκλήρυνσης να κυμαίνεται από 7 έως 28 ημέρες.



Εικόνα 4. 16 Έδαφος BC (black cotton soil)
Πηγή: Istanbul Memorial Forest Project, 2017

Η σταθεροποίηση με ασβέστη μειώνει την πλαστιμότητα και βελτιώνει την αντοχή και την ακαμψία του εδάφους. Οι αντιδράσεις ανταλλαγής κατιόντων και συσσωμάτων πραγματοποιούνται σχετικά γρήγορα και παράγουν γρήγορες αλλαγές στην πλαστιμότητα, τη δυνατότητα επεξεργασίας και τις τεχνικές ιδιότητες. Η τσιμεντοποίηση ως επί το πλείστον μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη μακροπρόθεσμη απόδοση των ασβεστοποιημένων εδαφών.

Το έδαφος BC συλλέχθηκε από τις περιοχές των Bagalkot, Karnataka στην Ινδία και δοκιμάστηκε για τις ιδιότητές του. Όλες οι δοκιμές διεξήχθησαν σύμφωνα με τις σχετικές

κατευθυντήριες οδηγίες του ινδικού κανονισμού. Το έδαφος αποτελείται, από 10% άμμο, 36% ιλύς και 54% άργιλο. Το έδαφος ταξινομείται ως A-7-C σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης HRB και σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης AASHTO ως A-7-6. Το όριο υδαρότητας και ο δείκτης πλαστιμότητας του εδάφους είναι 71% και 48% αντίστοιχα. Το έδαφος BC παρουσιάζει διόγκωση 34% και το έδαφος ταξινομείται ως χαμηλής διόγκωσης αργιλώδες έδαφος. Σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές του MoRT&H, το έδαφος με όριο υδαρότητας μεγαλύτερο από 71% και δείκτη πλαστιμότητας μεγαλύτερο από 45% αντιστοίχως είναι ακατάλληλο για έδαφος στρώσης έδρασης οδοστρώματος.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών ενεργού μέτρου ελαστικότητας σε έδαφος BC πραγματοποιήθηκαν για πρόσθεση ασβεστίου κατά 2%, 2,25%, 2,5%, 2,75% και 3% αντίστοιχα για περιόδους σκλήρυνσης που κυμαίνονται από 7 έως 28 ημέρες. Υπό κανονικές συνθήκες, οι τιμές του M_r κυμαίνονται από 67 MPa έως 243 MPa, από 73 MPa έως 272 MPa, από 80 MPa έως 302 MPa, από 87 MPa έως 331 MPa και από 94 MPa έως 360 MPa αντίστοιχα για τα παραπάνω περιεχόμενα ασβεστίου και τις περιόδους σκλήρυνσης με ποικιλία τιμών καταπόνησης. Στην ξηρή και υγρή πλευρά των πρότυπων συνθηκών Proctor, τα δείγματα που υποβλήθηκαν σε κατεργασία με ασβέστη έδειξαν συμπεριφορά κατάρρευσης κατά την εμβάπτιση. Υπό των πρότυπων συνθηκών Proctor, οι τιμές M_r κυμαίνονται από 79 MPa έως 326 MPa, από 86 MPa έως 357 MPa, από 94 MPa έως 388 MPa, από 101 MPa έως 419 MPa και από 108 MPa έως 450 MPa υπό την ανωτέρω περιεκτικότητα σε ασβέστιο και τις περιόδους σκλήρυνσης.

Οι τιμές του M_r υπολογίστηκαν και από το μοντέλο που αναπτύχθηκε από το πρόγραμμα NCHRP Project 1-37^A και δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$M_r = k_1 P_a \left[\frac{\theta}{P_a} \right]^{k_2} \left[\frac{\tau_{oct} + 1}{P_a} \right]^{k_3} \quad (4.17)$$

Με ki ως ακολούθως:

$$k_1 = 1.3577 + 0.0106(\%Clay) - 0.0437w \quad (4.71)$$

$$k_2 = 0.5193 - 0.0073P_{No.4} + 0.0095P_{No.40} - 0.0027P_{no.200} + 0.0030LL - 0.0049w_{opt} \quad (4.72)$$

$$k_3 = 1.4258 - 0.0288P_{No.4} + 0.0303P_{No.40} - 0.0521P_{No.200} + 0.0251(\%Silt) + 0.0535LL - 0.0672w_{opt} - 0.0026\gamma_{dmax} + 0.0025\gamma_d - 0.6055 \left(\frac{w}{w_{opt}} \right) \quad (4.73)$$

Τέλος, παρατηρήθηκε ότι οι τιμές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας που προέκυψαν από την εξίσωση που αναπτύχθηκε από το πρόγραμμα NCHRP Project 1-37^A και από τις σχέσεις απόδοσης των παραμέτρων k_i (εξ. 4.71 - 4.73), βρίσκονται αρκετά κοντά με τις εργαστηριακές τιμές του Mr.

5. Η ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΥΓΡΑΣΙΑ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

5.1. ΓΕΝΙΚΑ

Η υγρασία στο εσωτερικό των οδοστρωμάτων είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που συμβάλλουν στη φθορά των υφιστάμενων οδοστρωμάτων. Η υγρασία μπορεί να εισέλθει μέσω διάφορων επιφανειακών ρωγμών και αρμών διακοπής εργασίας. Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και η αποστράγγιση σε περιοχές διακοπής εργασίας μπορεί επίσης να προσθέσουν υγρασία στο οδόστρωμα. Η υπερβολική υγρασία στα οδοστρώματα μπορεί να προκαλέσει μία ή περισσότερες από τις ακόλουθες μορφές φθοράς: μείωση της αντοχής σε διάτμηση των χονδρόκοκκων εδαφών της στρώσης έδρασης καθώς και των ασύνδετων υλικών της βάσης, αύξηση του πάγου και μείωση της αντοχής κατά τη διάρκεια της τήξης του παγετού, διαφορική καθίζηση του εδάφους, αποφλοίωση της ασφάλτου σε εύκαμπτα οδοστρώματα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.1, ρωγμές στα άκαμπτα οδοστρώματα και μετακίνηση των στρώσεων της βάσης/υπόβασης εύκαμπτων οδοστρωμάτων (Huang, 1993).



Εικόνα 5. 1 Βλάβες που προκλήθηκαν από την υγρασία στο οδόστρωμα α) αποφλοίωση β) λακκούβα
Πηγή: Dawson, 2008

Το πρώτο βήμα για την αποφυγή αυτών των μορφών επιδείνωσης είναι η ανίχνευση της υγρασίας πριν από τη βλάβη και η σωστή αποστράγγιση του οδοστρώματος. Οι κατασκευαστές οδών από την πρώιμη ηλικία έχουν κατανοήσει τη σημασία ενός σωστά

αποστραγγισμένου συστήματος οδοστρώματος. Αν και κατανοούνταν εδώ και αιώνες, η ανάγκη αυτή δεν υλοποιούνταν πάντα. Ο John McAdam (1820) αναφέρει χαρακτηριστικά τα εξής:

«Τα οδοστρώματα δεν μπορούν ποτέ να γίνουν εξ ολοκλήρου ασφαλή μέχρι να γίνουν πλήρως κατανοητά, δηλαδή πρέπει να ικανοποιούνται οι ακόλουθες αρχές: το έδαφος να υποστηρίζει πραγματικά το βάρος της κυκλοφορίας του για όσο διατηρείται σε ξηρή κατάσταση, να μεταφέρει οποιοδήποτε βάρος χωρίς να βυθιστεί και τέλος, αν το νερό περάσει από ένα όριο και γεμίσει το οδόστρωμα, αυτό να μην χάσει την συνοχή του και να μην διαλυθεί σε κομμάτια».

Επιτρέποντας σε ένα οδόστρωμα να αποστραγγίσει το νερό που διεισδύει στο εσωτερικό του, αυτό διατηρεί την αντοχή του καθώς η αντοχή ενός συμπιεσμένου ασύνδετου υλικού, όπως αυτό που χρησιμοποιείται στις στρώσεις βάσης και υπόβασης, ποικίλει ανάλογα με την περιεκτικότητα σε υγρασία. Διότι, όταν η ποσότητα νερού σε ένα ασύνδετο υλικό ξεπερνά τη βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία, η ισχύς του μειώνεται. Επίσης, έρευνα που πραγματοποιήθηκε στη δεκαετία του 1960 έδειξε, ότι τα ποσοστά της απώλειας λειτουργικότητας ήταν 40 έως 50 φορές μεγαλύτερα κατά τη διάρκεια της άνοιξης λόγω της απόψυξης σε σχέση με τους καλοκαιρινούς μήνες όταν στο σύστημα του οδοστρώματος υπήρχε λιγότερο ή καθόλου νερό (Liddle, 1962).

5.2. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Η μέτρηση της περιεκτικότητας σε υγρασία των εδαφών βασίζεται συνήθως σε μεθόδους όπως, η βαρυμετρική δειγματοληψία, στους ανασταλτικούς παράγοντες από γύψο, στις πυρηνικές μεθόδους ή στους διηλεκτρικούς ανιχνευτές. Αυτές οι μέθοδοι παρουσιάζουν διάφορα μειονεκτήματα, όπως το χρόνο που απαιτείται για την εκτέλεση της δοκιμής, την υποβάθμιση του αντίστοιχου οργάνου και τα σχετικά ζητήματα ασφάλειας. Οι βαρυμετρικές μέθοδοι δεν προτιμώνται ιδιαίτερα επειδή δεν δίνουν επί τόπου αποτελέσματα της περιεκτικότητας σε υγρασία. Πρώτα πρέπει να ληφθεί ένα δείγμα και μετά να ξηρανθεί σε φούρνο για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (η AASHTO καθορίζει 105 ° C για 24 ώρες), έτσι ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί η σχετική απώλεια βάρους. Επιπλέον, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δυνατότητα πραγματοποίησης μόνο μιας δοκιμής. Αυτή η τεχνική είναι χρήσιμη μόνο όταν το έδαφος είναι προσβάσιμο (είτε στην επιφάνεια είτε μέσω της εκσκαφής).

Οι πυρηνικές μέθοδοι απαιτούν πολύ καλά εκπαιδευμένους χειριστές και εκτεταμένα μέτρα ασφαλείας. Και πάλι, αυτή η μέθοδος περιορίζεται σε προσβάσιμες τοποθεσίες. Επιπλέον, αντικείμενα που θεωρούνται ότι βρίσκονται σε μεγαλύτερο βάθος μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα. Οι ηλεκτρικοί ανασταλτικοί παράγοντες είναι σχετικά οικονομικοί ώστε να εγκατασταθούν σε μεγάλες ποσότητες. Ωστόσο, οι ανασταλτικοί αυτοί παράγοντες, από γύψο, επιδεινώνονται με το χρόνο. Τα αποτελέσματα από ανασταλτικούς παράγοντες που δεν παρουσιάζουν φθορά, όπως του υαλοβάμβακα, μπορεί να ποικίλουν ανάλογα με το ποσοστό των αλάτων στο έδαφος. Τέλος, οι διηλεκτρικοί ανιχνευτές αποδείχθηκαν χρήσιμοι μόνο για επιφανειακές μετρήσεις.

Ανεξάρτητα από ποια από τις παραπάνω μεθόδους θα επιλεγεί, μόλις προσδιοριστούν οι μετρημένες ιδιότητες του εδάφους, πρέπει αυτές να συσχετιστούν με την περιεκτικότητα σε υγρασία. Αυτό μπορεί να γίνει με τη χρήση ενός εκ των τύπων που προκύπτουν από τη θεωρία του διηλεκτρικού μίγματος ή με βαθμονόμηση στην οποία η περιεκτικότητα σε υγρασία προσδιορίζεται ανεξάρτητα (π.χ., βαρυμετρικός προσδιορισμός).

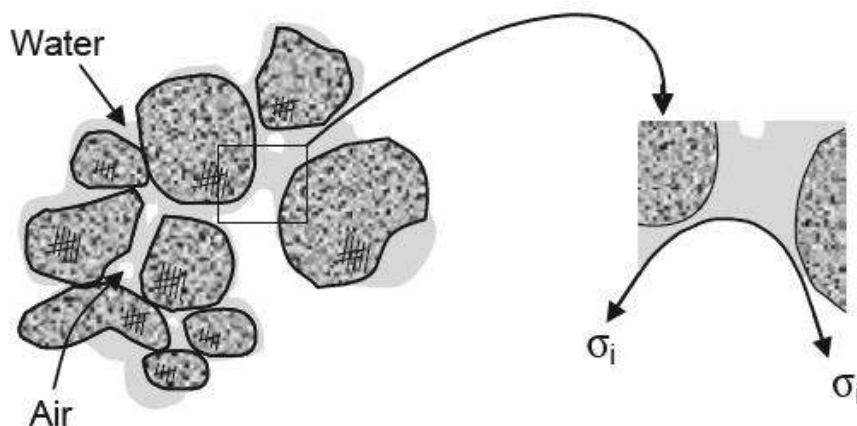
5.3. ΕΝΕΡΓΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΥΓΡΑΣΙΑ

Όπως αναλύθηκε και στο κεφάλαιο 4 το ενεργό μέτρο ελαστικότητας (M_r) εξαρτάται άμεσα από την κατανομή των τάσεων, αλλά και από το ποσοστό υγρασίας στην εκάστοτε στρώση. Η διαβροχή του ακόρεστου εδάφους μειώνει την αναρρόφηση στο έδαφος, η πίεση των πόρων προσεγγίζει την πίεση του αέρα και μειώνεται η τιμή των τάσεων. Εξαιτίας αυτού, η αύξηση της υγρασίας συνδέεται με μειώσεις στην αντοχή σε διάτμηση, στη δυσκαμψία και στην πλαστική παραμόρφωση σε όλα τα εδάφη και στα ασύνδετα υλικά. Επιπλέον, παρατηρούμε μείωση της φέρουσας ικανότητας και του ενεργού μέτρου ελαστικότητας, ενώ αυξάνονται οι παραμορφώσεις υπό την ίδια εφαρμοζόμενη φόρτιση.

Η επιρροή αυτή της υγρασίας θεωρείται τόσο σημαντική, έτσι ώστε σύμφωνα με τον Heydinger (2000), θα έπρεπε η περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους να υιοθετηθεί ως η κύρια μεταβλητή για την πρόβλεψη των εποχιακών μεταβολών του ενεργού μέτρου ελαστικότητας στο οδοστρώματα. Έτσι, για την ακριβέστερη μελέτη της εξάρτησης αυτής, στο παρόν κεφάλαιο θα μελετηθεί κάθε στρώση ξεχωριστά, για να παρατηρηθούν και οι διαφορές ανά υλικό (στρώση έδρασης, βάση/υπόβαση)

5.3.1. ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΒΑΣΗΣ

Οι στρώσεις αυτές του οδοστρώματος, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια, αποτελούνται από ασύνδετα υλικά. Τα ασύνδετα υλικά μπορούν να διατηρήσουν την αρχικά κατασκευασμένη υψηλή αντοχή τους εάν καταπονούνται κάτω από στραγγιζόμενες συνθήκες. Καθώς η ποσότητα του νερού σε ένα ασύνδετο υλικό αυξάνεται από μια χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία σε μία μεγαλύτερη, το επιπλέον νερό βοηθά στο να απομακρυνθούν τα σωματίδια μεταξύ τους κατά τη διάρκεια της συμπίκνωσης. Η ύπαρξη πολύ νερού έχει ως αποτέλεσμα να καλύπτονται κάποια κενά μεταξύ των κόκκων στα οποία υπήρχε αέρας αρχικά, όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.2. Το γεγονός αυτό μεταβάλλει την αντοχή του οδοστρώματος, καθώς τα κενά αυτά κατά τη διάρκεια που είναι συμπληρωμένα με νερό, προσαυξάνουν την αντοχή του οδοστρώματος. Με αποτέλεσμα να υπερεκτιμάτε και η φέρουσα ικανότητα του.



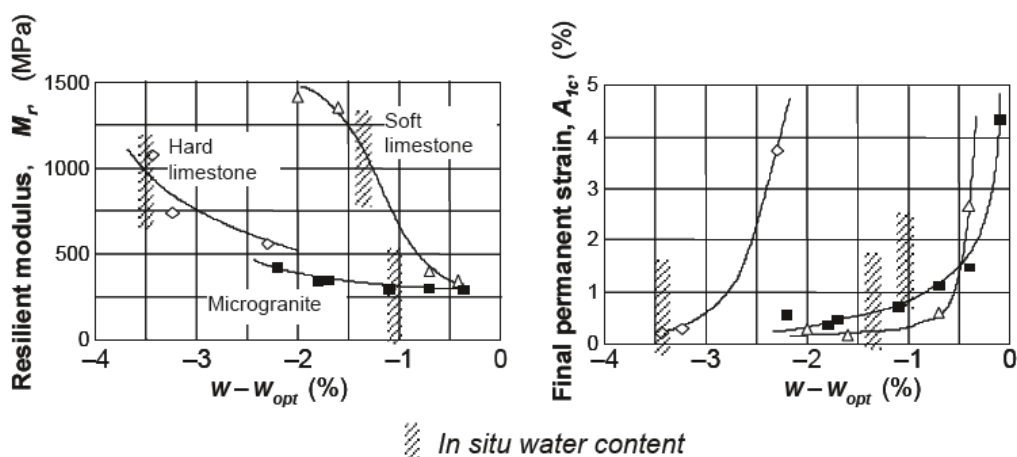
Εικόνα 5. 2 Το νερό και ο αέρας στους πόρους των κόκκων

Πηγή: Dawson, 2008

Οι Forsyth et al. (1987) δήλωσαν, ότι πάνω από το 65% των 329 δισεκατομμυρίων δολαρίων που δαπανήθηκαν για επισκευές οδών στις Ηνωμένες Πολιτείες μεταξύ του 1976 και του 1987 θα μπορούσαν, να εξοικονομηθούν, αν τα οδοστρώματα είχαν σχεδιαστεί με σωστή αποστράγγιση. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να κατανοηθούν οι επιπτώσεις των διαφορετικών σχεδίων αποστράγγισης και να αναπτυχθούν νέες στρατηγικές για τη μέτρηση και την πρόβλεψη της υγρασίας μέσα στα συστήματα οδοστρώματος.

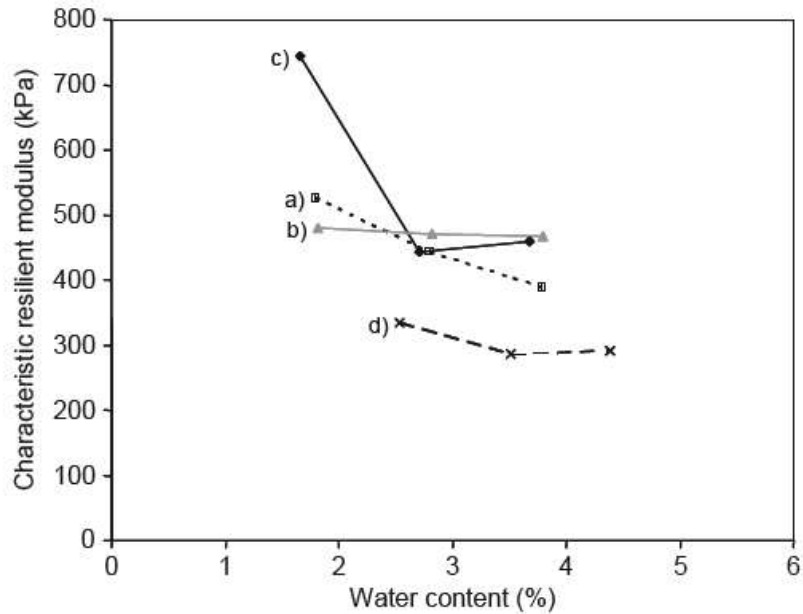
Ένα παράδειγμα επιρροής της υγρασίας στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας και στη μόνιμη παραμόρφωση παρουσιάζεται μέσω των 3 γαλλικών ασύνδετων υλικών, με διαφορετική

ορυκτολογία (σκληρός και μαλακός ασβεστόλιθος, μικρό-γρανίτης). Αυτό φαίνεται στην εικόνα 5.3. Και τα 3 υλικά παρουσιάζουν μείωση του ενεργού μέτρου ελαστικότητας τους καθώς η περιεκτικότητα σε υγρασία πλησιάζει την βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία (w_{opt}), αλλά η ευαισθησία στην υγρασία είναι πολύ πιο σημαντική για τον ασβεστόλιθο απ' ότι για το πυρογενές υλικό (μικρό-γρανίτης). Οι μόνιμες αξονικές παραμορφώσεις καθίστανται πολύ μεγάλες και για τα 3 υλικά όταν η περιεκτικότητα σε υγρασία προσεγγίζει τη τιμή w_{opt} .



Εικόνα 5. 3 Επιρροή της περιεκτικότητας σε υγρασία (w) στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας (M_r) και στη μόνιμη αξονική παραμόρφωση (A_{1c}) για 3 γαλλικά ασύνδετα υλικά
Πηγή: Hornych et al., 1998

Η επίδραση της περιεκτικότητας σε υγρασία στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας και στη μόνιμη παραμόρφωση φαίνεται και από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε πάνω σε διάφορα ασύνδετα υλικά από τη Σλοβενία. Αυτό παρουσιάζεται και στην εικόνα 5.4. Και πάλι, όπως στη προηγούμενη μελέτη η παραμόρφωση φαίνεται να είναι πιο ευαίσθητη στην μεταβολή της υγρασίας από ότι το ενεργό μέτρο ελαστικότητας.



Εικόνα 5. 4 Η επίδραση της περιεκτικότητας σε υγρασία στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας σε ασύνδετα υλικά. (α) θραυστό χαλίκι Hrusica, (β) δολομίτης από το λατομείο Lukonica, (γ) δολομίτη από το λατομείο Kamna Gorica, (δ) χαλίκι από Hoce

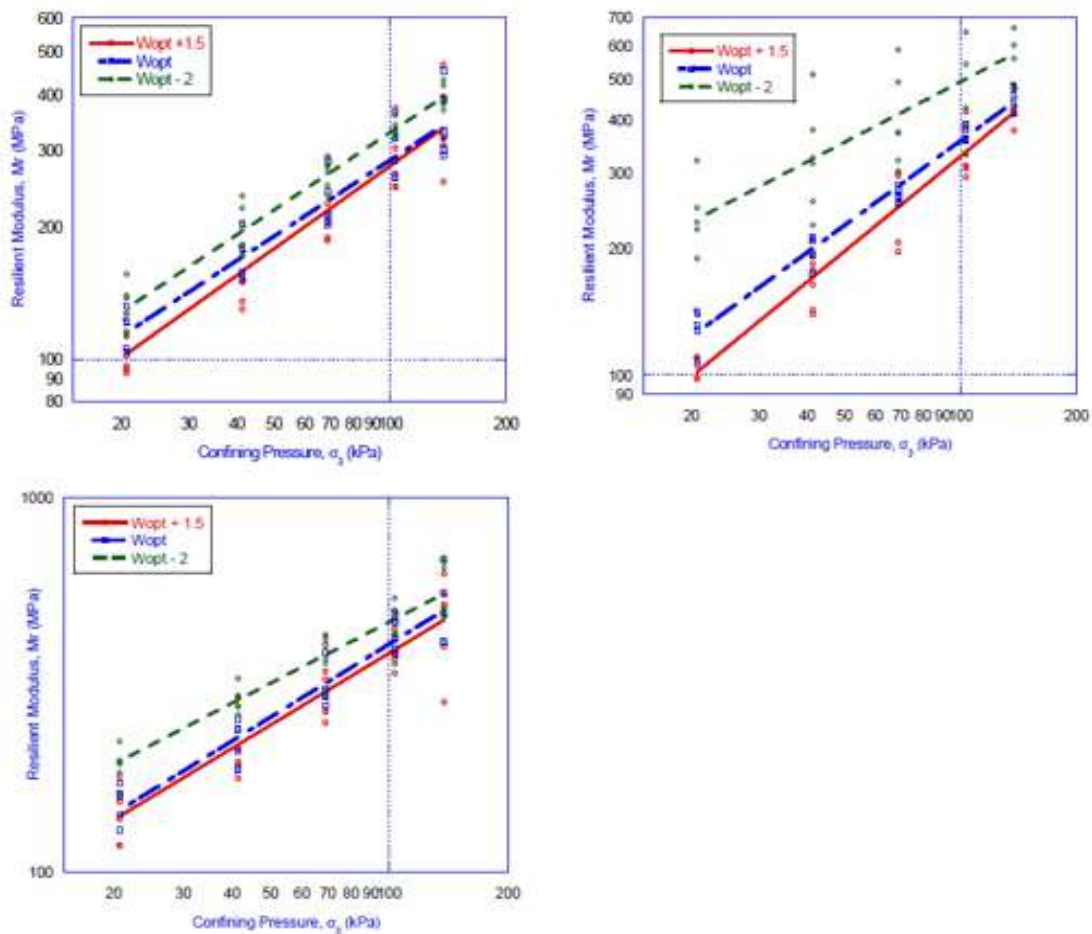
Πηγή: Pavsic, 2006

Από την ανάλυση τριών διαφορετικών ασύνδετων υλικών: κόκκινος χαλαζίτης από το Bakel (GRB), βασάλτης από το Diack (BAS) και ασβεστόλιθος από το Bandia (BAN) από την περιοχή της Senurgal (Δυτική Αφρική), μελετήθηκε η εξάρτηση του ενεργού μέτρου ελαστικότητας από το ποσοστό υγρασίας. Παρατηρήθηκε και εδώ, ότι το M_r αυξάνεται καθώς η υγρασία απομακρύνεται από την βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία. Τα χαρακτηριστικά των τριών αυτών υλικών παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.

