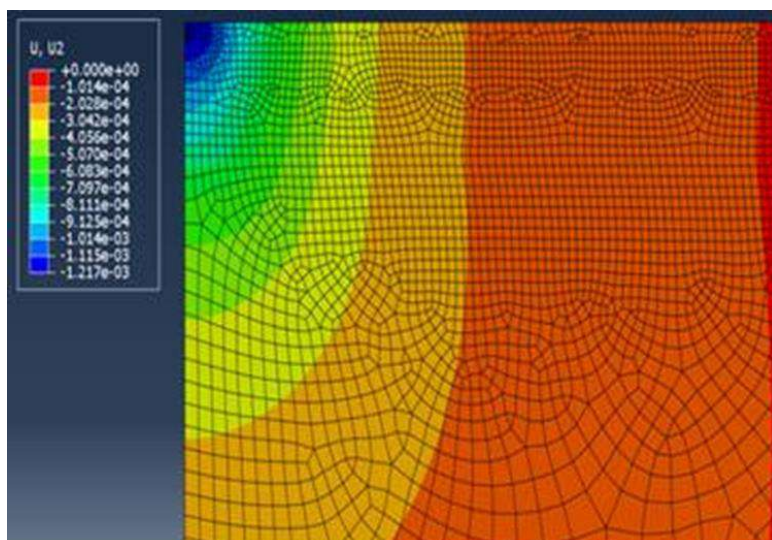




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΥΝΔΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ
ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ**



ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΛΟΥΚΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Α.ΛΟΪΖΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2018

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας μου κ. Ανδρέα Λοΐζο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου την παρούσα διπλωματική εργασία, την καθοδήγηση και την εξαιρετική συνεργασία, καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησής της. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Brad Cliatt, επιστημονικό συνεργάτη του Εργαστηρίου Οδοποιίας του ΕΜΠ για την πολύτιμη συμβολή του στην δημιουργία της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μέσα από την τακτική επικοινωνία και άψογη συνεργασία μας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την πολύτιμη στήριξη, υλική και πνευματική, που μου προσέφεραν κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στην διερεύνηση της συμπεριφοράς του εύκαμπτου οδοστρώματος, όταν αυτό βρίσκεται υπό φόρτιση. Ο προσδιορισμός της μηχανικής συμπεριφοράς του οδοστρώματος είναι καθοριστικός για την ακριβή εκτίμηση της απόκρισης της κατασκευής και άρα για τον ορθό σχεδιασμό αυτής. Επιπρόσθετα, η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στη μη γραμμική συμπεριφορά των ασύνδετων υλικών που χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατασκευή πολυστρωματικών εύκαμπτων οδοστρωμάτων, και ειδικότερα για την στρώση της βάσης/υπόβασης. Ειδικότερα, τα υπό εξέταση ασύνδετα υλικά προέρχονται από υφιστάμενο υπό κατασκευή έργο οδοποιίας και η κοκκομετρική τους διαβάθμιση έχει τροποποιηθεί καταλλήλως, ώστε να καλύπτουν το επιτρεπόμενο από τις Ελληνικές προδιαγραφές κοκκομετρικό φάσμα. Η μη γραμμική ανάλυση καθίσταται δυνατή με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method) χρησιμοποιώντας το λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, όπου ως δείκτης της μηχανικής συμπεριφοράς χρησιμοποιείται το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης – μέτρο επανάκτησης M_R . Ο προσδιορισμός του τελευταίου πραγματοποιείται με τη βοήθεια τριών καταστατικών μοντέλων: K-Θ, UZAN, MEPDG, προκειμένου να διερευνηθούν οι πιθανές αποκλίσεις για τις διάφορες εξεταζόμενες παραμέτρους. Η ανάλυση πραγματοποιείται για διάφορα πάχη τόσο της ασφαλικής στρώσης, όσο και της στρώσης βάσης/υπόβασης και εξετάζεται το κατά πόσο η εφαρμογή της μη γραμμικής ανάλυσης χρήσει των τριών καταστατικών μοντέλων, επηρεάζει την απόκριση του εύκαμπτου οδοστρώματος, όταν εκείνο αφορά όχι μόνο δευτερεύοντα έργα οδοποιίας (μικρά πάχη στρώσεων), αλλά και πρωτεύοντα (μεγαλύτερα πάχη).

ABSTRACT

The present study focuses on the assessment of the mechanical behavior of a flexible pavement structure. An accurate estimation of the pavement's behavior is critical to accurately evaluating the entire pavement structure's response to loading and therefore its optimum design. Moreover, this research investigates the non-linear elastic behavior of unbound materials utilized vastly in the construction of a typical multilayered flexible pavement structure, especially in the base-subbase course. In particular, the unbound materials in question derive from an existing road construction project and their grading has been appropriately modified to meet the Greek Standards accepted specifications. The non-linear numerical analysis becomes possible via the use of the Finite Element Method (F.E.M.), and a widely known software that performs finite element analysis and is called Abaqus. As an index of the mechanical behavior of unbound granular materials, the resilient modulus – M_R is used. The latter, can be determined via the use of three constitutive models that are coded in a user defined material subroutine (UMAT) in the Abaqus software and are: the K- θ model, the Uzan model and the MEPDG model, so that to determine the possible deviations among the various parameters in question. The analysis is performed for different thicknesses of both the asphalt layer and the base / subbase layer and it examines whether the application of the nonlinear analysis using the three constitutive models affects the responsiveness of the flexible pavement, regarding not only secondary road constructions (small layer thicknesses), but also primary road constructions (larger thicknesses).

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή	11
1.1 Γενικά	11
1.2 Στόχος και Μεθοδολογία της μελέτης	12
1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας.....	13
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	14
2.1 Γενικές πληροφορίες για τα οδοστρώματα.	14
2.2 Κατηγορίες και δομή οδοστρωμάτων.....	16
2.2.1 Δύσκαμπτα οδοστρώματα	16
2.2.2 Εύκαμπτα οδοστρώματα.....	18
2.3 Μηχανική συμπεριφορά ασύνδετου υλικού.	21
2.3.1 Ορισμός του μέτρου επανάκτησης MR	21
2.3.2 Προσδιορισμός του μέτρου επανάκτησης.	23
2.3.3 Παράγοντες επιρροής	24
2.3.4 Εργαστηριακή μέθοδος προσδιορισμού μέτρου επανάκτησης:	34
2.3.5 Καταστατικά μοντέλα προσδιορισμού του μέτρου επανάκτησης MR	37
3. Εξεταζόμενα υλικά και συλλογή δεδομένων	40
3.1 Γενικά για τα αδρανή υλικά οδοστρωσίας	40
3.2 Εξεταζόμενα υλικά	41
3.3 Ιδιότητες εξεταζόμενων υλικών	43
3.3.1 Υλικό 1	43
3.3.2 Υλικό 2	45
3.3.3 Υλικό 3	47
3.4 Σύγκριση μεταξύ των υλικών	50
3.4.1 Κατάταξη και Κοκκομετρική διαβάθμιση.....	50

3.4.2 Καμπύλη Ξηράς Πυκνότητας-Ποσοστού Υγρασίας	51
3.4.3 Εργαστηριακός Προσδιορισμός Μέτρου Επανάκτησης.	52
4. Αριθμητική Ανάλυση – Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων	55
4.1 Γενικά Στοιχεία.....	55
4.2 Εισαγωγή στα μοντέλα ανάλυσης οδοστρωματων.....	56
4.3 Τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων.....	57
4.4 Αριθμητική προσομοίωση	61
4.4.1 Γενικά	61
4.4.2 Το λογισμικό Abaqus	61
4.4.3 Διαδικασία δημιουργίας μοντέλου τυπικής διατομής εύκαμπτου οδοστρώματος	62
4.4.4 Χαρακτηριστικά της υπορουτίνας UMAT	67
5. Αποτελέσματα	72
5.1 Γενικά	72
5.2 Αποτελέσματα και Σύγκριση μεταξύ των Υλικών 1-3.....	72
5.2.1 Επιφανειακή Υποχώρηση U_{22}	73
5.2.2 Οριζόντια Εφελκυστική Τάση σ_{11}	79
5.2.3 Οριζόντια Εφελκυστική Παραμόρφωση ε_{11}	85
5.2.4 Κατακόρυφη Θλιπτική Τάση σ_{22}	91
5.2.5 Κατακόρυφη Θλιπτική Παραμόρφωση ε_{22}	97
6. Συμπεράσματα.....	103

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Κατανομή φορτίου σε ασφαλτικό οδόστρωμα (Chen et al 2009).	15
Σχήμα 2: Τυπική διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος.	17
Σχήμα 3: Σύγκριση εύκαμπτου (αριστερή εικόνα) με δύσκαμπτου οδοστρώματος (δεξιά εικόνα)	20
Σχήμα 4: Συμπεριφορά κοκκώδους υλικού υπό επαναλαμβανόμενη-κυκλική φόρτιση (Thom & Brown, 1988).	22
Σχήμα 5: Ορισμός μέτρου επανάκτησης.	22
Σχήμα 6: Τάσεις υπό τριαξονική φόρτιση δοκιμίου.	23
Σχήμα 7: Αποτελέσματα υπολογισμού του MR σε δοκιμές με σταθερή πλευρική – περιοριστική πίεση (CCP), σε σύγκριση με μεταβλητή (VCP), (Allen and Thompson 1974).	26
Σχήμα 8: Τιμές του μέτρου επανάκτησης μεταβάλλοντας το ποσοστό υγρασίας, (Seed et al. 1962).	27
Σχήμα 9: Επίδραση της αύξησης της υγρασίας μετά την κατασκευή στο μέτρο επανάκτησης, (Drumm 1997)	29
Σχήμα 10: Επίδραση του κορεσμού μετά την συμπύκνωση στο μέτρο επανάκτησης (Drumm 1997).	30
Σχήμα 11: Ημιτονοειδής παλμός φόρτισης (AASHTO T307-99, 2007).	36
Σχήμα 12: Διάταξη συσκευής τριαξονικής φόρτισης (AASHTO T307-99, 2007).	36
Σχήμα 13 : Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης μίγματος αδρανών υλικών Τύπου 1 (ΠΕΤΕΠ 05-03-03-00)	42
Σχήμα 14 : - Υλικό 1 - Γραφική παρουσίαση	43
Σχήμα 15: Κοκκομετρική διαβάθμιση Υλικού 1 – μέτριο ποσοστό λεπτόκοκκου.	44
Σχήμα 16: Καμπύλη ποσοστού υγρασίας – ξηρής πυκνότητας Υλικό 1.....	45
Σχήμα 17: - Υλικό 2 - Γραφική παρουσίαση	45
Σχήμα 18: Κοκκομετρική διαβάθμιση Υλικού 2 – χαμηλό ποσοστό λεπτόκοκκου	46
Σχήμα 19: Καμπύλη ποσοστού υγρασίας – ξηρής πυκνότητας Υλικό 2	47
Σχήμα 20: - Υλικό 3 - Γραφική παρουσίαση	47
Σχήμα 21: Κοκκομετρική διαβάθμιση Υλικού 3 – υψηλό ποσοστό λεπτόκοκκου.....	48
Σχήμα 22: Καμπύλη ποσοστού υγρασίας – ξηρής πυκνότητας Υλικό 3	49

Σχήμα 23: Σύγκριση κοκκομετρικών καμπυλών διαβάθμισης μεταξύ των υλικών 1-3, καθώς και των ορίων των προδιαγραφών.....	50
Σχήμα 24: Σύγκριση καμπυλών ποσοστού υγρασίας – ξηρής πυκνότητας υλικών 1-3.....	52
Σχήμα 25: Δοκίμιο τοποθετημένο στο θάλαμο φόρτισης για την πραγματοποίηση δοκιμής AASHTO T307.	54
Σχήμα 26: Επαναληπτική διαδικασία προς την επίτευξη κατάστασης ισορροπίας για μια φόρτιση μετά από n επαναλήψεις.....	60
Σχήμα 27: Στοιχεία α) CAX4R, β)CAX8R.....	64
Σχήμα 28: Απεικόνιση του φορέα, όπου φαίνονται οι στρώσεις και βασικές παραδοχές της διατομής και των υλικών.	65
Σχήμα 29: Συνολικός διακριτοποιημένος φορέας.....	66
Σχήμα 30: Λεπτομέρεια διακριτοποίησης άνω αριστερού άκρου του φορέα. Περιλαμβάνει την ασφαλική στρώση την βάση/υπόβαση, και μέρος της στρώσης έδρασης. Ενδεικτικές τιμές της επιφανειακής υποχώρησης u_{22} στο κέντρο της φόρτισης.	67
Σχήμα 31: Τυπικό διάγραμμα ροής της υπορουτίνας (Li 2013)	68
Σχήμα 32: Κρίσιμες θέσεις ελέγχου τάσεων και παραμορφώσεων στη διατομή ελέγχου..	71
Σχήμα 33 : Επιφανειακή Υποχώρηση (u_{22}) – Υλικό 1 UB30	74
Σχήμα 34: Επιφανειακή Υποχώρηση (u_{22}) – Υλικό 1 UB40	74
Σχήμα 35: Επιφανειακή Υποχώρηση (u_{22}) – Υλικό 2 UB30	75
Σχήμα 36: Επιφανειακή Υποχώρηση (u_{22}) – Υλικό 2 UB40	75
Σχήμα 37: Επιφανειακή Υποχώρηση (u_{22}) – Υλικό 3 UB30	76
Σχήμα 38: Επιφανειακή Υποχώρηση (u_{22}) – Υλικό 3 UB40	76
Σχήμα 39: Επιφανειακή Υποχώρηση (u_{22}) – Υλικά 1- 3 UB30 – MEPDG	78
Σχήμα 40:Οριζόντια Εφελκυστική Τάση (s_{11}) – Υλικό 1 – UB30	80
Σχήμα 41: Οριζόντια Εφελκυστική Τάση (s_{11}) – Υλικό 1 – UB40	80
Σχήμα 42: Οριζόντια Εφελκυστική Τάση (s_{11}) – Υλικό 2 – UB30	81
Σχήμα 43: Οριζόντια Εφελκυστική Τάση (s_{11}) – Υλικό 2 – UB40	81
Σχήμα 44: Οριζόντια Εφελκυστική Τάση (s_{11}) – Υλικό 3 – UB30	82
Σχήμα 45: Οριζόντια Εφελκυστική Τάση (s_{11}) – Υλικό 3 – UB40	82
Σχήμα 46: Οριζόντια Εφελκυστική Τάση (s_{11}) – Υλικά 1-3 – UB30 – MEPDG	84
Σχήμα 47: Οριζόντια Εφελκυστική Παραμόρφωση (ε_{11}) – Υλικό 1 – UB30	86
Σχήμα 48: Οριζόντια Εφελκυστική Παραμόρφωση (ε_{11}) – Υλικό 1 – UB40	86

Σχήμα 49: Οριζόντια Εφελκυστική Παραμόρφωση (ε_{11}) – Υλικό 2 – UB30	87
Σχήμα 50: Οριζόντια Εφελκυστική Παραμόρφωση (ε_{11}) – Υλικό 2 – UB40	87
Σχήμα 51: Οριζόντια Εφελκυστική Παραμόρφωση (ε_{11}) – Υλικό 3 – UB30	88
Σχήμα 52: Οριζόντια Εφελκυστική Παραμόρφωση (ε_{11}) – Υλικό 3 – UB40	88
Σχήμα 53: Οριζόντια Εφελκυστική Παραμόρφωση (ε_{11}) – Υλικά 1-3 – UB30 – MEPDG	90
Σχήμα 54: Κατακόρυφη Θλιπτική Τάση (s_{22}) – Υλικό 1 – UB30.....	92
Σχήμα 55: Κατακόρυφη Θλιπτική Τάση (s_{22}) – Υλικό 1 – UB40.....	92
Σχήμα 56: Κατακόρυφη Θλιπτική Τάση (s_{22}) – Υλικό 2 – UB30.....	93
Σχήμα 57: Κατακόρυφη Θλιπτική Τάση (s_{22}) – Υλικό 2 – UB40.....	93
Σχήμα 58: Κατακόρυφη Θλιπτική Τάση (s_{22}) – Υλικό 3 – UB30.....	94
Σχήμα 59: Κατακόρυφη Θλιπτική Τάση (s_{22}) – Υλικό 3 – UB40.....	94
Σχήμα 60: Κατακόρυφη Θλιπτική Τάση (s_{22}) – Υλικά 1- 3 – UB30 – MEPDG	96
Σχήμα 61: Κατακόρυφη Θλιπτική Παραμόρφωση (ε_{22}) – Υλικό 1 – UB30.....	98
Σχήμα 62: Κατακόρυφη Θλιπτική Παραμόρφωση (ε_{22}) – Υλικό 1 – UB40.....	98
Σχήμα 63: Κατακόρυφη Θλιπτική Παραμόρφωση (ε_{22}) – Υλικό 2 – UB30.....	99
Σχήμα 64: Κατακόρυφη Θλιπτική Παραμόρφωση (ε_{22}) – Υλικό 2 – UB40.....	99
Σχήμα 65: Κατακόρυφη Θλιπτική Παραμόρφωση (ε_{22}) – Υλικό 3 – UB30.....	100
Σχήμα 66: Κατακόρυφη Θλιπτική Παραμόρφωση (ε_{22}) – Υλικό 3 – UB40.....	100
Σχήμα 67: Κατακόρυφη Θλιπτική Παραμόρφωση (ε_{22}) – Υλικά 1-3 – UB30 - MEPDG	102

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Ακολουθία φορτίσεων τριαξονικής δοκιμής σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T307-99.	35
Πίνακας 2: Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης μίγματος αδρανών υλικών. (1): Γίνεται αποδεκτό και το ποσοστό 100%	41
Πίνακας 3: Άνω και κάτω όρια βάσει κανονισμών (ΠΕΤΕΠ 05-03-03-00), καθώς και οι εκάστοτε τιμές των τριών υλικών.....	51
Πίνακας 4: Σύγκριση πρόσθετων κοκκομετρικών απαιτήσεων (ΠΕΤΕΠ 05-03-03-00). ...	51
Πίνακας 5: Μέγιστη ξηρά πυκνότητα – Βέλτιστο ποσοστό υγρασίας (OMC) Υλικά 1-3..	52
Πίνακας 6 : Παράμετροι Υλικού 1	53
Πίνακας 7: Παράμετροι Υλικού 2	53
Πίνακας 8: Παράμετροι Υλικού 3	53
Πίνακας 9 : Χαρακτηριστικά υλικών διατομής οδοστρώματος.....	63
Πίνακας 10 : Βασικές παράμετροι καταστατικού μοντέλου, Υλικό 1	69
Πίνακας 11 : Βασικές παράμετροι καταστατικού μοντέλου, Υλικό 2	69
Πίνακας 12 : Βασικές παράμετροι καταστατικού μοντέλου, Υλικό 3	70
Πίνακας 13: Κρίσιμες παράμετροι απόκρισης οδοστρώματος.	71
Πίνακας 14: Επιφανειακή Υποχώρηση (Surface Deflection – u_{22}), για τις διάφορες στρώσεις και τα τρία εξεταζόμενα υλικά.	73
Πίνακας 15: Οριζόντια Εφελκυστική Τάση (Horizontal Tensile Strength – s_{11}), για τις διάφορες στρώσεις και τα τρία εξεταζόμενα υλικά.....	79
Πίνακας 16: Οριζόντια Εφελκυστική Παραμόρφωση (Horizontal Tensile Strain – ε_{11}), για τις διάφορες στρώσεις και τα τρία εξεταζόμενα υλικά.	85
Πίνακας 17: Κατακόρυφη Θλιπτική Τάση (Vertical Compressive Stress – s_{22}), για τις διάφορες στρώσεις και τα τρία εξεταζόμενα υλικά.....	91
Πίνακας 18: Κατακόρυφη Θλιπτική Παραμόρφωση (Vertical Compressive Strain – ε_{22}), για τις διάφορες στρώσεις και τα τρία εξεταζόμενα υλικά.	97

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Ως οδόστρωμα, ορίζεται η κατασκευή που αποτελείται από επάλληλες στρώσεις επιλεγμένων ή επεξεργασμένων υλικών οι οποίες εδράζονται πάνω στο φυσικό έδαφος για τη δημιουργία του δρόμου, καθώς το φυσικό έδαφος δεν είναι ικανό να αντέξει τις καταπονήσεις της κυκλοφορίας και δεν έχει κατάλληλη επιφάνεια για την ομαλή κίνηση των οχημάτων. Βασικός σκοπός της κατασκευής είναι οι τάσεις που μεταδίδονται στο έδαφος, λόγω των φορτίσεων από τα διερχόμενα οχήματα, να είναι τόσο μειωμένες, ώστε να αποτρέπονται μόνιμες παραμορφώσεις.

Βασική παράμετρος περιγραφής και πρόβλεψης της ελαστικής συμπεριφοράς των ασύνδετων υλικών, όταν η ανάλυση αυτών είναι μη γραμμική, αποτελεί το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης – μέτρο επανάκτησης M_R . Το μέτρο επανάκτησης δεν μπορεί να θεωρηθεί σταθερό, καθώς επηρεάζεται από ποικίλες παραμέτρους της διατομής του οδοστρώματος, αλλά και από τις εκάστοτε συνθήκες φόρτισης και περιβάλλοντος.

Για τον προσδιορισμό του μέτρου επανάκτησης και κατ' επέκταση των τάσεων και των παραμορφώσεων στα κρίσιμα σημεία της διατομής του οδοστρώματος, γίνεται η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος αυτή παρέχει στο μελετητή τη δυνατότητα να εξετάσει την απόκριση της κατασκευής του οδοστρώματος λαμβάνοντας υπόψιν διάφορες παραμέτρους, όπως τα πάχη των στρώσεων, τα διαφορετικά υλικά και το διαφορετικό τρόπο ανάλυσης καθενός από αυτά αλλά και τις συνθήκες και τον τρόπο φόρτισης, δοκιμές που καθίστανται αδύνατο να πραγματοποιηθούν εργαστηριακά.

Ο προσδιορισμός της απόκρισης της κατασκευής του οδοστρώματος, κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικός όχι μόνο για τον σχεδιασμό της διατομής του οδοστρώματος, αλλά και για την αποτελεσματική πρόβλεψη της απαιτούμενης συντήρησης της κατασκευής. Ειδικότερα για την στρώση της βάσης/υπόβασης, η αξιολόγηση της μηχανικής της συμπεριφοράς, είναι ιδιαίτερα σημαντική, αφού αποτελεί θεμελιώδη λίθο της συνολικής κατασκευής καθώς μεταφέρει τις τάσεις και τις παραμορφώσεις στο υποκείμενο υπέδαφος και συντελεί και στη διαστασιολόγηση του πάχους της ασφαλικής στρώσης. Οποιοδήποτε λοιπόν όφελος από την μη γραμμική ανάλυση, που προσεγγίζει καλύτερα την πραγματική συμπεριφορά των

ασύνδετων υλικών της στρώσης βάσης/υπόβασης δεν αφορά μόνο την προαναφερθείσα στρώση, αλλά το σύνολο της εύκαμπτης διατομής οδοστρώματος.

1.2 Στόχος και Μεθοδολογία της μελέτης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς των ασύνδετων υλικών της βάσης/υπόβασης, λαμβάνοντας υπόψιν διάφορες παραμέτρους. Τα υλικά τα οποία εξετάζονται είναι τρία διαφορετικά, με το αρχικό υλικό να προέρχεται από υπό κατασκευή έργο και τα δύο υπόλοιπα να είναι εργαστηριακά παράγωγα αυτού, αποσκοπώντας στην κάλυψη του φάσματος της επιτρεπόμενης κοκκομετρικής διαβάθμισης βάσει των Ελληνικών Προδιαγραφών (ΠΕΤΕΠ 05-03-03-00). Οι παράμετροι και τα δεδομένα των υλικών που χρησιμοποιούνται λαμβάνονται από το Εργαστήριο Οδοποιίας του Ε.Μ.Π. και είναι αποτέλεσμα εργαστηριακών δοκιμών βάσει του προτύπου AASHTO T307.