Πίνακας 5. 1 Χαρακτηριστικά υλικών

Υλικά	ρ_{dmax} (kg/m ³)	w_{opt} (%)	G_s	MDE (%)
GRB	2140	5.5	2.65	3.07
BAS	2420	4.2	2.95	5.66
BAN	2065	7.6	2.56	40.0

Η εικόνα 5.5 παρουσιάζει την επίδραση της περιεκτικότητας σε υγρασία στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας των τριών δοκιμών, του ασβεστόλιθου, του GRB και του βασάλτη αντίστοιχα. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικές τιμές υγρασίας w_{opt} , $w_{opt} + 1,5$ και $w_{opt} - 2$ για κάθε δοκίμιο.

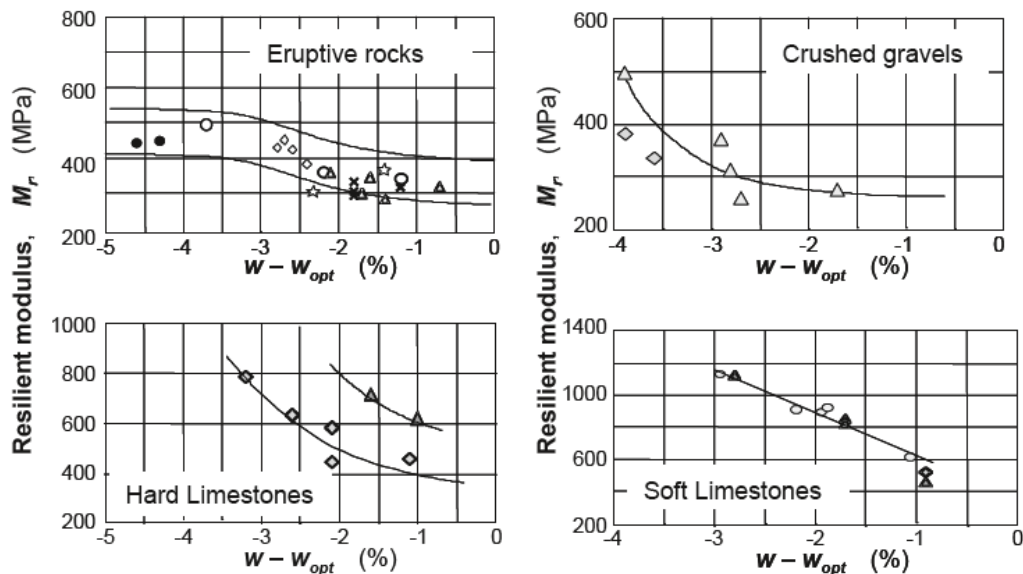


Εικόνα 5. 5 Σύγκριση M_r με την κύρια τάση σ_3 για τρεις διαφορετικές τιμές υγρασίας στο α) GRB β) ασβεστόλιθο γ) βασάλτη

Πηγή: Makhalay et al., 2011

Από τα διαγράμματα αυτά βλέπουμε ότι το ενεργό μέτρο ελαστικότητας του GRB αυξάνεται κατά 10% και 24%, όταν η περιεκτικότητα σε υγρασία μειώνεται αντίστοιχα από w_{opt} σε $w_{opt} - 2$ και από $w_{opt} + 1,5$ σε $w_{opt} - 2$. Για τον βασάλτη, το ενεργό μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται περίπου κατά 32% και 40%, όταν η περιεκτικότητα σε υγρασία μειώνεται αντίστοιχα από το w_{opt} στο $w_{opt} - 2$ και από το $w_{opt} + 1,5$ στο $w_{opt} - 2$. Ενώ για τον ασβεστόλιθο το ενεργό μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται περίπου κατά 59% και 87%, όταν η περιεκτικότητα σε υγρασία μειώνεται αντίστοιχα από w_{opt} σε $w_{opt} - 2$ και από $w_{opt} + 1,5$ έως $w_{opt} - 2$. Συμπεραίνουμε έτσι, ότι ο ασβεστόλιθος είναι πολύ πιο ευαίσθητος στη μεταβολή του ποσοστού υγρασίας από τον GRB και τον βασάλτη.

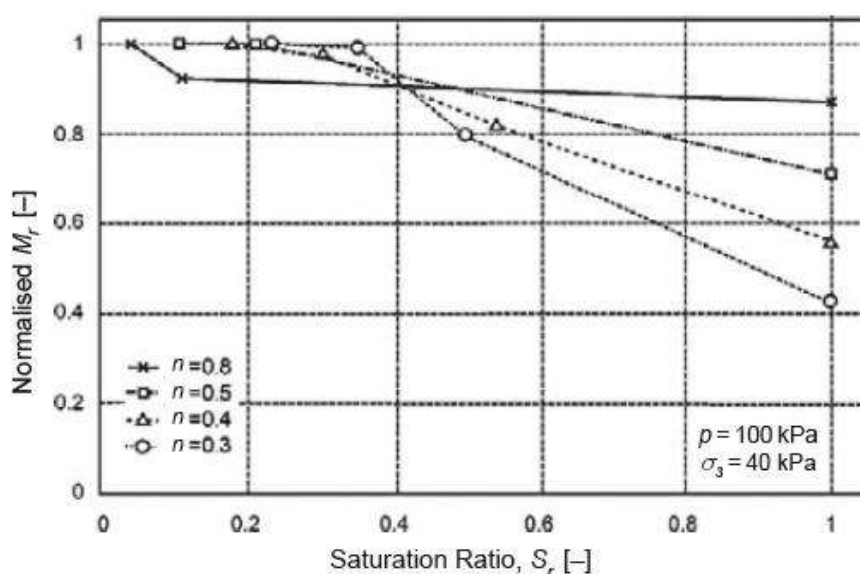
Αρκετές έρευνες που διεξήχθησαν στη Γαλλία σε μεγάλο αριθμό διαφορετικών ασύνδετων υλικών έδειξαν, ότι η ευαισθησία τους στην υγρασία συνδέεται στενά με την ορυκτολογική τους φύση και είναι ιδιαίτερα σημαντική για το μαλακό ασβεστόλιθο. Αυτό απεικονίζεται στην εικόνα 5.6, η οποία παρουσιάζει τιμές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας που λαμβάνονται για διαφορετικές φύσεις ασύνδετου υλικού και διαφορετικές περιεκτικότητες υγρασίας.



Εικόνα 5. 6 Ευαισθησία σε υγρασία ασύνδετων υλικών διαφορετικής προέλευσης
Πηγή: Hornych et al., 1998

Ο Ekblad (2004) διερεύνησε την επίδραση της υγρασίας στις ελαστικές ιδιότητες των ασύνδετων υλικών τόσο στην κορεσμένη όσο και στην ακόρεστη κατάσταση. Αυτή η μελέτη περιορίστηκε σε έναν τύπο συσσωματώματος διάφορων κατηγοριών (με μέγιστο μέγεθος σωματιδίων 90 mm). Το συσσωμάτωμα προέρχεται από την Skarlunda της Ostergotland στη Σουηδία. Οι δοκιμές του Ekblad σε ασύνδετα υλικά διαφορετικών κοκκομετρικών καμπυλών έδειξαν, ότι η επίδραση της περιεκτικότητας σε υγρασία στις ελαστικές ιδιότητες εξαρτάται από την ταξινόμηση των υλικών.

Πρώτον επιβεβαιώθηκε η εξάρτηση του ενεργού μέτρου ελαστικότητας από τη μέση τάση p . Η αύξηση της τιμής της τάσης οδηγεί σε σημαντική αύξηση του ενεργού μέτρου ελαστικότητας. Περιορισμένες πιέσεις 100 kPa επιτεύχθηκαν από την Ekblad. Διεξήχθησαν επίσης τριαξονικές δοκιμές σε διαφορετικές περιεκτικότητες σε υγρασία. Η περιεκτικότητα σε υγρασία αυξήθηκε διαδοχικά από αρχικά χαμηλή περιεκτικότητα σε κατάσταση διαβροχής (που αντιπροσωπεύει τον πλήρη κορεσμό) και στη συνέχεια το δείγμα αφέθηκε να στραγγίσει ελεύθερα. Από την εικόνα 5.7 μπορεί, να παρατηρηθεί, ότι η σχετική μείωση του M_r φαίνεται, να εξαρτάται από τον συντελεστή διαβάθμισης, με μια χαμηλότερη παράμετρο ταξινόμησης (δηλ. μία μεγαλύτερη αναλογία λεπτών σωματιδίων) που αποδίδει μεγαλύτερη μείωση συντελεστών κατά τον κορεσμό.



Εικόνα 5. 7 Ενεργό μέτρο ελαστικότητας ως συνάρτηση του βαθμού κορεσμού ($p = 100 \text{ kPa}$ και $\sigma_3 = 40 \text{ kPa}$)
Πηγή: Ekblad and Isacsson, 2006

Από τα ανωτέρω είναι ξεκάθαρο, ότι το ενεργό μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται άμεσα από το ποσοστό υγρασίας και γι' αυτό κατά τη προσπάθεια πειραματικού ή αναλυτικού προσδιορισμού του M_r πρέπει να συνυπολογίζεται υποχρεωτικά το ποσοστό υγρασίας της εκάστοτε στρώσης.

5.3.2. ΣΤΡΩΣΗ ΕΔΡΑΣΗΣ

Η στρώση έδρασης, όπως έχει αναφερθεί, είναι το έδαφος θεμελίωσης που υποστηρίζει τις υπόλοιπες στρώσεις του οδοστρώματος και το φορτίο κυκλοφορίας. Το ενεργό μέτρο ελαστικότητας αντιπροσωπεύοντας την δυναμική αντοχή του εδάφους της στρώσης έδρασης

χρησιμοποιείται ως βασικό στοιχείο σχεδιασμού των οδοστρωμάτων. Για ορισμένους τύπους εδάφους, το ενεργό μέτρο ελαστικότητας είναι ευαίσθητο στη μεταβολή της περιεκτικότητας σε υγρασία. Η εποχιακή μεταβολή της περιεκτικότητας σε υγρασία της στρώσης έδρασης μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το Mr και στη συνέχεια το σχεδιασμό του οδοστρώματος. Για αυτό το λόγο γίνεται απαραίτητη η χρήση μιας αποτελεσματικής τιμής για το ενεργό μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης που να αντικατοπτρίζει την εποχιακή διακύμανση της περιεκτικότητας σε υγρασία του εδάφους.

Το ανωτέρω σκεπτικό, τα τελευταία χρόνια, αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης και προκάλεσε το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών. Υπήρξε αυξημένο ενδιαφέρον για τον προσδιορισμό της επίδρασης των μεταβολών της υγρασίας στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας (Mr) των εδαφών της στρώσης έδρασης στο οδόστρωμα και αυτό είχε ως αποτέλεσμα, να καταβληθούν προσπάθειες για την ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων, που να προβλέπουν την μεταβολή των τιμών του Mr με την υγρασία. Τα μοντέλα αυτά αναμένεται να αντιπροσωπεύσουν τις εποχιακές διακυμάνσεις της περιεκτικότητας σε υγρασία της στρώσης έδρασης.

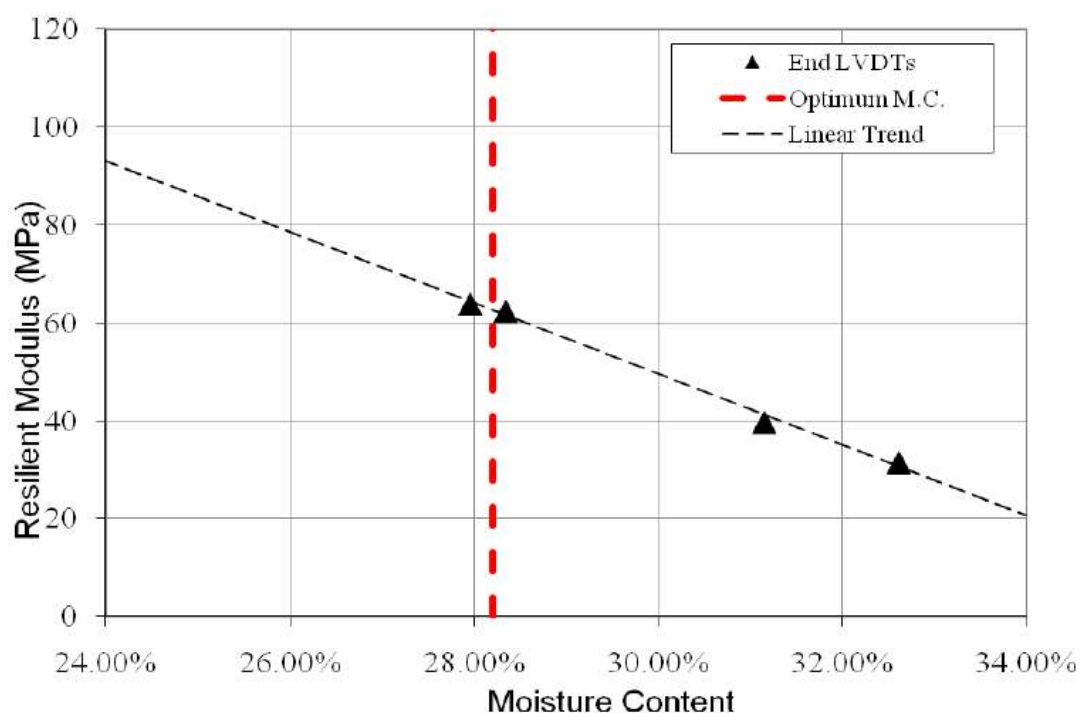
Η επίδραση της διακύμανσης της υγρασίας στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης έχει διερευνηθεί από αρκετούς μελετητές. Οι Nazzari et al. (2008) αξιολόγησαν το ενεργό μέτρο ελαστικότητας τεσσάρων τύπων εδάφους σε τέσσερα επίπεδα υγρασίας. Σύμφωνα με την ταξινόμηση των εδαφών AASHTO, οι τέσσερις τύποι εδάφους ταξινομήθηκαν ως εδάφη A-4, A-6, A-7-5 και A-7-6. Τα τέσσερα επίπεδα περιεκτικότητας σε υγρασία επιλέχθηκαν, έτσι ώστε, να καλύπτουν τόσο την ξηρή όσο και την υγρή πλευρά της βέλτιστης περιεκτικότητας σε υγρασία (w_{opt}). Τα αποτελέσματα έδειξαν, ότι το ενεργό μέτρο ελαστικότητας μειώθηκε κατά 50% έως 70%, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους, λόγω της αύξησης της περιεκτικότητας σε υγρασία από την ξηρά πλευρά της w_{opt} στην υγρή πλευρά της w_{opt} .

Διάφορα μοντέλα πρόβλεψης έχουν προταθεί για την αξιολόγηση του Mr από τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους της στρώσης έδρασης. Ο George (2004) διεξήγαγε ανάλυση ευαισθησίας για διάφορα μοντέλα πρόβλεψης και διαπίστωσε, ότι η περιεκτικότητα σε υγρασία του δείγματος ήταν η πιο σημαντική μεταβλητή στην πρόβλεψη του Mr. Οι Khourey et al. (2009) κατέληξε στο συμπέρασμα, ότι οι σχέσεις υγρασίας - Mr ποικίλλουν ανάλογα με τους τύπους του εδάφους, συγκεκριμένα με την τιμή του δείκτη πλαστιμότητας PI. Η παρατήρησή τους συμφωνεί με τα συμπεράσματα των Khourey και Zaman (2004) και των Drumm et al. (1997), ότι τα εδάφη με χαμηλή τιμή του δείκτη πλαστιμότητας είναι λιγότερο ευαίσθητα στις μεταβολές της υγρασίας από τα εδάφη με υψηλούς δείκτες πλαστιμότητας.

Οι Yau και Von Quintus (2001) μελέτησαν την επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους στο Mr, από τα δεδομένα δοκιμών που συλλέχθηκαν για το πρόγραμμα LTPP (2001). Τα δεδομένα από τις δοκιμές του Mr χωρίστηκαν σε τέσσερις ομάδες ανάλογα με τον τύπο του εδάφους: χαλίκι, άμμος, ιλύς και άργιλος. Διεξήχθη στατιστική ανάλυση για να διερευνηθεί η σημασία κάθε ιδιότητας του εδάφους για την πρόβλεψη του Mr. Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης έδειξαν, ότι η βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία w_{opt} , αποτέλεσε σημαντική μεταβλητή στην πρόβλεψη του Mr και για τους τέσσερις τύπους εδάφους, ενώ η περιεκτικότητα σε υγρασία του δείγματος ήταν σημαντική μεταβλητή στην πρόβλεψη του Mr για τα αμμώδη και αργιλώδη εδάφη. Ο George (2004) διαπίστωσε, ότι η πιο σημαντική μεταβλητή είναι η περιεκτικότητα σε υγρασία, ακολουθεί το ποσοστό διερχόμενου από το κόσκινο #200, ο δείκτης πλαστιμότητας και τέλος η πυκνότητα του δείγματος. Ωστόσο, η σειρά είναι πιθανό να ποικίλει για διαφορετικά εδάφη και διαφορετικές συνθήκες πίεσης.

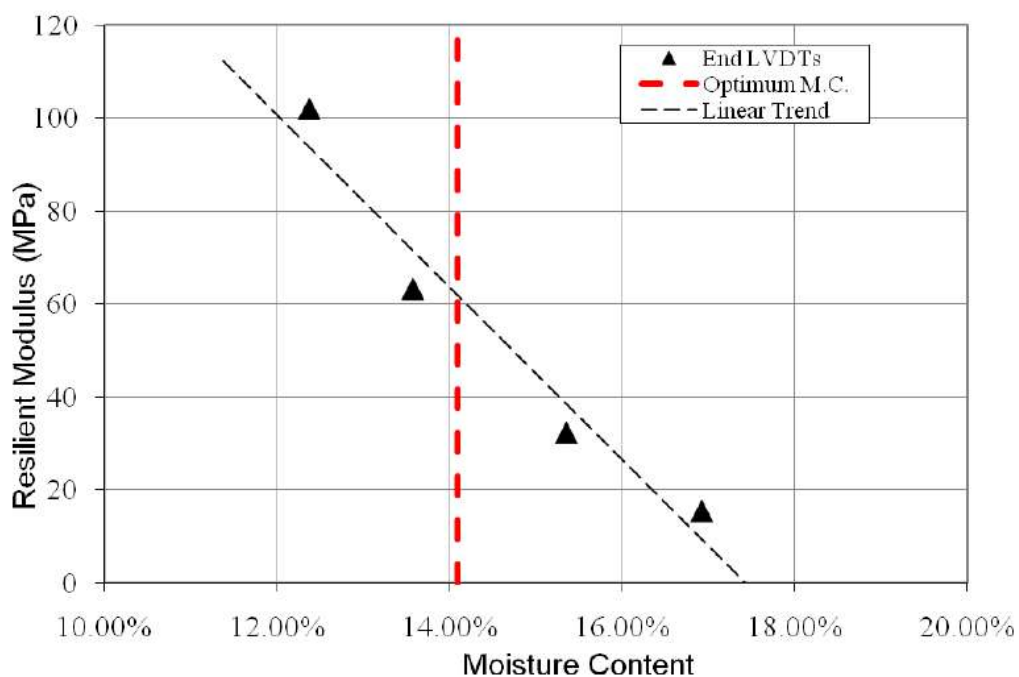
Ένα παράδειγμα για την περαιτέρω ανάλυση των παραπάνω αποτελεί η έρευνα των Shalaby A. και Soliman H. (2010), που αξιολογεί την ευαισθησία του ενεργού μέτρου ελαστικότητας των τυπικών εδαφών της Μανιτόμπα στη μεταβολή της περιεκτικότητας σε υγρασία. Πραγματοποιήθηκε δοκιμή τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου σε τρία διαφορετικά εδάφη: αμμώδης ιλύς, αμμώδης άργιλος και υψηλής πλαστιμότητας άργιλος και σε τέσσερα διαφορετικά ποσοστά υγρασίας. Τα τέσσερα περιεχόμενα υγρασίας επιλέχθηκαν σύμφωνα με την τυπική καμπύλη συμπίεσης Proctor του δείγματος για να καλύψουν τόσο την ξηρή όσο και την υγρή πλευρά της καμπύλης. Τα αποτελέσματα έδειξαν, ότι τα συνεκτικά εδάφη είναι πιο ευαίσθητα στις μεταβολές της υγρασίας από τα μη συνεκτικά και ότι η τιμή του Mr, από όλα τα δείγματα, εξαρτάται άμεσα από την υγρασία. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

Το δείγμα υψηλής πλαστιμότητας αργίλου HC1, που ταξινομήθηκε ως έδαφος A-7-6 σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης εδάφους AASHTO περιείχε 83% άργιλο. Το ενεργό μέτρο ελαστικότητας του δείγματος έδειξε ευαισθησία στην διακύμανση της υγρασίας. Το ενεργό μέτρο ελαστικότητας μειώθηκε από 63,9 MPa σε 31,5 MPa (-50,7%) με την αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία από 28,0% σε 32,6%, όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.8 ($w_{opt} = 28,2\%$). Αν και είναι γνωστό, ότι η συσχέτιση είναι πιθανόν να μην είναι γραμμική, παρατηρείται μία τάση γραμμικότητας της καμπύλης συσχέτισης των δύο μεταβλητών.



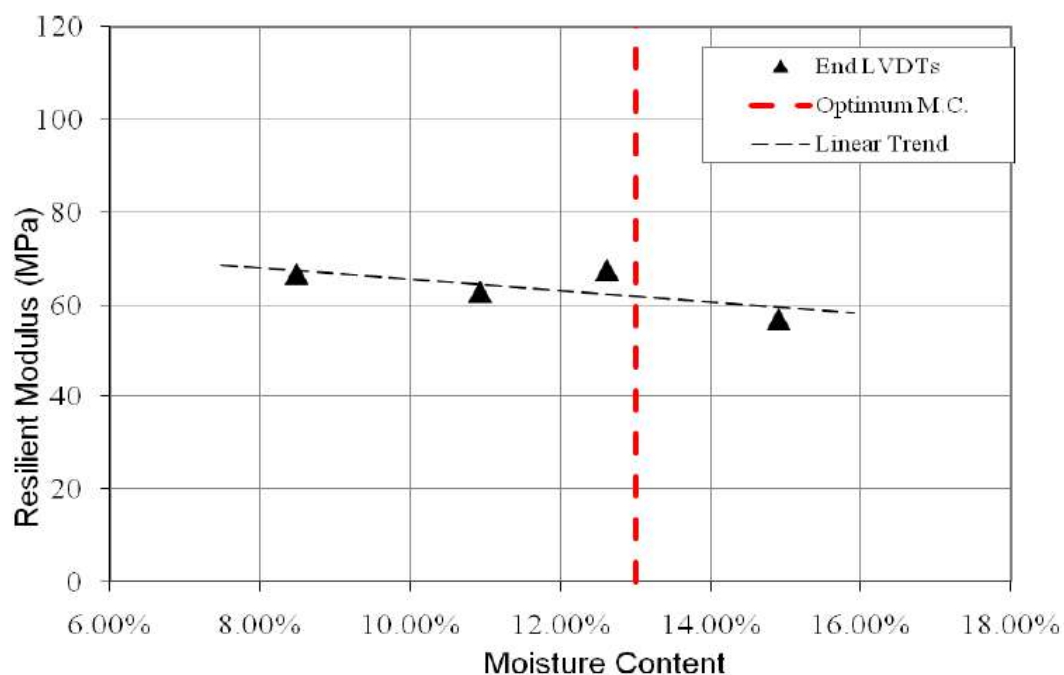
Εικόνα 5. 8 Ενεργό μέτρο ελαστικότητας με το ποσοστό υγρασίας για το δοκίμιο HC1
Πηγή: Shalaby et al., 2010

Το δείγμα της αμμώδους αργίλου SC1, που ταξινομήθηκε ως έδαφος A-6 σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης εδάφους AASHTO περιείχε 30% άργιλο. Το ενεργό μέτρο ελαστικότητας του δείγματος έδειξε υψηλή ευαισθησία στις διακυμάνσεις της υγρασίας. Το ενεργό μέτρο ελαστικότητας μειώθηκε από 101,9 MPa σε 15,4 MPa (-84,9%) λόγω της αύξησης της περιεκτικότητας σε υγρασία από 12,4% σε 16,9%, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.9 ($w_{opt} = 14,1\%$). Και εδώ παρατηρείται μια σχετικά γραμμική συσχέτιση των δύο μεταβλητών.