Η διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς των ασύνδετων υλικών της στρώσης βάσης/υπόβασης με την προσέγγιση της μη γραμμικότητας, καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική τόσο για την διαστασιολόγηση όσο και για την μελλοντική συντήρηση των διατομών εύκαμπτου οδοστρώματος. Συγκεκριμένα, διερευνάται εάν η παραδοχή μη γραμμικής συμπεριφοράς των ασύνδετων υλικών, δύναται να οδηγήσει σε οικονομικότερες διατομές, κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι λαμβάνει υπόψιν μόνο την αναιρέσιμη παραμόρφωση της στρώσης βάσης και ως εκ τούτου η συνολική αντοχή της διατομής προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματική συμπεριφορά της κατασκευής.

Η μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση της μη γραμμικής ανάλυσης, είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και το λογισμικό μέσω του οποίου έγινε η αριθμητική ανάλυση το λογισμικό Abaqus. Μέσω τις μεθόδου υπολογίζονται οι κρίσιμες τάσεις και παραμορφώσεις για τις διάφορες εξεταζόμενες διατομές, κατά τον κατακόρυφο και οριζόντιο άξονα των διατομών, αλλά και σε προκαθορισμένες κρίσιμες θέσεις, που μειώνει τον υπολογιστικό χρόνο ανάλυσης των αποτελεσμάτων. Προκειμένου να προσδιοριστεί το μέτρο επανάκτησης του ασύνδετου υλικού γίνεται χρήση τριών διαφορετικών καταστατικών μοντέλων τα οποία λαμβάνονται υπόψιν, μέσω μιας υπορουτίνας. Η χρήση τριών καταστατικών μοντέλων κρίνεται απαραίτητη προκειμένου να παρατηρηθεί κατά πόσο κάθε κρίσιμη τάση ή παραμόρφωση επηρεάζεται περισσότερο από το εκάστοτε καταστατικό μοντέλο.

Προκειμένου να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα, στην παρούσα μελέτη εκτός από τα καταστατικά μοντέλα, εξετάζονται και άλλοι παράμετροι της διατομής, όπως είναι τα πάχη των στρώσεων της ασφάλτου και της βάσης/υπόβασης και τα τρία διαφορετικά υλικά. Η ανάλυση πραγματοποιείται για 72 διαφορετικούς συνδυασμούς εξεταζόμενων παραμέτρων, γεγονός που αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση για την εφαρμογή μη γραμμικής ανάλυσης ασύνδετου υλικού σε ένα ευρύ φάσμα διατομών εύκαμπτου οδοστρώματος, με υλικά που ανταποκρίνονται σε όλο το φάσμα των Ελληνικών προδιαγραφών, προέρχονται από υφιστάμενο εν Ελλάδι έργο και ως εκ τούτου η παρούσα μελέτη αποσκοπεί στην μελλοντική πρακτική εφαρμογή της μη γραμμικής ανάλυσης για έργα οδοποιίας και στην εκμετάλλευση των πιθανών οφελών που επιφέρει.

1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από συνολικά 6 κεφάλαια. Εξαιρουμένου του παρόντος κεφαλαίου 1 τα υπόλοιπα 6 κεφάλαια είναι τα εξής:

- Το Κεφάλαιο 2, όπου πραγματοποιείται πλήρης παρουσίαση του μέτρου επανάκτησης M_R των υλικών. Αναφέρονται οι μέθοδοι προσδιορισμού του, οι παράγοντες επιρροής του και τα καταστατικά μοντέλα εκτίμησης του.
- Το Κεφάλαιο 3, όπου παρουσιάζονται τα τρία υπό εξέταση υλικά. Παρουσιάζονται οι ιδιότητες των υλικών, όπως είναι οι κοκκομετρική τους διαβάθμιση και η καμπύλες ξηρής πυκνότητας – υγρασίας, αλλά και τα εργαστηριακά αποτελέσματα εκτίμησης του μέτρου επανάκτησης μέσω των παραμέτρων των καταστατικών μοντέλων.
- Το Κεφάλαιο 4, όπου γίνεται περιγραφή της μεθοδολογίας που ακολουθείται για την αριθμητική ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων των διαφόρων διατομών οδοστρώματος.
- Το Κεφάλαιο 5, όπου γίνεται εκτενής ανάλυση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής ανάλυσης. Επιπροσθέτως, γίνονται διάφορες συγκρίσεις όπου εξετάζεται η επιρροή των διαφορετικών παραμέτρων – υλικών – καταστατικών μοντέλων στην συνολική απόκριση της κατασκευής του οδοστρώματος.
- Το Κεφάλαιο 6, όπου αναφέρονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από τα αποτελέσματα της ανάλυσης και των συγκρίσεων του κεφαλαίου 5, και αναφέρονται κάποιες προτάσεις μελλοντικής έρευνας.

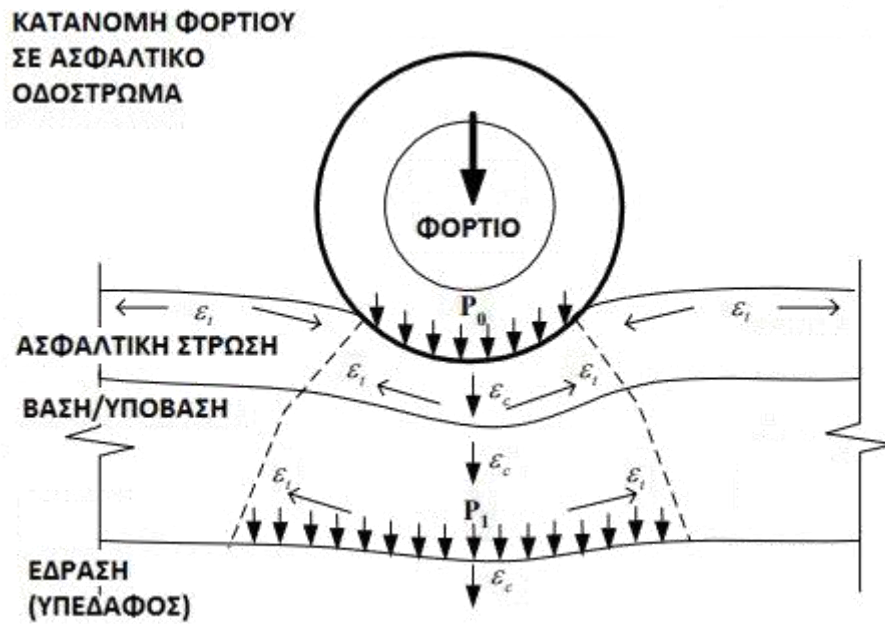
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Γενικές πληροφορίες για τα οδοστρώματα.

Τα οδοστρώματα αποτελούν μηχανικές δομές απαραίτητες στην καθημερινή ζωή, το εμπόριο και την άμυνα. Οι οδικές μεταφορές αποτελούν τον πλέον διαδεδομένο τρόπο μεταφορών στον κόσμο και το συνολικό μήκος του οδικού δικτύου μιας χώρας αποτελεί συχνά το μέτρο εκτίμησης της ανάπτυξής της.

Η σημαντικότερη λειτουργία του οδοστρώματος είναι η αντοχή στο φορτίο που ασκείται από κάποιο όχημα και από την επαναλαμβανομένη φόρτιση, χωρίς να υφίσταται εκτεταμένη μόνιμη παραμόρφωση ή/και ρηγμάτωση και αποφλοιώση. Η πολυεπίπεδη δομή του διασφαλίζει ότι το φορτίο διανέμεται κάτω από τον τροχό, με τρόπο τέτοιο ώστε η φόρτιση της διεπιφάνειας της κάτω στρώσης του οδοστρώματος (βάσης/υπόβασης) με το υπέδαφος να μην είναι ικανή να προκαλέσει προβλήματα. Το σημαντικότερο φορτίο που ασκείται στην επιφάνεια του οδοστρώματος προέρχεται από τον τροχό φορτηγού ή αεροσκάφους.

Παρακάτω στο σχήμα 1 βλέπουμε τις θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται σε ένα οδόστρωμα από τον τροχό ενός οχήματος (Σχήμα 1). Εφόσον τα οδοστρώματα είναι εκτεθειμένα στο περιβάλλον, πρέπει να λαμβάνεται πολύ σοβαρά υπόψιν στο σχεδιασμό τους ο παράγων του ύδατος, το οποίο μπορεί να προέρχεται είτε από βροχή / χιονόπτωση (επιφανειακό ύδωρ), είτε/και από το έδαφος (υπόγειο ύδωρ). Για το λόγο αυτό κατά το σχεδιασμό είναι απαραίτητη η πρόβλεψη επαρκούς αποστράγγισης για το επιφανειακό και το υπόγειο ύδωρ, προκειμένου να διασφαλιστεί η φέρουσα ικανότητά του οδοστρώματος και να αποφευχθούν μόνιμες παραμορφώσεις.



Σχήμα 1: Κατανομή φορτίου σε ασφαλτικό οδόστρωμα (Chen et al 2009).

2.2 Κατηγορίες και δομή οδοστρωμάτων.

Τα οδοστρώματα χωρίζονται σε δυο κύριες κατηγορίες , τα εύκαμπτα και τα δύσκαμπτα.

2.2.1 Δύσκαμπτα οδοστρώματα

Τα δύσκαμπτα οδοστρώματα χρησιμοποιούνται κυρίως στη κατασκευή αεροδρομίων και μεγάλων αυτοκινητοδρόμων. Επιπλέον, συναντώνται σε υψηλής αντοχής βιομηχανικά δάπεδα , σε προβλήτες και δάπεδα λιμένων, όπως και σε υψηλής συχνότητας σταθμούς στάθμευσης (Fwa et al 2005). Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι η κατανομή του φορτίου πραγματοποιείται σε μια ευρεία επιφάνεια του εδάφους έδρασης. Κατασκευάζονται γενικώς στα εξής επίπεδα:

- Πλάκα από σκυρόδεμα (επιφανειακή στρώση). Ανάλογα με την περίπτωση μπορεί να μη φέρει οπλισμό , ή να φέρει διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό καθώς και σε κάποιες περιπτώσεις να γίνεται χρήση μεθόδων προέντασης. Παρέχει την κύρια στήριξη του οδοστρώματος, μια αντισισθητική επιφάνεια κύλισης και εμποδίζει την εισβολή περιττών επιφανειακών υδάτων στην βάση/υπόβαση. Επηρεάζει άμεσα την ένταση των θερμικών τάσεων που αναπτύσσονται στο οδόστρωμα σύμφωνα με τις διαστάσεις των πλακών, καθώς και τις διαστάσεις του έργου. Επιπροσθέτως, πέρα από την πλάκα σκυροδέματος, απαιτούνται ενισχύσεις για τον περιορισμό των θερμοκρασιακών μεταβολών που είναι υπεύθυνες και για τον έλεγχο ρηγμάτωσης της πλάκας. Η διάσταση του αρμού καθορίζεται από τις διαστάσεις της πλάκας.
- Βάση/υπόβαση. Η βάση/υπόβαση παρέχει ομοιόμορφη στήριξη για την επιφανειακή στρώση. Επίσης, εξυπηρετεί στον έλεγχο – περιορισμό συνθηκών παγετού, παρέχει αποστράγγιση στο υπέδαφος, περιορίζει την διόγκωση του υπεδάφους, αποτελεί μια σταθερή βάση κατασκευής για την έδραση της πλάκας σκυροδέματος και εμποδίζει την ανέγερση στην επιφάνεια λεπτόκοκκων υλικών υπεδάφους. Τα δύσκαμπτα οδοστρώματα απαιτούν συνήθως ένα ελάχιστο πάχος στρώσης βάσης/υπόβασης των 100mm. Σε περιπτώσεις όπου το οδόστρωμα σχεδιάζεται αποσκοπώντας στην εξυπηρέτηση αεροσκαφών βάρους μεγαλύτερου των 45,000kg η στρώση απαιτείται να είναι σταθεροποιημένη.
- Υπέδαφος. Το υπέδαφος είναι η συμπτυκνωμένη στρώση εδάφους που αποτελεί το θεμέλιο της κατασκευής του οδοστρώματος. Οι τάσεις που ασκούνται στο υπέδαφος είναι μικρότερες από αυτές που ασκούνται στην επιφανειακή στρώση και από το

υπέδαφος. Οι τάσεις αυτές μειώνονται συναρτήσει του βάθους και η τάση ελέγχου στην γενική περίπτωση επιλέγεται στην διεπιφάνεια υπεδάφους και βάσης/υπόβασης. Οι ανώτερες του υπεδάφους στρώσεις εξασφαλίζουν επαρκή μείωση των τάσεων, έτσι ώστε οι τάσεις στο υπέδαφος να μην προκαλούν ιδιαίτερη παραμόρφωση και μετάθεση αυτού. Αναγκαία κρίνεται η διερεύνηση των συνθηκών στη στάθμη του υπεδάφους, καθώς αυτό αποτελεί θεμέλιο της κατασκευής.

Σημειώνεται επίσης ότι σε περιοχές με πολύ χαμηλή θερμοκρασία ενδέχεται να παρεμβάλλεται μεταξύ του υπεδάφους και της βάσης/υπόβασης μια άλλη στρώση υπεύθυνη για την προστασία του υπεδάφους από συνθήκες παγετού.



Σχήμα 2: Τυπική διατομή δύσκαμπτου οδοστρώματος.

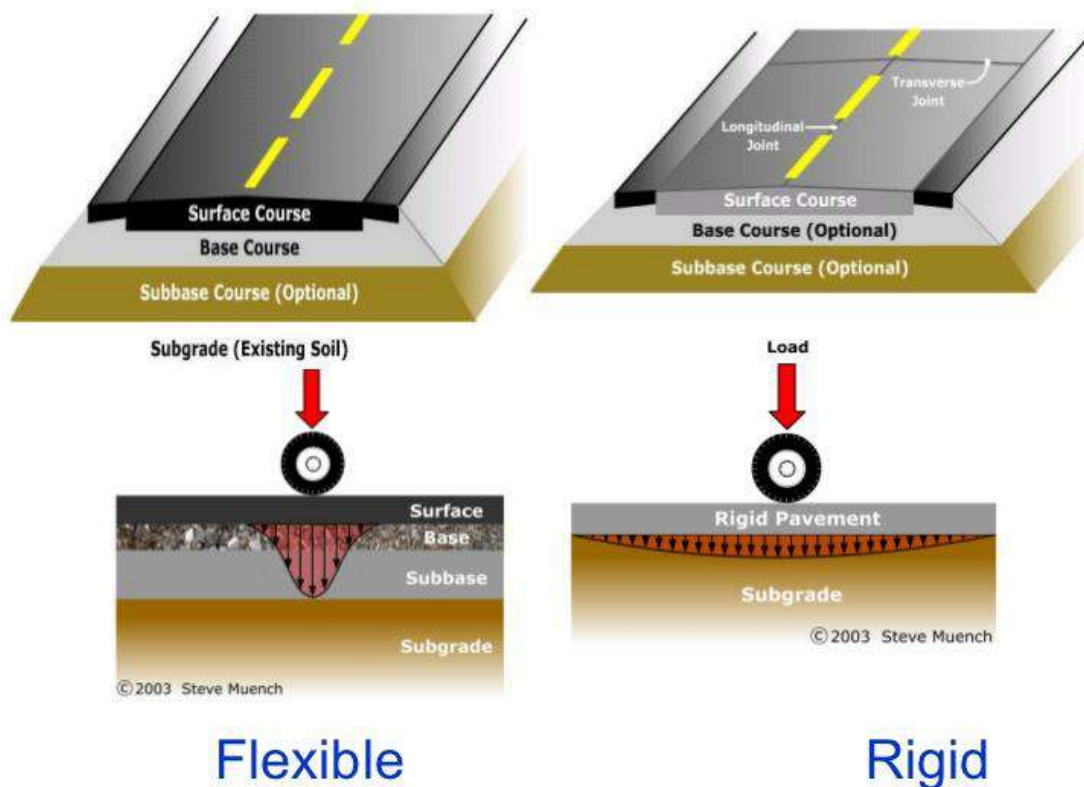
2.2.2 Εύκαμπτα οδοστρώματα.

Τα εύκαμπτα οδοστρώματα αποτελούνται συνήθως από τρεις ή τέσσερις στρώσεις. Στα εύκαμπτα οδοστρώματα η μεγαλύτερη καταπόνηση εντοπίζεται στην επιφανειακή στρώση και η τάση μειώνεται συναρτήσει του βάθους του οδοστρώματος. Κατά συνέπεια, τα καλύτερης ποιότητας υλικά τοποθετούνται στην επιφάνεια, ενώ χαμηλότερης ποιότητας υλικά χρησιμοποιούνται για τις υπόλοιπες στρώσεις. Ο όρος εύκαμπτο χρησιμοποιείται καθώς η ασφαλτος δύναται να καμπυλώνεται και να παραμορφώνεται ελαφρώς και στην συνέχεια να επιστρέφει στην αρχική της θέση, όταν εφαρμοστεί και απομακρυνθεί η φόρτιση. Βέβαια αυτές οι παραμορφώσεις δύναται εν μέρει να μονιμοποιηθούν (Mamlouk, 2005).

Δομικά ένα εύκαμπτο οδόστρωμα ή ένα οδόστρωμα με στρώσεις από κατεργασμένες με υδραυλικές κονίες αδρανή (ημιάκαμπτο οδόστρωμα) ή ένα οδόστρωμα με στρώση έδρασης από σταθεροποιημένα επιτόπου εδαφικά υλικά περιλαμβάνει (Σχήμα 3):

- Τις ασφατικές στρώσεις, με συνολικό πάχος που συνήθως κυμαίνεται - ανάλογα με την κυκλοφορία - από περίπου 4 cm έως 35 cm . Οι ασφατικές στρώσεις αποτελούνται από:
 - τη στρώση κύλισης, η οποία πρέπει να εξασφαλίζει τα απαιτούμενα αντιολισθητικά χαρακτηριστικά και την απαιτούμενη ομαλότητα με πάχος, που ανάλογα με το αντιολισθητικό ασφαλτόμιγμα που χρησιμοποιείται, κυμαίνεται συνήθως από μερικά mm μέχρι 50 mm.
 - τη συνδετική στρώση, η οποία αποτελεί μαζί με την υποκείμενη ασφατική βάση τις κυρίως φέρουσες ασφατικές στρώσεις. Την ασφατική βάση, η οποία στα αμιγώς εύκαμπτα οδοστρώματα επιπονείται σε κόπωση ενώ στα ημιάκαμπτα οδοστρώματα μπορεί να παραληφθεί.
- Τις στρώσεις βάσης που στα :
 - αμιγώς εύκαμπτα οδοστρώματα αποτελείται από καλώς διαβαθμισμένο θραυστό αμμοχάλικο πάχους γενικά από 10 cm έως 30 cm (ΕΛΟΤ /EN 13242)

- ημιάκαμπτα οδοστρώματα αποτελείται από στρώση σταθεροποιημένου/κατεργασμένου αμμοχάλικου πάχους γενικά από 15 cm έως 35 cm (ΕΛΟΤ/EN 14227-1, 2, και 3)
- Τις στρώσεις βάσης/υπόβασης που στα:
 - αμιγώς εύκαμπτα οδοστρώματα αποτελείται από καλώς διαβαθμισμένο αμμοχάλικο (συλλεκτό ή θραυστό) πάχους γενικά από 10 έως 30 cm (ΕΛΟΤ /EN13242)
 - ημιάκαμπτα οδοστρώματα μεγάλης κυκλοφορίας αποτελείται από στρώση από σταθεροποιημένο/κατεργασμένο αμμοχάλικο πάχους γενικά από 15 cm έως 25 cm (ΕΛΟΤ/EN 14227- 1, 2, και 3)
 - Σε ορισμένες περιπτώσεις (μέτρια κυκλοφορία, μεγάλη φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης) η βάση/υπόβαση μπορεί να παραληφθεί, όταν η στρώση βάσης κατασκευαστεί σε μεγάλο πάχος (πχ 30 ή 35 cm).
- Τη στρώση έδρασης η οποία είναι:
 - μία στρώση πάχους, συνήθως 50 cm - 70 cm, επιλεγμένου εδαφικού υλικού ή μεταφερόμενου θραυστού ή φυσικού - συλλεκτού αμμοχαλικού (χωρίς απαιτήσεις ως προς την διαβάθμιση)
 - μία ή δύο στρώσεις από σταθεροποιημένο εδαφικό υλικό (EN 14227-10 έως και 14) συνολικού πάχους γενικά από 40 cm - 60 cm. Στις περιπτώσεις αυτές, ανάλογα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σταθεροποιημένου υλικού, είναι δυνατόν να γίνουν σημαντικές μειώσεις στα πάχη των στρώσεων του οδοστρώματος και ειδικότερα στις ασφατικές στρώσεις. Σημειώνεται ότι τα τελευταία χρόνια τα οδοστρώματα με σταθεροποιημένες στρώσεις έδρασης παρουσιάζουν σημαντικά οικονομικά, περιβαλλοντικά και τεχνικά πλεονεκτήματα και βρίσκουν εκτεταμένη εφαρμογή.



Σχήμα 3: Σύγκριση εύκαμπτου (αριστερή εικόνα) με δύσκαμπτου οδοστρώματος (δεξιά εικόνα) (Muench, 2003, Pavement Tools Consortium) .

Σε ένα γενικότερο πλαίσιο, η ομαλή λειτουργία (service life) ενός εύκαμπτου οδοστρώματος, διασφαλίζεται με τον κατάλληλο σχεδιασμό αυτού, συνήθως για 20-30 χρόνια. Το απαιτούμενο πάχος της κάθε στρώσης του οδοστρώματος ποικίλει σε κάθε περίπτωση, και είναι συνάρτηση των χρησιμοποιημένων υλικών, του εύρους, των προβλεπόμενων συνθηκών φόρτισης αυτού (κυκλοφοριακές συνθήκες), των περιβαλλοντικών συνθηκών και της επιθυμητής διάρκειας ζωής του έργου. Προκειμένου λοιπόν, να επιτευχθούν οι επιθυμητοί στόχοι, όλοι αυτοί οι παράγοντες λαμβάνονται υπόψη στην εκάστοτε μελέτη (Mamlouk 2005). Συγκεκριμένα, καθώς η κατασκευή του εύκαμπτου οδοστρώματος προϋποθέτει τη μετάβαση των τάσεων από την ανώτερη προς τις κατώτερες στρώσεις αυτού, προκειμένου να ελαττώνονται τελείως στην στρώση έδρασης, τα υλικά των στρώσεων και η αντοχή αυτών κρίνεται πολύ σημαντική. Όσον αφορά στην αντοχή των αδρανών υλικών που χρησιμοποιούνται, βασικός εκτιμητής καθίσταται, μεταξύ άλλων, το μέτρο επανάκτησης M_R .

2.3 Μηχανική συμπεριφορά ασύνδετου υλικού.

2.3.1 Ορισμός του μέτρου επανάκτησης M_R

Η μηχανική συμπεριφορά του ασύνδετου υλικού είναι περίπλοκη και η κατανόηση αυτής καθίσταται απαραίτητη τόσο για τη συμπεριφορά του οδοστρώματος όσο και για τα μοντέλα μελέτης των επιδόσεών του. Η συμπεριφορά του ασύνδετου υλικού στην αξονική φόρτιση που προκαλεί ο τροχός ενός οχήματος είναι μη γραμμική ελαστική.

Αρχικά, κατά τα πρώτα στάδια της φόρτισης το ασύνδετο υλικό υφίσταται πλαστική παραμόρφωση. Οι παραμένουσες παραμορφώσεις προκαλούνται, κατά κύριο λόγο, εξαιτίας της αναδιάταξης των αδρανών προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα μεταξύ τους κενά. Είναι επιθυμητό να οφείλονται είτε στη συμπίκνωση (κίνηση βαρέων οχημάτων όταν κατασκευάζεται το έργο), είτε στο βάρος των υπερκείμενων ασφαλικών στρώσεων.

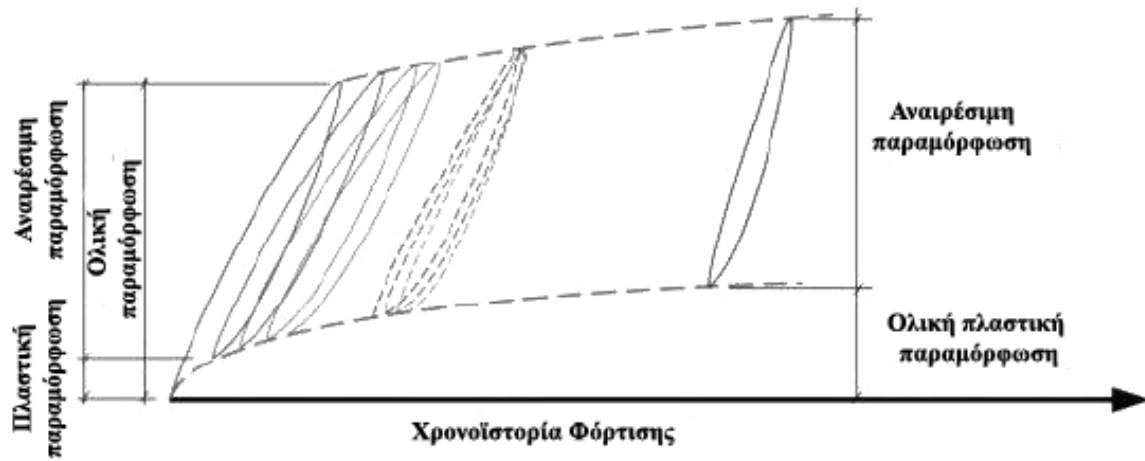
Όπως φαίνεται παρακάτω (σχήμα 4) , οι παραμένουσες παραμορφώσεις αυξάνονται αρχικά κατά τις πρώτες επαναλήψεις φόρτισης και έπειτα διατηρούνται σχεδόν σταθερές ανεξάρτητα από περαιτέρω φορτίσεις. Κατά συνέπεια, υπό φυσιολογικές συνθήκες κυκλοφορίας θεωρούνται αμελητέες. Όποιες πρόσθετες παραμορφώσεις προκύπτουν κρίνονται ελαστικές, δηλαδή αναιρέσιμες. Όσον αφορά τις ελαστικές παραμορφώσεις, το καταλληλότερο μέτρο ελαστικότητας για τη μηχανική συμπεριφορά του ασύνδετου υλικού είναι το μέτρο επανάκτησης M_R . Ορίζεται ως το πηλίκο της αποκλίνουσας τάσης σ_d , προς την τιμή της αξονικής ελαστικής παραμόρφωσης ε_r (αναιρέσιμη παραμόρφωση) τη στιγμή που το φορτίο έχει σταματήσει να εφαρμόζεται (Li et al. 2010, Λοϊζος και Πλατή 2013).

Με βάση το Σχήμα 5 μέτρο επανάκτησης ορίζεται ως :

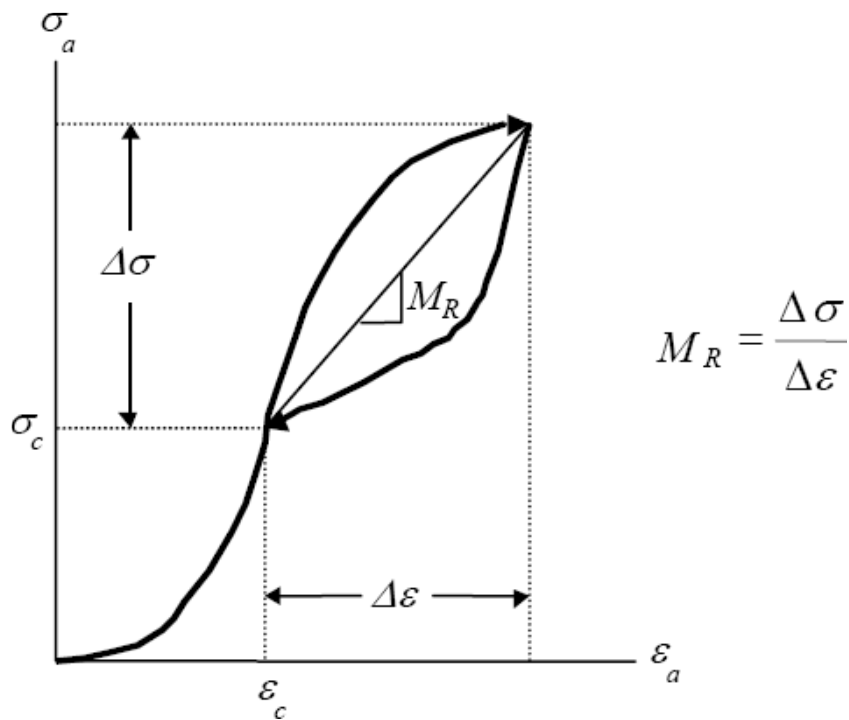
$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r}$$

Όπου:

- $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ ορίζεται η πρόσθετη αποκλίνουσα τάση και ε_r η αναιρέσιμη – ανακτώμενη παραμόρφωση. (σχήμα 6)



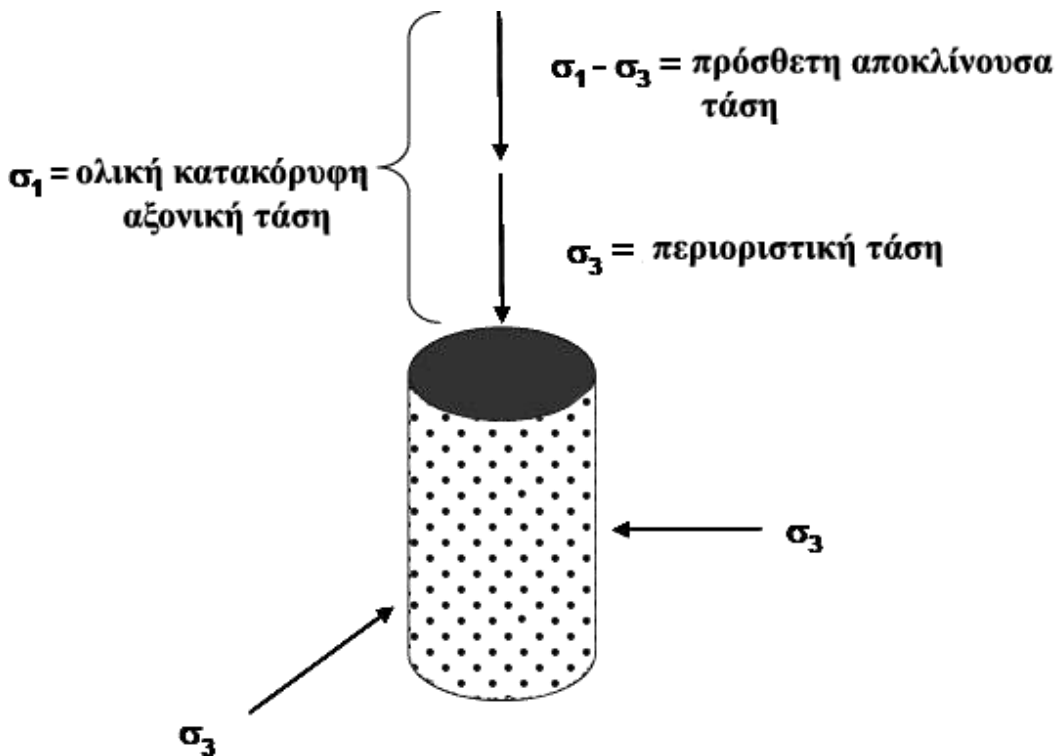
Σχήμα 4: Συμπεριφορά κοκκώδους υλικού υπό επαναλαμβανόμενη-κυκλική φόρτιση (Thom & Brown, 1988).



Σχήμα 5: Ορισμός μέτρου επανάκτησης.

2.3.2 Προσδιορισμός του μέτρου επανάκτησης.

Το μέτρο επανάκτησης υπολογίζεται είτε άμεσα είτε έμμεσα. Στην μεν πρώτη περίπτωση, με εργαστηριακές δοκιμές επαναλαμβανόμενου τριαξονικού φορτίου σταθερού εύρους (σχήμα 6), στην δε άλλη λαμβάνοντας υπόψη άλλες τυποποιημένες δοκιμές ή κατά την κρίση του μελετητή κατά την επεξεργασία δεδομένων in-situ δοκιμών, εμπειρικά.



Σχήμα 6: Τάσεις υπό τριαξονική φόρτιση δοκιμίου.

Όπου:

- σ_1 ορίζεται η ολική κατακόρυφη αξονική τάση
- σ_3 ορίζεται η περιοριστική τάση γύρω από το δοκίμιο

Ειδικότερα, σύμφωνα με τον οδηγό για τον σχεδιασμό οδοστρωμάτων του Αμερικανικού Οργανισμού Αυτοκινητοδρόμων και Μεταφορών (AASHTO, 1993) υιοθετούνται τέσσερις προσεγγίσεις για τον καθορισμό του μέτρου επανάκτησης:

- ❖ Εργαστηριακές δοκιμές σύμφωνα με τυποποιημένες διαδικασίες. Συγκεκριμένα πραγματοποιείται:

- Δοκιμή σε δείγματα που αντιπροσωπεύουν τις συνθήκες πυκνότητας και υγρασίας του έργου ή σε δείγματα με μέγιστη ξηρή πυκνότητα και βέλτιστη περιεχόμενη υγρασία, όπως διαπιστώνονται στο εργαστήριο.
- Η επιλογή του κατάλληλου καταστατικού μοντέλου το οποίο προσαρμόζεται στα εργαστηριακά αποτελέσματα, αποσκοπώντας στην εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης για διάφορους συνδυασμούς τάσεων.
- ❖ Εξαγωγή αποτελεσμάτων λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα από μη-καταστρεπτικές δοκιμές (non-destructive testing, NDT), όπως η δοκιμή με το Παραμορφοσίμετρο Πίπτοντος Βάρους, (Falling Weight Deflectometer FWD).
- ❖ Εκτίμηση του μέτρου επανάκτησης μέσω συσχέτισης με άλλες φυσικές ιδιότητες των υλικών (όπως ο δείκτης αντίστασης R, το CBR, ο δείκτης PI κλπ.)
- ❖ Ορισμός τιμής με βάση προηγούμενη εμπειρία με «παρεμφερή» εδάφη ή κοκκώδη υλικά.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται χρήση των τιμών των καταστατικών μοντέλων για τα εξεταζόμενα υλικά, οι οποίες προκύπτουν έπειτα από εργαστηριακές δοκιμές, βάσει του προτύπου AASHTO (T307-99).

2.3.3 Παράγοντες επιρροής

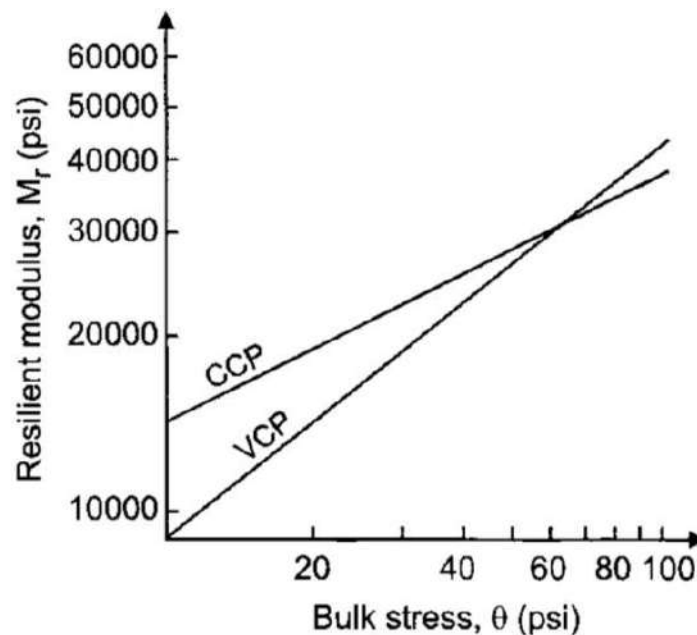
Η αξιολόγηση της ελαστικής συμπεριφοράς μιας ασύνδετης κοκκώδους στρώσης, υπό διαφορετικές συνθήκες, κρίνεται απαραίτητη για λόγους που αφορούν κυρίως το σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων. Πληθώρα ερευνητών, όπως οι Hicks and Monismith (1971) και Lekarp et al (2000), αναφέρουν τη σημαντικότητα της κατανόησης των παραγόντων που επηρεάζουν το μέτρο επανάκτησης M_R . Ειδικότερα οι κυριότεροι παράγοντες είναι η επιβαλλόμενη τάση (stress), η πυκνότητα (density), το ποσοστό υγρασίας (moisture content), το ποσοστό σε λεπτόκοκκο υλικό (fines content) και ο τύπος και το σχήμα των κόκκων του ασύνδετου υλικού (material type and shape).

2.3.3.1 Η επιβαλλόμενη τάση (Applied stress)

Ο Kolisoja (1997) κατέληξε ότι το επίπεδο της επιβαλλόμενης τάσης είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά την ιδιότητα της επανάκτησης του ασύνδετου υλικού (Unbound Granular Material – UMG). Πολλοί ερευνητές (Morgan 1996; Hicks and Monismith 1971; Brown and Hyde 1975; Sweere 1990; Kolisoja 1997) εντοπίζουν ότι το μέτρο επανάκτησης είναι υψηλά εξαρτώμενο από το άθροισμα των κύριων τάσεων (sum of principal stresses), και από την περιοριστική – πλευρική τάση (confining stress). Συγκεκριμένα, το M_R αυξάνει ραγδαία με την αύξηση του αθροίσματος των κύριων τάσεων και της περιοριστικής – πλευρικής τάσης.

Ο Morgan (1966) ανέφερε ότι αυξάνοντας τη πρόσθετη αξονική τάση ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$, Deviator stress), το M_R μειώνεται ελαφρά, υπό σταθερή πλευρική τάση. Παρόλα αυτά, ο Hicks (1970) και οι Stolle et al. (2009) πρότειναν ότι το εύρος της ασκούμενης πρόσθετης αξονικής τάσης πρακτικά δεν επηρέαζε το M_R , είτε μπορούσε να αμεληθεί, δεδομένου ότι δεν δημιουργείτε υπερβολική πλαστική παραμόρφωση. Απεναντίας, οι Hicks and Monismith (1971) ανέφεραν ότι το υλικό παρουσιάζει ένα ελαφρύ μαλάκωμα, υπό την εφαρμογή χαμηλής πρόσθετης αξονικής τάσης, ενώ όταν ασκείται υψηλότερη πρόσθετη αξονική τάση παρουσιάζοταν αύξηση της σκληρότητας του υλικού. Επίσης αναφέρουν, αύξηση του M_R καθώς αυξάνεται η περιοριστική – πλευρική τάση, κάτι που βρίσκει σύμφωνους τους Brown and Hyde (1975). Επιπροσθέτως, κατέληξαν στο ότι η πρόσθετη αξονική τάση και η μόνιμη παραμόρφωση μετά από 10000 κύκλους φόρτισης, είναι σε αναλογία με όταν ασκείται σταθερή πλευρική – περιοριστική τάση.

Σε εργαστηριακές δοκιμές υπολογισμού του μέτρου επανάκτησης, χρησιμοποιείται όχι μόνο σταθερή πλευρική - περιοριστική πίεση (Constant Confining Pressure – CCP), αλλά και μεταβλητή πλευρική – περιοριστική πίεση (Variable Confining Pressure – VCP). Οι Allen and Thompson (1974) ανέφεραν ότι το M_R υπολογίζεται υψηλότερο σε δοκιμές με σταθερή πλευρική – περιοριστική πίεση (CCP), από ότι με μεταβλητή (VCP), σχήμα 9. Οι Brown and Hyde (1975) κατέληξαν στις ίδιες τιμές του M_R είτε από CCP, είτε από VCP δοκιμές, όταν η σταθερή πλευρική – περιοριστική πίεση στην CCP δοκιμή ήταν ίση της μέσης τιμής της μεταβλητής περιοριστικής πίεσης στην VCP δοκιμή.



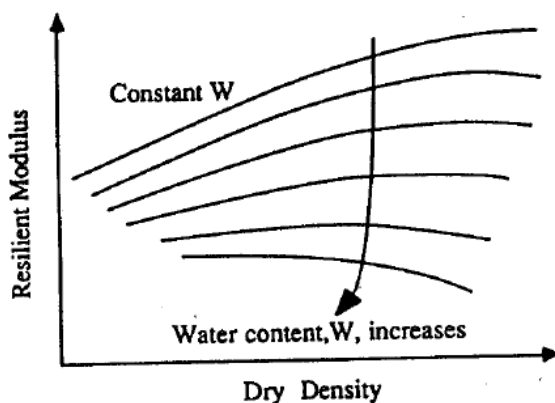
Σχήμα 7: Αποτελέσματα υπολογισμού του M_R σε δοκιμές με σταθερή πλευρική – περιοριστική πίεση (CCP), σε σύγκριση με μεταβλητή (VCP), (Allen and Thompson 1974).

2.3.3.2 Η Πυκνότητα (Density)

Σε ένα γενικότερο πλαίσιο, η αύξηση της πυκνότητας ενός κοκκώδους υλικού, θα είχε ως συνέπεια την σκλήρυνση (stiffness) του επιπέδου της βάσης/ υπόβασης, καθώς και την μείωση τόσο της μόνιμης (permanent) όσο και της επανακτώμενης (resilient) παραμόρφωσης, υπό την επίδραση επαναλαμβανόμενου φορτίου. Πολλοί ερευνητές, (ανάμεσά τους οι Seed et al. 1962; Trollope et al. 1962; Hicks and Monismith 1971; Thom and Brown 1989; Barksdale and Ithani 1989; Kolisoja 1997; Andrei 2009), συνέβαλαν στην μελέτη της επιρροής της πυκνότητας στο μέτρο επανάκτησης, αν και αυτή δεν είναι απολύτως κατανοητή. Κάποιοι ερευνητές πρότειναν ότι η αύξηση της πυκνότητας προκαλεί αύξηση στις τιμές του M_R . Ο Trollope et al. (1962), πραγματοποιώντας δοκιμές επαναλαμβανόμενης φόρτισης σε δείγματα ομοιόμορφης άμμου που διέφεραν ως προς την πυκνότητα, παρατήρησε αύξηση του M_R της τάξεως του 50% ανάμεσα σε χαλαρά και πυκνότερα δείγματα. Ο Kolisoja (1997), επίσης παρατήρησε αύξηση του M_R , με την αύξηση της πυκνότητας. Ειδικότερα, προκειμένου να επιτευχθεί η αύξηση της πυκνότητας του υλικού, απαιτείται η εφαρμογή περαιτέρω συμπύκνωσης αυτού, κάτι που προκαλεί αύξηση των σημείων επαφής των κόκκων. Η αύξηση των σημείων επαφής προκαλεί την μείωση της τάσης επαφής ανά κόκκο και άρα μειώνεται η παραμόρφωση στα σημεία επαφής και το M_R αυξάνεται.

Παρόλα αυτά, οι Thom and Brown (1989) ανέφεραν ότι η επιρροή της πυκνότητας είναι σχετικώς ασήμαντη, και ότι σημαντικότεροι παράγοντες αποτελούν ο τύπος του υλικού και τα επίπεδα φόρτισης. Οι Hicks and Monosmith (1971), πραγματοποίησαν εργαστηριακές δοκιμές σε μερικώς θραυσμένα αδρανή δείγματα και παρατήρησαν αύξηση του μέτρου επανάκτησης M_R , με την αύξηση της σχετικής πυκνότητας του υλικού. Αντίθετα, στην περίπτωση δοκιμών με πλήρως θραυσμένα αδρανή, η αύξηση της σχετικής πυκνότητας δεν επηρέασε τις τιμές του M_R . Επιπροσθέτως, διαπίστωσαν ότι η επιρροή της πυκνότητας μειώνεται, όταν το ασύνδετο υλικό περιέχει υψηλότερο ποσοστό σε λεπτόκοκκο υλικό.

Οι Barksdale and Ithani (1989), παρατήρησαν ότι υπό χαμηλά επίπεδα φόρτισης, η αύξηση της πυκνότητας προκαλεί ραγδαία αύξηση του M_R , ενώ υπό υψηλά επίπεδα φόρτισης η επιρροή της πυκνότητας στο M_R , κρίνεται λιγότερο σημαντική. Έρευνες έδειξαν ότι το μέτρο επανάκτησης δεν εξαρτάται σημαντικά από την πυκνότητα, όταν η τελευταία είναι υψηλότερη της βέλτιστης τιμής της (Vuong 1992). Οι Seed et al. (1962) ανέφερε ότι το M_R είναι χαμηλότερο σε χαλαρότερα δείγματα με χαμηλό ποσοστό υγρασίας. Απεναντίας, το M_R είναι υψηλότερο σε πυκνότερα δείγματα με υψηλό ποσοστό υγρασίας. Αναλυτικότερα, οι παρατηρήσεις τους φαίνονται στο σχήμα 10 που ακολουθεί.



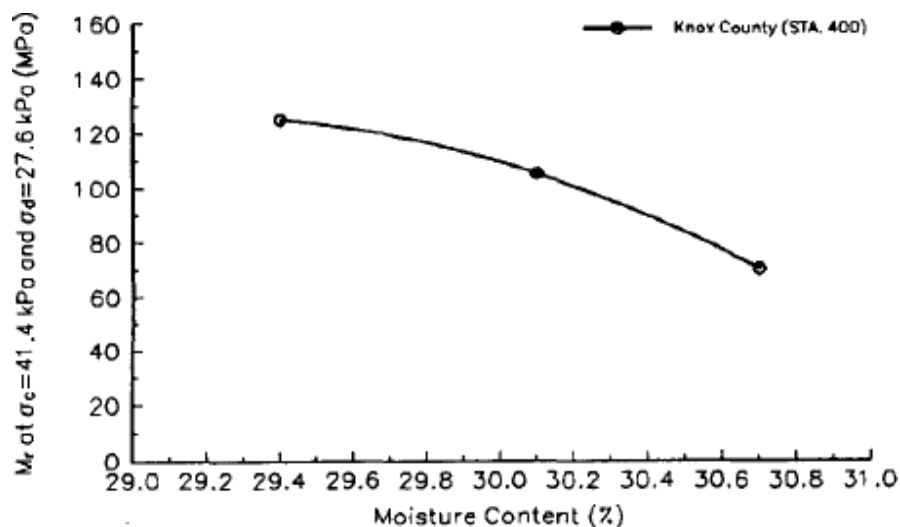
Σχήμα 8: Τιμές του μέτρου επανάκτησης μεταβάλλοντας το ποσοστό υγρασίας, (Seed et al. 1962)

Λαμβάνοντας υπόψη εργαστηριακά δεδομένα, ο Andrei (2009) συμφώνησε ότι η πυκνότητα επηρεάζει σημαντικά τη σχέση μεταξύ του M_R και του ποσοστού υγρασίας και πρότεινε την εισαγωγή της πυκνότητας ως όρο καθορισμού του μοντέλου του M_R , το οποίο έχει αναπτυχθεί βασιζόμενο στην περιεκτικότητα σε υγρασία. Οι Alam et al. (2010), ανέφεραν ότι η ξηρή πυκνότητα έχει θετικό, ενώ η περιεκτικότητα σε υγρασία έχει αρνητικό αντίκτυπο στο M_R .

2.3.3.3 Ποσοστό Υγρασίας (moisture content)

Το υπέδαφος του οδοστρώματος μπορεί γενικά να προετοιμαστεί με δυο διαφορετικούς τρόπους. Ιδανικότερη είναι η συμπύκνωση του υλικού υπό συνθήκες βέλτιστου ποσοστού υγρασίας (Optimum Moisture Content – OMC) και μέγιστης ξηρής πυκνότητας (Maximum Dry Density – MDD), κάτι το οποίο δεν είναι πάντα δυνατό και τα οδοστρώματα κατασκευάζονται σε υπεδάφη υπό τις υπάρχουσες συνθήκες του έργου. Σε κάθε περίπτωση, μετά την κατασκευή το ποσοστό υγρασίας έρχεται σε ισορροπία με τις συνθήκες του περιβάλλοντος (Yang, 2005; Uzan, 1998) και έπειτα ποικίλει λόγω των εποχικών μεταβολών. Λαμβάνοντας υπόψη την μεταβλητότητα του ποσοστού υγρασίας του υλικού του υπεδάφους, ακόμα κι αν αυτό έχει προετοιμαστεί σύμφωνα με τις βέλτιστες προδιαγραφές υγρασίας και πυκνότητας, καθίσταται απαραίτητο να κατανοήσουμε τη σχέση του με το μέτρο επανάκτησης M_R .