Εικόνα 5. 9 Ενεργό μέτρο ελαστικότητας με το ποσοστό υγρασίας για το δοκίμιο SC1
 Πηγή: Shalaby et al., 2010

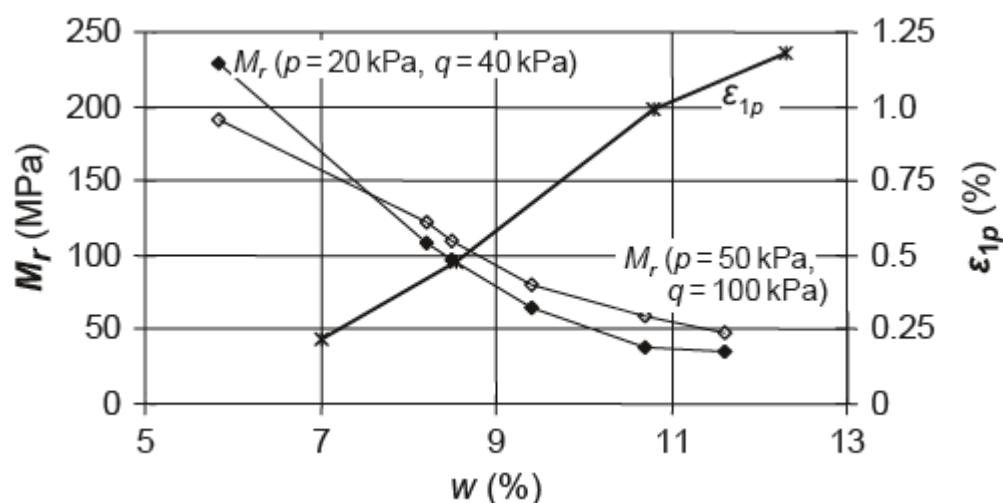
Το δείγμα της αμμώδους ιλύς, SS1 που ταξινομήθηκε ως χώμα A-4 σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης εδάφους AASHTO περιείχε 46% ιλύς και 47% λεπτή άμμο. Το ενεργό μέτρο ελαστικότητας του δείγματος έδειξε χαμηλή ευαισθησία στην διακύμανση της υγρασίας. Το M_r μειώθηκε από 66,6 MPa σε 56,9 MPa (-14,6%) λόγω της αύξησης της περιεκτικότητας σε υγρασία από 8,5% σε 14,9%, όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.10 ($w_{opt} = 13\%$). Και εδώ παρατηρείται μια σχετικά γραμμική συσχέτιση των δύο μεταβλητών.



Εικόνα 5. 10 Ενεργό μέτρο ελαστικότητας με το ποσοστό υγρασίας για το δοκίμιο SS1

Πηγή: Shalaby et al., 2010

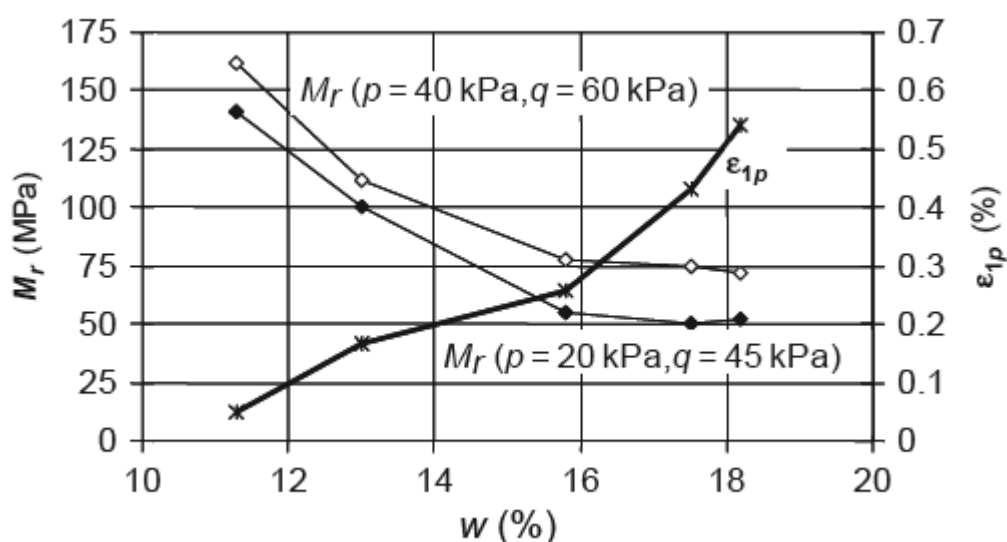
Επιπλέον παραδείγματα (Hornych et al., 1998) της συσχέτισης του ενεργού μέτρου ελαστικότητας και των μόνιμων παραμορφώσεων του εδάφους της στρώσης έδρασης με την περιεκτικότητα σε υγρασία παρουσιάζονται στις εικόνες 5.11 και 5.12. Η εικόνα 5.11 παρουσιάζει αποτελέσματα που λαμβάνονται σε μια αργιλώδη άμμο (14% λεπτόκοκκο, βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία $w_{opt} = 8\%$).



Εικόνα 5. 11 Μεταβολές του M_r και των πλαστικών παραμορφώσεων σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία για μια αργιλώδη άμμο

Πηγή: Hornych et al., 1998

Η εικόνα 5.12 παρουσιάζει τα αποτελέσματα που λαμβάνονται για μία ιλύς (85% λεπτόκοκκο, βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία $w_{opt} = 14\%$). Για τα 2 εδάφη, το ενεργό μέτρο ελαστικότητας (που καθορίζεται για δύο διαφορετικά επίπεδα τάσης) μειώνεται κατά ένα συντελεστή 3-4 όταν η περιεκτικότητα σε υγρασία αυξάνεται από $w_{opt} - 2\%$ σε $w_{opt} + 2\%$. Για την ίδια αλλαγή, αυξάνονται σημαντικά οι μόνιμες αξονικές τάσεις (που καθορίστηκαν μετά από 200.000 κύκλους φορτίου με τάσεις $p = 26 \text{ kPa}$ και $q = 80 \text{ kPa}$).

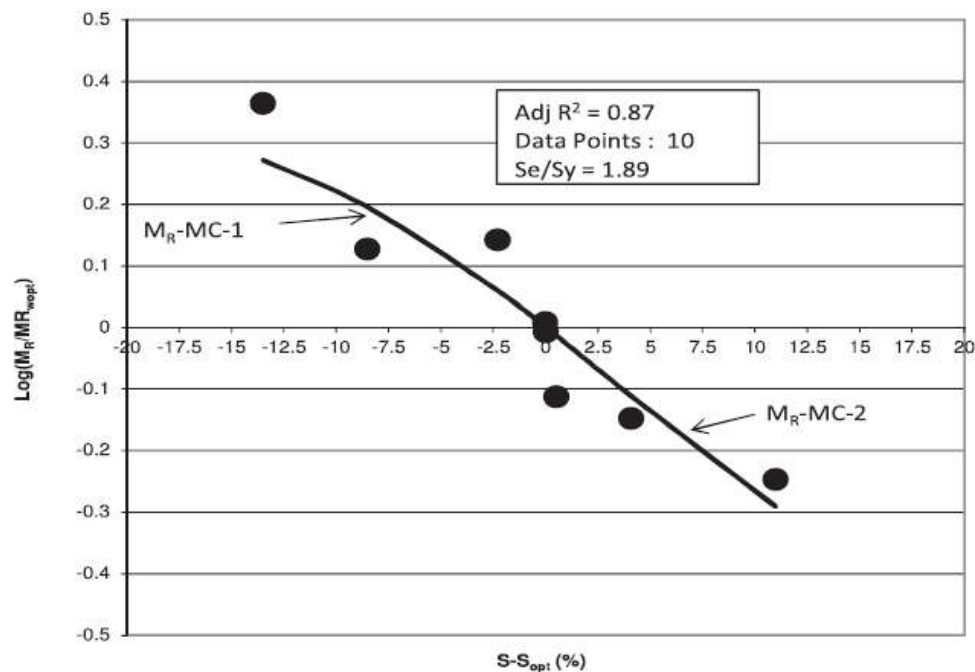


Εικόνα 5. 12 Μεταβολές M_r και των μόνιμων αξονικών παραμορφώσεων σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία για μία ιλύς
Πηγή: Hornych et al., 1998

Μία ακόμη έρευνα (Naji, 2016) πραγματοποιήθηκε για την αξιολόγηση της μεταβολής του ενεργού μέτρου ελαστικότητας με την περιεκτικότητα σε υγρασία μετά την συμπύκνωση των εδαφών στην πολιτεία της Οκλαχόμα και στο κράτος της Πενσυλβανίας. Χρησιμοποιήθηκαν επτά διαφορετικά εδαφικά δοκίμια και ελέγχθηκαν σε τέσσερις τιμές του ποσοστού υγρασίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν, ότι οι σχέσεις υγρασίας- M_r ποικίλλουν.

Ένα από τα δοκίμια της έρευνας (δοκίμιο α) για συμπίεση στην βέλτιστη υγρασία, παρουσίασε συσχέτιση του M_r με τη υγρασία, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.13. Το τμήμα της καμπύλης MR-MC-1 παρουσιάζει τη διαδρομή ξήρανσης και το τμήμα MR-MC-2 τη διαδρομή διαβροχής του δοκιμίου. Είναι εμφανές, ότι οι τιμές του M_r κατά μήκος της καμπύλης MR-MC-1 αυξήθηκαν με τη μείωση της περιεκτικότητας σε υγρασία (δηλ. αύξηση του βαθμού κορεσμού), ενώ οι τιμές του M_r μειώθηκαν κατά μήκος της διαδρομής MR-MC-2 όπου από την υγρασία w_{opt} μεταβαίνει σε υψηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία. Τα αποτελέσματα δείχνουν, ότι για μεταβολή της υγρασίας από την w_{opt} στην τιμή $w_{opt} + 4\%$ το M_r παρουσιάζει μείωση 40%. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν, ότι οι μεταβολές στις τιμές του M_r

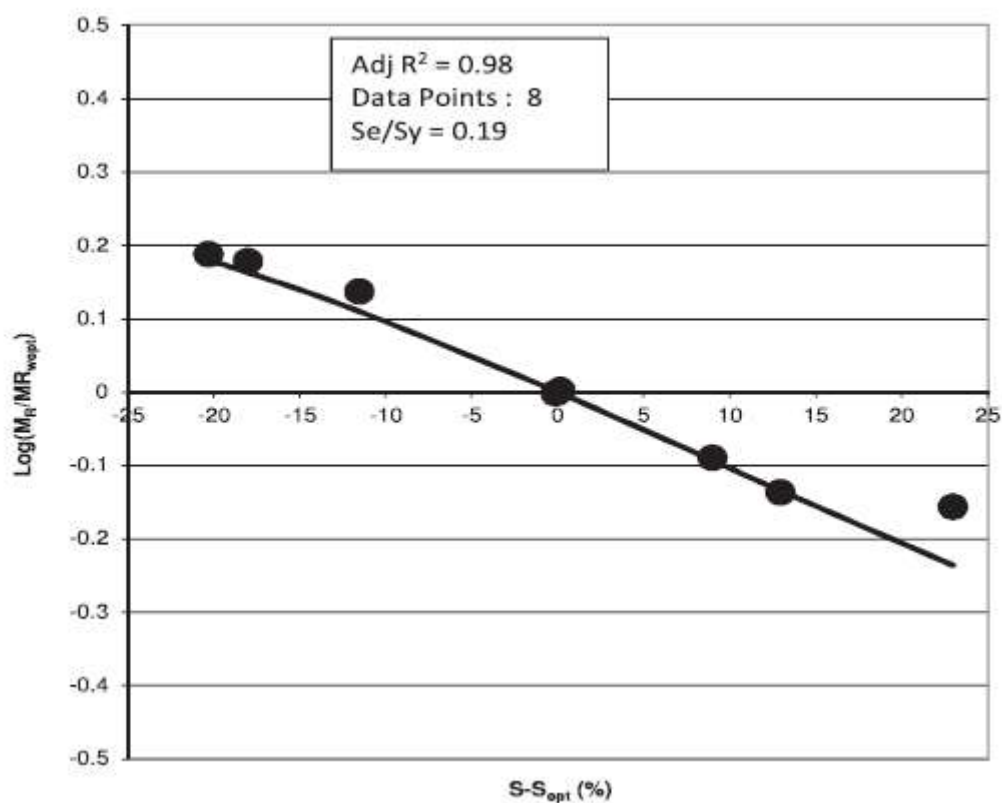
επηρεάζονται άμεσα από τη διαδρομή διαβροχής/ξήρανσης και ότι μεταβάλλεται αντιστρόφως με τη μεταβολή της περιεκτικότητας σε υγρασία.



Εικόνα 5. 13 Συσχέτιση $M_R - w$ για το εδαφικό δοκίμιο α

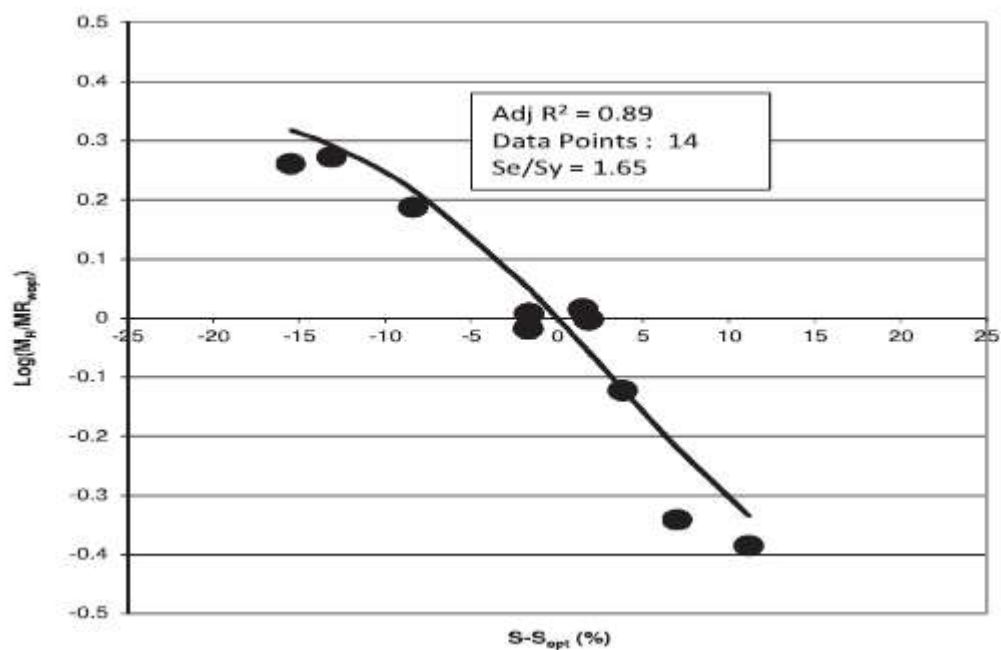
Πηγή: Naji, 2016

Για το επόμενο δοκίμιο (δοκίμιο β), που περιγράφεται στην εικόνα 5.14, το ενεργό μέτρο ελαστικότητας των δειγμάτων μειώθηκε από τη τιμή 65MPa στα 46 MPa με την αύξηση του ποσοστού υγρασίας από την βέλτιστη τιμή (περίπου 12,5%) σε μία υψηλότερη (περίπου 16,5%). Για μείωση του ποσοστού υγρασίας από την τιμή w_{opt} στην τιμή $w_{opt} - 4\%$ το ενεργό μέτρο ελαστικότητας αυξήθηκε κατά 55%. Αυτή η συμπεριφορά είναι σύμφωνη με τη βιβλιογραφία που αναφέρει την ποιοτική συμπεριφορά του εδαφικού δοκιμίου Kingfisher και άλλων εδαφών (π.χ., Khoury & Zaman 2004 και Khoury et al., 2009).



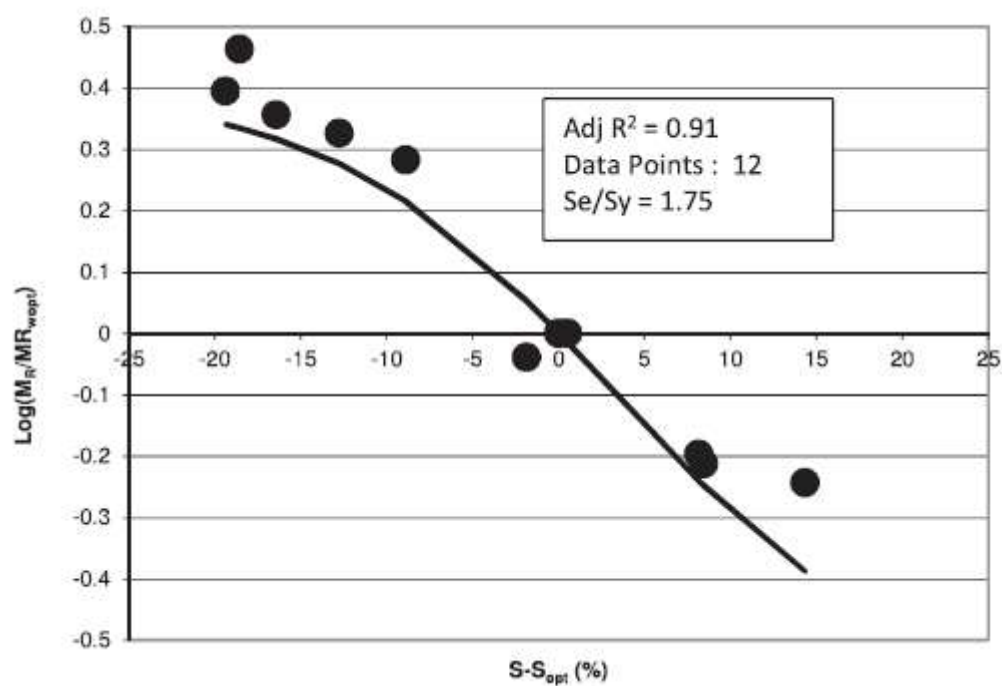
Εικόνα 5. 14 Συσχέτιση $Mr - w$ για το εδαφικό δοκίμιο β
Πηγή: Naji, 2016

Για τα ακόλουθα εδαφικά δοκίμια (δοκίμια γ και δ) οι καμπύλες του Mr με την υγρασία παρουσιάζονται στις εικόνες 5.15 και 5.16 αντίστοιχα. Το Mr μειώθηκε με αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία και αυξήθηκε με μείωση αυτής, μια τάση παρόμοια με εκείνη που παρατηρήθηκε στα δοκίμια Kingfisher, Binger αλλά και σε άλλες εδαφικές σειρές (Khouiry et al., 2009) που υποβλήθηκαν σε παρόμοια δοκιμή.



Εικόνα 5. 15 Συσχέτιση $M_r - w$ για το εδαφικό δοκίμιο γ

Πηγή: Naji, 2016

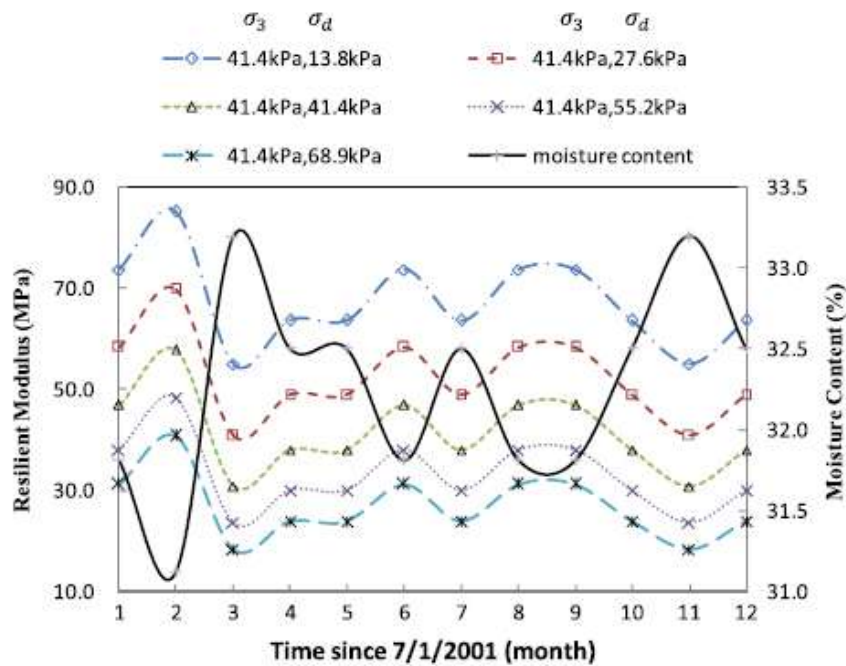


Εικόνα 5. 16 Συσχέτιση $M_r - w$ για το εδαφικό δοκίμιο δ

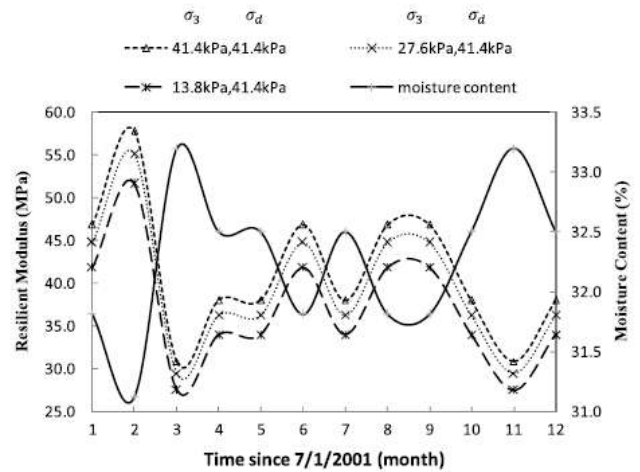
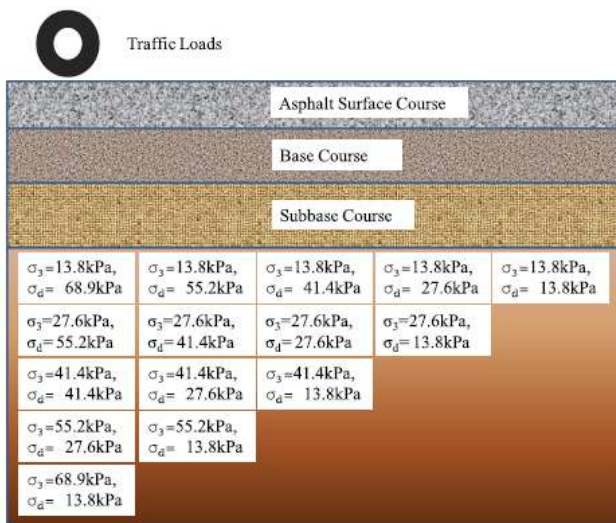
Πηγή: Naji, 2016

Τέλος, από έρευνα (Changjun et al., 2015) που πραγματοποιήθηκε στα εδάφη του Τένεσι προέκυψε το συμπέρασμα, ότι η διακύμανση της υγρασίας είχε σημαντική επίδραση στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας της στρώσης έδρασης και, στη συνέχεια, στην απόδοση του οδοστρώματος. Χρησιμοποιήθηκαν 24 δείγματα από αργιλώδη εδάφη και εννέα δείγματα από ιλύς. Παρατηρήθηκε, ότι οι φυσικές ιδιότητες όπως το όριο πλαστιμότητας, το ποσοστό αργίλου, το ποσοστό διερχομένου από το κόσκινο #200, το ειδικό βάρος, το όριο υδαρότητας, η βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία, η μέγιστη πυκνότητα και η περιεκτικότητα σε υγρασία είχαν σημαντικές επιπτώσεις στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας της αργίλου ενώ το ειδικό βάρος, η περιεκτικότητα σε υγρασία και το ποσοστό διερχομένου από το κόσκινο 4% επηρέασαν σημαντικά το ενεργό μέτρο ελαστικότητας των δοκιμών από ιλύς. Επίσης φάνηκε, ότι το ενεργό μέτρο ελαστικότητας των εδαφών μειώθηκε, καθώς η περιεκτικότητα σε υγρασία αυξήθηκε από τη βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία.

Οι εικόνες 5.17 και 5.18 δείχνουν την εποχιακή μεταβολή του ενεργού μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος. Δείχνουν, ότι όταν η περιεκτικότητα σε υγρασία ήταν υψηλότερη από τη βέλτιστη, υπήρξε αντίστροφη συσχέτιση μεταξύ ενεργού μέτρου ελαστικότητας και περιεκτικότητας σε υγρασία. Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρθηκαν και από άλλους ερευνητές (Ceratti et al., 2004). Η μεταβολή του ενεργού μέτρου ελαστικότητας του εδάφους ήταν περίπου 10 MPa. Μπορούμε επίσης να δούμε, ότι τα εδαφικά σημεία κάθετα υπό το φορτία κυκλοφορίας παρουσίαζαν μικρότερο M_r από αυτά που βρίσκονταν βαθύτερα ή οριζοντίως μακρύτερα από τα φορτία κυκλοφορίας.



Εικόνα 5. 17 Ετήσια μεταβολή του ενεργού μέτρου ελαστικότητας του αργιλικού εδάφους λόγω της εποχιακής μεταβολής της υγρασίας
Πηγή: Changjun et al., 2015



Εικόνα 5. 18 Καταπόνηση της στρώσης έδρασης σε σχέση με την εποχιακή διακύμανση του M_r σε διαφορετικά βάθη
Πηγή: Changjun et al., 2015

Τέλος, λόγω του αυξημένου ενδιαφέροντος για τον προσδιορισμό της επίδρασης των μεταβολών της υγρασίας ($w\%$) στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας (Mr) των εδαφών της στρώσης έδρασης στο οδόστρωμα, αναπτύχθηκαν μαθηματικά μοντέλα που προβλέπουν την μεταβολή των τιμών του Mr με την υγρασία. Κάποια από αυτά τα μαθηματικά μοντέλα αναφέρονται στη συνέχεια.

Οι Han και Vanapalli (2015) πρότειναν ένα νέο μοντέλο που να συσχετίζει το ενεργό μέτρο ελαστικότητας και την αναρρόφηση της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος. Το μοντέλο επικυρώθηκε χρησιμοποιώντας συνολικά 11 εδαφικά δοκίμια. Τα ευρήματα από τους Han και Vanapalli (2015) έδειξαν, ότι το μοντέλο είναι σημαντικό στην πρόβλεψη των αλλαγών στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας με την μεταβολή της αναρρόφησης (S) του εδάφους. Οι Khosravifar et al. (2015) αξιολόγησαν συνολικά εννέα μοντέλα για την πρόβλεψη του Mr των εδαφών. Τα ευρήματα έδειξαν, ότι ένα μοντέλο που προτάθηκε από τον Lytton (1995) ήταν καλύτερο στο να προβλέψει το ενεργό μέτρο ελαστικότητας σε σύγκριση με άλλα μοντέλα της βιβλιογραφίας.