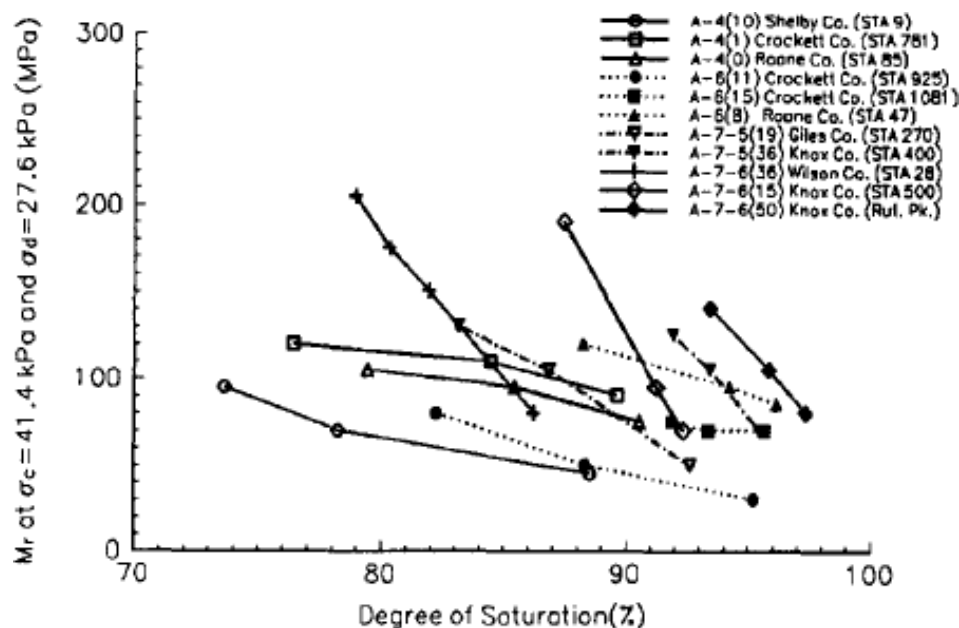
Γενικά, στα υπεδάφη με υψηλό ποσοστό σε λεπτόκοκκο υλικό, παρατηρείται μείωση του M_R με την αύξηση στο ποσοστό υγρασίας (Drumm 1997). Ακολουθώντας, η μείωση στο M_R οδηγεί σε αυξημένη παραμόρφωση του οδοστρώματος, κάτι που μειώνει τη λειτουργική “ζωή” του έργου. Προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή του ποσοστού υγρασίας στο μέτρο επανάκτησης, έχουν πραγματοποιηθεί εργαστηριακές δοκιμές, όπου τα δείγματα είτε έχουν συμπτυκνωθεί σε διαφορετικές συνθήκες υγρασίας, είτε συμπτυκνώθηκαν με ένα συγκεκριμένο ποσοστό υγρασίας και έπειτα υποβλήθηκαν σε μεταβολές ποσοστού υγρασίας μετά την κατασκευή. Κρίνεται αξιοσημείωτο, ότι υπό πραγματικές συνθήκες περιβάλλοντος έργου, το υπέδαφος υπόκειται σε μεταβολές ποσοστού υγρασίας, μετά την κατασκευή του, και ως εκ τούτου η διαφορετικότητα στα ποσοστά υγρασίας κατά την συμπύκνωση, δεν προσομοιώνει με ακρίβεια τις μεταβολές που προκύπτουν με το πέρασμα της κατασκευής. Αυτό συμβαίνει διότι οι μεταβολές στο ποσοστό υγρασίας ενός συμπτυκνωμένου υλικού επιφέρουν αλλαγές στη δομή του (Drumm 1997).



Σχήμα 9: Επίδραση της αύξησης της υγρασίας μετά την κατασκευή στο μέτρο επανάκτησης, (Drumm 1997)

Ενώ είναι γενικώς αποδεκτό ότι η μείωση του ποσοστού υγρασίας οδηγεί σε μείωση του μέτρου επανάκτησης, πρέπει επίσης να γίνει κατανοητό ότι η επίδραση, των αλλαγών του ποσοστού υγρασίας, στο M_R , διαφέρει για διαφορετικούς τύπου του υλικού (Drumm 1997). Επιπροσθέτως, ο Vuong (1992) παρατήρησε ότι η αύξηση του M_R μειώνοντας το ποσοστό υγρασίας, δεν ήταν σημαντική όταν το τελευταίο ήταν χαμηλότερο από το 70% του βέλτιστου ποσοστού υγρασίας (OMC). Οι Hicks and Monosmith (1971) απέδειξαν ότι το M_R μειώνεται σταθερά, καθώς αυξάνεται το ποσοστό υγρασίας πέραν της βέλτιστης τιμής του.

Μια άλλη προσέγγιση αξιολόγησης της επιρροής της υγρασίας στο μέτρο επανάκτησης, είναι να λάβουμε υπόψη τη σχέση μεταξύ του M_R και του επιπέδου κορεσμού (Degree of Saturation- S). Παρόλο που, εκ πρώτης όψεως, η σχέση μεταξύ του M_R και του επιπέδου κορεσμού, δείχνει παρόμοια αυτής μεταξύ του M_R και του ποσοστού υγρασίας, οφείλουμε να παρατηρήσουμε ότι η εκτίμηση του επιπέδου κορεσμού περιλαμβάνει και την επιρροή της πυκνότητας. Από τη στιγμή λοιπόν, που ο βαθμός κορεσμού εξαρτάται και από το ποσοστό υγρασίας και από την πυκνότητα του υλικού, αποτελεί καλύτερη περιγραφή της κατάστασής του (Drumm 1997).



Σχήμα 10: Επίδραση του κορεσμού μετά την συμπύκνωση στο μέτρο επανάκτησης (Drumm 1997).

Εν συνεχεία, σε καλά διαβαθμισμένα υλικά με υψηλό ποσοστό σε λεπτόκοκκο αδρανές, η επίδραση του ποσοστού υγρασίας καθίσταται ίσως ο σημαντικότερος παράγοντας εκτίμησης του M_R (Raad et al. 1992). Το φαινόμενο αυτό προκαλείται από το γεγονός ότι στους πόρους των προαναφερθέντων υλικών το νερό συγκρατείται ευκολότερα, ενώ στα κακώς διαβαθμισμένα υλικά, το νερό ρέει – στραγγίζει πιο εύκολα. Οι Dawson et al. (1996) μελέτησαν μια σειρά καλώς διαβαθμισμένων δειγμάτων ασύνδετων αδρανών υλικών και παρατήρησαν αύξηση του μέτρου επανάκτησης καθώς αυξάνεται το ποσοστό υγρασίας, σε τιμές όμως κάτω από τη βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία. Προφανώς αυτό οφείλεται στην ανάπτυξη μηχανισμού αναρρόφησης στους πόρους των αδρανών. Πέρα από το βέλτιστο ποσοστό σε υγρασία, καθώς το υλικό γίνεται περισσότερο κορεσμένο και αναπτύσσεται υπερβολική πίεση του νερού των πόρων, η επίδραση αντιστρέφεται και το M_R αρχίζει να μειώνεται αρκετά γρήγορα.

2.3.3.4 Ποσοστό σε λεπτόκοκκο υλικό (fines content)

Η επίδραση του ποσοστού σε λεπτόκοκκο υλικό στην σκληρότητα του εδάφους δεν είναι ακόμα πλήρως κατανοητή, ωστόσο πολλοί ερευνητές (Hicks and Monosmith 1971; Thom and Brown 1987; Barksdale and Ithani 1989; Kamal et al. 1993) ασχολήθηκαν με αυτή.

Οι Hicks and Monosmith (1971), μελέτησαν την επιρροή του ποσοστού σε λεπτόκοκκο υλικό σε δύο διαφορετικούς τύπους αδρανών υλικών, τα οποία ήταν είτε μερικώς, είτε πλήρως θραυσμένα αδρανή. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών, παρατήρησαν διαφορές ανάμεσα στα δύο αυτά υλικά. Το M_R των μερικώς θραυσμένων αδρανών, μειωνόταν με την αύξηση του ποσοστού λεπτόκοκκου υλικού, ενώ στα πλήρως θραυσμένα αδρανή συνέβαινε το αντίθετο αποτέλεσμα. Επιπροσθέτως, οι Hicks and Monosmith (1971) κατέληξαν ότι η επίδραση του ποσοστού σε λεπτόκοκκο υλικό έχει πολύ μικρό αντίκτυπο στο M_R , όταν το ποσοστό αυτό είναι της τάξεως του 2-10%. Οι Barksdale and Ithani (1989) από την άλλη, ανέφεραν ότι το M_R μειώθηκε κατά 60%, όταν το ποσοστό σε λεπτόκοκκο υλικό αυξήθηκε από 0 % σε 10%. Σε μελέτη που πραγματοποίησαν οι Hicks and Jorenby (1986), παρατήρησαν μια αρχικά αυξανόμενη δυσκαμψία και στη συνέχεια σημαντική μείωση, προσθέτοντας στο θραυσμένο δείγμα λεπτόκοκκο υλικό. Αυτό προκύπτει διότι προσθέτοντας λεπτόκοκκο υλικό αυξάνονται τα σημεία επαφής, καθώς γεμίζουν τα κενά των πόρων και άρα παρατηρείται μια αρχική βελτίωση της δυσκαμψίας του υλικού. Έπειτα όμως, τα περίσσια λεπτόκοκκα σωματίδια εκτοπίζουν τους χονδρούς κόκκους, και ως εκ τούτου, η μηχανική απόδοση βασίζεται μόνο στο λεπτόκοκκο υλικό του δείγματος και άρα προκαλείται μείωση της αντοχής. Όσον αφορά αδρανή υλικά με το ίδιο ποσοστό σε λεπτόκοκκο υλικό και παρόμοιο σχήμα της κατανομής του μεγέθους των κόκκων, έχειδειχθεί ότι το μέτρο επανάκτησης αυξάνεται καθώς αυξάνεται το μέγεθος του μέγιστου κόκκου (Gray, 1962, Thom, 1988, Kolisoja, 1997). Σύμφωνα με τον Kolisoja (1997), η ιδιαίτερη εξήγηση της παραπάνω συμπεριφοράς είναι ότι το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου που ενεργεί σε μια ασύνδετη κοκκώδη μορφή, είτε είναι στρώση, είτε δοκίμιο ελέγχου, μεταδίδεται από σωματίδιο σε σωματίδιο.

Επιπλέον, οι Thom (1987), Kamal et al. (1993), Kancherla (2004), συμφώνησαν ότι το M_R , μειώνεται γενικώς σε δείγματα που περιέχουν περισσότερο λεπτόκοκκο υλικό. Οι Stolle et al. (2009), ανέφεραν ότι τα λεπτόκοκκα υλικά επηρεάζουν σημαντικά την ευαισθησία σε ποσοστό υγρασίας των τιμών του M_R των αδρανών ακόμα και σε χαμηλά ποσοστά.

2.3.3.5 Τύπος και Σχήμα κόκκων ασύνδετου υλικού (Material Type and Shape)

Η ποικιλία στους διάφορους τύπους υλικών ανάγκασε πολλούς ερευνητές (Hicks 1970; Hicks and Monismith 1971; Barksdale and Itani 1989; Thom and Brown 1989; Heydinger et al. 1996) να μελετήσουν την επιρροή των διαφορετικών τύπων υλικών στο μέτρο επανάκτησης. Οι Heydinger et al. (1996) πραγματοποίησαν δοκιμές με δείγματα από ασβεστόλιθο, αμμοχάλικο και σκωρία. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το αμμοχάλικο είχε την υψηλότερη τιμή M_R , ακολούθησε το δείγμα ασβεστόλιθου και το δείγμα σκωρίας είχε την χαμηλότερη τιμή M_R .

Από την άλλη, αρκετοί άλλοι ερευνητές (Hicks 1970; Hicks and Monismith 1971; Barksdale and Itani 1989; Thom and Brown 1989) ανέφεραν ότι τα θραυσμένα αδρανή που περιέχουν σωματίδια με γωνιακό προς περίπου γωνιακό σχήμα κατανέμουν καλύτερα το φορτίο και παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές του δείκτη M_R , σε σχέση με το άθραυστο αμμοχάλικο που περιέχει σωματίδια με σφαιρικό ή περίπου σφαιρικό σχήμα. Καθίσταται λοιπόν, το σχήμα των σωματιδίων ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά προς την περιγραφή των διαφορετικών τύπων των υλικών. Οι Brown and Itani (1989), ανέφεραν ότι τα θραυσμένα υλικά με γωνιακά σωματίδια και τραχεία επιφάνεια είχαν περίπου 50% υψηλότερη τιμή του μέτρου επανάκτησης από τα άθραυστα υλικά με σφαιρικό σχήμα σωματιδίου, υπό χαμηλή μέση κανονική τάση και περίπου 25% υψηλότερη τιμή κάτω από υψηλή μέση κανονική τάση.

Εδώ και δύο δεκαετίες τα ανακυκλωμένα υλικά χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο ως υλικά υπεδάφους του οδοστρώματος και οι ερευνητές επεκτείνουν τη μελέτη τους στην επιρροή των τύπων των υλικών στο M_R , ώστε να περιλαμβάνει τα ευρέως χρησιμοποιούμενα ανακυκλωμένα υλικά. Τα RPCC και RAP είναι τα δύο πιο χρησιμοποιούμενα υλικά στην κατασκευή βάσης / υπόβασης.

Τα κοκκώδη υλικά συνήθως εμφανίζουν μία μείωση στο M_R , όταν αυξάνεται το ποσοστό υγρασίας, ενώ από την άλλη τα δείγματα από RPCC είχαν αυξημένο M_R , αυξάνοντας το ποσοστό υγρασίας. Η ασφαλική επικάλυψη στα σωματίδια μπορεί να επηρεάσει τις ιδιότητες των RAP υλικών. Οι Bennert et al. (2000), πραγματοποίησαν κυκλικές τριαξονικές δοκιμές πάνω στα RPCC, RAP και ταξινομημένα με βάση την πυκνότητα χονδρόκοκκα αδρανή βάσεις (densegraded aggregate base coarse – DGABC) μείγματα υλικών με διαφορετικά ποσοστά το καθένα. Επιπροσθέτως, κατέληξαν ότι τα 100% RPCC και 100% RAP υλικά είχαν υψηλότερη τιμή του M_R από ότι τα 100% DGABC υλικά. Ανέφεραν

επίσης, από τις εργαστηριακές δοκιμές ότι οι τιμές του μέτρου επανάκτησης αυξάνονταν, καθώς αυξανόταν το ποσοστό των RPCC και RAP υλικών υπό την επίδραση πιέσεων 21 και 50 psi.

Οι Alam et al. (2010), συμφώνησαν ότι οι τιμές του M_R , αυξάνονται όταν αυξάνεται το ποσοστό RAP υλικού σε ανάμεικτα από RAP και φυσικό κοκκώδες υλικό δείγματα. Επίσης, κατέγραψαν ότι η αύξηση της περιεκτικότητας σε RAP υλικό, επιφέρει μείωση των παραμορφώσεων στην επιφάνεια του οδοστρώματος σύμφωνα με in-situ δοκιμές. Οι Kang et al. (2011), συμπέραναν ότι η προσθήκη, σε μείγματα αδρανών κοκκώδων υλικών, ποσοστού RAP ή RPCC προκαλεί αύξηση του M_R και πρότειναν τα προαναφερθέντα υλικά ως καταλληλότερα για την χρήση στη κατασκευή βάσης/ υπόβασης του οδοστρώματος. Βέβαια από την άλλη οι Leite et al. (2011), θεώρησαν ότι τα υλικά που προκύπτουν από την ανακύκλωση περισσευούμενων από κατασκευές ή καταρρεύσεις υλικών, έχουν παρεμφερείς τιμές M_R , με μια καλώς διαβαθμισμένη θραυσμένη πέτρα, σύμφωνα με εργαστηριακές δοκιμές.

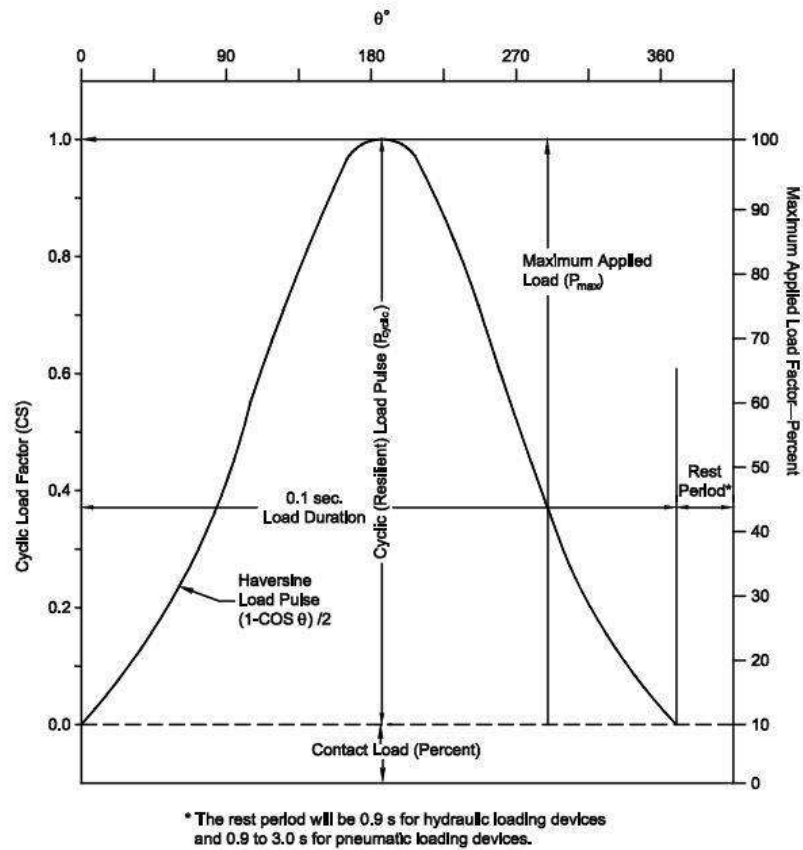
2.3.4 Εργαστηριακή μέθοδος προσδιορισμού μέτρου επανάκτησης:

Μέθοδος AASHTO T307-99 (2007)

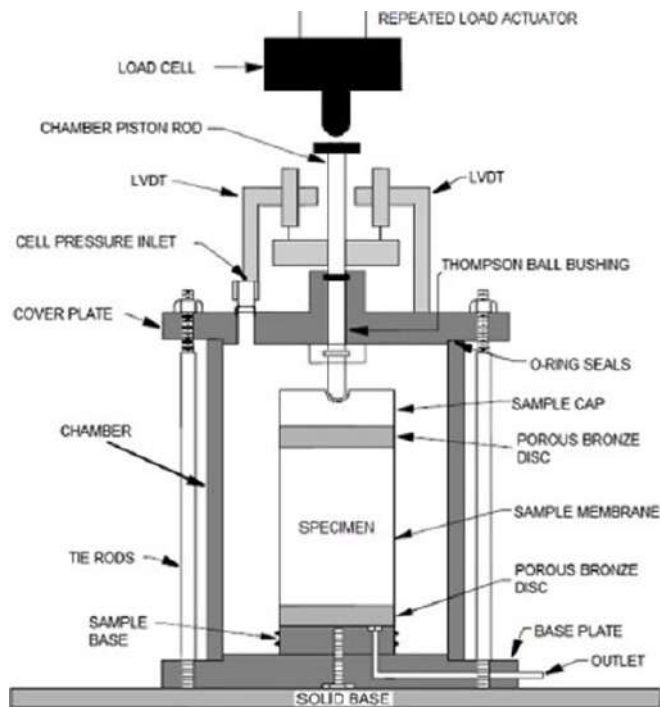
Το μέτρο επανάκτησης προσδιορίζεται πραγματοποιώντας εργαστηριακή δοκιμή, με εκείνη που προσομοιάζει καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης του οδοστρώματος να είναι η τριαξονική δοκιμή επαναλαμβανόμενης φόρτισης. Ως εκ τούτου, όλα τα πρότυπα για τον προσδιορισμό του μέτρου επανάκτησης χρησιμοποιούν την τριαξονική επαναλαμβανόμενη φόρτιση του δοκιμίου. Ένα από τα δημοφιλέστερα πρότυπα, είναι το πρότυπο AASHTO T307 – 99 σύμφωνα με το οποίο, πραγματοποιείται εργαστηριακή συμπίκνωση του δείγματος προσομοιώνοντας την αδιατάρακτη φύση των ασύνδετων υλικών οδοστρωσίας. Οι διαστάσεις του δοκιμίου καθώς και το εύρος των επιβαλλόμενων τάσεων είναι προκαθορισμένο από το πρότυπο της μεθόδου. Η διάταξη της συσκευής τριαξονικής δοκιμής σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T307-99 παρουσιάζεται στο σχήμα 12. Αναλυτικότερα, το κυλινδρικό δοκίμιο διαμέτρου 152μμ υπόκειται σε μια αλληλουχία φορτίσεων, διάρκειας 0,1 δευτερολέπτου ανά κύκλο φόρτισης. Αυτός ο παλμός του φορτίου ακολουθείται από μία περίοδο 0,9 δευτερολέπτων κατά την οποία ασκείται στο δοκίμιο φορτίο ίσο με το 10% της μέγιστης τάσης, προσομοιώνοντας έτσι την αποφόρτιση που επιφέρει το πέρασμα των αξόνων ενός οχήματος από ένα συγκεκριμένο σημείο μιας κοκκώδους στρώσης ενός πραγματικού οδοστρώματος (σχήμα 11). Πριν την έναρξη της καταγραφής δεδομένων για το μέτρο ανάπτυξης πραγματοποιούνται τουλάχιστον 500 κύκλοι φόρτισης, για δεδομένο συνδυασμό πλευρικής και αξονικής τάσης, που αποτελούν την προ-φόρτιση με σκοπό να εξαλειφθούν οι όποιες διαταραχές του δείγματος που προκλήθηκαν κατά την προετοιμασία του. Στη συνέχεια, ο κάθε ένας από τους 15 συνδυασμούς πλευρικής και πρόσθετης αξονικής τάσης πραγματοποιείται 100 φορές (Πίνακας 1). Για τον σχεδιασμό οδοστρωμάτων, είναι αναμενόμενο το ότι η ελαστική παραμόρφωση αυξάνεται περισσότερο από την μόνιμη, όσο αυξάνονται και οι κύκλοι φόρτισης. Έτσι, έπειτα από ένα μεγάλο αριθμό κύκλων η παραμόρφωση είναι για κάθε φόρτιση είναι σχεδόν όλη ανακτήσιμη. Συνεπώς, οι τιμές του μέτρου επανάκτησης M_r υπολογίζονται από τους τελευταίους πέντε κύκλους φόρτισης για κάθε συνδυασμό τάσεων (Li et al, 2010).

Ακολουθία φόρτισης	Πλευρική-περιοριστική τάση σ_3	Μέγιστη αξονική τάση $\sigma_{\max}$	Κυκλική τάση σ_{cyclic}	Σταθερή τάση $0.1\sigma_{\max}$	Αριθμός Επαναλήψεων
	kPa	kPa	kPa	kPa	
0	103,4	103,4	93,1	10,3	500-1000
1	20,7	20,7	18,6	2,1	100
2	20,7	41,4	37,3	4,1	100
3	20,7	62,1	55,9	6,2	100
4	34,5	34,5	31,1	3,5	100
5	34,5	68,9	62	6,9	100
6	34,5	103,4	93,1	10,3	100
7	68,9	68,9	62	6,9	100
8	68,9	137,9	124,1	13,8	100
9	68,9	206,8	186,1	20,7	100
10	103,4	68,9	62	6,9	100
11	103,4	103,4	93,1	10,3	100
12	103,4	206,8	186,1	20,7	100
13	137,9	103,4	93,1	10,3	100
14	137,9	137,9	124,1	13,8	100
15	137,9	275,8	248,2	27,6	100

Πίνακας 1: Ακολουθία φορτίσεων τριαξονικής δοκιμής σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T307-99.



Σχήμα 11: Ημιτονοειδής παλμός φόρτισης (AASHTO T307-99, 2007).



Σχήμα 12: Διάταξη συσκευής τριαξονικής φόρτισης (AASHTO T307-99, 2007).

2.3.5 Καταστατικά μοντέλα προσδιορισμού του μέτρου επανάκτησης M_R

Ο υπολογισμός του M_R γίνεται μαθηματικά μέσω κατάλληλων βαθμονομημένων καταστατικών μοντέλων. Προκειμένου να προσομοιωθούν οι επιτόπου συνθήκες φόρτισης και περιβάλλοντος στο εκάστοτε καταστατικό μοντέλο η βαθμονόμησή του κρίνεται απαραίτητη. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από εργαστηριακές τριαξονικές δοκιμές, έχει αναπτυχθεί πληθώρα καταστατικών μοντέλων, προκειμένου να μελετηθεί η επιρροή της τάσης-παραμόρφωσης στο μέτρο επανάκτησης (Λοΐζος et al). Η ύπαρξη των καταστατικών μοντέλων, βοηθά το μελετητή να εξάγει αποτελέσματα με μεγαλύτερη ταχύτητα και λιγότερες εργαστηριακές δοκιμές.

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιούνται τα εξής καταστατικά μοντέλα:

- **K-θ:** Το μοντέλο του Seed (1985), το οποίο βασίζεται στο μοντέλο των Hicks και Monismith (1971), γνωστό και ως κ-θ μοντέλο.

$$M_R = k_1 \times \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2}$$

Όπου:

- θ είναι το άθροισμα των κύριων τάσεων (ογκομετρική τάση – bulk stress) ,
 $\theta = \sigma_1 + 2 \times \sigma_3$,
- k_1, k_2 : οι παράμετροι του υλικού που προκύπτουν κατόπιν κατάλληλης στατιστικής επεξεργασίας πειραματικών δεδομένων,
- p_a : η ατμοσφαιρική πίεση($p_a = 100kpa$)

Το μοντέλο χαρακτηρίζεται από την απλότητά του, παρόλα αυτά, δεν λαμβάνει υπόψη την επίδραση της διατμητικής συμπεριφοράς των ασύνδετων υλικών παρά μόνο ορθές τάσεις (Zhou et al. 2015).

- **Uzan:** Η επίδραση της διάτμησης λαμβάνεται υπόψη στο μοντέλο του Uzan (1985) επίσης γνωστό ως universal model. Αυτό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή του όρου της πρόσθετης αξονικής τάσης ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$) στο k-θ μοντέλο, προσεγγίζοντας καλύτερα τα εργαστηριακά αποτελέσματα (Kim 2007). Το μοντέλο ορίζεται από τη σχέση:

$$M_R = k_1 \times \theta^{k_2} \times \sigma_d^{k_3}$$

Και σε κανονικοποιημένη μορφή από τη σχέση:

$$M_R = k_1 \times p_a \times \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \times \left(\frac{\sigma_d}{p_a}\right)^{k_3}$$

Όπου θ , p_a , σ_d , όπως έχουν οριστεί και k_1 , k_2 , k_3 οι παράμετροι του υλικού που προκύπτουν κατόπιν κατάλληλης στατιστικής επεξεργασίας πειραματικών δεδομένων.

- **Uzan-Witczak:** Αντικαθιστώντας την πρόσθετη αξονική τάση σ_d , με τη οκτάεδρη διατμητική τάση τ_{oct} , προκύπτει το μοντέλο των Uzan and Witczak (1988), ως επέκταση του universal model του Uzan (1985). Το μοντέλο αυτό περιγράφεται από την σχέση:

$$M_R = k_1 \times \theta^{k_2} \times \tau_{oct}^{k_3}$$

Και σε κανονικοποιημένη μορφή από τη σχέση:

$$M_R = k_1 \times p_a \times \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \times \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a}\right)^{k_3}$$

Η τ_{oct} ορίζεται ως εξής:

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

- **MEPDG:** Κλείνοντας, στο Μηχανιστικό – Εμπειρικό οδηγό σχεδιασμού οδοστρωμάτων (MEPDG), έχει εισαχθεί ένα γενικευμένο καταστατικό μοντέλο σχεδιασμού του M_R για ασύνδετα υλικά που ορίζεται ως εξής :

$$M_R = k_1 \times p_a \times \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \times \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3}$$

Το μοντέλο αυτό είναι κατάλληλο τόσο για ασύνδετα υλικά, όσο και για εδαφικά, τα οποία χρησιμοποιούνται και για τη βάση αλλά και για το υπέδαφος (Kim 2007). Πλεονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι ότι λαμβάνει υπόψη τόσο το φαινόμενο σκλήρυνσης της ογκομετρικής τάσης θ , όσο και το φαινόμενο χαλάρωσης που σχετίζεται με τη διατμητική τάση. Μεταβάλλοντας τις παραμέτρους το μοντέλο αυτό, εύκολα παραπέμπει σε άλλα μοντέλα (Steven 2005). Συγκεκριμένα, θέτοντας $k_3 = 0$ προκύπτει το k-θ μοντέλο, ενώ υποθέτοντας $k_2 = k_3 = 0$ προκύπτει σταθερή τιμή της M_R και άρα σε γραμμική ελαστική ανάλυση.

3. Εξεταζόμενα υλικά και συλλογή δεδομένων

3.1 Γενικά για τα αδρανή υλικά οδοστρωσίας

Κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, χρησιμοποιούνται στις στρώσεις βάσης- υποβάσης αδρανή υλικά, τα οποία προέρχονται κυρίως από τη θραύση κατάλληλων πετρωμάτων ή από φυσικές αποθέσεις ποταμών και χειμάρρων, ή από ορυχεία, είτε θραυσμένα, είτε όχι (Λοΐζος 2013). Οι συνηθέστερες πηγές προελεύσεως των υλικών φυσικών αποθέσεων, εντοπίζονται σε παλαιές κοίτες ή/και όχθες χειμάρρων, στις εκβολές ποταμών ή χειμάρρων, σε παραλίες, αλλά και στα υψίπεδα που δημιουργήθηκαν κατά την μετά-παγετώνια περίοδο. Επιπρόσθετα, τα υλικά αυτά, είναι τα χαλίκια, τα αμμοχάλικα ή και η φυσική άμμος, βρίσκονται κυρίως σε ελαφρώς σταθεροποιημένη μορφή και χρησιμοποιούνται ευρέως ως υλικά υποβάσεων οδοστρωμάτων.

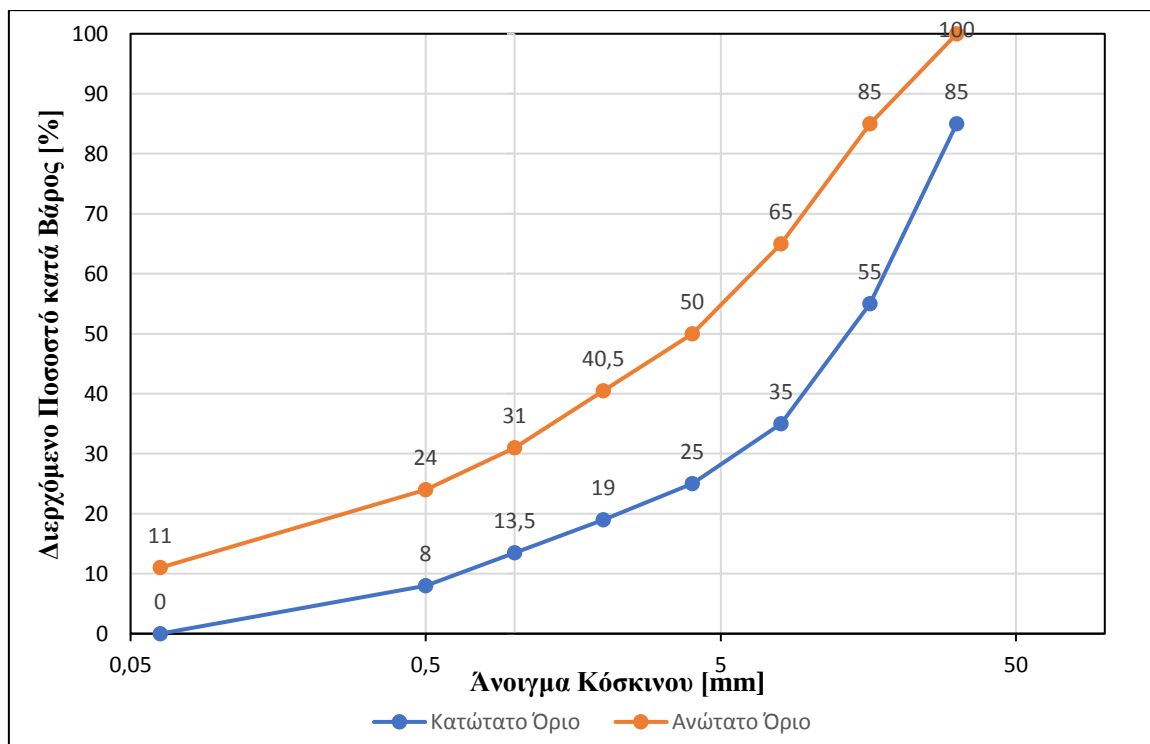
Τέλος, σε βάσεις και υποβάσεις χρησιμοποιούνται και θραυστά αδρανή, τα οποία προέρχονται από λατομεία και από πετρώματα με κατάλληλες μηχανικές και χημικές ιδιότητες. Το πιο ευρέως διαδεδομένο αδρανές της παρούσας κατηγορίας, είναι το αμμοχάλικο 3Α, το οποίο παράγεται από μηχανική κατεργασία στο λατομείο και στη συνέχεια γίνεται διαχωρισμός με τη χρήση κοσκίνων, από τα οποία προκύπτει και η ονομασία του. Συγκεκριμένα, γίνεται χρήση κοσκίνου 3΄΄ με Α διαβάθμιση, δηλαδή το υλικό αποτελείται από μέγιστο κόκκο που διέρχεται από το κόσκινο αυτό. Η κοκκομετρική του διαβάθμιση είναι σε συμφωνία με τις Πρότυπες Τεχνικές Προδιαγραφές Οδοστρωσίας Π.Τ.Π.Ο. 155 και 150 για βάσεις και υποβάσεις οδοστρωμάτων αντίστοιχα.

3.2 Εξεταζόμενα υλικά

Τα εξεταζόμενα αδρανή υλικά στην παρούσα διπλωματική εργασία, παρέχονται από το Εργαστήριο Οδοποιίας του Ε.Μ.Π. και είναι συμβατικά αδρανή υλικά με τις προδιαγραφές κοκκομετρικής διαβάθμισης των Προτύπων Τεχνικών Προδιαγραφών για υλικά τύπου Ι, οι οποίες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 1 και στο παρακάτω σχήμα 13

Άνοιγμα κόσκινου ΕΛΟΤ EN 933-2 [mm]	Διερχόμενο ποσοστό κατά βάρος [%]	
	Τύπος Ι 0/32 G _A 85	Τύπος ΙΙ 0/40 G _A 85
63		100
40	100	85-99 ⁽¹⁾
31,5	85-99 ⁽¹⁾	
20		55-85
16	55-85	
10		35-65
8	35-65	
4	25-50	25-50
2	19-40,5	19-44
1	13,5-31	13,5-38
0,5	8-24	8-32
0,063	0-11	0-12

Πίνακας 2: Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης μίγματος αδρανών υλικών.
(1): Γίνεται αποδεκτό και το ποσοστό 100%



Σχήμα 13 : Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης μίγματος αδρανών υλικών Τύπου 1
05-03-03-00)

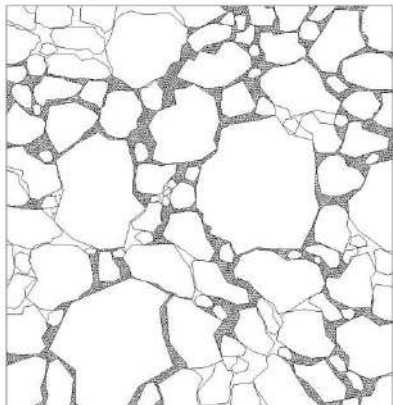
(ΠΕΤΕΠ

Το πρώτο εκ των τριών υλικών, προέρχεται από in-situ συλλογή δοκιμίου, από ένα υπό κατασκευήν έργο αυτοκινητοδρόμου και θα αναφέρεται στο εξής ως Υλικό 1. Τα υλικά 2 και 3 αποτελούν παράγωγα του αρχικού υλικού και δημιουργήθηκαν εργαστηριακά προκειμένου στο σύνολο τους τα 3 υλικά να καλύπτουν όλο το φάσμα της κοκκομετρικής διαβάθμισης. Αναλυτικότερα, το Υλικό 2 με τη βοήθεια κοσκίνων περιέχει λιγότερο ποσοστό σε λεπτόκοκκο υλικό από το υλικό 1 ώστε να τοποθετείται κοντά στο κατώτερο όριο των προδιαγραφών, ενώ για την παραγωγή του Υλικού 3, προστίθεται λεπτόκοκκο υλικό στο αρχικό Υλικό 1. Ωστε να προσεγγιστούν τα ποσοστά του άνωθεν ορίου των προδιαγραφών.

3.3 Ιδιότητες εξεταζόμενων υλικών

3.3.1 Υλικό 1

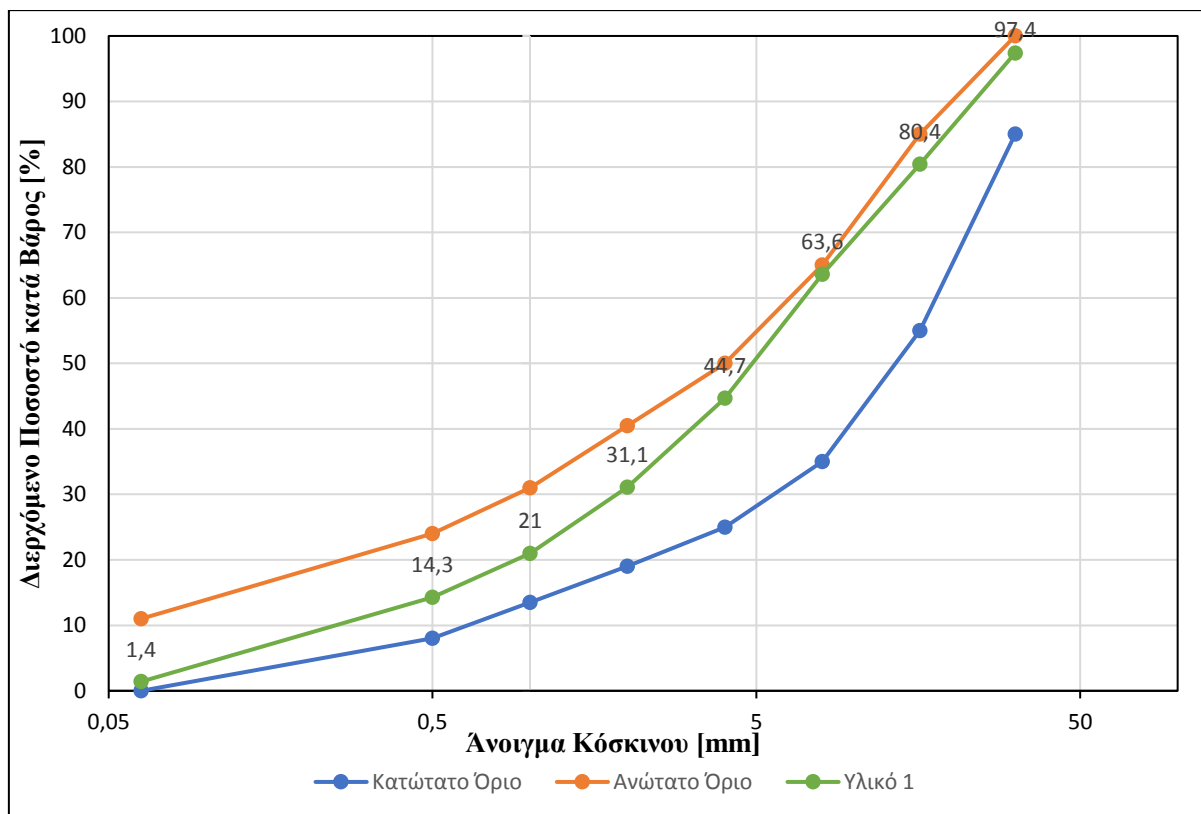
Στο παρακάτω σχήμα 14 απεικονίζεται γραφικά το Υλικό 1.



Material 1 - Mid Fines

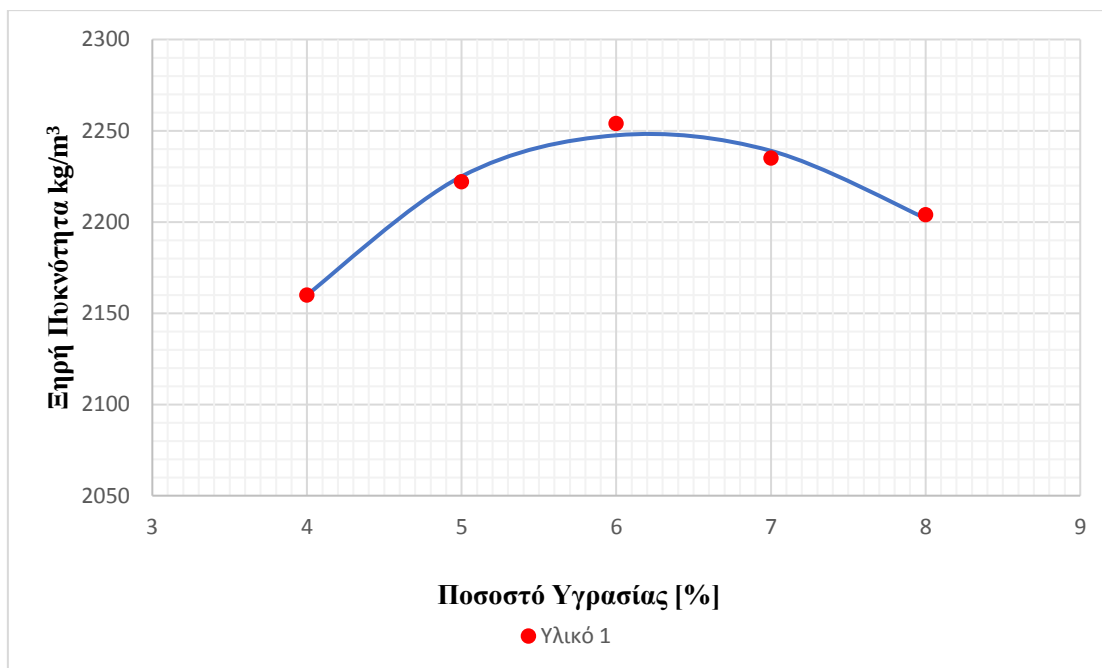
Σχήμα 14 : - Υλικό 1 - Γραφική παρουσίαση

Το υλικό κατατάσσεται ως A-1 με βάση τους Αμερικάνικους Κανονισμούς AASHTO, και η κοκκομετρική του διαβάθμιση πραγματοποιήθηκε με βάση τα Ευρωπαϊκά πρότυπα EN 933-1 και 933-2. Σύμφωνα με τις Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές ΠΕΤΕΠ 05-03-03-00, ορίζεται όπως προαναφέρθηκε ως υλικό Τύπου Ι προς χρήση σε στρώσεις βάσης/υπόβασης καθώς και έδρασης της διατομής του οδοστρώματος. Η κοκκομετρική του διαβάθμιση φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 15, μάλιστα εν- συγκρίσει με τα όρια που ορίζουν οι προδιαγραφές. Παρατηρείται ότι πρόκειται για ένα μεσαίου εύρους υλικού, ως προς την κοκκομετρική του διαβάθμιση.



Σχήμα 15: Κοκκομετρική διαβάθμιση Υλικού 1 – μέτριο ποσοστό λεπτόκοκκου.

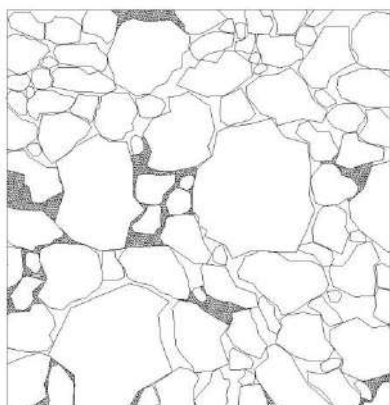
Το υλικό συμπίεστηκε με τη χρήση της μεθόδου της τροποποιημένης δοκιμής Proctor (ELOT EN 13286-2), χρησιμοποιώντας καλούπι τύπου B, και με βάση τα αποτελέσματα της συμπίκνωσης κατασκευάστηκε η παρακάτω καμπύλη ξηράς πυκνότητας – ποσοστού υγρασίας (Σχήμα 16). Παρατηρώντας την εν-λόγω καμπύλη, παρατηρείται ότι το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας ισούται με 6.2% (OMC), ενώ η μέγιστη ξηρά πυκνότητα ισούται με 2248 kg/m³.



Σχήμα 16: Καμπύλη ποσοστού υγρασίας – ξηρής πυκνότητας Υλικό 1

3.3.2 Υλικό 2

Στο παρακάτω σχήμα 17 απεικονίζεται γραφικά το Υλικό 2.

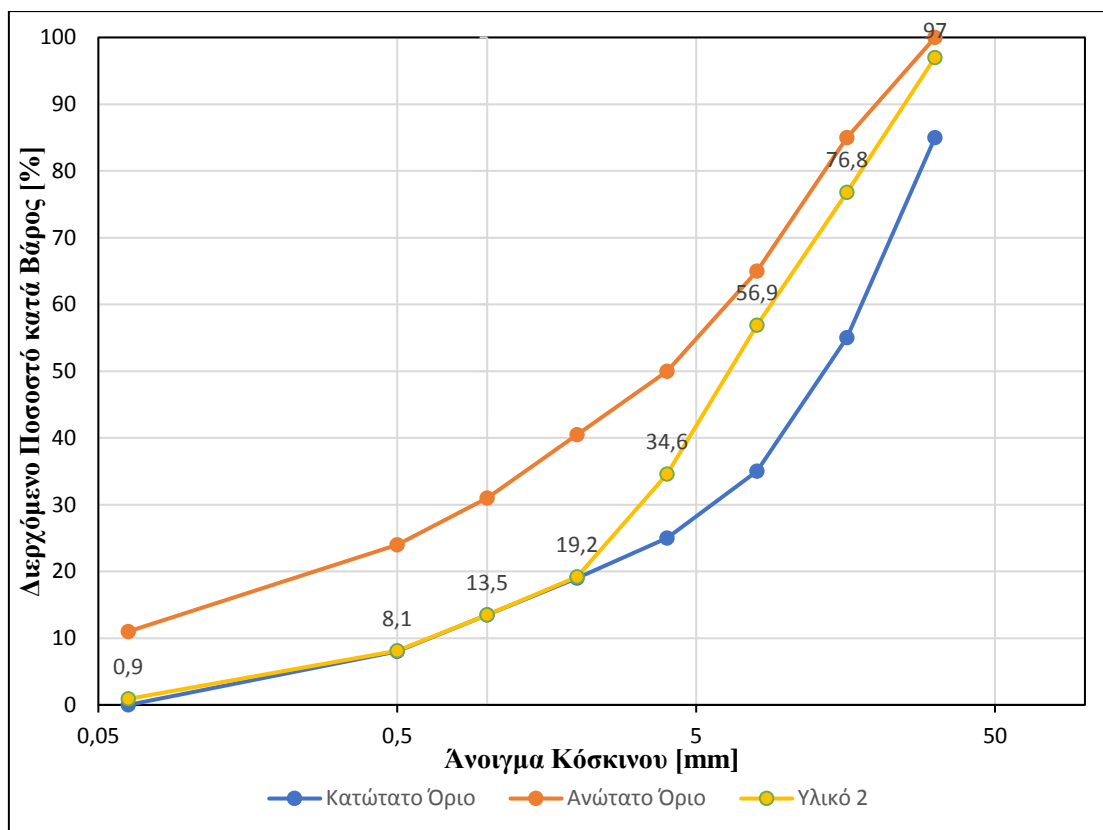


Material 2 - Low Fines

Σχήμα 17: - Υλικό 2 - Γραφική παρουσίαση

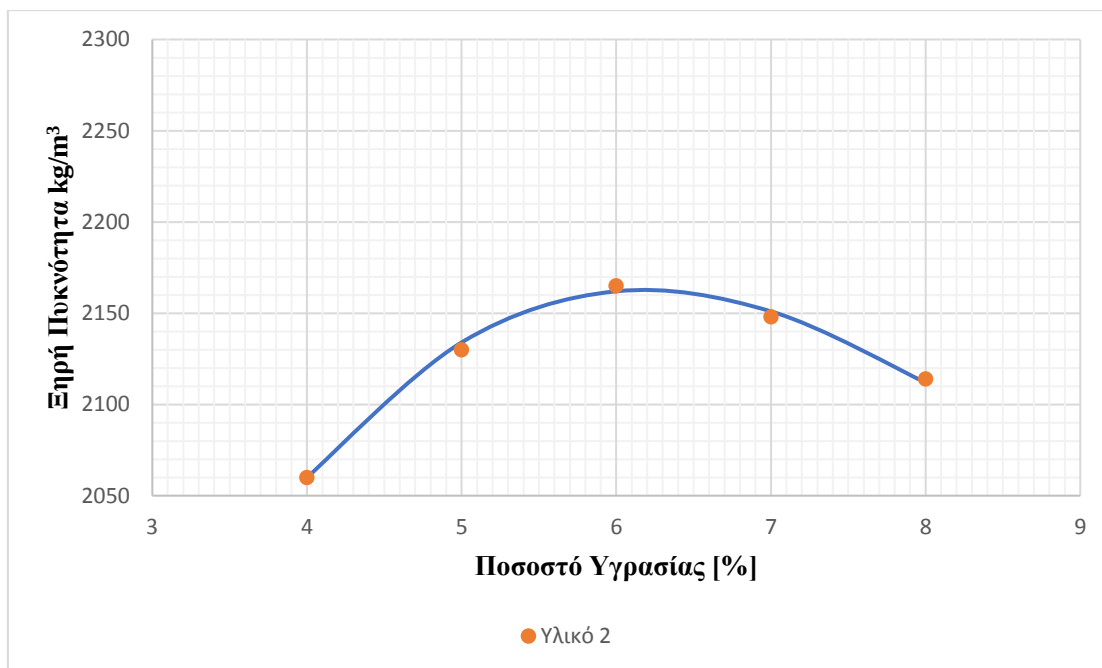
Το υλικό κατατάσσεται ως A-1 με βάση τους Αμερικάνικους Κανονισμούς AASHTO, και η κοκκομετρική του διαβάθμιση πραγματοποιήθηκε με βάση τα Ευρωπαϊκά πρότυπα EN 933-1 και 933-2. Σύμφωνα με τις Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές ΠΙΕΤΕΠ 05-03-03-00, ορίζεται όπως προαναφέρθηκε ως υλικό Τύπου Ι προς χρήση σε στρώσεις βάσης/υπόβασης καθώς και έδρασης της διατομής του οδοστρώματος. Η κοκκομετρική του διαβάθμιση φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, μάλιστα εν- συγκρίσει με τα όρια που ορίζουν

οι προδιαγραφές. Παρατηρείται ότι προσεγγίζει αρκετά το κατώτατο όριο που ορίζουν οι προδιαγραφές, γεγονός που δικαιολογείται από την χαμηλή περιεκτικότητά του σε λεπτόκοκκο υλικό.