Σε μια σχετική έρευνα, οι Ng και Zhou (2014) ανέπτυξαν ένα νέο σύστημα τριαξονικής φόρτισης για να αξιολογήσουν την επίδραση του αριθμού των κύκλων φόρτισης, της αναρρόφησης και της θερμοκρασίας του εδάφους στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας και στην πλαστική παραμόρφωση. Τα αποτελέσματα είναι χρήσιμα στην πρόβλεψη της δομής του εδάφους της στρώσης έδρασης και γενικά της απόδοσης του οδοστρώματος. Οι Sivakumar et al. (2013) εξέτασαν τη συμπεριφορά των ακόρεστων εδαφών υπό κυκλική φόρτιση. Διαπιστώθηκε, ότι το ενεργό μέτρο ελαστικότητας αρχικά αυξήθηκε και στη συνέχεια μειώθηκε, καθώς αυξανόταν η περιεκτικότητα σε υγρασία.

Μια άλλη έρευνα από τους Cary και Zapata (2010) πρότεινε ένα αναθεωρημένο μοντέλο MEPDG που μπορεί να προβλέψει το ενεργό μέτρο ελαστικότητας των εδαφών της βάσης, της υπόβασης και της στρώσης έδρασης λόγω εποχιακών αλλαγών. Οι Sawangsuriya et al. (2009) μελέτησαν τη μεταβολή του ενεργού μέτρου ελαστικότητας με την αναρρόφηση και ανέπτυξαν μια ημι-λογαριθμική λειτουργία που συσχετίζει τις δύο παραμέτρους. Οι Khouiry et al. (2011, 2009) και οι Khouiry και Zaman (2004) αξιολόγησαν την επίδραση τόσο της υγρασίας όσο και της αναρρόφησης στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας επιλεκτικών εδαφών της στρώσης έδρασης στην Οκλαχόμα. Ένα τροποποιημένο μοντέλο MEPDG Mr - $w\%$ αναπτύχθηκε και επικυρώθηκε για τρία εδάφη που συναντώνται συνήθως στην Οκλαχόμα. Ο Khouiry et al. (2011) παρείχε πειραματικά δεδομένα και ανέπτυξε μια σχέση υστέρησης μεταξύ του Mr και της αναρρόφησης που προσδιορίστηκε ως χαρακτηριστική καμπύλη Mr (MRCC). Οι Yuan and Nazarian (2003) διερεύνησαν την επίδραση της υγρασίας, σε

συμπυκνωμένα και μη-συμπυκνωμένα δοκίμια, στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας της βάσης/υπόβασης και της στρώσης έδρασης. Τα ευρήματα από την έρευνα τους έδειξαν, ότι οι τιμές του M_r παρουσίαζαν μείωση με την αύξηση της υγρασίας και αύξηση με την μείωση αυτής.

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

6.1. ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η περαιτέρω διερεύνηση των όσων αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, δηλαδή κατά πόσο η μεταβολή του ποσοστού υγρασίας της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος μπορεί να επηρεάσει τη τιμή του ενεργού μέτρου ελαστικότητας. Με σκοπό τη σύγκριση του βαθμού επιρροής της μεταβολής του ποσοστού υγρασίας στο M_r μεταξύ δύο διαφορετικών διατομών εύκαμπτων οδοστρωμάτων καθορίζονται δύο θεωρητικές διατομές, μία για οδόστρωμα υψηλής κυκλοφορίας (HVR) και μία για οδόστρωμα χαμηλής κυκλοφορίας (LVR). Επιπλέον, για μεγαλύτερο εύρος αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκαν διάφορα εδαφικά δοκίμια για την στρώση έδρασης.

Η επιλογή των δοκιμών έγινε με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία και την εργασιμότητα των διαθέσιμων στοιχείων. Τα εδαφικά δοκίμια που επιλέχθηκαν, η ακριβής προέλευση τους καθώς και τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1. Το δοκίμιο 2 χαρακτηρίζεται ως χονδρόκοκκο (SM) ενώ τα υπόλοιπα δοκίμια 1, 3 και 4 ως λεπτόκοκκα (CL).

Πίνακας 6. 1 Δεδομένα δοκιμών 1, 2, 3 και 4

Δοκίμιο	Χώρα/Οδός	$w_{opt}\%$	γ_d	γ_{dmax}	LL	PI	P200
1	Montgomery/US 82 W	13,8	18,0864	19,6707	22,3	6,1	55
2	Wayne/US 45N	11	18,526	20,817	20,5	1	28
3	Hinds/Norell W	17,8	16,5792	18,2358	37,2	13,1	96
4	Montgomery/US 82 W	13,8	18,2358	19,6707	28,1	12,4	60

Δοκίμιο	P40	%Clay	%Silt	Κατάταξη	Pa
1	NA	10,6	44,5	CL	14,7psi/100kPa
2	NA	3,2	25,4	SM	14,7psi/100kPa
3	99	19,3	78,7	CL	14,7psi/100kPa
4	90	12,3	48,1	CL	14,7psi/100kPa

Όπως έγινε φανερό και από το Κεφάλαιο 4, έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες και έχει αναπτυχθεί αντίστοιχα ένα ευρύ φάσμα εξισώσεων για τον θεωρητικό υπολογισμό του M_r καθώς και των παραμέτρων αυτού (k_i). Για τον υπολογισμό του M_r και της εξάρτησης αυτού από το ποσοστό υγρασίας των τεσσάρων εδαφικών δοκιμών, επιλέχθηκαν δύο διαφορετικές εξισώσεις υπολογισμού του ενεργού μέτρου ελαστικότητας και τρία διαφορετικά μοντέλα υπολογισμού των παραμέτρων k_i . Η διάκριση των συγκεκριμένων εξισώσεων έγινε βάσει

των διαθέσιμων χαρακτηριστικών των επιλεγμένων δοκιμών (1, 2, 3 και 4) και της δυνατότητας της πλήρους εφαρμογής τους.

Η εξίσωση του ενεργού μέτρου ελαστικότητας που υιοθετήθηκε κατά το πρόγραμμα NCHRP Project 1-37A (2002) είναι η μία εκ των εξισώσεων που επιλέχθηκε για τον υπολογισμό του M_r . Η εξίσωση που αναπτύχθηκε από τον Uzan το 1985 είναι η δεύτερη εξίσωση προσδιορισμού του ενεργού μέτρου ελαστικότητας. Οι εξισώσεις παρουσιάζονται ακολούθως:

$$M_r = k_1 P_a \left[\frac{\theta}{P_a} \right]^{k_2} \left[\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right]^{k_3} \quad (4.17)$$

$$M_r = k_1 \theta^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (4.11)$$

Για την εξίσωση 4.17 ο υπολογισμός των παραμέτρων k_1 , k_2 και k_3 βασίστηκε σε δύο μοντέλα.

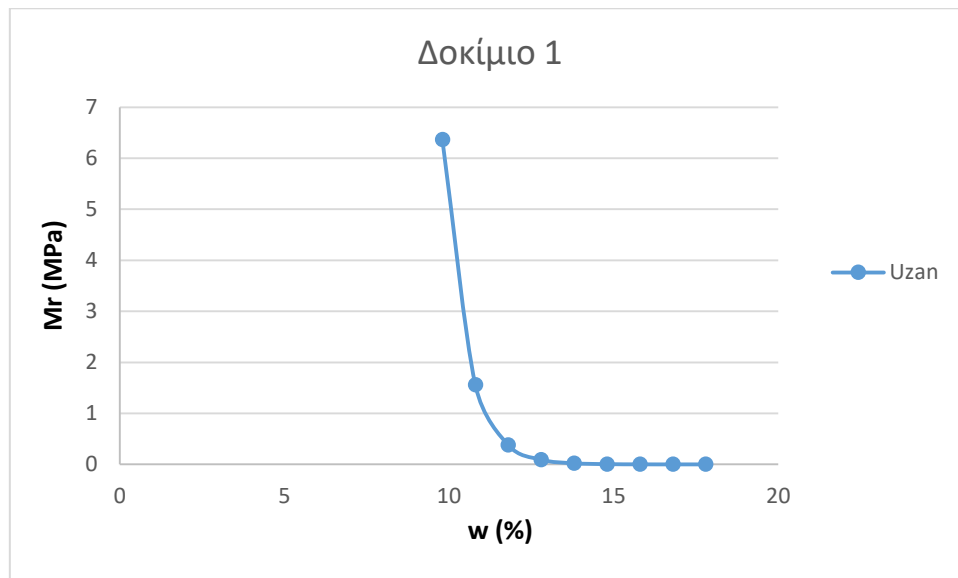
Το πρώτο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι το μοντέλο LTPP (Yau και Von Quintus, 2004) και παρουσιάζεται στις εξισώσεις 4.33 – 4.44.

Το δεύτερο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι το μοντέλο Wisconsin (Wisconsin Highway Research Program Project, 2006) και παρουσιάζεται στις εξισώσεις 4.24 – 4.32.

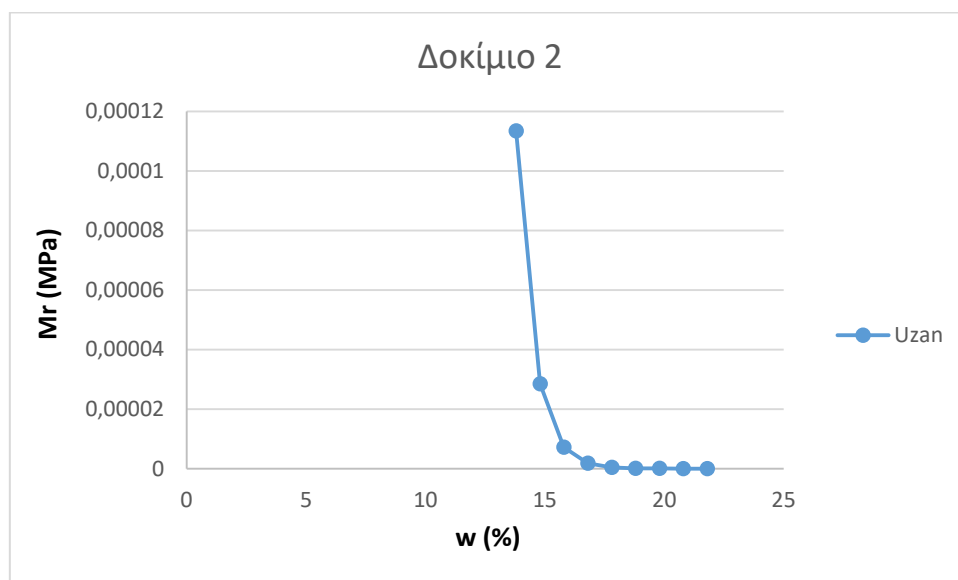
Για την εξίσωση 4.11 ο υπολογισμός των παραμέτρων k_1 , k_2 και k_3 βασίστηκε στο μοντέλο που αναπτύχθηκε από τους Dai et al (2002). Οι Dai et al., σε μια προσπάθεια να συγκρίνουν δύο από τα πιο γνωστά μοντέλα του M_r (καθολικό μοντέλο και μοντέλο τάσης σ_d) στην περιγραφή της ελαστικής συμπεριφοράς των εδαφών της στρώσης έδρασης και στη προσπάθεια μελέτης των επιδράσεων των ιδιοτήτων των υλικών στο M_r , ανέλυσαν επιλεγμένα δείγματα από έξι διαφορετικά τμήματα οδοστρώματος του σχεδίου οδικής έρευνας της Μινεσότα και οδηγήθηκαν στο μοντέλο που περιγράφεται από τις εξισώσεις 4.50 – 4.52.

Ο συνδυασμός του μοντέλου Uzan και των εξισώσεων των Dai et al. οδήγησε σε μη ενδεικτικά αποτελέσματα για τον υπολογισμό του ενεργού μέτρου ελαστικότητας, καθώς προέκυψαν για τα εδαφικά δοκίμια 1, 2 και 4 πολύ χαμηλές τιμές του M_r ενώ για το δοκίμιο 3 προέκυψαν αρνητικές τιμές του M_r . Επίσης, η συσχέτιση του ενεργού μέτρου ελαστικότητας με το ποσοστό υγρασίας δεν είναι σύμφωνη με τα όσα αναφέρονται στο Κεφάλαιο 5 και την διεθνή βιβλιογραφία για την επίδραση του ποσοστού υγρασίας στον σχεδιασμό των οδοστρωμάτων. Ενδεικτικά στις εικόνες 6.1 - 6.2 παρουσιάζονται τα διαγράμματα συσχέτισης του ενεργού μέτρου ελαστικότητας με το ποσοστό υγρασίας για όλα τα δοκίμια για το οδόστρωμα υψηλής κυκλοφορίας. Τα ανωτέρω οδηγούν στο συμπέρασμα, ότι οι

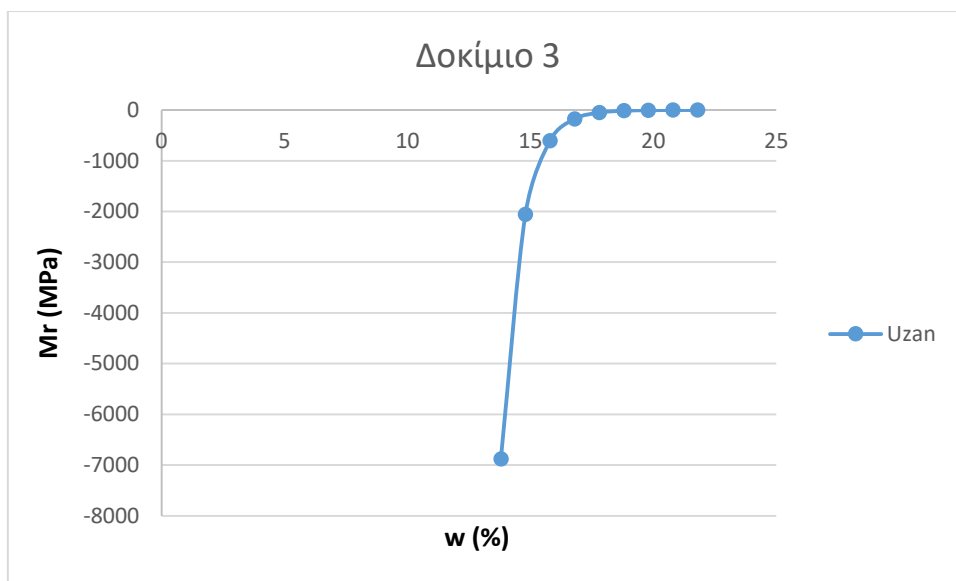
εξισώσεις Uzan και Dai et al. δεν είναι κατάλληλες για τον υπολογισμό του ενεργού μέτρου ελαστικότητας στην παρούσα πειραματική διαδικασία και έτσι αποκλείονται.



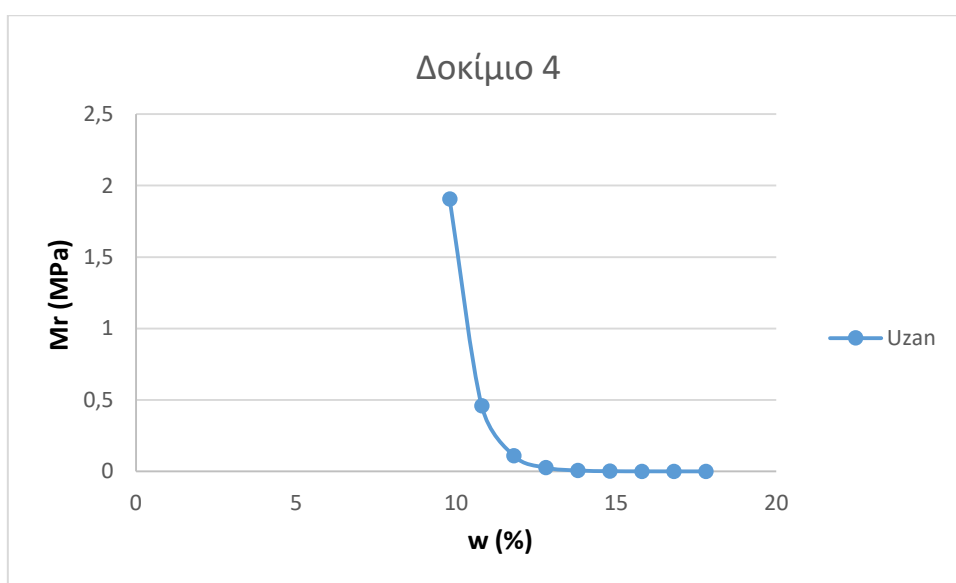
Εικόνα 6. 1 Διάγραμμα συσχέτισης του ενεργού μέτρου ελαστικότητας με το ποσοστό υγρασίας για το δοκίμιο 1 για οδόστρωμα HVR



Εικόνα 6. 2 Διάγραμμα συσχέτισης του ενεργού μέτρου ελαστικότητας με το ποσοστό υγρασίας για το δοκίμιο 2 για οδόστρωμα HVR



Εικόνα 6. 3 Διάγραμμα συσχέτισης του ενεργού μέτρου ελαστικότητας με το ποσοστό υγρασίας για το δοκίμιο 3 για οδόστρωμα HVR



Εικόνα 6. 4 Διάγραμμα συσχέτισης του ενεργού μέτρου ελαστικότητας με το ποσοστό υγρασίας για το δοκίμιο 4 για οδόστρωμα HVR

Στη συνέχεια για τα δοκίμια 1, 2 και 4 πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή της εξίσωσης 4.17 χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους που προέκυψαν από τις εξισώσεις 4.32 – 4.40 και 4.23 – 4.31. Μεταξύ των τριών δοκιμών τα δοκίμια 1 και 4 χαρακτηρίζονται ως λεπτόκοκκα ενώ το δοκίμιο 2 ως χονδρόκοκκο. Για τα δοκίμια 1 και 2 προκύπτουν ανάλογες τιμές του Mr για τα δυο μοντέλα υπολογισμού των παραμέτρων k_i ενώ για το δοκίμιο 4 προκύπτουν τιμές του Mr μεγαλύτερες από αυτές των άλλων δοκιμών με διαφορά της τάξεως των 40 MPa. Οι τιμές

του ενεργού μέτρου ελαστικότητας που προέκυψαν και για τα τρία δοκίμια μέσω των δύο μοντέλων παρουσιάζονται στον πίνακα 6.2.

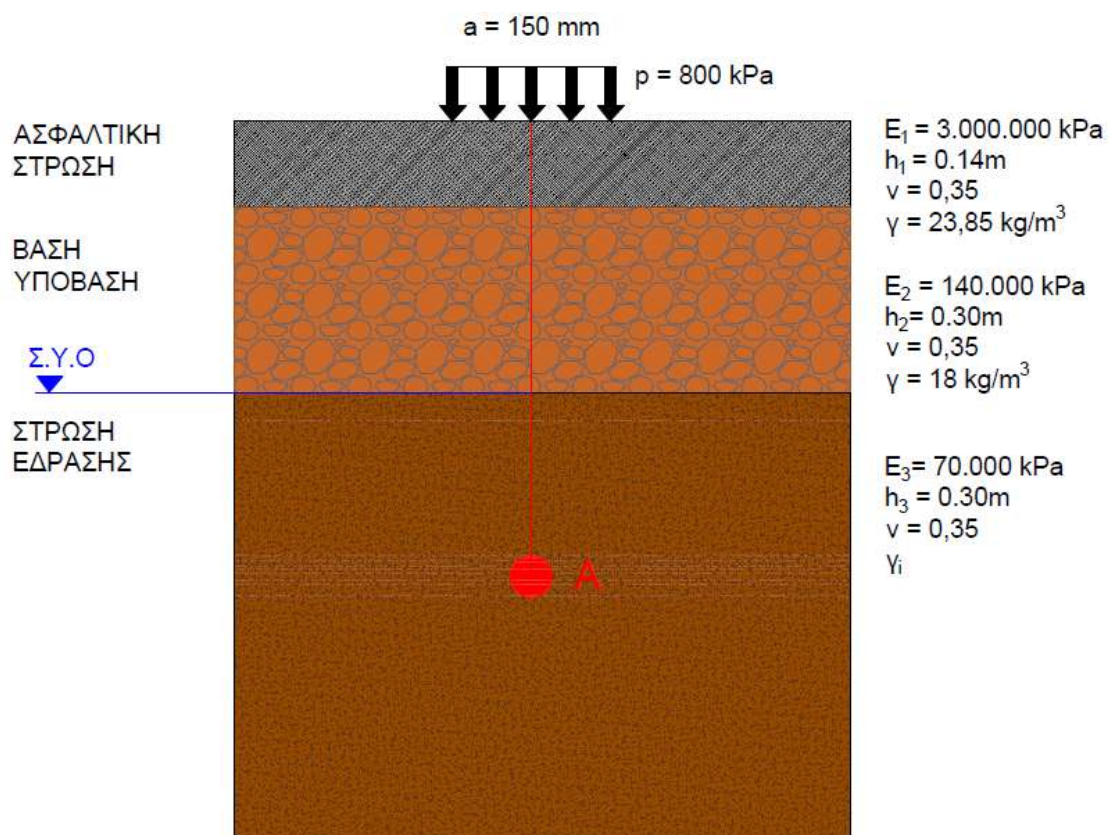
Πίνακας 6. 2 Τιμές ενεργού μέτρου ελαστικότητας για τα δοκίμια 1, 2 και 4

Δοκίμιο 1		Δοκίμιο 2		Δοκίμιο 4	
LTPP	Wisconsin	LTPP	Wisconsin	LTPP	Wisconsin
26,40755	45,1124251	10,59277	42,3048457	43,89784	84,7728364
24,35518	37,9050777	9,360002	37,8316619	40,52795	72,629943
22,41851	31,6187718	8,269841	33,7417281	37,3463	61,9739263
20,5919	26,1466769	7,305893	30,004321	34,34378	52,6360185
18,86994	21,3937159	6,453633	26,5911283	31,51167	44,4657941
17,24748	17,2753127	5,700201	23,4760597	28,84165	37,3292292
15,71958	13,7162712	5,034207	20,6350733	26,32576	31,1069632
14,28154	10,6497705	4,445564	18,046015	23,95641	25,6927408
12,92888	8,01646594	3,925344	15,6884715	21,72633	20,992017

Με σκοπό την διερεύνηση ενός ευρύτερου φάσματος δεδομένων έγινε αναγκαία η επιλογή και των δύο ειδών εδαφικών δοκιμίων, χονδρόκοκκο και λεπτόκοκκο. Μεταξύ των δοκιμίων 2 και 4 ως λεπτόκοκκα παρατηρείται, ότι οι τιμές του M_r για το δοκίμιο 2 παρουσιάζουν λιγότερη απόκλιση από τις τιμές του δοκιμίου 1 και αυτό οδηγεί σε καλύτερη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Έτσι, στην παρούσα εργασία διερευνήθηκαν τα δοκίμια 1 και 2.

6.2. ΟΔΟΣΤΡΩΜΑ HVR

Για την εφαρμογή σε οδόστρωμα υψηλής κυκλοφορίας χρησιμοποιήθηκε μία τυπική διατομή οδοστρώματος υψηλής κυκλοφορίας (HVR), όπως αυτή περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2. Για την διατομή αυτή επιλέχθηκε πάχος ασφαλτικής στρώσης 140mm, πάχος στρώσης βάσης και υπόβασης 300mm και σημείο μελέτης της στρώσης έδρασης (σημείο A) σε βάθος 300mm από την διεπιφάνεια επαφής της στρώσης έδρασης και της στρώσης βάσης/υπόβασης (όπως παρουσιάζεται και στην εικόνα 6.5). Το μέτρο ελαστικότητας (E), το φαινόμενο ειδικό βάρος (γ) και ο λόγος Poisson (ν) κάθε στρώσης παρουσιάζονται στην εικόνα 6.5.



Εικόνα 6. 5 Τυπική διατομή οδοστρώματος υψηλής κυκλοφορίας (HVR)

Το κυκλικό φορτίο τροχού που ασκείται στην επιφάνεια του οδοστρώματος αντιμετωπίστηκε ως κατακόρυφη πίεση p (800 kPa) κυκλικής κάτοψης και διαμέτρου a (150 mm) που ασκείται στην επιφάνεια ελαστικού ισότροπου ημίσφαιρου. Ο συντελεστής οριζόντιας ώθησης τέθηκε για την πρώτη και δεύτερη στρώση με τιμή 0,40 ενώ για την στρώση έδρασης με 0,50.

Για τον υπολογισμό του M_r της στρώσης έδρασης έπρεπε αρχικά να γίνει ο υπολογισμός των κύριων τάσεων (σ_1 και σ_3) που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του ελαστικού ισότροπου

ημίχωρου (σημείο Α) λόγω του κυκλικού φορτίου p αλλά και των γεωστατικών τάσεων. Το θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη των τιμών αυτών αναλύθηκε λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 3.