Σχήμα 18: Κοκκομετρική διαβάθμιση Υλικού 2 – χαμηλό ποσοστό λεπτόκοκκου

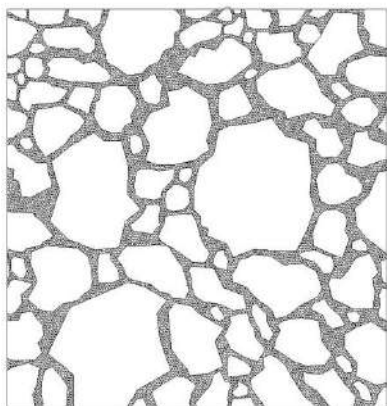
Το υλικό συμπίεστηκε με τη χρήση της μεθόδου της τροποποιημένης δοκιμής Proctor (ELOT EN 13286-2), χρησιμοποιώντας καλούπι τύπου B, και με βάση τα αποτελέσματα της συμπύκνωσης κατασκευάστηκε η παρακάτω καμπύλη ξηράς πυκνότητας – ποσοστού υγρασίας (Σχήμα 19). Παρατηρώντας την εν-λόγω καμπύλη, παρατηρείται ότι το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας ισούται με 6.0% (OMC), ενώ η μέγιστη ξηρά πυκνότητα ισούται με 2162 kg/m³.



Σχήμα 19: Καμπύλη ποσοστού υγρασίας – ξηρής πυκνότητας Υλικό 2

3.3.3 Υλικό 3

Στο παρακάτω σχήμα 20 απεικονίζεται γραφικά το Υλικό 3.

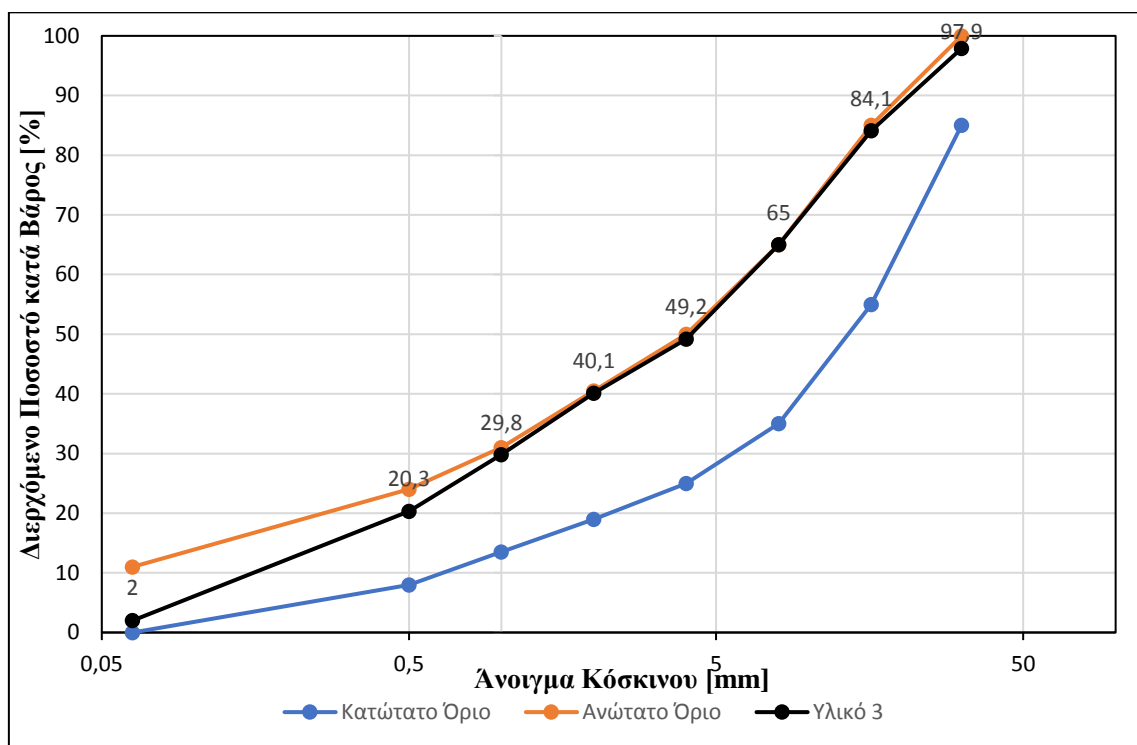


Material 3 - High Fines

Σχήμα 20: - Υλικό 3 - Γραφική παρουσίαση

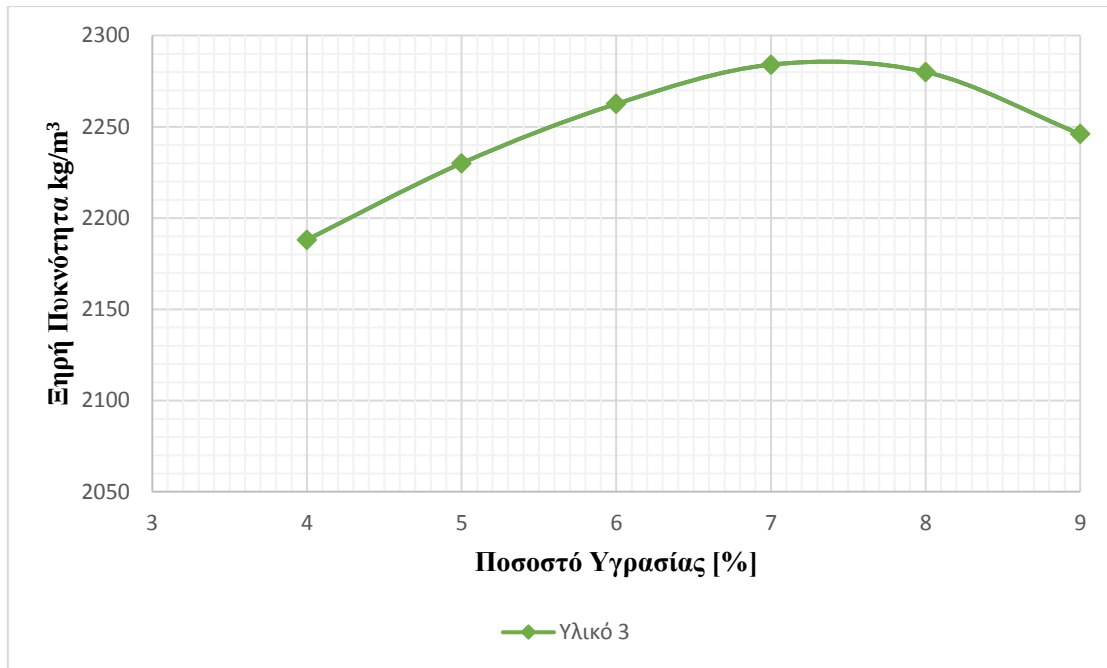
Το υλικό κατατάσσεται ως A-1 με βάση τους Αμερικάνικους Κανονισμούς AASHTO, και η κοκκομετρική του διαβάθμιση πραγματοποιήθηκε με βάση τα Ευρωπαϊκά πρότυπα EN 933-1 και 933-2. Σύμφωνα με τις Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές ΠΕΤΕΠ 05-03-03-00, ορίζεται όπως προαναφέρθηκε ως υλικό Τύπου Ι προς χρήση σε στρώσεις βάσης/υπόβασης καθώς και έδρασης της διατομής του οδοστρώματος. Η κοκκομετρική του

διαβάθμιση φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 21, μάλιστα εν- συγκρίσει με τα όρια που ορίζουν οι προδιαγραφές. Παρατηρείται ότι προσεγγίζει αρκετά το ανώτατο όριο που ορίζουν οι προδιαγραφές, γεγονός που δικαιολογείται από την υψηλή περιεκτικότητά του σε λεπτόκοκκο υλικό.



Σχήμα 21: Κοκκομετρική διαβάθμιση Υλικού 3 – υψηλό ποσοστό λεπτόκοκκου

Το υλικό συμπίεστηκε με τη χρήση της μεθόδου της τροποποιημένης δοκιμής Proctor (ELOT EN 13286-2), χρησιμοποιώντας καλούπι τύπου B, και με βάση τα αποτελέσματα της συμπίκνωσης κατασκευάστηκε η παρακάτω καμπύλη ξηράς πυκνότητας – ποσοστού υγρασίας (Σχήμα 22). Παρατηρώντας την εν-λόγω καμπύλη, παρατηρείται ότι το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας ισούται με 7.2% (OMC), ενώ η μέγιστη ξηρά πυκνότητα ισούται με 2280 kg/m³.



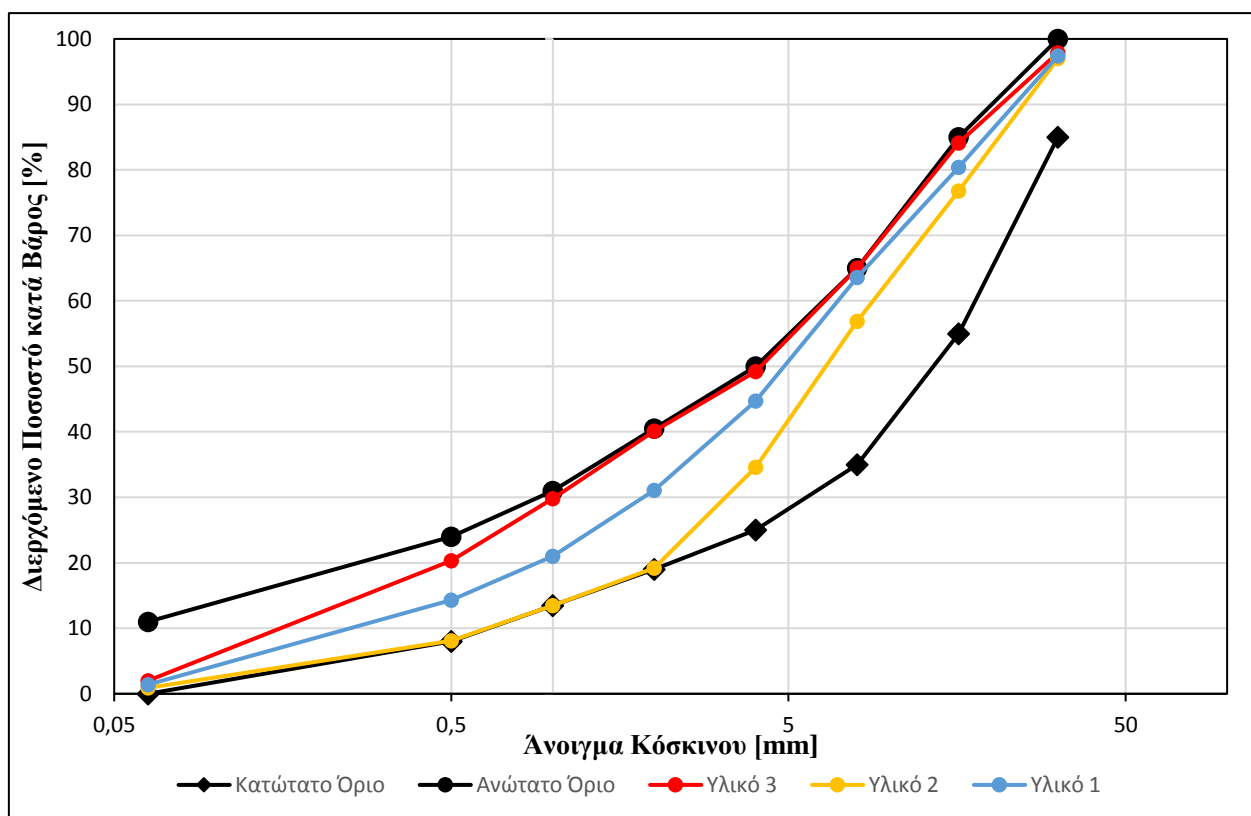
Σχήμα 22: Καμπύλη ποσοστού υγρασίας – ξηρής πυκνότητας Υλικό 3

3.4 Σύγκριση μεταξύ των υλικών

3.4.1 Κατάταξη και Κοκκομετρική διαβάθμιση

Και τα τρία εξεταζόμενα υλικά, κατατάσσονται στην ίδια κατηγορία A-1 με βάση τις προδιαγραφές του AASHTO.

Όπως προαναφέρθηκε, και τα 3 υλικά είναι σε συμφωνία με τις Ελληνικές προδιαγραφές ΠΕΤΕΠ 05-03-03-00 για υλικό βάσης/υπόβασης τύπου Ι, κάτι που απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα 23 και στον Πίνακα 2, όπου φαίνονται τα άνω και κάτω όρια βάσει κανονισμών, καθώς και οι κοκκομετρικές καμπύλες διαβάθμισης των τριών υλικών.



Σχήμα 23: Σύγκριση κοκκομετρικών καμπυλών διαβάθμισης μεταξύ των υλικών 1-3, καθώς και των ορίων των προδιαγραφών.

	Διερχόμενο ποσοστό κατά βάρος [%]					
		Κάτω όριο	Άνω όριο	Υλικό 1	Υλικό 2	Υλικό 3
Ονομαστικό άνοιγμα οπής κόσκινου (ΕΛΟΤ EN 933-2), [mm]	31,5	85	100	97,4	97	97,9
	16	55	85	80,4	76,8	84,1
	8	35	65	63,6	56,9	65
	4	25	50	44,7	34,6	49,2
	2	19	40,5	31,1	19,2	40,1
	1	13,5	31	21	13,5	29,8
	0,5	8	24	14,3	8,1	20,3
	0,063	0	11	1,4	0,9	2

Πίνακας 3: Άνω και κάτω όρια βάσει κανονισμών (ΠΕΤΕΠ 05-03-03-00), καθώς και οι εκάστοτε τιμές των τριών υλικών.

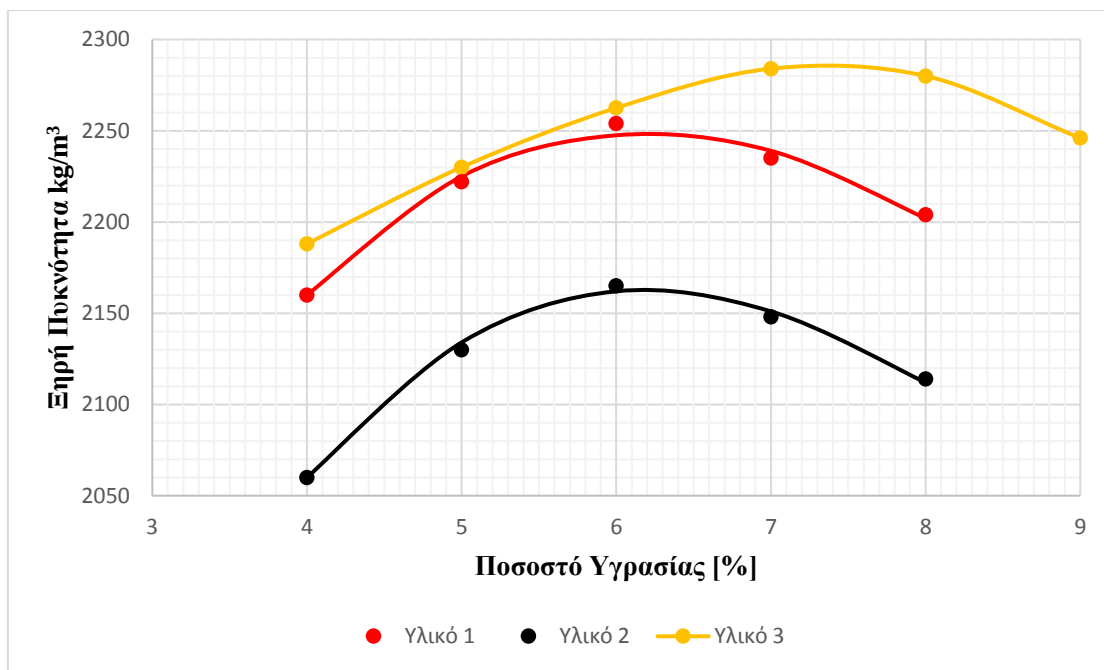
Επιπροσθέτως, στον παρακάτω πίνακα 4 φαίνονται οι πρόσθετες απαιτήσεις κοσκίνων, όπου για τον περιορισμό $P_{2mm} \geq P_{1mm} + 6$ το υλικό 2 είναι κατά 0.5% υπό του ορίου.

	% Διερχόμενο Ποσοστό κατά Βάρος		
	Κόσκινο 4 mm	Κόσκινο 2 mm	Κόσκινο 1 mm
	$P_{4mm} \geq P_{2mm} + 6$	$P_{2mm} \geq P_{1mm} + 6$	$P_{1mm} \geq 1,8 \times P_{0,063mm}$
Υλικό 1	☑	☑	☑
Υλικό 2	☑	☒	☑
Υλικό 3	☑	☑	☑

Πίνακας 4: Σύγκριση πρόσθετων κοκκομετρικών απαιτήσεων (ΠΕΤΕΠ 05-03-03-00).

3.4.2 Καμπύλη Ξηράς Πυκνότητας-Ποσοστού Υγρασίας

Τα εξεταζόμενα είναι υλικά 1-3, είναι πολύ κοντά και ως προς την ξηρά πυκνότητα, αλλά και ως προς το ποσοστό βέλτιστης υγρασίας (OMC), με το υλικό 3 να έχει την υψηλότερη ξηρά πυκνότητα. Οι παρατηρήσεις και η σύγκριση των καμπυλών φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 24 και στον πίνακα 3



Σχήμα 24: Σύγκριση καμπυλών ποσοστού υγρασίας – ξηρής πυκνότητας υλικών 1-3

	Υλικό 1	Υλικό 2	Υλικό 3
Ξηρή Πυκνότητα (kg/m ³)	2248	2162	2280
Βέλτιστο Ποσοστό Υγρασίας (OMC), (%)	6,2	6	7,2

Πίνακας 5: Μέγιστη ξηρά πυκνότητα – Βέλτιστο ποσοστό υγρασίας (OMC) Υλικά 1-3

3.4.3 Εργαστηριακός Προσδιορισμός Μέτρου Επανάκτησης.

3.4.3.1 Διαδικασία και Αποτελέσματα

Για τον προσδιορισμό του μέτρου επανάκτησης, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σύμφωνα με το πρότυπο AASHTO T307 (σχήμα 25), διαδικασία η οποία έχει περιγραφεί εκτενώς προηγουμένως, για την εύρεση των παραμέτρων k_1 , k_2 , k_3 των καταστατικών μοντέλων K-θ, UZAN και MEPDG που επίσης έχουν αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Λαμβάνοντας τα δεδομένα από τους 15 κύκλους φόρτισης για κάθε υλικό, οι παράμετροι του υλικού προκύπτουν κατόπιν κατάλληλης στατιστικής επεξεργασίας των πειραματικών αυτών δεδομένων. Στους παρακάτω πίνακες 4-6 παρουσιάζονται οι παράμετροι των υλικών, όπως αυτοί χορηγήθηκαν από το Εργαστήριο Ε.Μ.Π. μετά από τους απαραίτητους υπολογισμούς. Σημειώνεται ότι στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται τα υλικά

και τα καταστατικά μοντέλα μόνο για το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας, και θα γίνει χρήση μόνο των αντίστοιχων παραμέτρων.

Ποσοστό Υγρασίας (%)	Καταστατικό Μοντέλο	k_1	k_2	k_3
OMC	K - θ	787.02	0.634	N/A
OMC	UZAN	1878.32	0.175	0.461
OMC	MEPDG	738	0.301	1.025

Πίνακας 6 : Παράμετροι Υλικού 1

Ποσοστό Υγρασίας (%)	Καταστατικό Μοντέλο	k_1	k_2	k_3
OMC	K - θ	443.30	0.898	N/A
OMC	UZAN	1309.29	0.314	0.566
OMC	MEPDG	432.38	0.497	1.137

Πίνακας 7: Παράμετροι Υλικού 2

Ποσοστό Υγρασίας (%)	Καταστατικό Μοντέλο	k_1	k_2	k_3
OMC	K - θ	608.05	0.775	N/A
OMC	UZAN	1204.62	0.416	0.37
OMC	MEPDG	592.15	0.511	0.772

Πίνακας 8: Παράμετροι Υλικού 3



Σχήμα 25: Δοκίμιο τοποθετημένο στο θάλαμο φόρτισης για την πραγματοποίηση δοκιμής AASHTO T307.

4. Αριθμητική Ανάλυση – Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

4.1 Γενικά Στοιχεία

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Elements Method – F.E.M.), καθίσταται πολύτιμη και χρησιμοποιείται ευρέως σε ποικίλα πεδία μηχανικής. Σκοπός αυτής της μεθόδου, αποτελεί η ανάπτυξη μιας αριθμητικής πορείας επίλυσης για σύνθετα μηχανικά προβλήματα. Συγκεκριμένα, η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αντικατάσταση του φορέα που προσομοιώνει μια σύνθετη γεωμετρικά κατασκευή με ένα σύνολο απλών υποπεδίων. Τα υποπεδία αυτά ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία και είναι φυσικά αρκετά μικρότερα του αρχικού φορέα και συνδέονται μεταξύ τους με κόμβους οι οποίοι συνήθως είναι τα άκρα τους, αλλά δύνανται να είναι και άλλα σημεία (Schwartz, 2012). Κατόπιν, η μέθοδος αναλύει αυτά τα υποπεδία και εξάγοντας τα αποτελέσματα των επιμέρους αναλύσεων των μικρότερων μερών δύναται να ληφθεί μια ικανοποιητική προσεγγιστική λύση της σύνθετης δομής. Το πιο ελκυστικό μέρος αυτής της μεθόδου είναι η ικανότητά της να επιλύει πολύ περίπλοκα προβλήματα μηχανικής, ειδικά με τη βοήθεια λογισμικού υπολογιστών. Το λογισμικό του υπολογιστή απαιτείται για να διευκολύνει την επίλυση των μεγάλων μητρώων που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της ανάλυσης χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο.