Γεωστατικές Τάσεις (σ_v , σ_h)

Οι οριζόντιες και κατακόρυφες γεωστατικές τάσεις βασίζονται στις τιμές του φαινομένου ειδικού βάρους για την ασφαλική στρώση και την στρώση βάσης/υπόβασης όπως αυτές παρουσιάζονται στην εικόνα 6.5. Για την στρώση έδρασης η τιμή του φαινομένου ειδικού βάρους μεταβάλλεται. Το φαινόμενο ειδικό βάρος (γ) εξαρτάται από το ποσοστό υγρασίας ($w\%$), όπως φαίνεται από την σχέση:

$$\gamma = (1 + w)\gamma_d \quad (6.1)$$

Στην εφαρμογή αυτή τα ποσοστά υγρασίας επιλέχθηκαν σύμφωνα με τις έρευνες που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5 και διερευνούν την επιρροή του ποσοστού υγρασίας στο M_r της στρώσης έδρασης. Οι τιμές αυτές κυμαίνονται από $w_{opt} - 4\%$ έως $w_{opt} + 4\%$. Τα δύο εδαφικά δοκίμια που μελετήθηκαν παρουσιάζουν διαφορετικές τιμές βέλτιστου ποσοστού υγρασίας (w_{opt}). Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να δημιουργηθούν διαφορετικά σύνολα τιμών του φαινομένου ειδικού βάρους για το κάθε δοκίμιο. Οι τιμές του φαινομένου ειδικού βάρους και των ποσοστών υγρασίας για κάθε δοκίμιο παρουσιάζονται στο πίνακα 6.3.

Πίνακας 6. 3 Φαινόμενο ειδικό βάρος και αντίστοιχο ποσοστό υγρασίας για κάθε εδαφικό δοκίμιο

Δοκίμιο			
1		2	
$w_{opt} = 13,8\%$		$w_{opt} = 11\%$	
$\gamma_d = 18,0864$		$\gamma_d = 18,526$	
w%	$\gamma(kN/m^3)$	w%	$\gamma(kN/m^3)$
9,8	19,85887	7	19,82282
10,8	20,03973	8	20,00808
11,8	20,2206	9	20,19334
12,8	20,40146	10	20,3786
13,8	20,58232	11	20,56386
14,8	20,76319	12	20,74912
15,8	20,94405	13	20,93438
16,8	21,12492	14	21,11964
17,8	21,30578	15	21,3049

Παρατηρούμε, ότι ενώ οι τιμές της βέλτιστης περιεκτικότητας σε υγρασία, ανάμεσα στα δύο εδαφικά δοκίμια, παρουσιάζουν διαφορά της τάξεως των 2,8%, οι τιμές του φαινομένου ειδικού βάρους (γ) για την εκάστοτε τιμή του ποσοστού υγρασίας σχεδόν συγκλίνουν εμφανίζοντας πολύ μικρές διαφορές μεταξύ τους.

Στη συνέχεια, ο υπολογισμός των γεωστατικών τάσεων έγινε ανά εδαφική στρώση όπως παρουσιάζεται στην ακόλουθη διαδικασία. Ενδεικτικά επιλέχθηκε το δοκίμιο 1 με τιμή ποσοστού υγρασίας 9,8% και φαινόμενο ειδικό βάρος $19,85887 \text{ kN/m}^3$.

Βάθος από την επιφάνεια $t_1 = 0$

$$\sigma'_{v0} = 0 \text{ kPa}$$

$$u = 0$$

$$\sigma_{v0} = \sigma'_v + u = 0 \text{ kPa}$$

Βάθος από την επιφάνεια $t_2 = 0.14 \text{ m}$

$$\sigma_{v1} = \gamma_1 \cdot z_1 = 23,85 \cdot 0,14 = 3,339 \text{ kPa}$$

$$u = 0$$

$$\sigma'_{v1} = \sigma_v - u = 3,339 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{h1} = K_o \sigma'_v = 0,40 * 3,339 = 1,3356 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{h1} = \sigma'_h + u = 1,3356 \text{ kPa}$$

Βάθος από την επιφάνεια $t_3 = 0.44 \text{ m}$

$$\sigma_{v2} = \gamma_2 * z_2 + \sigma_{v1} = 18 * 0,30 + 3,339 = 8,739 \text{ kPa}$$

$$u = 0$$

$$\sigma'_{v2} = \sigma_v - u = 8,739 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_h = K_o \sigma'_v = 0,40 * 8,739 = 3,4956 \text{ kPa}$$

$$\sigma_h = \sigma'_h + u = 3,4956 \text{ kPa}$$

Βάθος από την επιφάνεια $t_4 = 0.74 \text{ m}$ (σημείο A)

$$\sigma_{v3} = \gamma_3 * z_3 + \sigma_{v2} = 8,739 + 19,85887 * 0,30 = 14,69666 \text{ kPa}$$

$$u = 0 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{v3} = \sigma_v - u = 14,69666 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{h3} = K_o \sigma'_v = 0,50 * 14,69666 = 7,34833 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{h3} = \sigma'_h + u = 7,34833 \text{ kPa}$$

Από τα ανωτέρω καταλήγουμε, ότι η τιμή της οριζόντιας και της κατακόρυφης τάσης στο σημείο A για ποσοστό υγρασίας 9,8% και φαινόμενο ειδικό βάρος 19,85887 kN/m³ προέκυψαν ίσες με:

$$\sigma_v = 14,69666 \text{ kPa}$$

$$\sigma_h = 7,34833 \text{ kPa}$$

Τάσεις λόγω κυκλικού φορτίου

Οι κύριες τάσεις στο σημείο A, όπως προαναφέρθηκε, αποτελούν το σύνολο των γεωστατικών τάσεων και των τάσεων που οφείλονται στο κυκλικό φορτίο τροχού στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Η κατανομή των τάσεων σ_z και σ_r κατά μήκος του άξονα z κάτω από το κέντρο του κυκλικού φορτίου δίνεται από τις σχέσεις:

$$\sigma_z = p \left(1 - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{a}{z} \right)^2 \right)^{1.5}} \right) \quad (6.2)$$

$$\sigma_r = p \left(\frac{1+2\nu}{2} - \frac{1+\nu}{\left(1 + \left(\frac{a}{z} \right)^2 \right)^{0.5}} + \frac{1}{2} \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{a}{z} \right)^2 \right)^{1.5}} \right) \quad (6.3)$$

Οι σχέσεις κατανομής των τάσεων βασίζονται στη γραμμική ελαστική θεωρία και απευθύνονται σε ομοιογενές ισότροπό ημίχωρο. Η τυπική διατομή του οδοστρώματος που παρουσιάζεται σε αυτή την εφαρμογή αλλά και γενικά το οδόστρωμα αποτελείται από πολύστρωτες δομές με διαφορετικά υλικά ανά στρώση. Για την αντιμετώπιση αυτής της διαφοροποίησης και την δυνατότητα εφαρμογής των σχέσεων 6.2 και 6.3 χρησιμοποιήθηκε η θεωρία του Odemark και υπολογίστηκε ένα ισοδύναμο βάθος, το οποίο όπως αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 3 προκύπτει από την σχέση:

$$h_{\iota\sigma} = f \left[h_1 \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}} + h_2 \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3}} + h_3 \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3}} \right] \quad (6.4)$$

και με $f = 0.80$, $h_1 = 0.14 \text{ m}$, $h_2 = 0.30 \text{ m}$, $h_3 = 0.30 \text{ m}$ το $h_{\iota\sigma}$ προκύπτει ίσο με:

$$h_{\iota\sigma} = 0,853468 \text{ m}$$

Εφαρμόζοντας τις δεδομένες τιμές των p , ν , a και $h_{\iota\sigma}$ στις ανωτέρω σχέσεις οι τιμές των τάσεων σ_z και σ_r στο σημείο A ισούνται με:

$$\sigma_z = 35,68574 \text{ kPa}$$

$$\sigma_r = -1,53941 \text{ kPa}$$

Τέλος, οι κύριες τάσεις σ_1 και σ_3 στο σημείο A προκύπτουν από τα αθροίσματα:

$$\sigma_1 = \sigma_v + \sigma_z = 50,3824 \text{ kPa}$$

$$\sigma_3 = \sigma_h + \sigma_r = 5,808918 \text{ kPa}$$

Το σύνολο των κύριων τάσεων για τα δύο εδαφικά δοκίμια και τις διάφορες τιμές του ποσοστού υγρασίας παρουσιάζονται στο πίνακα 6.4.

Πίνακας 6. 4 Κύριες τάσεις συναρτήσει ποσοστού υγρασίας

Δοκίμιο					
1			2		
$w_{opt} = 13,8\%$			$w_{opt} = 11\%$		
$\gamma_d = 18,0864(kN/m^3)$			$\gamma_d = 18,526(kN/m^3)$		
w%	σ_3 kPa	σ_1 kPa	w%	σ_3 kPa	σ_1 kPa
9,8	5,808918	50,3824	7	5,803511	50,37159
10,8	5,836048	50,43666	8	5,8313	50,42717
11,8	5,863177	50,49092	9	5,859089	50,48274
12,8	5,890307	50,54518	10	5,886878	50,53832
13,8	5,917437	50,59944	11	5,914667	50,5939
14,8	5,944566	50,6537	12	5,942456	50,64948
15,8	5,971696	50,70796	13	5,970245	50,70506
16,8	5,998825	50,76222	14	5,998034	50,76063
17,8	6,025955	50,81648	15	6,025823	50,81621

Από την ανάλυση του πίνακα 6.4 διαπιστώθηκε, ότι οι κύριες τάσεις σ_3 και σ_1 για κάθε τιμή του ποσοστού υγρασίας παρουσιάζουν πολύ μικρές διαφορές ανάμεσα στα δύο εδαφικά δοκίμια και σχεδόν ταυτίζονται.

Τάσεις θ και τ_{oct}

Από την εξίσωση 4.17 παρατηρείται, ότι για τον υπολογισμό του M_r απαιτείται ο υπολογισμός της τάσης θ και της διατμητικής οκταεδρικής τάσης τ_{oct} . Οι τάσεις αυτές προκύπτουν από τις σχέσεις:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \quad (6.5)$$

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (6.6)$$

Για την αξονοσυμμετρική καταπόνηση (τριαξονική) ισχύει, $\sigma_2 = \sigma_3$. Άρα η σχέσεις 6.5 και 6.6 μετατρέπονται σε:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad (6.7)$$

$$\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3 \quad (6.8)$$

Οι τάσεις για τα δύο εδαφικά δοκίμια και για τις διάφορες τιμές του ποσοστού υγρασίας παρουσιάζονται στο πίνακα 6.5.

Πίνακας 6. 5 Τάσεις θ και τ_{oct} συναρτήσει ποσοστού υγρασίας

Δοκίμιο					
1			2		
$w_{opt} = 13,8\%$			$w_{opt} = 11\%$		
$\gamma_d = 18,0864(kN/m^3)$			$\gamma_d = 18,526(kN/m^3)$		
w%	θ kPa	τ_{oct} kPa	w%	θ kPa	τ_{oct} kPa
9,8	62,00024	21,01214	7	61,97861	21,00959
10,8	62,10876	21,02493	8	62,08977	21,02269
11,8	62,21728	21,03772	9	62,20092	21,03579
12,8	62,32579	21,05051	10	62,31208	21,04889
13,8	62,43431	21,0633	11	62,42323	21,06199
14,8	62,54283	21,07609	12	62,53439	21,07509
15,8	62,65135	21,08888	13	62,64555	21,08819
16,8	62,75987	21,10166	14	62,7567	21,10129
17,8	62,86839	21,11445	15	62,86786	21,11439

Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν και για τον πίνακα 6.5, καθώς οι τάσεις θ και τ_{oct} παρουσιάζουν πολύ μικρές διαφορές μεταξύ τους. Συγκεκριμένα οι τάσεις τ_{oct} για τα δύο εδαφικά δοκίμια σχεδόν ταυτίζονται.

Παράμετροι k_i

Για το δοκίμιο 1 ως λεπτόκοκκο έδαφος και κατηγορίας CL χρησιμοποιήθηκαν για κάθε μοντέλο οι εξής εξισώσεις:

Εξισώσεις LTPP για αργιλώδη εδάφη

$$k_1 = 1.3577 + 0.0106(\%Clay) - 0.0437w \quad (4.32)$$

$$k_2 = 0.5193 - 0.0073P_{No.4} + 0.0095P_{No.40} - 0.0027P_{no.200} + 0.0030LL - 0.0049w_{opt} \quad (4.33)$$

$$k_3 = 1.4258 - 0.0288P_{No.4} + 0.0303P_{No.40} - 0.0521P_{No.200} + 0.0251(\%Silt) + 0.0535LL - 0.0672w_{opt} - 0.0026\gamma_{dmax} + 0.0025\gamma_d - 0.6055\left(\frac{w}{w_{opt}}\right) \quad (4.34)$$

Λεπτόκοκκα εδάφη (Wisconsin)

$$k_1 = 404.166 + 42.933PI + 52.260\gamma_d - 987.353\left(\frac{w}{w_{opt}}\right) \quad (4.23)$$

$$k_2 = 0.25113 - 0.0292PI + 0.5573\left(\frac{w}{w_{opt}}\right) \times \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}}\right) \quad (4.24)$$

$$k_3 = -0.20772 + 0.23088PI + 0.00367\gamma_d - 5.4238\left(\frac{w}{w_{opt}}\right) \quad (4.25)$$

Και για το δοκίμιο 2 ως χονδρόκοκκο και κατηγορίας SM χρησιμοποιήθηκαν για κάθε μοντέλο οι εξής εξισώσεις:

Εξισώσεις LTPP για εδάφη από ιλύς

$$k_1 = 1.0480 + 0.0177(\%Clay) + 0.0279PI - 0.0370w \quad (4.35)$$

$$k_2 = 0.5097 - 0.0286PI \quad (4.36)$$

$$k_3 = -0.2218 + 0.0047(\%Silt) + 0.0849PI - 0.1399w \quad (4.37)$$

Μη πλάστιμα χονδρόκοκκα εδάφη (Wisconsin)

$$k_1 = 809.547 + 10.568P_{No.4} - 6.112P_{No.40} - 578.337\left(\frac{w}{w_{opt}}\right) \times \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}}\right) \quad (4.26)$$

$$k_2 = 0.5661 + 0.006711P_{No.40} - 0.02423P_{No.200} + 0.05849(w - w_{opt}) + 0.001242(w_{opt}) \times (\gamma_{dmax}) \quad (4.27)$$

$$k_3 = -0.5079 - 0.041411P_{No.40} + 0.14820P_{No.200} - 0.1726(w - w_{opt}) - 0.01214(w_{opt}) \times (\gamma_{dmax}) \quad (4.28)$$

Οι τιμές των παραμέτρων k_i για τα δύο εδαφικά δοκίμια και για τις διάφορες τιμές του ποσοστού υγρασίας παρουσιάζονται στο πίνακα 6.6.

Πίνακας 6. 6 Παράμετροι *ki* συναρτήσει ποσοστού υγρασίας

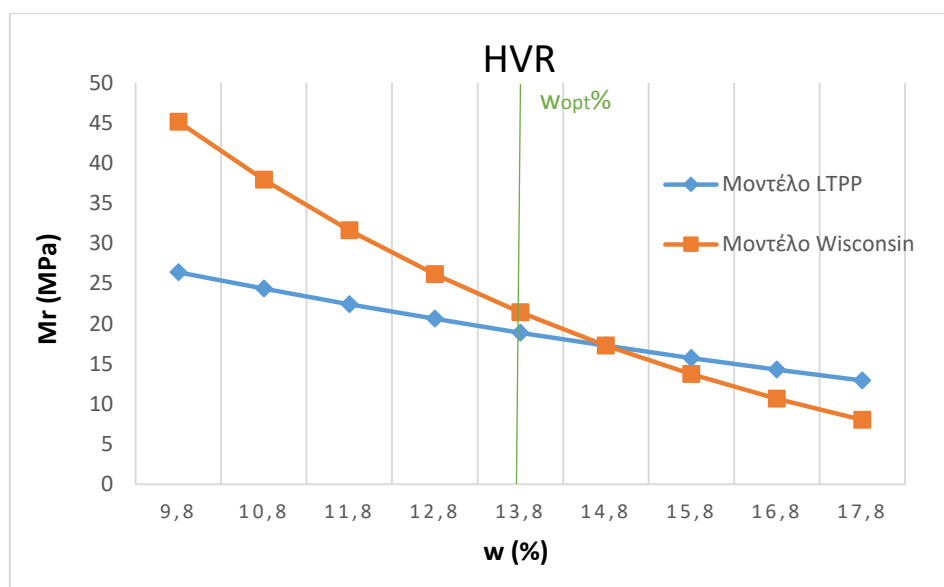
Δοκίμιο							
1				2			
$w_{opt} = 13,8\%$				$w_{opt} = 11\%$			
$\gamma_d = 18,0864(\text{kN/m}^3)$				$\gamma_d = 18,526(\text{kN/m}^3)$			
LTPP				LTPP			
w%	k_1	k_2	k_3	w%	k_1	k_2	k_3
9,8	1,0418	0,59008	-0,34298	7	0,87354	0,4811	-0,99682
10,8	0,9981	0,59008	-0,38686	8	0,87354	0,4811	-1,13672
11,8	0,9544	0,59008	-0,43073	9	0,87354	0,4811	-1,27662
12,8	0,9107	0,59008	-0,47461	10	0,87354	0,4811	-1,41652
13,8	0,867	0,59008	-0,51849	11	0,87354	0,4811	-1,55642
14,8	0,8233	0,59008	-0,56236	12	0,87354	0,4811	-1,69632
15,8	0,7796	0,59008	-0,60624	13	0,87354	0,4811	-1,83622
16,8	0,7359	0,59008	-0,65012	14	0,87354	0,4811	-1,97612
17,8	0,6922	0,59008	-0,694	15	0,87354	0,4811	-2,11602
Wisconsin				Wisconsin			
w%	k_1	k_2	k_3	w%	k_1	k_2	k_3
9,8	910,0888	0,436899	-2,58466	7	927,6179	0,609202	-2,5889
10,8	838,5415	0,47403	-2,97769	8	880,8281	0,667692	-2,7615
11,8	766,9942	0,511161	-3,37072	9	834,0382	0,726182	-2,9341
12,8	695,4469	0,548293	-3,76375	10	787,2483	0,784672	-3,1067
13,8	623,8996	0,585424	-4,15677	11	740,4585	0,843162	-3,2793
14,8	552,3522	0,622556	-4,5498	12	693,6686	0,901652	-3,4519
15,8	480,8049	0,659687	-4,94283	13	646,8787	0,960142	-3,6245
16,8	409,2576	0,696819	-5,33586	14	600,0889	1,018632	-3,7971
17,8	337,7103	0,73395	-5,72889	15	553,299	1,077122	-3,9697

Η ανάλυση του πίνακα 6.6 έδειξε ότι το k_1 προκύπτει πάντοτε μεγαλύτερο του μηδενός, δεδομένου, ότι το ενεργό μέτρο ελαστικότητας πρέπει πάντα να είναι μεγαλύτερο από το μηδέν. Οι τιμές του k_2 ήταν επίσης μεγαλύτερες από το μηδέν, καθώς το ενεργό μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται με την αύξηση της τάσης θ . Τέλος, εφόσον το M_r μειώνεται με την αύξηση της τάσης σ_d , η παράμετρος k_3 είναι αρνητική.

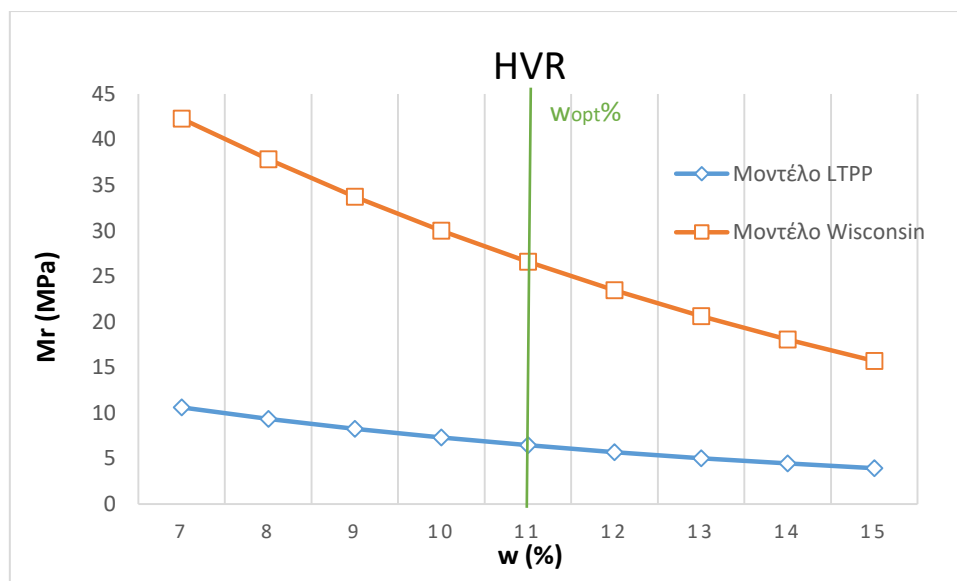
Ενεργό μέτρο ελαστικότητας (M_r)

Ως τελικό βήμα εφαρμόστηκε η εξίσωση που υιοθετήθηκε κατά το πρόγραμμα NCHRP Project 1-37^A (2002) για τον υπολογισμό του ενεργού μέτρου ελαστικότητας. Για κάθε δοκίμιο (1 και 2) έγινε αντικατάσταση των αντίστοιχων τιμών των παραμέτρων k_1 και k_2 σύμφωνα με τις τιμές του ποσοστού υγρασίας καθώς και των τιμών των τάσεων θ και τ_{oct} . Τα αποτελέσματα των μεταβολών των τιμών του M_r σε σχέση με τα ποσοστά περιεκτικότητας σε υγρασία παρουσιάζονται στις εικόνες 6.6, 6.7, 6.8 και 6.9. Η εξίσωση του προγράμματος NCHRP Project 1-37^A παρουσιάζεται ακολούθως:

$$M_r = k_1 P_a \left[\frac{\theta}{P_a} \right]^{k_2} \left[\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right]^{k_3} \quad (4.17)$$



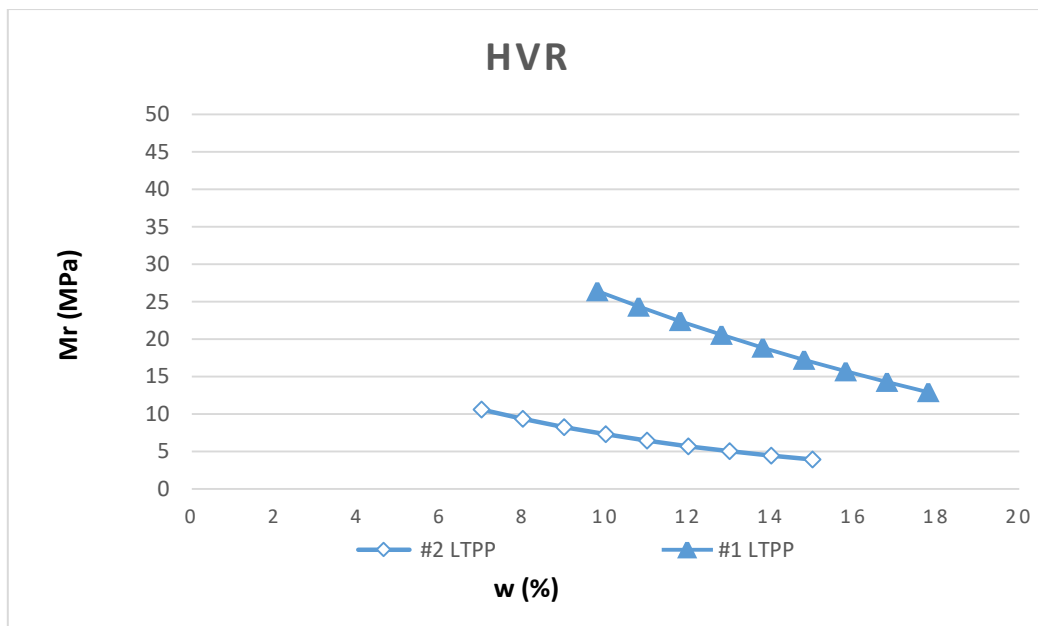
Εικόνα 6. 6 Οι μεταβολές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας M_r σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία για το δοκίμιο 1 με $w_{opt}=13,8\%$



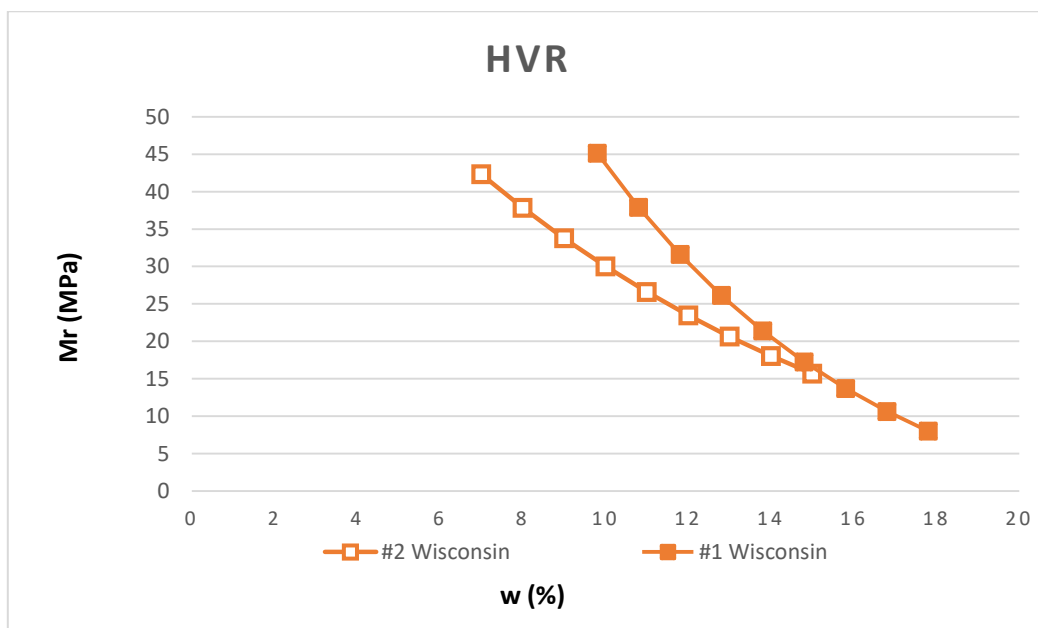
Εικόνα 6. 7 Οι μεταβολές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας M_r σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία για το δοκίμιο 2 με $w_{opt}=11\%$

Από την ανάλυση των εικόνων 6.6 και 6.7 γίνεται εμφανές, ότι οι τιμές του M_r κατά μήκος της καμπύλης αριστερά από την βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία αυξήθηκαν με τη μείωση της περιεκτικότητας σε υγρασία (δηλαδή αύξηση του βαθμού κορεσμού), ενώ οι τιμές του M_r μειώθηκαν κατά μήκος της καμπύλης όπου από την υγρασία w_{opt} μεταβαίνει σε υψηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία. Υπολογίζεται, ότι για μεταβολή της υγρασίας από την w_{opt} στην τιμή $w_{opt} + 4\%$ το M_r παρουσιάζει μείωση για το δοκίμιο 1 μέσω του μοντέλου LTPP 31% και μέσω του μοντέλου Wisconsin 63%, ενώ για το δοκίμιο 2 μέσω του μοντέλου LTPP 39% και μέσω του μοντέλου Wisconsin 41%. Επίσης, ο ρυθμός μεταβολής της καμπύλης LTPP για το δοκίμιο 1 υπολογίζεται στη τιμή 1,68 ενώ της καμπύλης Wisconsin στη τιμή 4,58. Αντίστοιχα για το δοκίμιο 2 ο ρυθμός μεταβολής της καμπύλης LTPP υπολογίζεται στα 0,82 και της καμπύλης Wisconsin στη τιμή 3,31.

Εν συνεχεία στις εικόνες 6.8 και 6.9 παρουσιάζονται οι μεταβολές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας με το ποσοστό υγρασίας της στρώσης έδρασης αν μοντέλο πρόβλεψης (LTPP και Wisconsin) συγκριτικά για τα δύο εδαφικά δοκίμια.



Εικόνα 6. 8 Οι μεταβολές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας M_r σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία συγκριτικά για τα δύο δοκίμια μέσω των εξισώσεων LTPP



Εικόνα 6. 9 Οι μεταβολές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας M_r σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία συγκριτικά για τα δύο δοκίμια μέσω των εξισώσεων Wisconsin

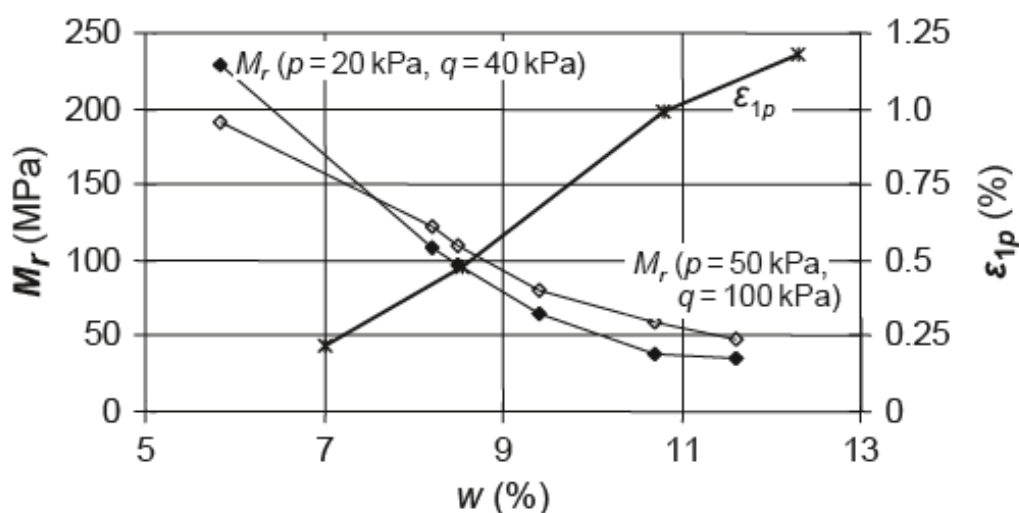
Παρατηρείται, ότι στα δύο εδαφικά δοκίμια (δοκίμιο 1 λεπτόκοκκο και δοκίμιο 2 χονδρόκοκκο) οι τιμές των τάσεων που αναπτύσσονται (θ και τ_{oct}) είναι σχεδόν ισότιμες (βλ. πίνακας 6.5), ενώ με την περαιτέρω ανάλυση των εικόνων 6.8 και 6.9 γίνεται εμφανές, ότι οι τιμές του M_r από το μοντέλο LTPP παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση της τάξεως των 10 MPa

έως και 15 MPa. Επίσης, υπολογίζοντας τη ρίζα του μέσου τετραγωνικού ποσοστιαίου σφάλματος (Root Mean Square Percentage Error – RMSPE) για τις τιμές των δύο συγκεκριμένων καμπυλών, παρατηρείται η σημαντική διαφορά τους με $RMSPE = 73,05\%$. Αντίθετα οι τιμές του M_r από το μοντέλο Wisconsin παρουσιάζουν για τα δύο δοκίμια μικρότερες αποκλίσεις ($RMSPE = 32,44\%$).

Σχολιασμός

Μέσω της πειραματικής διαδικασίας που πραγματοποιήθηκε για την αξιολόγηση της μεταβολής του ενεργού μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία, προέκυψαν τα διαγράμματα των εικόνων 6.6 – 6.9, τα οποία παρουσιάζουν πολύπλευρο ενδιαφέρον. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης τους δείχνουν, ότι οι μεταβολές στις τιμές του M_r επηρεάζονται άμεσα από τη διαδρομή διαβροχής/ξήρανσης και ότι στη περίπτωση του μοντέλου Wisconsin η μεταβολή αυτή είναι εντονότερη.

Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν από την διεθνή βιβλιογραφία και από τα όσα αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 5 για την εξάρτηση του M_r από το ποσοστό της περιεκτικότητας σε υγρασία. Για λόγους σύγκρισης αναφέρεται η μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τους Hornych et al., (1998) και οδήγησε στο διάγραμμα συσχέτισης του ενεργού μέτρου ελαστικότητας με το ποσοστό υγρασίας, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 6.10.

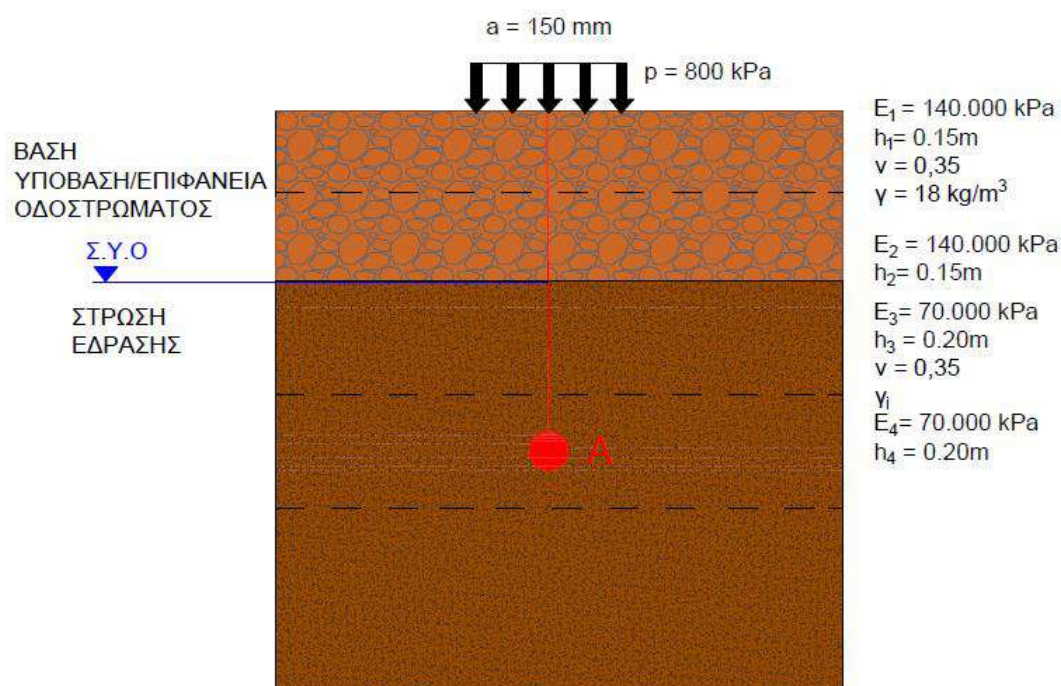


Εικόνα 6. 10 Οι μεταβολές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας και των πλαστικών παραμορφώσεων σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία για μια αργιλώδη άμμο
Πηγή: Hornych et al., 1998

Γίνεται εμφανές από την σύγκριση των διαγραμμάτων (εικόνες 6.6 – 6.10), ότι η συμπεριφορά του M_r , όπως αυτή περιγράφεται από την παρούσα πειραματική διαδικασία, συγκλίνει με τα αποτελέσματα της έρευνας των Hornych et al. (1998).

6.3. ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ LVR

Για την εφαρμογή σε οδόστρωμα χαμηλής κυκλοφορίας χρησιμοποιήθηκε μία τυπική διατομή οδοστρώματος χαμηλής κυκλοφορίας, όπως αυτή περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2. Για την διατομή αυτή επιλέχθηκε πάχος στρώσης βάσης και υπόβασης 300mm και σημείο μελέτης της στρώσης έδρασης (σημείο A) σε βάθος 300mm από την διεπιφάνεια επαφής της στρώσης έδρασης και της στρώσης βάσης/υπόβασης (όπως παρουσιάζεται και στην εικόνα 6.11). Το μέτρο ελαστικότητας (E), το φαινόμενο ειδικό βάρος (γ) και ο λόγος Poisson (ν) κάθε στρώσης παρουσιάζονται στην εικόνα 6.11.



Εικόνα 6. 11 Τυπική διατομή οδοστρώματος χαμηλής κυκλοφορίας (LVR)

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3, οι Coghlan (1999), Visser και Hall (2003) και El abd et al. (2004) επιβεβαίωσαν, ότι τα παραδοσιακά πρότυπα μηχανικής οδοποιίας δεν θεωρούνται ιδανικά για τον σχεδιασμό των οδοστρωμάτων χαμηλής κυκλοφορίας. Με σκοπό να ληφθεί υπόψιν κατά προσέγγιση η μη-γραμμική συμπεριφορά των οδοστρωμάτων χαμηλής κυκλοφορίας και για την καλύτερη διαχείρισή τους ακολουθήθηκε η παρακάτω αναλυτική διαδικασία:

- Υποδιαιρέθηκαν οι πραγματικές στρώσεις σε υποστρώσεις (4 εδαφικά στρώματα).
- Εκτιμήθηκε μία ενιαία τιμή του μέτρου ελαστικότητας (E) για όλα τις στρώσεις ασύνδετου υλικού και μια διαφορετική τιμή για την στρώση έδρασης.

- Υπολογίσθηκαν οι τάσεις λόγω του κυκλικού φορτίου τροχού στο κέντρο κάθε στρώσης και κάτω ακριβώς από το φορτίο.
- Υπολογίσθηκε το ενεργό μέτρο ελαστικότητας κάθε στρώσης μέσω μη-γραμμικού μοντέλου.

Το κυκλικό φορτίο τροχού που ασκείται στην επιφάνεια του οδοστρώματος (στρώση βάσης/υπόβασης), αντιμετωπίστηκε ως κατακόρυφη πίεση p (800 kPa) κυκλικής κάτοψης και διαμέτρου a (150 mm) που ασκείται στην επιφάνεια ελαστικού ισότροπου ημίχωρου. Ο συντελεστής οριζόντιας ώθησης θεωρήθηκε στις στρώσεις ασύνδετων υλικών ίσος με 0,40 ενώ για την στρώση έδρασης λήφθηκε ίσος με 0,50.

Για τον υπολογισμό του M_r στη στρώση έδρασης έπρεπε αρχικά να γίνει ο υπολογισμός των κύριων τάσεων (σ_1 και σ_3) που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του ελαστικού ισότροπου ημίχωρου (σημείο A) λόγω του κυκλικού φορτίου p αλλά και των γεωστατικών τάσεων. Το θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη των τιμών αυτών αναλύθηκε λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 3.

Γεωστατικές Τάσεις (σ_v , σ_h)

Και στην εφαρμογή των οδοστρωμάτων χαμηλής κυκλοφορίας τα ποσοστά υγρασίας επιλέχθηκαν σύμφωνα με τις μελέτες που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5. Οι τιμές αυτές κυμαίνονται από $w_{opt} - 4\%$ έως $w_{opt} + 4\%$. Τα δύο εδαφικά δοκίμια που μελετήθηκαν παρουσιάζουν διαφορετικές τιμές βέλτιστου ποσοστού υγρασίας w_{opt} . Οι τιμές του φαινόμενου ειδικού βάρους και των ποσοστών υγρασίας για κάθε δοκίμιο παραμένουν οι ίδιες, όπως και στην περίπτωση του υψηλής κυκλοφορίας οδοστρώματος, και παρουσιάζονται στο πίνακα 6.3.

Ο υπολογισμός των γεωστατικών τάσεων έγινε ανά εδαφική στρώση, όπως παρουσιάζεται στην ακόλουθη διαδικασία. Ενδεικτικά επιλέχθηκε το δοκίμιο 1 με τιμή ποσοστού υγρασίας 9,8% και φαινόμενο ειδικό βάρος 19,85887 kN/m³.

Βάθος $t = 0$

$$\sigma'_{v0} = 0 \text{ kPa}$$

$$u = 0$$

$$\sigma_{v0} = \sigma'_v + u = 0 \text{ kPa}$$

Βάθος $z = 0.15 \text{ m}$

$$\sigma_{v1} = \gamma_1 \cdot z_1 = 18,00 \cdot 0,15 = 2,7 \text{ kPa}$$

$$u = 0$$

$$\sigma'_{v1} = \sigma_v - u = 2,7 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{h1} = K_o \sigma'_{v1} = 0,40 \cdot 2,7 = 1,08 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{h1} = \sigma'_{h1} + u = 1,08 \text{ kPa}$$

Βάθος $z = 0.30\text{m}$

$$\sigma_{v2} = \gamma_2 \cdot z_2 + \sigma_{v1} = 18 \cdot 0,15 + 2,7 = 5,4 \text{ kPa}$$

$$u = 0$$

$$\sigma'_{v2} = \sigma_v - u = 5,4 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_h = K_o \sigma'_{v2} = 0,40 \cdot 5,4 = 2,16 \text{ kPa}$$

$$\sigma_h = \sigma'_h + u = 2,16 \text{ kPa}$$

Βάθος $z = 0.50 \text{ m}$

$$\sigma_{v3} = \gamma_3 \cdot z_3 + \sigma_{v2} = 5,4 + 19,85887 \cdot 0,30 = 9,371774 \text{ kPa}$$

$$u = 0 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{v3} = \sigma_v - u = 9,371774 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{h3} = K_o \sigma'_{v3} = 0,50 \cdot 9,371774 = 4,685887 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{h3} = \sigma'_{h3} + u = 4,685887 \text{ kPa}$$

Βάθος $z = 0.60 \text{ m}$ (σημείο A)

$$\sigma_{v4} = \gamma_4 \cdot z_4 + \sigma_{v3} = 9,371774 + 19,85887 \cdot 0,10 = 11,357661 \text{ kPa}$$

$$u = 0 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{v4} = \sigma_v - u = 11,357661 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_{h4} = K_o \sigma'_{v4} = 0,50 \cdot 11,357661 = 5,6788305 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{h4} = \sigma'_{h4} + u = 5,6788305 \text{ kPa}$$

Από τα ανωτέρω καταλήγουμε, ότι οι τιμές της οριζόντιας και της κατακόρυφης τάσης στο σημείο Α για τιμή ποσοστού υγρασίας 9,8% και του φαινόμενου ειδικού βάρους 19,85887 kN/m³ προέκυψαν ίσες με:

$$\sigma_v = 11,357661 \text{ kPa}$$

$$\sigma_h = 5,6788305 \text{ kPa}$$

Τάσεις λόγω κυκλικού φορτίου

Το οδόστρωμα χαμηλής κυκλοφορίας αντιμετωπίζεται και αυτό ως ελαστικός ισότροπος ημίχωρος. Η κατανομή των τάσεων σ_z και σ_r κατά μήκος του άξονα z κάτω από το κέντρο του κυκλικού φορτίου που ασκείται στην επιφάνεια του οδοστρώματος (στρώση βάσης/υπόβασης) δίνεται από τις σχέσεις:

$$\sigma_z = p \left(1 - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{a}{z} \right)^2 \right)^{1,5}} \right) \quad (6.2)$$

$$\sigma_r = p \left(\frac{1 + 2\nu}{2} - \frac{1 + \nu}{\left(1 + \left(\frac{a}{z} \right)^2 \right)^{0,5}} + \frac{1}{2} \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{a}{z} \right)^2 \right)^{1,5}} \right) \quad (6.3)$$

Για την αντιμετώπιση της ανομοιογένειας του οδοστρώματος και την δυνατότητα εφαρμογής των ανωτέρω σχέσεων χρησιμοποιήθηκε η θεωρία του Odemark και υπολογίστηκε ένα ισοδύναμο βάθος το οποίο, όπως αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 3 προκύπτει από την σχέση:

$$h_{\iota\sigma} = f \left[h_1^3 \sqrt{\frac{E_1}{E_2}} + h_2^3 \sqrt{\frac{E_2}{E_3}} + h_3^3 \sqrt{\frac{E_2}{E_3}} + h_4^3 \sqrt{\frac{E_4}{E_4}} \right] \quad (6.9)$$

και με $f = 0.80$, $h_1 = 0.15 \text{ m}$, $h_2 = 0.15 \text{ m}$, $h_3 = 0.20 \text{ m}$ και $h_4 = 0,10 \text{ m}$ το $h_{\iota\sigma}$ προκύπτει ίσο με:

$$h_{\iota\sigma} = 0,5112 \text{ m}$$

Εφαρμόζοντας τις δεδομένες τιμές των p , ν , a και $h_{\iota\sigma}$ στις ανωτέρω σχέσεις οι τιμές των τάσεων σ_z και σ_r στο σημείο Α ισούνται με:

$$\sigma_z = 93,2176 \text{ kPa}$$

$$\sigma_r = -2,91716 \text{ kPa}$$

Τέλος, οι κύριες τάσεις σ_1 και σ_3 στο σημείο Α προκύπτουν από τα αθροίσματα:

$$\sigma_1 = \sigma_v + \sigma_z = 104,5753 \text{ kPa}$$

$$\sigma_3 = \sigma_h + \sigma_r = 2,76167 \text{ kPa}$$

Το σύνολο των κύριων τάσεων για τα δύο εδαφικά δοκίμια και τις διάφορες τιμές του ποσοστού υγρασίας παρουσιάζονται στο πίνακα 6.7.

Πίνακας 6. 7 Κύριες τάσεις συναρτήσει ποσοστού υγρασίας

Δοκίμιο					
1			2		
W _{opt} = 13,8%			W _{opt} = 11%		
γ _d = 18,0864(kN/m ³)			γ _d = 18,526(kN/m ³)		
w%	σ ₃ kPa	σ ₁ kPa	w%	σ ₃ kPa	σ ₁ kPa
9,8	2,76167	104,5753	7	2,756263	104,5644
10,8	2,7888	104,6295	8	2,784052	104,62
11,8	2,815929	104,6838	9	2,811841	104,6756
12,8	2,843059	104,738	10	2,83963	104,7312
13,8	2,870188	104,7923	11	2,867419	104,7868
14,8	2,897318	104,8466	12	2,895208	104,8423
15,8	2,924448	104,9008	13	2,922997	104,8979
16,8	2,951577	104,9551	14	2,950786	104,9535
17,8	2,978707	105,0093	15	2,978575	105,0091

Οι κύριες τάσεις σ₁ και σ₃ που αναπτύχθηκαν στο εσωτερικό του οδοστρώματος χαμηλής κυκλοφορίας, όπως φαίνεται από τον πίνακα 6.7, παρουσιάζουν τιμές που σχεδόν ταυτίζονται.

Τάσεις θ και τ_{oct}

Από την εξίσωση 4.17 διαπιστώνουμε, ότι για τον υπολογισμό του M_r απαιτείται η τάση θ και η διατμητική οκταεδρική τάση τ_{oct}. Οι τάσεις αυτές προκύπτουν από τις σχέσεις:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \quad (6.5)$$

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (6.6)$$

Για την αξονοσυμμετρική καταπόνηση (τριαξονική) ισχύει, σ₂ = σ₃. Άρα οι σχέσεις μετατρέπονται σε:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad (6.7)$$

$$\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3 \quad (6.8)$$

Οι τάσεις για τα δύο εδαφικά δοκίμια και για τις διάφορες τιμές του ποσοστού υγρασίας παρουσιάζονται στο πίνακα 6.8.

Πίνακας 6. 8 Τάσεις θ και τ_{oct} συναρτήσει ποσοστού υγρασίας

Δοκίμιο					
1			2		
$w_{opt} = 13,8\%$			$w_{opt} = 11\%$		
$\gamma_d = 18,0864(kN/m^3)$			$\gamma_d = 18,526(kN/m^3)$		
w%	θ kPa	τ_{oct} kPa	w%	θ kPa	τ_{oct} kPa
9,8	110,0986	47,99539	7	110,077	47,99284
10,8	110,2071	48,00818	8	110,1881	48,00594
11,8	110,3156	48,02096	9	110,2993	48,01904
12,8	110,4242	48,03375	10	110,4104	48,03214
13,8	110,5327	48,04654	11	110,5216	48,04524
14,8	110,6412	48,05933	12	110,6328	48,05834
15,8	110,7497	48,07212	13	110,7439	48,07144
16,8	110,8582	48,08491	14	110,8551	48,08454
17,8	110,9667	48,0977	15	110,9662	48,09764

Από την ανάλυση του πίνακα 6.8 γίνεται εμφανές, ότι οι τάσεις θ και τ_{oct} , για κάθε τιμή του ποσοστού υγρασίας, ανάμεσα στα δύο δοκίμια παρουσιάζουν πανομοιότυπες τιμές.

Παράμετροι k_i

Για τα δυο εδαφικά δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν οι αντίστοιχες εξισώσεις όπως ακριβώς και στην περίπτωση του οδοστρώματος υψηλής κυκλοφορίας. Λόγω διαφορετικών τιμών του ποσοστού υγρασίας προέκυψαν όπως ήταν αναμενόμενο διαφορετικές τιμές παραμέτρων. Οι τιμές των παραμέτρων k_i για τα δύο εδαφικά δοκίμια και για τις διάφορες τιμές του ποσοστού υγρασίας παρουσιάζονται στο πίνακα 6.9.