Παρά το γεγονός ότι δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε την ακριβή χρονική στιγμή κατά την οποία εισήχθη αυτή η μέθοδος, είναι γνωστό ότι αυτή η μέθοδος χρησιμοποιούνταν αρχικά για την επίλυση των σύνθετων ελαστικών και δομικών προβλημάτων που αντιμετώπιζαν οι πολιτικοί μηχανικοί και οι αεροναυπηγοί μηχανικοί. Ειδικότερα, η μέθοδος αυτή μπορεί να εντοπιστεί πίσω στην Κίνα στις αρχές της δεκαετίας του 1940 από το έργο των A. Hrennikoff και R. Courant, καθώς και θεωρείται ότι επινοήθηκε από τον καθηγητή Ιωάννη Αργύρη το 1944 στην Βρετανία, στην προσπάθειά του να επιλύσει το πρόβλημα της αξιόπιστης προσομοίωσης της κεκλιμένης γεωμετρίας των πτερύγων των μαχητικών αεροσκαφών. Εκείνη την εποχή, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων ονομάστηκε θεωρία μήτρας σε δομική ανάλυση και αρκετές λογοτεχνίες αρχίζουν να συζητούν αυτή τη μέθοδο και να τη βελτιώνουν. Παρά την μεγάλη χρησιμότητα της μεθόδου για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων, οι μελετητές έρχονταν συχνά αντιμέτωποι με μήτρες εκατοντάδων σειρών και στηλών. Αν και θεωρητικά οι μήτρες αυτές είναι επιλύσιμες, κρίθηκε σταδιακά αναγκαία η χρήση της μεθόδου με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Στη δεκαετία

του 1960 εισήχθησαν οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές και σύντομα πολλοί ερευνητές αρχίζουν να αναπτύσσουν προγράμματα ηλεκτρονικών υπολογιστών που είναι σε θέση να επιλύσουν μηχανικά προβλήματα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Η εισαγωγή γραφικών παραστάσεων απεικόνισης των προβλημάτων, ευνόησε την ανάπτυξη του προγράμματος την δεκαετία του 1980 και αυτό μειώνει τα ανθρώπινα λάθη στη μορφοποίηση των προβλημάτων πεπερασμένων στοιχείων. Από τότε μέχρι σήμερα, τα προγράμματα αναπτύσσονται όλο και περισσότερο για την επίλυση πιο σύνθετων προβλημάτων μηχανικής με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Είναι ευρέως γνωστό ότι τα εύκαμπτα οδοστρώματα είναι σύνθετες δομές μηχανικής λόγω των διαφόρων στρωμάτων, των ποικίλων υλικών και των οριακών συνθηκών που επικρατούν.

4.2 Εισαγωγή στα μοντέλα ανάλυσης οδοστρωμάτων

Τα εύκαμπτα οδοστρώματα, είναι πολύπλοκες κατασκευές που αποτελούνται από διαφορετικά υλικά με διαφορετικές ιδιότητες. Μερικά από αυτά τα υλικά συμπεριφέρονται με ελαστικό τρόπο, μερικά ιξωδοελαστικά και μερικά έχουν πλαστική συμπεριφορά. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο είναι σχεδόν αδύνατο να επιτευχθεί ένα τέλειο μαθηματικό μοντέλο.

Η δομοστατική ανάλυση των οδοστρωμάτων έχει αναπτυχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Αρχικά, χρησιμοποιώντας τη γραμμική ελαστική μοντελοποίηση που έχει αναπτύξει ο Boussinesq (1885). Το γραμμικό ελαστικό μοντέλο είναι ένα απλό αναλυτικό μοντέλο στο οποίο το υλικό υποτίθεται ότι είναι ισотροπικό και ομοιογενές. Σε αυτό το μοντέλο, οι οριζόντιες, κατακόρυφες, κανονικές και διατμητικές τάσεις μπορούν να υπολογιστούν υποθέτοντας ότι το υλικό είναι τελείως ελαστικό με γραμμική σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης. Στο μοντέλο αυτό το υλικό μπορεί να περιγραφεί πλήρως χρησιμοποιώντας δύο ελαστικές παραμέτρους, όπως είναι το ελαστικό μέτρο και ο λόγος Poisson.

Επιπροσθέτως, η θεωρία του Boussinesq, βελτιώθηκε από το έργο του Burmister (1945). Ο Burmister επέκτεινε τη θεωρία του Boussinesq από μια μονοστρωματική θεώρηση, σε ένα μοντέλο ελαστικής ανάλυσης πολυστρωματικού μέσου (επάλληλων στρώσεων). Ο Burmister εισήγαγε τη χρήση της πολυστρωματικής ελαστικής θεωρίας για την ανάλυση

των οδοστρωμάτων. Το μοντέλο του αντιπροσώπευε τα διαφορετικά στρώματα με διαφορετικό συντελεστή ελαστικότητας και λόγο Poisson. Ξεκίνησε τη λύση του για την κατασκευή δύο στρωμάτων οδοστρώματος και στη συνέχεια επέκτεινε τη λύση του σε τρία στρώματα οδοστρώματος .

Ωστόσο, τα γραμμικά ελαστικά μοντέλα παρουσιάζουν κάποιες αδυναμίες. Αρχικά, κρίνονται αναποτελεσματικά ως προς την αντιπροσώπευση της πραγματικής κατάστασης τάσης και παραμόρφωσης, εκτός αν πραγματοποιείται υπό την επίδραση χαμηλού επιπέδου τάσης και παραμόρφωσης. Τα λογισμικά γραμμικής ανάλυσης θεμελιώνονται κυρίως στις παραδοχές για γραμμικά ελαστικά υλικά, επιβολή αξονοσυμμετρικών φορτίων και θεώρηση ισότροπων υλικών. Δεδομένου λοιπόν, ότι καμία από τις προαναφερθείσες παραδοχές δεν επιβεβαιώνεται στην πράξη, η ακρίβεια των εν-λόγω λογισμικών τίθεται υπό αμφισβήτηση. Αυτός ήταν ο λόγος για την ανάπτυξη πολλών μη γραμμικών μοντέλων τα τελευταία σαράντα χρόνια. Ορισμένα από αυτά τα μοντέλα βασίστηκαν πειραματικά και ορισμένα βασίστηκαν στις θεωρητικές αρχές. Ορισμένα από αυτά τα μοντέλα ήταν πιο ακριβή από τα άλλα.

Συνεχίζοντας, αναπτύχθηκαν πιο προηγμένα μοντέλα που ονομάζονται τα ελαστοπλαστικά μοντέλα, τα οποία θα μπορούσαν να προβλέψουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τη συμπεριφορά του εδάφους σε υψηλά επίπεδα τάσης. Επιπλέον, θα μπορούσε να περιγράψει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη σχέση μεταξύ των διατμητικών και ογκομετρικών παραμορφώσεων του εδάφους.

4.3 Τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων

Η αριθμητική προσομοίωση των οδοστρωμάτων χρήσει της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), ευνοείται δεόντως από την ύπαρξη καταστατικών μοντέλων

προσδιορισμού του μέτρου επανάκτησης. Ο Waterhouse (1967), εισήγαγε πρώτα τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων προς τη δομική αξιολόγηση των οδοστρωμάτων, προτείνοντας τον υπολογισμό της γραμμικής ελαστικής απόκρισης του οδοστρώματος σε όλα τα σημεία του και όχι μόνο στα σημεία του άξονα συμμετρίας του φορέα. Έτσι, έχουν δημιουργηθεί διάφορα λογισμικά ανάλυσης οδοστρωμάτων που χωρίζονται κυρίως σε δυο κατηγορίες, τα λογισμικά γραμμικής ελαστικής ανάλυσης (όπως αναφέρθηκε προηγουμένως) και τα λογισμικά που βασίζονται στα πεπερασμένα στοιχεία.

Στα λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων κάθε στρώση στη δομή του οδοστρώματος θεωρείται ως ένα συνεχές στερεό, το οποίο χωρίζεται σε υπομήματα, τα οποία με τη σειρά τους χωρίζονται σε έναν αριθμό πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία αντιπροσωπεύουν το συνολικό πρόβλημα κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Συνδέονται μεταξύ τους με κόμβους οι οποίοι συνήθως είναι τα άκρα τους, αλλά δύνανται να είναι και άλλα σημεία (Schwartz, 2012), και η ανάλυση τους παρέχει μια προσεγγιστική λύση του προβλήματος για τις διάφορες συνοριακές συνθήκες και υπό την επίδραση διαφόρων τύπων φορτίων. Ειδικότερα, σε λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων γενικής χρήσης (Abaqus, Ansys, etc), υφίσταται η δυνατότητα της ενσωμάτωσης των διάφορων καταστατικών μοντέλων στο λογισμικό. Προγραμματίζεται δηλαδή, από το χρήστη σε κώδικα ο επιθυμητός καταστατικός νόμος εύρεσης, εν προκειμένω, του μέτρου επανάκτησης μέσω υπορουτίνας.

Τα μοντέλα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιούνται ευρέως για την ανάλυση και τον σχεδιασμό των οδοστρωμάτων, ενώ υπάρχουν γενικά τρεις κύριαξονοσυμμοι τύποι μοντέλων (Sutharsan 2013):

- Τρισδιάστατα μοντέλα ανάλυσης (3-D)
- Επίπεδα- δισδιάστατα μοντέλα ανάλυσης (Plane strain – 2-D)
- Αξονοσυμμετρικά μοντέλα ανάλυσης (δισδιάστατα και αυτά)

Τα αξονοσυμμετρικά μοντέλα χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανάλυση μοντέλων στα οποία τόσο η γεωμετρία όσο και η φόρτιση ενός μόνο τροχού είναι αξονοσυμμετρικές, μιας και είναι επαρκή και μειώνουν τον χρόνο ανάλυσης. Παρόλα αυτά, σε περίπτωση μελέτης ενός άξονα με δύο ή και περισσότερους τροχούς, κρίνεται αναγκαία η χρήση δισδιάστατου μη αξονοσυμμετρικού μοντέλου ή/ και τρισδιάστατου μοντέλου ανάλυσης. Η δισδιάστατη ανάλυση είναι ευκολότερη και γρηγορότερη από την τρισδιάστατη, όμως δεν δίνει την

δυνατότητα υπολογισμού ανομοιόμορφης επαφής τροχού στο οδόστρωμα, καθώς και πολλαπλών φορτίων τροχών (Rahman et al. 2011). Απεναντίας τα τρισδιάστατα μοντέλα ανάλυσης, παρέχουν ακριβέστερα αποτελέσματα και επεκτείνονται και στη μελέτη πολύπλοκων γεωμετριών οδοστρώματος, ακόμα και υπό μεταβαλλόμενη φόρτιση επιφάνειας τροχού στο οδόστρωμα (Wang 2001). Παρά το γεγονός ότι τα τρισδιάστατα μοντέλα ανάλυσης υπερκαλύπτουν τις δυνατότητες των υπολοίπων, χρησιμοποιούνται κυρίως μόνο όταν τα υπόλοιπα κρίνονται ανεπαρκή για τις ανάγκες της εκάστοτε μελέτης. Αυτό συμβαίνει, διότι τα τρισδιάστατα μοντέλα απαιτούν μεγαλύτερο όγκο πληροφοριών – χρόνο προετοιμασίας, καθώς και επαρκώς περισσότερο χρόνο υπολογισμών.

Εν συνεχεία, για την επίλυση του προβλήματος των πεπερασμένων στοιχείων, πρέπει να δομηθεί ένα μητρώο δυσκαμψίας, για το οποίο συνυπολογίζονται τρεις κύριοι παράγοντες: η γεωμετρία των στοιχείων, οι μηχανικές ιδιότητες των στοιχείων και οι βαθμοί ελευθερίας μετακίνησης των ορισθέντων κόμβων.

Σύμφωνα με το μοντέλο ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων η εξίσωση ισορροπίας ορίζεται ως εξής:

$$\{F\} = [K]^e \times \{U\}$$

Όπου:

- $\{F\}$: το διάνυσμα δύναμης στον κόμβο
- $[K]^e$: το ολικό μητρώο δυσκαμψίας
- $\{U\}$: το διάνυσμα μετακινήσεων των κόμβων

Οι παραμένουσες παραμορφώσεις και τάσεις υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\{\varepsilon\} = [B] \times \{U\}$$

$$\{\sigma\} = [D] \times \{\varepsilon\}$$

Όπου:

- $[B]$: είναι το μετακινησιακό μητρώο παραμορφώσεων
- $[D]$: το ελαστικό μητρώο

Όσον αφορά στο ολικό μητρώο δυσκαμψίας $[K]^e$, αυτό βασίζεται στην επαλληλία των ατομικών μητρώων δυσκαμψίας των στοιχείων $[k]^e$, ως εξής:

$$[K]^e = \sum_i \int_{V_i} [B]^T \times [k]^e \times [B] \times dV$$

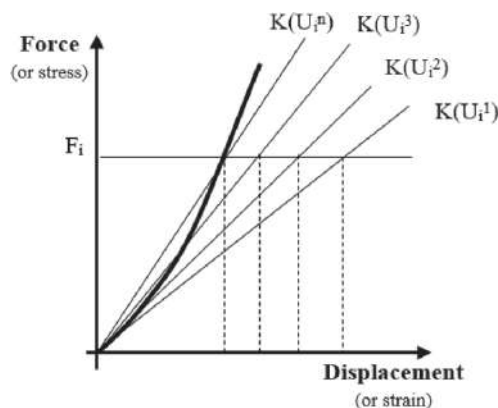
Οι κομβικές μετατοπίσεις υπολογίζονται μέσα από μια επαναληπτική διαδικασία αναπροσαρμογής του επαυξητικού βήματος φόρτισης (incremental loading) σύμφωνα με τη σχέση:

$$\{U^n\} = [K^{n-1}]^{-1} \times \{F\}$$

Στην συνέχεια οδηγούμαστε στην προσέγγιση, των αναγκαίων για τα καταστατικά μοντέλα του M_R , τάσεων ως εξής:

$$\{\sigma^n\} = [D^{n-1}]^{-1} \times [B] \times \{U^n\}$$

Η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται έως ότου επέλθει ισορροπία μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών φορτίων, με ένα βέβαια προκαθορισμένο ποσοστό ανεκτικότητας (tolerance factor), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα...



Σχήμα 26: Επαναληπτική διαδικασία προς την επίτευξη κατάστασης ισορροπίας για μια φόρτιση μετά από n επαναλήψεις.

4.4 Αριθμητική προσομοίωση

4.4.1 Γενικά

Στο παρόν υποκεφάλαιο αναφέρεται βήμα προς βήμα, η διαδικασία της αριθμητικής προσομοίωσης μιας τυπικής διατομής εύκαμπτου οδοστρώματος (flexible pavement), αποσκοπώντας στην εκτίμηση της απόκρισής του στα αξονικά φορτία. Προκειμένου να ερευνηθεί η επιρροή της μη γραμμικότητας των υλικών της βάσης/υπόβασης στη συνολική απόκριση του οδοστρώματος, γίνεται θεώρηση γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς της ασφαλικής στρώσης (asphalt layer) και του υπεδάφους (subgrade), ενώ για τα ασύνδετα υλικά της βάσης (subbase) θεωρείται μη γραμμική μηχανική συμπεριφορά.

4.4.2 Το λογισμικό Abaqus

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι το Abaqus, το οποίο διατίθεται στην αγορά από την εταιρεία Dassault Systemes. Το Abaqus είναι ένα λογισμικό πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων με μεγάλο φάσμα εφαρμογών, που μπορεί να καλύψει από δομικά, στατικά και δυναμικά προβλήματα, μέχρι προβλήματα μεταφοράς θερμότητας, ακουστικής και ρευστοδυναμικής, καθώς και το συνδυασμό των ανωτέρω. Εν συνεχεία, καθιστά δυνατή τη μοντελοποίηση και ανάλυση προβλημάτων εξαιρετικά περίπλοκων γεωμετρικών και φορτικών χαρακτηριστικών, αλλά και παρέχει συμβατότητα με άλλα προγράμματα σχεδιασμού σε άλλους τύπους αρχείων (CAD etc).

Το γεγονός ότι εν αντιθέσει με άλλους δημοφιλείς κώδικες πεπερασμένων στοιχείων, το Abaqus δημιουργήθηκε εξ αρχής, με πλήρεις μη γραμμικές εξισώσεις που δεν βασίζονται σε απλοποιητικές παραδοχές, δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης οποιασδήποτε πραγματικής πολύπλοκης φυσικής κατάστασης. Μάλιστα, δύναται πραγματοποιώντας μη γραμμική ανάλυση, η αυτόματη αναπροσαρμογή του επαυξητικού βήματος φόρτισης και ανοχής για κάθε φορτίο, έως ότου επιτευχθεί η επιθυμητή σύγκλιση με επαρκή ακρίβεια. Ένα ακόμα εξαιρετικά σημαντικό χαρακτηριστικό του λογισμικού αυτού, είναι ότι παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει σε αυτό κώδικα γραμμένο σε FORTRAN μέσω μιας υπορουτίνας UMAT (User Material Subroutine), προκειμένου να προσομοιωθεί σωστά η μηχανική συμπεριφορά ειδικών κατηγοριών υλικών (όπως εν προκειμένω τα ασύνδετα υλικά οδοστρώσας).

4.4.3 Διαδικασία δημιουργίας μοντέλου τυπικής διατομής εύκαμπτου οδοστρώματος

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζεται η πορεία δημιουργίας του μοντέλου ανάλυσης της τυπικής διατομής εύκαμπτου οδοστρώματος. Κατά την μοντελοποίηση της διατομής λαμβάνονται υπόψιν το εύρος της διατομής (domain size), οι συνοριακές συνθήκες (boundary conditions), η πυκνότητα του καννάβου πεπερασμένων στοιχείων, (mesh density) και το είδος των πεπερασμένων στοιχείων (type of elements) που χρησιμοποιούνται για τη διακριτοποίηση του φορέα, (Li 2013).

Προκειμένου να εξοικονομηθεί υπολογιστικός χρόνος και μιας και για τις ανάγκες της παρούσας ανάλυσης ο φορέας είναι αξονοσυμμετρικός, τόσο γεωμετρικά, όσο και φορτικά, η ανάλυση η οποία θα πραγματοποιηθεί θα είναι η δισδιάστατη αξονοσυμμετρική ανάλυση.

Η διάμετρος του τροχού φόρτισης ορίζεται ίση με 300mm, το εύρος της διατομής είναι συνάρτηση της ακτίνας του κυκλικού φορτίου ($R=300\text{mm}/2=150\text{mm}$) , με την οριζόντια διάσταση να θεωρείται ίση με 50R και την κατακόρυφη ίση με 100R. Με βάση τις παραδοχές αυτές, η οριζόντια διάσταση του φορέα θα είναι ίση με 7.5m ενώ η κατακόρυφη διάσταση θα είναι ίση με 15m. Η κατακόρυφη διάσταση ορίζεται περίπου 15 φορές μεγαλύτερη απ' ότι σε μια πραγματική εύκαμπτη διατομή οδοστρώματος (περίπου 1m), προκειμένου τα αποτελέσματα της ανάλυσης και κυρίως αυτά που αφορούν την επιφανειακή υποχώρηση να είναι αντιπροσωπευτικά και αναλλοίωτα, ενώ η οριζόντια διάσταση της διατομής ορίστηκε τόσο μεγάλη όσο να μην απαιτούνται συνοριακές συνθήκες για το άκρο της.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η διατομή αποτελείται από τρεις στρώσεις, οι οποίες ορίζονται ως εξής:

- Η ασφαλτική στρώση (AC layer), αποτελείται από ασφαλτόμιγμα με γραμμική ισότροπη συμπεριφορά.
- Η στρώση βάσης/υπόβασης (Subbase layer), η οποία αποτελείται από ασύνδετα κοκκώδη υλικά με μη γραμμική συμπεριφορά.
- Η στρώση έδρασης (Subgrade layer), η οποία αποτελείται από γαιώδες υλικό με γραμμική ισότροπη συμπεριφορά.

Οι μηχανικές ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των υλικών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 7.

Μηχανικές Ιδιότητες Εύκαμπτου Οδοστρώματος			
Στρώσεις Οδοστρώματος	Πάχος Στρώσης (cm)	Μέτρο Ελαστικότητας (E), (Mpa)	Λόγος Poisson (ν)
Ασφαλτική Στρώση	{8, 10, 15, 20}	3000	0,35
Στρώση Βάσης/υπόβασης	{30, 40}	400 (αρχικό)	0,45
Υπέδαφος	-	80	0,35

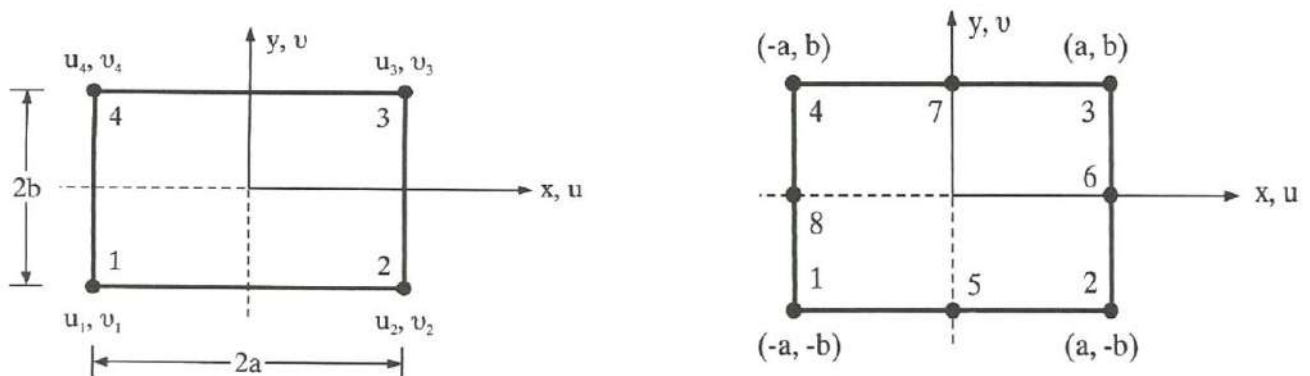
Πίνακας 9 : Χαρακτηριστικά υλικών διατομής οδοστρώματος.

Όπως φαίνεται στον άνωθεν πίνακα, η στρώση έδρασης (subgrade layer), θεωρείται ότι έχει πολύ μεγάλο πάχος (συνήθης παραδοχή γραμμικής ελαστικής ανάλυσης), ενώ τα πάχη των υπόλοιπων 2 στρώσεων λαμβάνουν διαφορετικές τιμές, προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή του πάχους τους στην απόκριση του συνόλου της κατασκευής. Σημειώνεται επίσης, ότι επικρατούν συνθήκες πλήρους συνάφειας μεταξύ των υλικών στις διεπιφάνειες των στρώσεων (no slip condition), προκειμένου η διατομή να μπορεί να θεωρηθεί συνεχές μέσο.

Η ασφαλτική στρώση της επιφάνειας του εύκαμπτου οδοστρώματος, φορτίζεται με μια ομοιόμορφη φόρτιση της τάξεως των 0.69 MPa, προερχόμενη από ένα μοναδικό κυκλικό τροχό, διαμέτρου 300mm. Επιπροσθέτως, το φορτίο θεωρείται στατικό από τη στιγμή που επιβάλλεται σε ένα στάδιο φόρτισης, όμως από τη στιγμή που πραγματοποιείται μη γραμμική ανάλυση, επιβάλλεται τμηματικά σε επιμέρους επαυξητικά βήματα (incremental loading). Αναλυτικότερα, το αρχικό βήμα φόρτισης αποτελεί πολύ μικρό ποσοστό του συνολικού φορτίου, ώστε να περιοριστεί η επίδρασή του στην τελική λύση, ενώ σε κάθε βήμα πραγματοποιούνται διαδοχικές επαναλήψεις προς την εξασφάλιση ισορροπίας μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων και να είναι το εκάστοτε βήμα ευσταθές.