Πίνακας 6. 9 Παράμετροι *ki* συναρτήσει ποσοστού υγρασίας

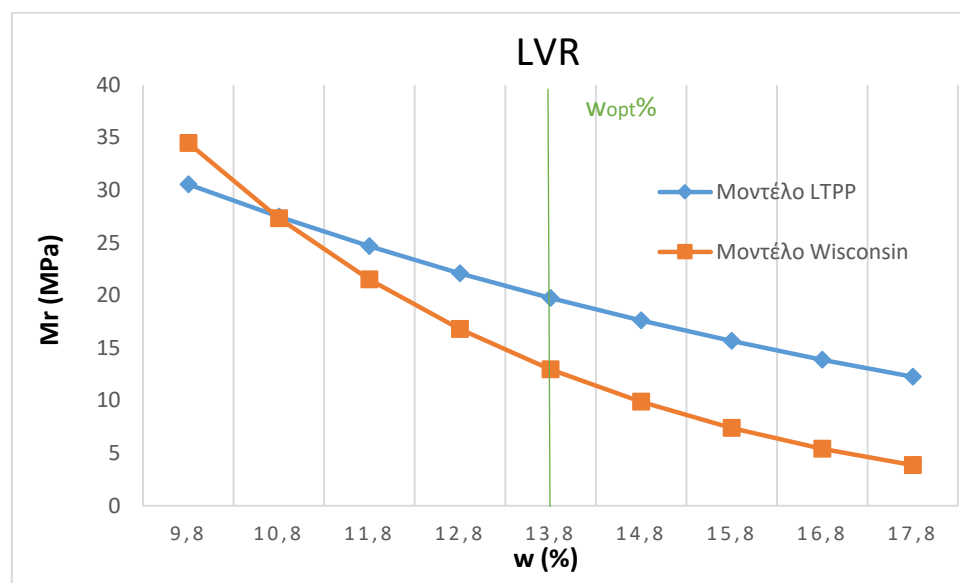
Δοκίμιο							
1				2			
$w_{opt} = 13,8\%$				$w_{opt} = 11\%$			
$\gamma_d = 18,0864(\text{kN/m}^3)$				$\gamma_d = 18,526(\text{kN/m}^3)$			
LTPP				LTPP			
w%	k_1	k_2	k_3	w%	k_1	k_2	k_3
9,8	1,0418	0,59008	-0,34298	7	0,87354	0,4811	-0,99682
10,8	0,9981	0,59008	-0,38686	8	0,87354	0,4811	-1,13672
11,8	0,9544	0,59008	-0,43073	9	0,87354	0,4811	-1,27662
12,8	0,9107	0,59008	-0,47461	10	0,87354	0,4811	-1,41652
13,8	0,867	0,59008	-0,51849	11	0,87354	0,4811	-1,55642
14,8	0,8233	0,59008	-0,56236	12	0,87354	0,4811	-1,69632
15,8	0,7796	0,59008	-0,60624	13	0,87354	0,4811	-1,83622
16,8	0,7359	0,59008	-0,65012	14	0,87354	0,4811	-1,97612
17,8	0,6922	0,59008	-0,694	15	0,87354	0,4811	-2,11602
Wisconsin				Wisconsin			
w%	k_1	k_2	k_3	w%	k_1	k_2	k_3
9,8	910,0888	0,436899	-2,58466	7	927,6179	0,609202	-2,5889
10,8	838,5415	0,47403	-2,97769	8	880,8281	0,667692	-2,7615
11,8	766,9942	0,511161	-3,37072	9	834,0382	0,726182	-2,9341
12,8	695,4469	0,548293	-3,76375	10	787,2483	0,784672	-3,1067
13,8	623,8996	0,585424	-4,15677	11	740,4585	0,843162	-3,2793
14,8	552,3522	0,622556	-4,5498	12	693,6686	0,901652	-3,4519
15,8	480,8049	0,659687	-4,94283	13	646,8787	0,960142	-3,6245
16,8	409,2576	0,696819	-5,33586	14	600,0889	1,018632	-3,7971
17,8	337,7103	0,73395	-5,72889	15	553,299	1,077122	-3,9697

Μέσω της παρατήρησης του πίνακα 6.9 συμπεραίνεται, ότι και για τα δύο μοντέλα οι παράμετροι k_1 και k_2 προκύπτουν θετικές ενώ η παράμετρος k_3 αρνητική. Δεδομένου ότι ο συντελεστής k_1 είναι ανάλογος με το συντελεστή Young, πρέπει πάντα να είναι θετικός, καθώς το M_r δεν μπορεί ποτέ να είναι αρνητικό. Ο συντελεστής k_2 πρέπει να είναι θετικός, διότι η αύξηση της τάσης θ προκαλεί ακαμψία ή σκλήρυνση του υλικού, αποδίδοντας

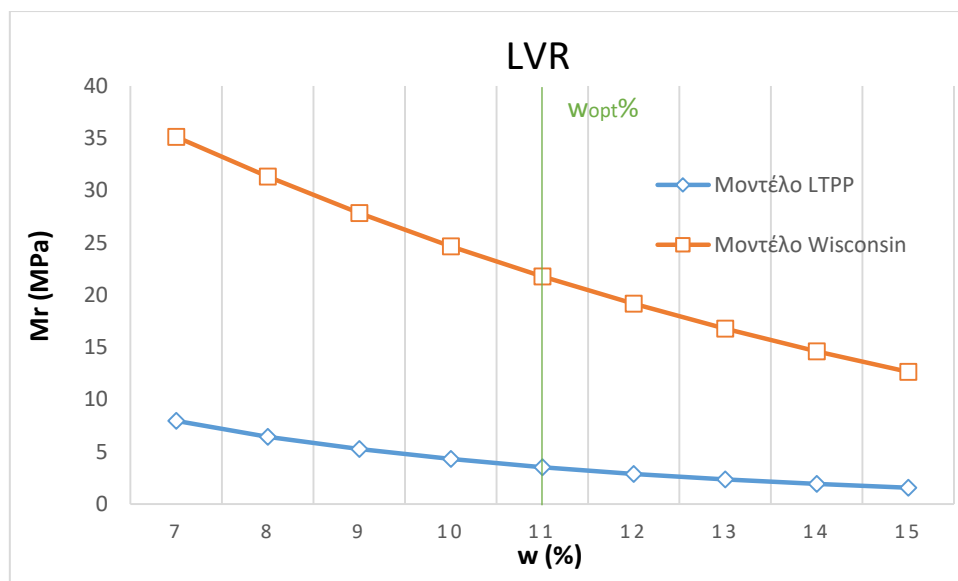
υψηλότερο συντελεστή. Ο συντελεστής k_3 θα πρέπει να είναι αρνητικός, επειδή μια αύξηση στην διατμητική τάση μαλακώνει το υλικό, αποδίδοντας έτσι χαμηλότερη τιμή.

Ενεργό μέτρο ελαστικότητας M_r

Ως τελικό βήμα εφαρμόστηκε η εξίσωση που υιοθετήθηκε από το πρόγραμμα NCHRP Project 1-37^A (2002) για τον υπολογισμό του ενεργού μέτρου ελαστικότητας. Για κάθε δοκίμιο (1 και 2) έγινε αντικατάσταση των αντίστοιχων τιμών των παραμέτρων k_1 σύμφωνα με τις τιμές του ποσοστού υγρασίας, καθώς και των τιμών των τάσεων θ και τ_{oct} . Τα αποτελέσματα των μεταβολών των τιμών του M_r σε σχέση με τα ποσοστά περιεκτικότητας σε υγρασία παρουσιάζονται στις εικόνες 6.12, 6.13, 6.14 και 6.15.

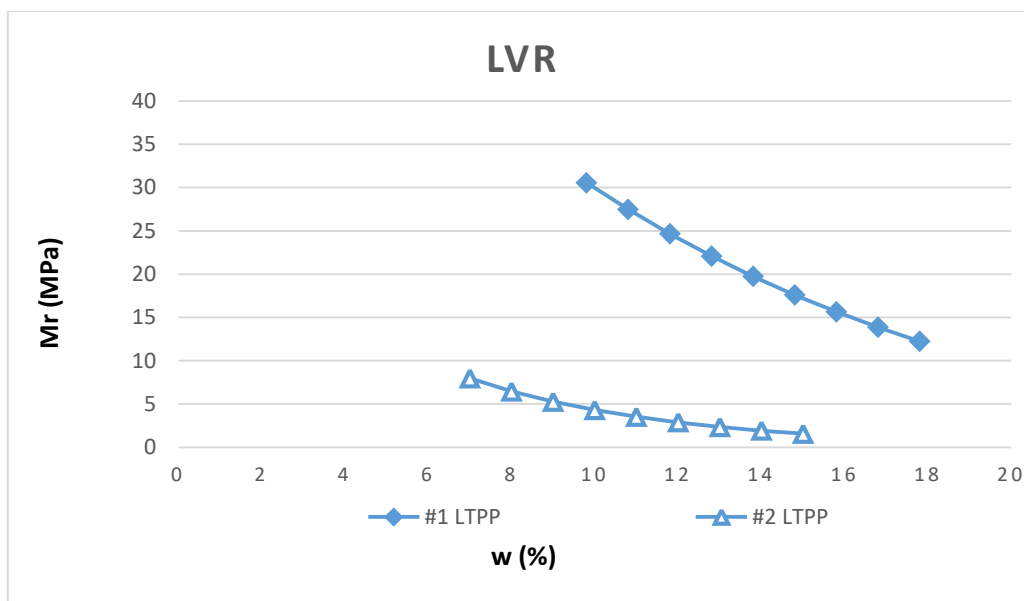


Εικόνα 6. 12 Οι μεταβολές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας M_r σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία για το δοκίμιο 1 με $w_{opt} = 13,8\%$

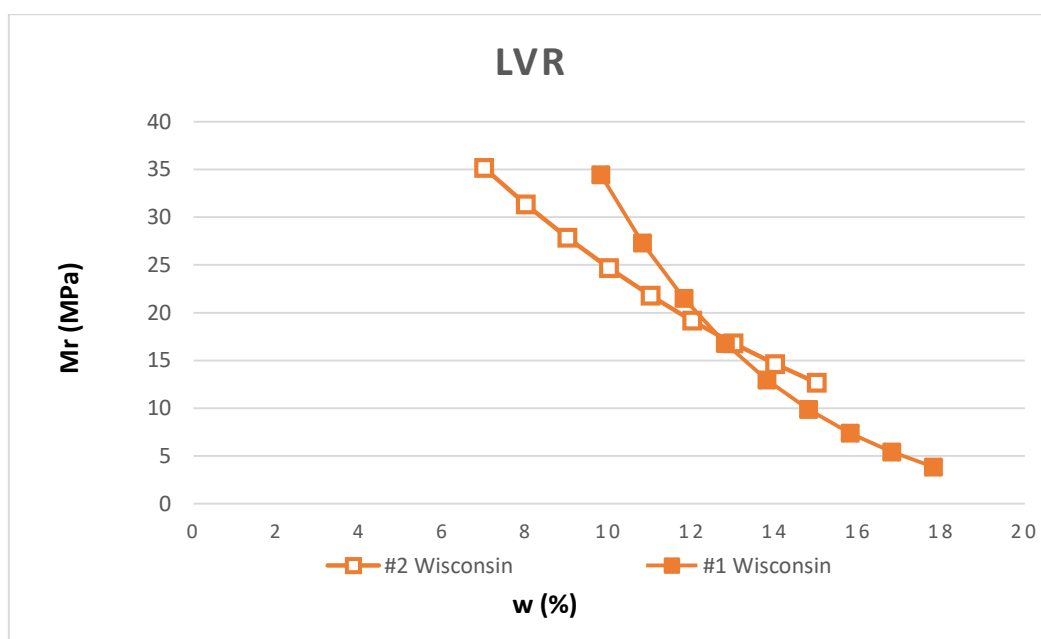


Εικόνα 6. 13 Οι μεταβολές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας M_r σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία για το δοκίμιο 2 με $w_{opt}=11\%$

Η μελέτη των διαγραμμάτων 6.12 και 6.13 κάνει εμφανές το γεγονός ότι οι τιμές του M_r αριστερά από την βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία (w_{opt}) αυξήθηκαν με τη μείωση της περιεκτικότητας σε υγρασία (δηλ. αύξηση του βαθμού κορεσμού), ενώ οι τιμές του M_r μειώθηκαν κατά μήκος της καμπύλης, όπου από την υγρασία w_{opt} μεταβαίνει σε υψηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία. Υπολογίζεται, ότι για μεταβολή της υγρασίας από την w_{opt} στην τιμή $w_{opt} + 4\%$ το M_r παρουσιάζει μείωση για το δοκίμιο 1 μέσω του μοντέλου LTPP 38% και μέσω του μοντέλου Wisconsin 70%, ενώ για το δοκίμιο 2 μέσω του μοντέλου LTPP 57% και μέσω του μοντέλου Wisconsin 42%. Επίσης ο ρυθμός μεταβολής της καμπύλης LTPP για το δοκίμιο 1 υπολογίζεται στη τιμή 2,27 ενώ της καμπύλης Wisconsin στη τιμή 3,72. Αντίστοιχα για το δοκίμιο 2 ο ρυθμός μεταβολής της καμπύλης LTPP υπολογίζεται στα 0,77 και της καμπύλης Wisconsin στη τιμή 2,79.



Εικόνα 6. 14 Οι μεταβολές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας, M_r σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία συγκριτικά για τα δύο δοκίμια μέσω των εξισώσεων LTPP



Εικόνα 6. 15 Οι μεταβολές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας, M_r σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία συγκριτικά για τα δύο δοκίμια μέσω των εξισώσεων Wisconsin

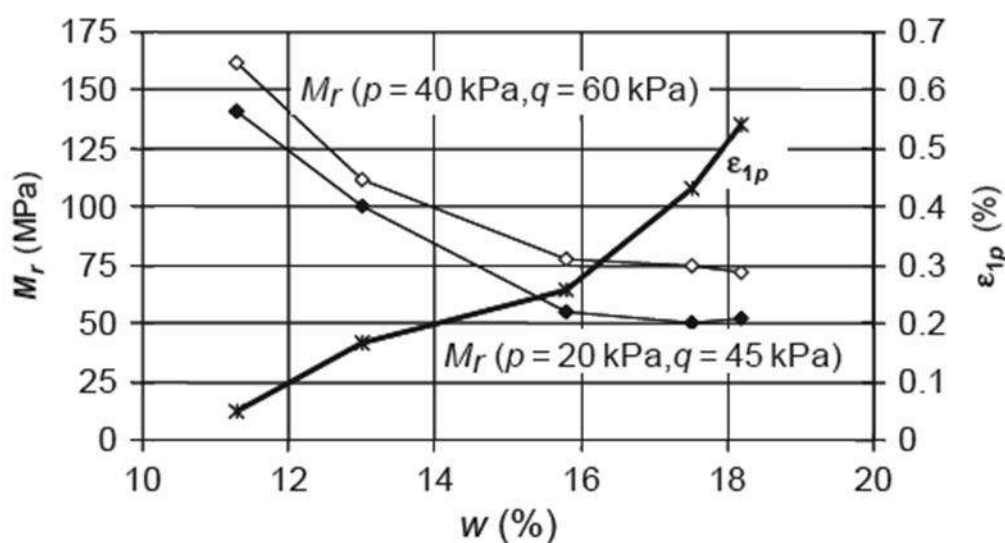
Αντίστοιχα με τα οδοστρώματα HVR, στο οδόστρωμα LVR παρατηρείται ότι στα δύο εδαφικά δοκίμια (δοκίμιο 1 λεπτόκοκκο και δοκίμιο 2 χονδρόκοκκο) οι τιμές των τάσεων που αναπτύσσονται (θ και τ_{oct}) είναι σχεδόν ισότιμες (βλ. πίνακα 6.7), ενώ μέσω της ανάλυσης των εικόνων 6.14 και 6.15 παρατηρείται ότι οι τιμές του M_r από το μοντέλο LTPP

παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση της τάξεως των 10 MPa έως και 25 MPa (RMSPE = 86,72%). Αντίθετα οι τιμές του M_r από το μοντέλο Wisconsin παρουσιάζουν για τα δύο δοκίμια μικρότερες αποκλίσεις της τάξεως των 10 MPa (RMSPE = 34,60%).

Σχολιασμός

Από την ανάλυση των εικόνων 6.12 – 6.15 προκύπτουν αποτελέσματα που δείχνουν ότι οι μεταβολές στις τιμές του M_r επηρεάζονται άμεσα από τη διαδρομή διαβροχής/ξήρανσης και ότι στη περίπτωση του μοντέλου Wisconsin η μεταβολή αυτή είναι εντονότερη, όπως ακριβώς και στην περίπτωση του οδοστρώματος υψηλής κυκλοφορίας.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν για το οδόστρωμα LVR είναι ανάλογα με αυτά που προκύπτουν από την διεθνή βιβλιογραφία και από τα δεδομένα του Κεφαλαίου 5, όπως και στην περίπτωση του οδοστρώματος υψηλής κυκλοφορίας. Για λόγους σύγκρισης αναφέρεται η μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τους Hornych et al., (1998) και οδήγησε στο ακόλουθο διάγραμμα συσχέτισης του ενεργού μέτρου ελαστικότητας με το ποσοστό σε υγρασίας, που παρουσιάζεται στην εικόνα 6.16.

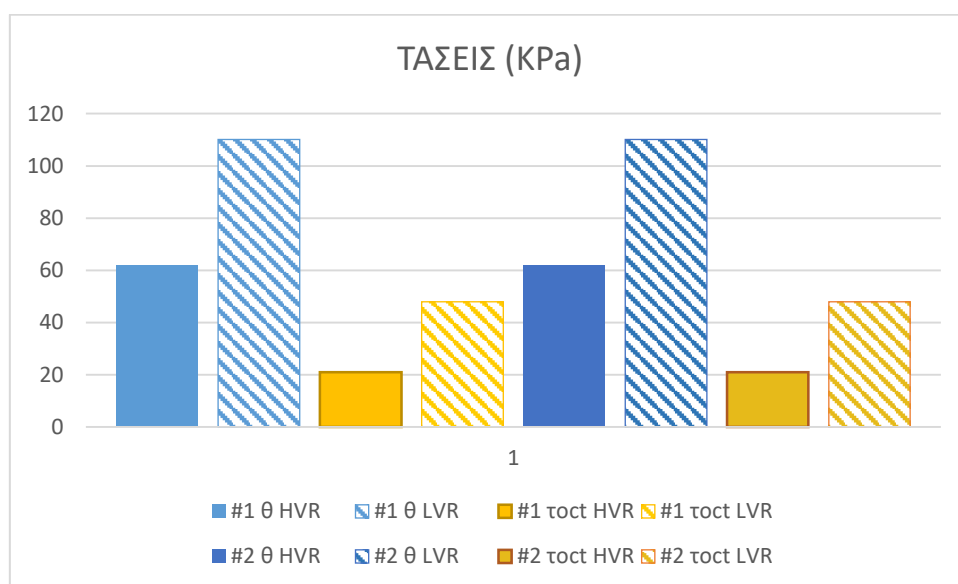


Εικόνα 6. 16 Οι μεταβολές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία για μία υλός
Πηγή: Hornych et al., 1998

Από την ανάλυση και την σύγκριση των διαγραμμάτων της παρούσας πειραματικής διαδικασίας, μπορεί να γίνει κατανοητό, ότι η συσχέτιση του M_r με το ποσοστό υγρασίας, όπως αυτή εμφανίζεται μέσα από τα διαγράμματα 6.12 - 6.15, παρουσιάζει ομοιότητες με αυτή του διαγράμματος 6.16, που προέκυψε από την έρευνα των Hornych et al. (1998).

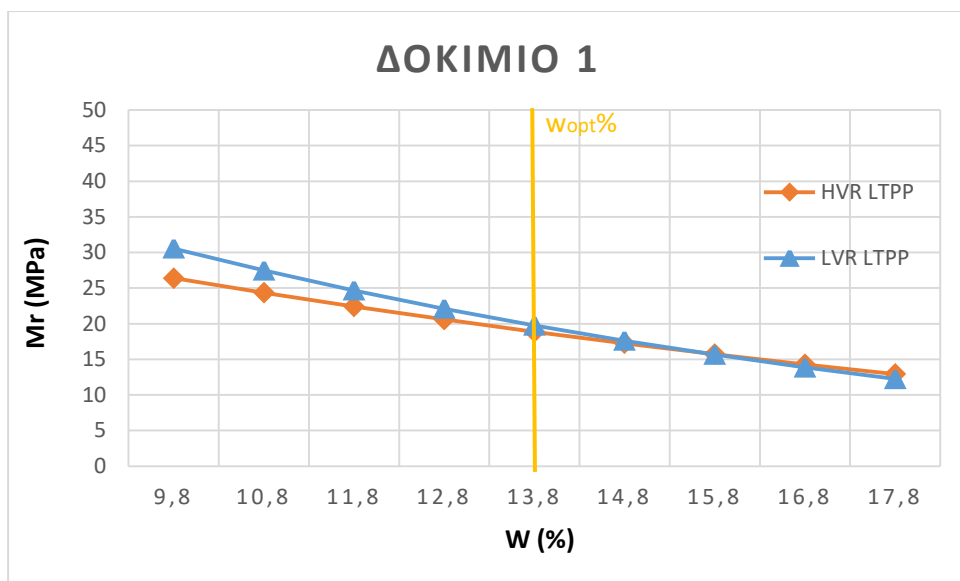
6.4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ HVR και LVR

Σύμφωνα με τον αναλυτικό υπολογισμό των τάσεων, που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, διαπιστώθηκε, όπως αναμενόταν, ότι στο οδόστρωμα χαμηλής κυκλοφορίας αναπτύσσονται πολύ μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με το οδόστρωμα υψηλής κυκλοφορίας. Οι κύριες τάσεις καθώς και οι τάσεις θ και διατμητική οκταεδρική τάση τ_{oct} , είναι μεγαλύτερες στο οδόστρωμα χαμηλής κυκλοφορίας αν και εφαρμόζεται και στις δύο περιπτώσεις ίσο κυκλικό φορτίο τροχού. Η σύγκριση των τιμών αυτών φαίνεται και στην εικόνα 6.17.

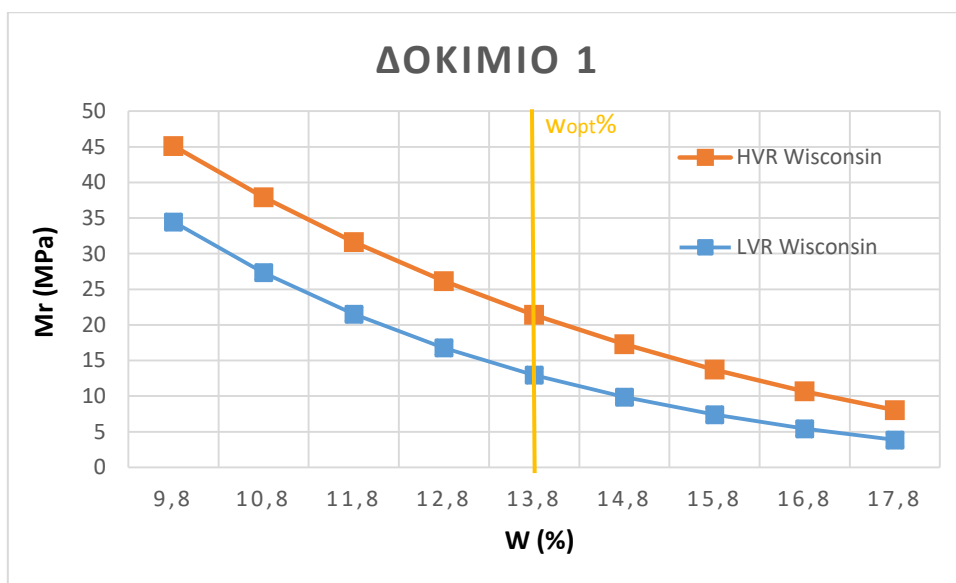


Εικόνα 6. 17 Σύγκριση τιμών των τάσεων για τα δύο οδοστρώματα HVR vs LVR

Παρά την έντονη διαφορά των τιμών των τάσεων θ και τ_{oct} ανάμεσα στις δύο πειραματικές διατομές οδοστρωμάτων (HVR και LVR), οι τιμές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας για τα δύο οδοστρώματα ανά μοντέλο μελέτης δεν διαφέρουν σημαντικά. Οι αποκλίσεις των τιμών είναι μικρότερες από 10 MPa και σε ορισμένα σημεία σχεδόν ταυτίζονται. Τα αποτελέσματα αυτά φαίνονται αναλυτικά στις εικόνες 6.18, 6.19, 6.20 και 6.21.



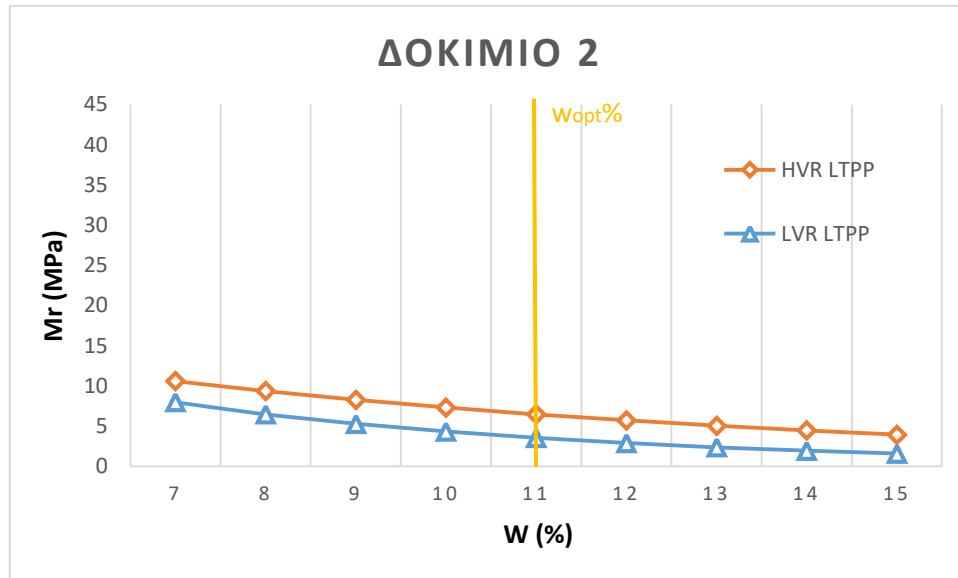
Εικόνα 6. 18 Μεταβολή του ενεργού μέτρου ελαστικότητας με την περιεκτικότητα σε υγρασία για τα δυο τυπικά οδοστρώματα και για μοντέλο μελέτης LTPP, για το δοκίμιο 1



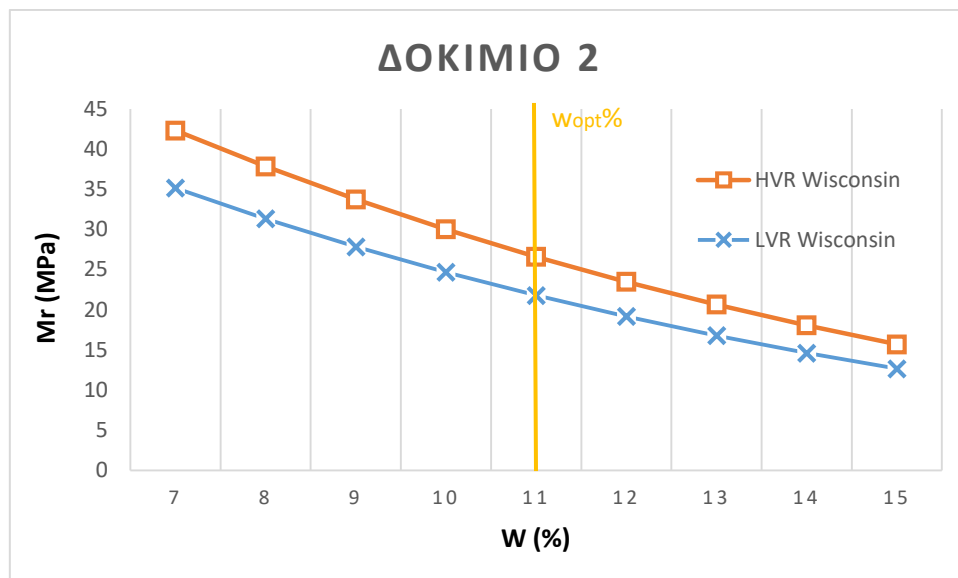
Εικόνα 6. 19 Μεταβολή του ενεργού μέτρου ελαστικότητας με την περιεκτικότητα σε υγρασία για τα δυο τυπικά οδοστρώματα και για μοντέλο μελέτης Wisconsin, για το δοκίμιο 1

Είναι αναμενόμενο, ότι και στις δύο μορφές οδοστρώματος το ενεργό μέτρο ελαστικότητας μειώνεται καθώς το ποσοστό υγρασίας αυξάνεται. Για το λεπτόκοκκο εδαφικό δοκίμιο (δοκίμιο 1) παρατηρείται, ότι με την εφαρμογή του μοντέλου LTPP οι τιμές του Mr για ποσοστό υγρασίας μεγαλύτερο του w_{opt} σχεδόν ταυτίζονται και για μικρότερες τιμές του w_{opt} οι τιμές του ενεργού μέτρου ελαστικότητας Mr βρίσκονται πολύ κοντά με διαφορά μικρότερη των 5 MPa (RMSPE = 8,35%). Αρχικά στο οδόστρωμα χαμηλής κυκλοφορίας προκύπτουν

μεγαλύτερες τιμές ενεργού μέτρου ελαστικότητας, ενώ αυτό στη συνέχεια αντιστρέφεται. Μέσω του μοντέλου Wisconsin παρατηρείται, ότι οι τιμές του M_r και για τα δύο οδοστρώματα μειώνονται σχεδόν ανάλογα. Για ποσοστό υγρασίας μεγαλύτερο του w_{opt} η διαφορά των τιμών μειώνεται και γίνεται μικρότερη των 5 MPa ενώ αριστερά του w_{opt} η διαφορά αυξάνεται έως και τα 10 MPa (RMSPE = 39,86%).



Εικόνα 6. 20 Μεταβολή του ενεργού μέτρου ελαστικότητας με την περιεκτικότητα σε υγρασία για τα δυο τυπικά οδοστρώματα και για μοντέλο μελέτης LTPP, για το δοκίμιο 2



Εικόνα 6. 21 Μεταβολή του ενεργού μέτρου ελαστικότητας με την περιεκτικότητα σε υγρασία για τα δυο τυπικά οδοστρώματα και για μοντέλο μελέτης Wisconsin, για το δοκίμιο 2

Το συμπέρασμα, ότι το ενεργό μέτρο ελαστικότητας μειώνεται καθώς το ποσοστό υγρασίας αυξάνεται και για τα δύο τυπικά οδοστρώματα είναι φανερό και στο δοκίμιο 2. Για το χονδρόκοκκο εδαφικό δοκίμιο παρατηρείται, ότι με την εφαρμογή και των δύο μοντέλων (LTPP και Wisconsin) η μεταβολή του M_r σε σχέση με το ποσοστό υγρασίας φέρεται σχεδόν ανάλογα και στους δύο τύπους οδοστρώματος. Μέσω του μοντέλου LTPP οι διαφορές των τιμών του M_r διατηρούνται σχεδόν σταθερές. Για ποσοστό υγρασίας μεγαλύτερο του w_{opt} το ενεργό μέτρο ελαστικότητας μειώνεται, ενώ αριστερά του w_{opt} αυξάνεται ($RMSPE = 45,67\%$). Μέσω του μοντέλου Wisconsin για ποσοστό υγρασίας μεγαλύτερο του w_{opt} η διαφορά των τιμών του ενεργού μέτρου ελαστικότητας μειώνεται και γίνεται μικρότερη των 4 MPa ενώ αριστερά του w_{opt} η διαφορά αυξάνεται έως και τα 7 MPa ($RMSPE = 18,11\%$).

Ωστόσο παρατηρείται, ότι σε όλες τις περιπτώσεις δοκιμών και τυπικών διατομών η ανάλυση σύμφωνα με το μοντέλο Wisconsin δίνει αποτελέσματα ενεργού μέτρου ελαστικότητας πιο έντονα εξαρτημένα από την μεταβολή του ποσοστού υγρασίας, από την τιμή $w_{opt} - 4\%$ έως τη τιμή $w_{opt} + 4\%$, παρουσιάζοντας καμπύλη με μεγαλύτερο ρυθμό μεταβολής.

Με την ανάλυση του νομογραφήματος AASHTO προκύπτει το συμπέρασμα, ότι η ενδεχόμενη μείωση του M_r , με σταθερές τις υπόλοιπες μεταβλητές, έχει ως συνέπεια την αύξηση του δείκτη δομικής επάρκειας SN, δηλαδή αύξηση του πάχους των ασφαλτικών στρώσεων και των στρώσεων βάσης, υπόβασης. Η έντονη διαφορά των τιμών του M_r για το μοντέλο Wisconsin, που αντιστοιχούν στο ελάχιστο και στο μέγιστο ποσοστό υγρασίας, δημιουργεί την πιθανότητα το πάχος των ασφαλτικών στρώσεων να μην επαρκεί στο ενδεχόμενο μείωσης της τιμής του M_r λόγω αύξησης της υγρασίας.

Επομένως, το ενεργό μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται άμεσα από το ποσοστό υγρασίας της στρώσης έδρασης. Το ποσοστό υγρασίας είναι ένα χαρακτηριστικό το οποίο επηρεάζεται άμεσα από τις κλιματικές συνθήκες που υφίστανται ανά εποχή. Το γεγονός αυτό κάνει φανερό, ότι το M_r της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος αναπόφευκτα θα μεταβάλλεται στη διάρκεια του χρόνου.

Ο συνδυασμός των ανωτέρω δημιουργεί μία έντονη αβεβαιότητα στην περίπτωση υπολογισμού του ενεργού μέτρου ελαστικότητας μέσω του μοντέλου Wisconsin και οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι στην παρούσα πειραματική διαδικασία η επιλογή του μοντέλου LTPP και για τους δυο τύπους εδάφους, μπορεί να θεωρηθεί πιο αξιόπιστη.

7. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μέσω μίας ενδελεχούς ανασκόπησης της διεθνούς βιβλιογραφίας, η παρούσα εργασία αναδεικνύει ότι, ο κλάδος του σχεδιασμού των οδοστρωμάτων είναι ένας δυναμικός κλάδος υπό την έννοια ότι οι μέθοδοι σχεδιασμού αλλάζουν συνεχώς και νέα στοιχεία γίνονται αποδεκτά. Η ανάγκη για παραγωγή ενός δομικού και οικονομικού συνδυασμού υλικών, έτσι ώστε να εξυπηρετείται ο προβλεπόμενος όγκος κυκλοφορίας σε ένα δεδομένο κλίμα, στις υπάρχουσες συνθήκες εδάφους και για ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα, έχει πυροδοτήσει διεθνώς τη διεξαγωγή επιστημονικών ερευνών για τον σχεδιασμό των οδοστρωμάτων.

Εστιάζοντας στα εύκαμπτα οδοστρώματα, η χρήση τους έχει επιμεριστεί σε οδοστρώματα υψηλής και χαμηλής κυκλοφορίας (HVR & LVR). Ο διαχωρισμός αυτός βασίζεται, όπως φανερώνεται και από την ονομασία τους, στην ένταση της κυκλοφορίας. Από την βιβλιογραφική ανασκόπηση προέκυψε το συμπέρασμα ότι, ανάλογα με την τιμή της έντασης της κυκλοφορίας, όπως αυτή υπολογίζεται από τον υπεύθυνο μηχανικό κατά τη διάρκεια της μελέτης για την κατασκευή της οδού, ο αριθμός, το πάχος και η μορφή των στρώσεων του οδοστρώματος διαφοροποιούνται. Για τους λόγους αυτούς, μέσα στα χρόνια έχουν διαμορφωθεί πρότυπες μορφές διατομών οδοστρωμάτων υψηλής κυκλοφορίας (HVR) και οδοστρωμάτων χαμηλής κυκλοφορίας (LVR).

Επιπλέον, από την βιβλιογραφική ανασκόπηση προέκυψε το συμπέρασμα ότι, τα παραδοσιακά πρότυπα μηχανικής οδοποιίας ενδέχεται να είναι ακατάλληλα για τον σχεδιασμό των οδοστρωμάτων χαμηλής κυκλοφορίας. Στην πλειοψηφία τους οι μέθοδοι σχεδιασμού οδοστρωμάτων βασίζονται σε γραμμικούς ελαστικούς υπολογισμούς. Τέτοιες μέθοδοι δίνουν καλά αποτελέσματα μόνο για μεγάλης διατομής οδοστρώματα (HVR). Ως λύση του ζητήματος αυτού έχει προταθεί η λήψη, κατά προσέγγιση, της μη-γραμμικής συμπεριφοράς μέσω διαφοροποιήσεων που μπορούν να πραγματοποιηθούν πάνω στην μέθοδο σχεδιασμού των οδοστρωμάτων χαμηλής κυκλοφορίας.

Ειδικότερα διαπιστώθηκε, ότι τα οδοστρώματα αποτελούν μέσα με μη-γραμμική συμπεριφορά. Τα ασύνδετα υλικά φέρονται διαφορετικά από τα εδάφη στα φυσικά χαρακτηριστικά τους και επίσης στην απόκριση τους στο εφαρμοζόμενο κυκλικό φορτίο. Τα ασύνδετα υλικά επίσης, είναι ένα μίγμα μεγάλου αριθμού μεμονωμένων σωματιδίων με διαφορετικά σχήματα και μεγέθη. Αυτά έχουν ως αποτέλεσμα η εφαρμογή της θεωρίας της ελαστικότητας να μην οδηγεί στα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Ωστόσο, η θεωρία της ελαστικότητας έχει εκτεταμένη εφαρμογή στην ανάλυση των πολυστρωματικών

οδοστρωμάτων. Η εξέλιξη του θεωρητικού υπόβαθρου και της τεχνολογίας, η μεγαλύτερη ευχέρεια που παρέχεται και η παρατήρηση ότι τα περισσότερα οδοστρώματα αποκρίνονται με ελαστικό τρόπο, έκαναν τη θεωρία της ελαστικότητας ακόμη πιο χρήσιμη.

Δεδομένων των ανωτέρω στην παρούσα εργασία, αναγνωρίζεται η σπουδαιότητα της στρώσης έδρασης του οδοστρώματος. Η στρώση έδρασης είναι το θεμέλιο που υποστηρίζει τις υπόλοιπες στρώσεις του οδοστρώματος για την απορρόφηση των φορτίων κυκλοφορίας. Με την εμφάνιση των διάφορων Οδηγών Σχεδιασμού Οδοστρώματος η δυναμική αντοχή του εδάφους της στρώσης έδρασης εκφράζεται μέσω της έννοιας του ενεργού μέτρου ελαστικότητας (M_r). Πλέον ο χαρακτηρισμός των εδαφών της στρώσης έδρασης από την άποψη του ενεργού μέτρου ελαστικότητας έχει καταστεί ζωτικής σημασίας για το σχεδιασμό του οδοστρώματος. Για ένα σχεδιασμό νέου οδοστρώματος, οι τιμές του M_r γενικά μπορούν να ληφθούν με τη διεξαγωγή δοκιμών τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου. Επιπλέον, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, το M_r μπορεί να ληφθεί και από εξισώσεις συσχέτισης που περιλαμβάνουν υπόψιν την κατάσταση καταπόνησης και τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους. Έτσι πολλά μη-γραμμικά μοντέλα προτάθηκαν με σκοπό την ενσωμάτωση των επιδράσεων της κατάστασης καταπόνησης στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας, αλλά και άλλων παραμέτρων.

Οι εξισώσεις που έχουν προκύψει κατά καιρούς για τον υπολογισμό του ενεργού μέτρου ελαστικότητας, συσχετίζουν τις τάσεις καταπόνησης του εδάφους της στρώσης έδρασης με συγκεκριμένες παραμέτρους k_i . Οι παράμετροι k_i για κάθε μοντέλο προκύπτουν εργαστηριακά μέσω της δοκιμής τριαξονικού επαναλαμβανόμενου φορτίου. Έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί για τον προσδιορισμό των παραμέτρων k_i , οι οποίες όμως δημιουργούν καλές συσχετίσεις απόδοσης μόνο για τα συγκεκριμένα εδαφικά δοκίμια ανά έρευνα. Άλλες έρευνες που χρησιμοποίησαν ένα ευρύ φάσμα εδαφών και συνθηκών είχαν ως αποτέλεσμα κακές συσχετίσεις. Αυτό κάνει φανερό το γεγονός, ότι δεν υπάρχει μια σχέση απόδοσης των παραμέτρων k_i γενικής εφαρμογής.

Επίσης πολλοί ερευνητές έχουν δείξει, ότι το ενεργό μέτρο ελαστικότητας είναι ευαίσθητο στη μεταβολή της περιεκτικότητας σε υγρασία. Κατά τη διαβροχή του ακόρεστου εδάφους μειώνεται η αναρρόφηση στο έδαφος, η πίεση των πόρων προσεγγίζει την πίεση του αέρα και μειώνεται η τιμή των τάσεων. Εξαιτίας αυτού, η αύξηση της υγρασίας συνδέεται με μειώσεις στην αντοχή σε διάτμηση, σε δυσκαμψία και στην πλαστική παραμόρφωση σε όλα τα εδάφη και τα ασύνδετα υλικά. Έτσι, παρατηρείται μείωση της φέρουσας ικανότητας και του ενεργού μέτρου ελαστικότητας. Γενικά, το ενεργό μέτρο ελαστικότητας μειώνεται σημαντικά, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους, λόγω της αύξησης της περιεκτικότητας σε

υγρασία από την ξηρή πλευρά της βέλτιστης περιεκτικότητας σε υγρασία (w_{opt}) στην υγρή πλευρά αυτής.

Από την πειραματική διαδικασία που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, με σκοπό τον προσδιορισμό του βαθμού επίδρασης του ποσοστού υγρασίας στο Mr, προέκυψαν συμπεράσματα τα οποία συμπλέουν με αντίστοιχα συμπεράσματα που έχουν καταγραφεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε πάνω σε θεωρητικές τυπικές διατομές οδοστρωμάτων υψηλής και χαμηλής κυκλοφορίας (HVR & LVR). Η επιλογή των θεωρητικών μοντέλων υπολογισμού των παραμέτρων k_i και του ενεργού μέτρου ελαστικότητας που χρησιμοποιήθηκαν, βασίστηκε στην υπάρχουσα βιβλιογραφία και στα δεδομένα που αντλήθηκαν μέσω αυτής για τα διάφορα εδαφικά δοκίμια. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν δύο εδαφικά δοκίμια (ένα συνεκτικό και ένα μη-συνεκτικό). Για τον προσδιορισμό του ενεργού μέτρου ελαστικότητας χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση που υιοθετήθηκε από το πρόγραμμα NCHRP Project 1-37A και ο προσδιορισμός των παραμέτρων k_i έγινε μέσω δύο διαφορετικών μοντέλων, του μοντέλου LTPP και του μοντέλου Wisconsin. Η επιλογή αυτών έγινε με βάση το γεγονός ότι, η εξίσωση προσδιορισμού του Mr αλλά και τα μοντέλα ανάπτυξης των παραμέτρων k_i , μπορούσαν να εφαρμοστούν πλήρως με βάση τα διατεθειμένα στοιχεία.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής έδειξαν, ότι ο βαθμός επιρροής της μεταβολής του ποσοστού υγρασίας στο ενεργό μέτρο ελαστικότητας ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και ότι η βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία αποτελεί μία πολύ σημαντική μεταβλητή στη πρόβλεψη του Mr. Επίσης παρατηρήθηκε, ότι ο προσδιορισμός του ενεργού μέτρου ελαστικότητας μέσω του μοντέλου LTPP οδηγεί σε τιμές του Mr που παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόκλιση ανάμεσα στα δύο δοκίμια, ενώ το μοντέλο Wisconsin οδηγεί σε μικρότερες αποκλίσεις. Ωστόσο, το μοντέλο Wisconsin παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στην μεταβολή του ποσοστού υγρασίας και κυρίως για το συνεκτικό εδαφικό δοκίμιο. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι ενδεχομένως το μοντέλο LTPP να μπορεί να θεωρηθεί ως πιο αξιόπιστο. Επιπλέον αξίζει να τονιστεί ότι, ανάμεσα στα δύο εδαφικά δοκίμια, το συνεκτικό είναι αυτό που εμφανίζει μεγαλύτερη εξάρτηση από το ποσοστό υγρασίας.

Από όλα τα παραπάνω συμπεράσματα καθίσταται σαφές ότι, ο κλάδος του σχεδιασμού των οδοστρωμάτων παρουσιάζει δυνατότητα περαιτέρω εξέλιξης. Η πλήρης κατανόηση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς μίας πολυστρωματικής δομής, όπως αυτή ενός οδοστρώματος, μπορεί να οδηγήσει στην εφαρμογή αυτής της γνώσης με στόχο τον καλύτερο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων.

Πρόταση για περαιτέρω έρευνα, αποτελεί η ανάπτυξη μοντέλων προσδιορισμού των παραμέτρων (k_i) των καταστατικών μοντέλων πρόβλεψης του ενεργού μέτρου ελαστικότητας (M_r), που να μην περιορίζονται σε συγκεκριμένα εδαφικά δοκίμια ανά περιοχή, αλλά να μπορούν να χαρακτηριστούν ως καθολικά και να εφαρμόζονται κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες και για κάθε εδαφικό δοκίμιο. Επίσης, προτείνεται να γίνει έρευνα προκειμένου η υγρασία να εισαχθεί ως κύρια μεταβλητή στην πρόβλεψη του ενεργού μέτρου ελαστικότητας της στρώσης έδρασης των οδοστρωμάτων, με σκοπό τον βέλτιστο σχεδιασμό τους.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- AASHTO 2001. “*American Association of State Highway and Transportation Guide for Design of Pavement Structures*”, 444N. Capitol Street, N.W., Washington D.C.
- Brito L. A. T. 2011. “*Design Methods for Low Volume Roads*”, University of Nottingham, Department of Civil Engineering.
- Brown S. F. 1996. “*Soil Mechanics in Pavement Engineering*”, *Géotechnique*, 46 (3), 383-426.
- Changjun Z., Baoshan H., Xiang S. and Qia D. 2011. “*Soil Resilient Modulus Regressed from Physical Properties and Influence of Seasonal Variation on Asphalt Pavement*”, *Journal of Transportation Engineering*.
- Coronado O., Caicebo B., Taibi S., Correia A. G., Souli H. and Fleureau J. M. 2016. “*Effect of Water Content on the Resilient Behavior of Non Standard Unbound Granular Materials*”, *Transportation Geotechnics*, 7, 29-39.
- Davies O. B. 2004. “*A Model for the Prediction of Subgrade Soil Resilient Modulus for Flexible – Pavement Design: Influence of Moisture Content and Climate Change*”, University of Toledo.
- Dawson A. 2008. “*Water in Road Structures Movement, Drainage and Effects*”, Nottingham Transportation Engineering Centre, University of Nottingham, UK.
- Department of Planning and Local Government, 2010. “*Water Sensitive Urban Design Technical Manual for the Greater Adelaide Region*”, Government of South Australia, Adelaide.
- Diefenderfer K.B. 2002. “*Moisture Content Determination and Temperature Profile Modeling of Flexible Pavement Structures*”, Virginia Polytechnic Institute and State University, Department of Civil and Environmental Engineering.
- Dong C., Liu W., Li Z. and Li I. 2017. “*Modified Prediction Model for Dynamic Resilient Modulus of Compacted Subgrade Silt and Relevant Verification*”, Hunan Communication Research Institute, Changsha, Hunan 410015, China.

- Ekblad J. and Isacsson U. 2006. “*Influence of Water on Resilient Properties of Coarse Granular Materials*”, Road Materials and Pavement Design, 7, 369-404.
- El-Badawy S. and Kamel. M. 2015. “*Assessment and Improvement of the Accuracy of the Odemark Transformation Method*”, International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies, 6 (1), 105-110.
- Erlingsson, S. 2004. “*Mechanistic pavement design methods – A road to better understanding of pavement performance*”, University of Iceland, Iceland.
- Faizan A. 2012. “*Stress in Pavement Structure and Pressure Bulb*”, Planning Commission of Pakistan.
- George K. P. 2004. “*Prediction of Resilient Modulus from Soil Index Properties*”, University of Mississippi, Department of Civil Engineering.
- Gudishala. 2004. “*Development of Resilient Modulus Prediction Models for Base and Subgrade Pavement Layers from in Situ Devices Test Result*”, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Department of Civil Environmental Engineering.
- Hossain Z., Zaman M. and Doiron C. 2015. “*Regression Modeling of Resilient Modulus of Unbound Aggregates*”, Journal of Marine Science and Technology, 23 (3), 388-398.
- Hossain Z., Zaman M., Doiron C. and Cross S. 2011. “*Development of Flexible Pavement Database for Local Calibration of MEPDG*”, Oklahoma Department of Transportation, Final Report, Volume I.
- Keller G. and Sherar I. 2003. “*Low Volume Roads Engineering Best Management Practices Field Guide*”, US Agency for International Development (USAID).
- Kumlai S., Jitsangiam P. and Nikraz H. 2014. “*Comparison Between Resilient Modulus and Dynamic Modulus of Western Australian Hot Mix Asphalt Based on Flexible Pavement Design Perspectives*”, 26th ARRB Conference – Research Driving Efficiency, Sydney, New South Wales.
- Long R. 1991. “*Resilient Modulus of Subgrades*”, Highway Research Advisory Council (JHRAC), University of Connecticut.

- Makhaly B., Meissa F., Oustasse A. S. and Fatou S. 2011. “*Effect of Compaction Moisture Content on the Resilient Modulus of Unbound Aggregates from Senegal (West Africa)*”, Laboratoire de Mécanique et Modélisation (L2M), UFR Sciences de l’Ingénieur, University of Thies, Thies, Senegal.
- Mamatha K. H. and Dinesh S. V. 2017. “*Resilient Modulus of Black Cotton Soil*”, International Journal of Pavement Research and Technology, 10, 171-184.
- Mazari M., Abdallah I., Garibay I., and Nazarian S. 2016. “*Correlating Nonlinear Parameters of Resilient Modulus Models for Unbound Geomaterials*”, International Conference on Transportation Geotechnics.
- Molenaar A.A.A. 2009. “*Design of Flexible Paements*”, Part III, CT 4860, Structural Design of Pavements.
- Naji K. 2016. “*Resilient Modulus – Moisture Content Relationships for Pavement Engineering Applications*”, International Journal of Pavement Engineering.
- Parkman C. 2014. “*High Volume Transport: Rapid Assessment of Research Gaps in Road Engineering and Technical Aspects*”, UK Department for International Development (DFID).
- Santha B. L. 1994. “*Resilient Modulus of Subgrade Soils: Comparison of Two Constitutive Equations*”, Office of Materials and Research, Georgia Department of Transportation.
- Soliman H. and Shalaby A. 2010. “*Sensitivity of Subgrade Resilient Modulus to Moisture Variation*”, Conference of the Transportation Association of Canada, Halifax, Nova Scotia.
- Swedeen K. 2016. “*Rambling on Local Road Maintenance, Rehabilitation and Design*”, Asphalt Conference, Dakota Asphalt Pavement Association, 2016 North Dakota.
- Titi H. H., Elias M. B. and Helwany S. 2006. “*Determination of Typical Resilient Modulus Values for Selected Soil in Wisconsin*”, University of Wisconsin – Milwaukee, Department of Civil Engineering and Mechanics.
- Yoder E. J. and Witczak M. W. 2011. “*Αρχές Σχεδιασμού Οδοστρωμάτων*”, Δεύτερη Αμερικάνικη Έκδοση, Μ. Γκιούρδας.

- Zhou C., Qu S., Nie Z., and Zhang J. 2016. “*Effects of Density and Moisture Variation on Dynamic Deformation Properties of Compacted Lateritic Soil*”, Hindawi Publishing Corporation Advances in Materials Science and Engineering, Article ID 5951832.
- Γεωργιάδης Κ. και Γεωργιάδης Μ. 2011. “*Στοιχεία Εδαφομηχανικής*”, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, ΕΚΔΟΣΗ ΖΗΤΗ.
- Καββαδάς Μ. 2009. “*Στοιχεία Εδαφομηχανικής*”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΕΚΔΟΣΗ ΣΥΜΕΩΝ.
- Λοΐζος Α. και Χ. Πλατή 2014. “*Σημειώσεις για το Μάθημα Ειδικά Θέματα Οδοστρωμάτων*”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Οδοποιίας.
- Λοΐζος Α. και Χ. Πλατή 2015. “*Σημειώσεις για το Μάθημα Οδοστρώματα*”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Οδοποιίας.
- Παπαχαρίσης Ν., Γραμματικόπουλος Ι., Μάνου – Ανδρέου Ν. 2010. “*Γεωτεχνική Μηχανική Έρευνα Γεωτρήσεις Εργαστήριο*”, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Β΄ Έκδοση, Κυριακίδη ΑΦΟΙ.