Όσον αφορά στις συνοριακές συνθήκες του εξεταζόμενου μοντέλου, η κάτω παρειά λαμβάνεται ως πάκτωση, προκειμένου να αποφευχθούν οριζόντιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις, καθώς και η περιστροφή. Το αριστερό όριο, θεωρείται ως κύλιση λόγω της αξονικής συμμετρίας του φορέα, ενώ για να αποφύγουμε την περαιτέρω με κυλίσεις δέσμευση του δεξιού ορίου του φορέα, η οριζόντια διάστασή του λήφθηκε επαρκώς μεγάλη και είναι ανεπηρέαστο το όριο αυτό από την φόρτιση.

Για τον κάνναβο των πεπερασμένων στοιχείων επιλέγονται στοιχεία ορθογωνικά 2^{ης} τάξης με οκτώ κόμβους, (ένας κόμβος σε κάθε άκρο και σε κάθε μέσο πλευράς του στοιχείου- CAX8R) , έναντι των ορθογωνικών στοιχείων 1^{ης} τάξης (4 κόμβοι, ένας σε κάθε άκρο- CAX4R) , καθότι προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια. Στο σχήμα 27 φαίνονται οι διαφορετικοί τύποι στοιχείων CAX4R(α), CAX8R(β).

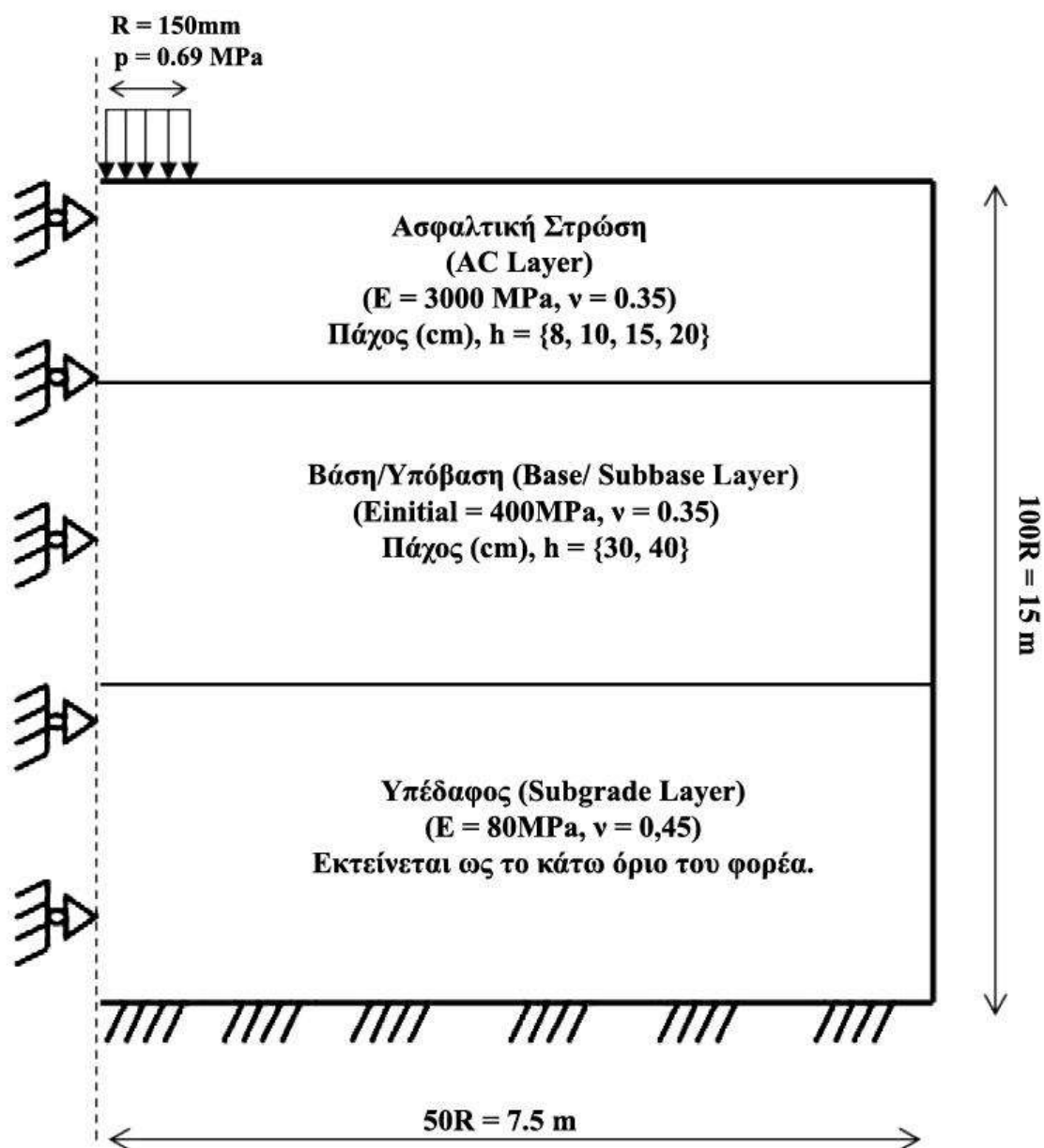


Σχήμα 27: Στοιχεία α) CAX4R, β) CAX8R

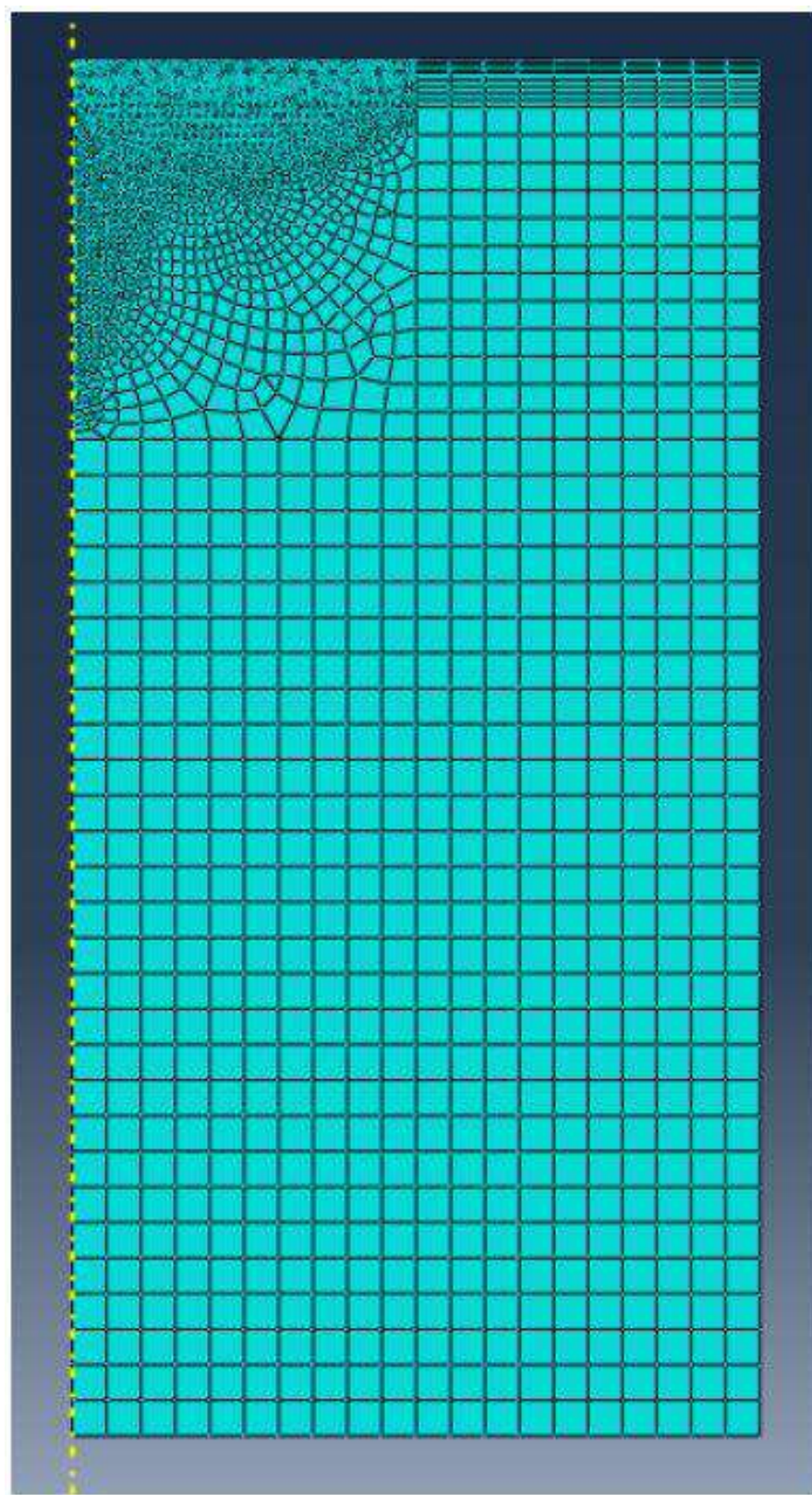
Κατά την επίλυση του αριθμητικού μοντέλου, οι απαιτήσεις υπολογιστικής ακρίβειας δεν είναι οι ίδιες σε όλη την έκταση του φορέα. Συγκεκριμένα, στο άνω αριστερό άκρο του μοντέλου οι απαιτήσεις είναι σημαντικά υψηλότερες από ότι στον υπόλοιπο φορέα, ενώ στο κάτω και στο δεξιό μέρος του σημαντικά χαμηλότερες. Λαμβάνοντας υπόψιν λοιπόν τις διαφορετικές αυτές απαιτήσεις υπολογιστικής ακρίβειας, αποφεύγεται η χρήση ενιαίου καννάβου πεπερασμένων στοιχείων, αλλά ο φορέας χωρίζεται σε επιμέρους υποτιμήματα και εφαρμόζεται σε καθένα από αυτά διαφορετική διακριτοποίηση. Ως εκ τούτου, ο φορέας υφίσταται πύκνωση στο άνω αριστερό τμήμα του, χρήσει μικρότερων στοιχείων, ενώ στο κάτω και στο δεξιό όριό του τα στοιχεία είναι σημαντικά μεγαλύτερα. Κατά τη διακριτοποίηση κάθε διατομής ελέγχου πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι σταθερότητας καννάβου

(verify mesh), μέσω του λογισμικού. Στο σχήμα 29 φαίνεται ο συνολικός φορέας διακριτοποιημένος, ενώ στο σχήμα 30 φαίνεται η πυκνότερη διακριτοποίηση του φορέα στο άνω αριστερό άκρο του.

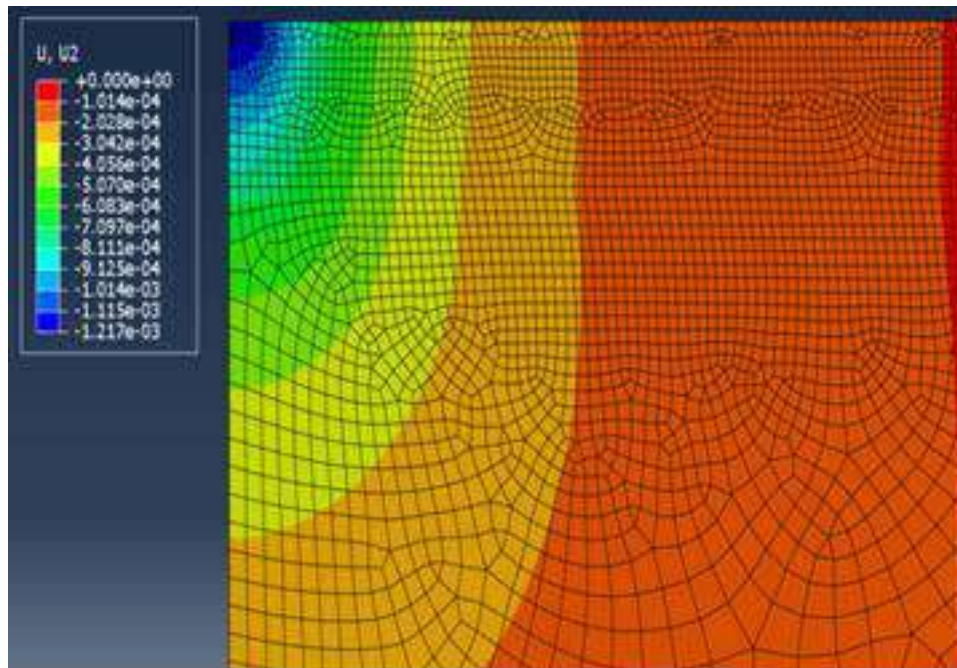
Στο παρακάτω σχήμα 28, φαίνεται ο τυπικός φορέας με βάση τον οποίον έγιναν οι υπολογισμοί, επί του οποίου αναγράφονται συνοπτικά και οι παραδοχές της ανάλυσης.



Σχήμα 28: Απεικόνιση του φορέα, όπου φαίνονται οι στρώσεις και βασικές παραδοχές της διατομής και των υλικών.



Σχήμα 29: Συνολικός διακριτοποιημένος φορέας

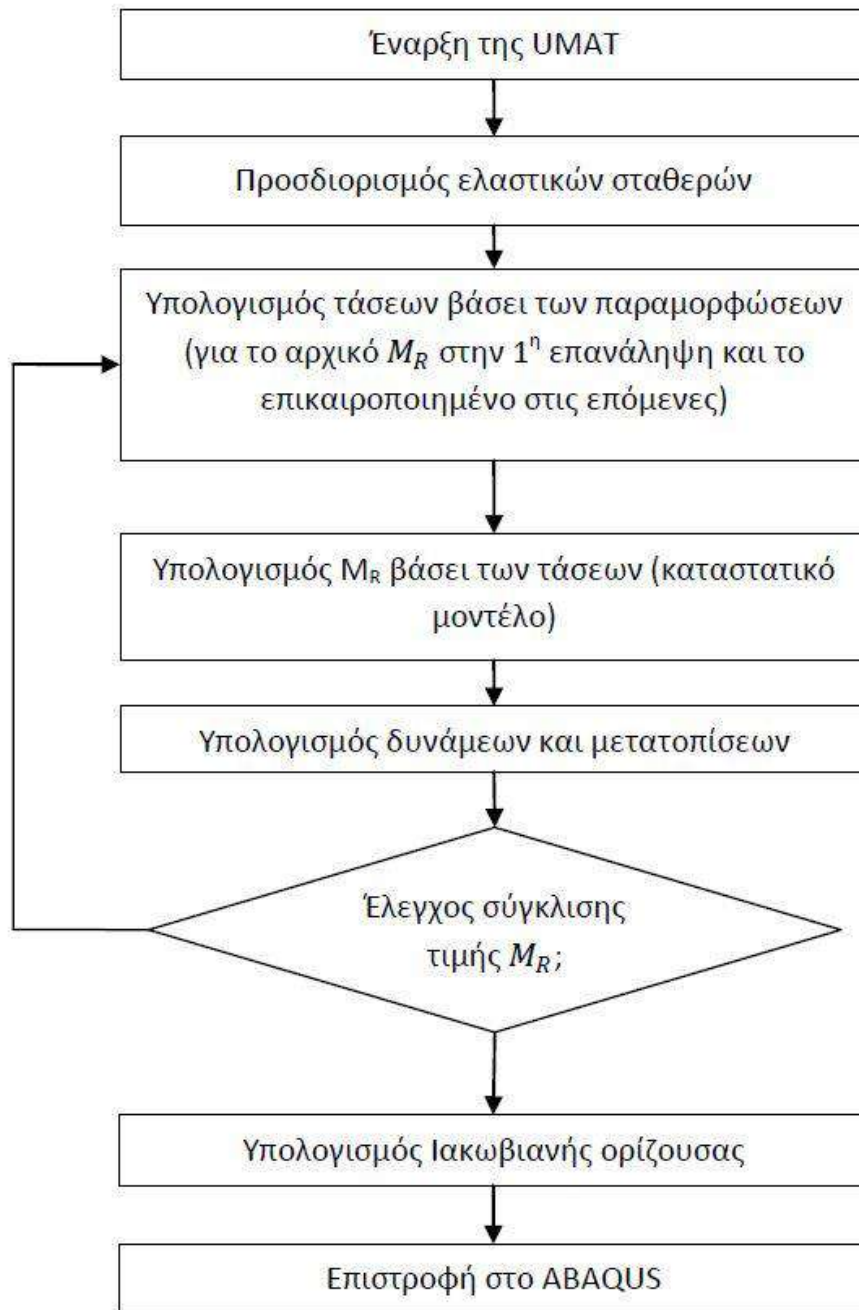


Σχήμα 30: Λεπτομέρεια διακριτοποίησης άνω αριστερού άκρου του φορέα. Περιλαμβάνει την ασφαλικτή στρώση την βάση/υπόβαση, και μέρος της στρώσης έδρασης. Ενδεικτικές τιμές της επιφανειακής υποχώρησης u_{22} στο κέντρο της φόρτισης.

4.4.4 Χαρακτηριστικά της υπορουτίνας UMAT

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, το λογισμικό Abaqus, παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα να ορίσει τη μηχανική συμπεριφορά των υλικών μέσω της κωδικοποίησης των καταστατικών τους μοντέλων και εισαγωγής τους στο λογισμικό μέσω μιας υπορουτίνας UMAT. Ο κώδικας είναι γραμμένος στη γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN και μέσω της υπορουτίνας, εισάγεται στο Abaqus η μεθοδολογία ανάλυσης, ώστε να υπολογιστούν οι τάσεις και οι παραμορφώσεις στη στρώση της βάσης, χρήσει των καταστατικών μοντέλων που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2. Ο χρησιμοποιούμενος κώδικας είναι κατάλληλα τροποποιημένος ώστε να αφορά δισδιάστατη αξονοσυμμετρική ανάλυση και τα καταστατικά μοντέλα K-θ, Uzan και MEPDG. Κατά την ανάπτυξη της υπορουτίνας, προσαρμόζονται σε αυτή διάφορες παράμετροι και τιμές από το κεντρικό πρόγραμμα, ενώ ανάμεσα στους κυριότερους υπολογισμούς της είναι ο ορισμός του επαυξητικού μητρώου δυσκαμψίας (Ιακωβιανή ορίζουσα), καθώς και η εκτίμηση της ολικής τάσης, ανανεώνοντάς την με το πέρας κάθε επαυξητικού βήματος φόρτισης. Η UMAT καλείται να προσδιορίσει τη μηχανική συμπεριφορά των ασύνδετων υλικών της βάσης και να υπολογίσει σε κάθε επανάληψη φόρτισης το μητρώο δυσκαμψίας και τη σχέση τάσεων – παραμορφώσεων σε

κάθε σημείο υπολογισμού με βάση των δεδομένο κάρναβο πεπερασμένων στοιχείων έως ώτου επιτευχθεί σύγκλιση. Στο παρακάτω σχήμα 31 φαίνεται ένα τυπικό διάγραμμα ροής της υπορουτίνας (Li 2013), αρχικά ορίζονται οι ελαστικές παράμετροι και στη συνέχεια υπολογίζεται το μητρώο δυσκαμψίας.



Σχήμα 31: Τυπικό διάγραμμα ροής της υπορουτίνας (Li 2013)

Κατά την ανάπτυξη του κώδικα, ο χρήστης εισάγει κάποιες βασικές μεταβλητές, γεφυρώνοντας την επικοινωνία μεταξύ του κύριου προγράμματος και της υπορουτίνας, πριν την εκκίνηση της ανάλυσης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι μεταβλητές αυτές είναι ο λόγος Poisson για την στρώση της βάσης/υπόβασης ($\nu=0.35$), οι παράμετροι των καταστατικών μοντέλων k_1 , k_2 , k_3 , η αρχική υπόθεση του ελαστικού μέτρου ($E_{\text{initial}}=400$ MPa) για την επιβολή του πρώτου βήματος φόρτισης, μια αρχική υποθετική τιμή του μέτρου επανάκτησης προς αποφυγή προβλήματος μηδενισμού τάσεων ($M_R = 50$ MPa), μια σταθερά K_0 για τον προσδιορισμό των οριζόντιων τάσεων υπό συνθήκες ηρεμίας (τυπική τιμή $K_0 = 3$) και μια μέση πυκνότητα του υλικού βάσης για τον υπολογισμό των επιπρόσθετων φορτίσεων λόγω του υλικού (θέτουμε μια μέση ομοιόμορφη τιμή $\rho=2.200$ Kg/m³). Οι μεταβλητές K_0 και ρ λαμβάνουν τις αντιπροσωπευτικές τους τιμές μόνο όταν λαμβάνεται υπόψιν η αρχική φόρτιση, λόγω του ιδίου βάρους των υλικών και οι απομένουσες τάσεις, λόγω των φορτίων που ασκήθηκαν κατά την κατασκευή και συμπίεση των στρώσεων του οδοστρώματος.

Στους παρακάτω πίνακες 8-10 παρατίθενται οι τιμές των παραμέτρων των καταστατικών μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση για κάθε υλικό, υπό συνθήκες βέλτιστης περιεκτικότητας υγρασίας (OMC).

Σταθερές (OMC)	Καταστατικό Μοντέλο		
	K - θ	UZAN	MEPDG
k_1	787.02	1878.32	738
k_2	0.634	0.175	0.301
k_3	N/A	0.461	1.025

Πίνακας 10 : Βασικές παράμετροι καταστατικού μοντέλου, Υλικό 1

Σταθερές (OMC)	Καταστατικό Μοντέλο		
	K - θ	UZAN	MEPDG
k_1	443.30	1309.29	432.38
k_2	0.898	0.314	0.497
k_3	N/A	0.566	1.137

Πίνακας 11 : Βασικές παράμετροι καταστατικού μοντέλου, Υλικό 2

Σταθερές (OMC)	Καταστατικό Μοντέλο		
	K - θ	UZAN	MEPDG
k_1	608.05	1204.62	592.15
k_2	0.775	0.416	0.511
k_3	N/A	0.37	0.772

Πίνακας 12 : Βασικές παράμετροι καταστατικού μοντέλου, Υλικό 3

Κατά την ανάλυση τα ασύνδετα υλικά θεωρούνται ισότροπα, και εφαρμόζεται μη γραμμική ανάλυση λαμβάνοντας υπόψιν αρχικές και προϋπάρχουσες τάσεις.

Οι κύριοι παράγοντες, που εξάγονται από το λογισμικό με το πέρας της ανάλυσης είναι οι εξής:

- Η επιφανειακή υποχώρηση (Surface deflection, u_{22}), στο κέντρο της κυκλικής φόρτισης, επί του άξονα συμμετρίας του φορέα.
- Η οριζόντια εφελκυστική τάση (Horizontal tensile strength σ_{11}), στον πυθμένα της ασφαλικής στρώσης.
- Η οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση (Horizontal tensile strain ε_{11}), στον πυθμένα της ασφαλικής στρώσης.
- Η κατακόρυφη θλιπτική τάση (Vertical compressive stress σ_{22}), στην κορυφή της στρώσης έδρασης.
- Η κατακόρυφη θλιπτική παραμόρφωση (Vertical compressive strain ε_{22}), στην κορυφή της στρώσης έδρασης.

Οι οριζόντια εφελκυστική τάση και παραμόρφωση σχετίζεται με την αστοχία του οδοστρώματος λόγω κόπωσης ασφαλτομίγματος, ενώ η κατακόρυφη θλιπτική τάση και παραμόρφωση σχετίζεται με την αστοχία του οδοστρώματος, λόγω εκτεταμένης παραμόρφωσης της στρώσης έδρασης.

Οι συμβολισμοί και οι μονάδες μέτρησης των προαναφερθέντων κρίσιμων παραμέτρων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 13 και οι θέσεις τους στο παρακάτω σχήμα 32.

Κρίσιμη εξεταζόμενη παράμετρος	Συμβολισμός- μονάδα μέτρησης
Επιφανειακή υποχώρηση - άξονας συμμετρίας φορέα	u_{22} (μm)
Οριζόντια εφελκυστική τάση - πυθμένας ασφαλτικής στρώσης	σ_{11} (Mpa)
Οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση - πυθμένας ασφαλτικής στρώσης	ε_{11} (μm/m)
Κατακόρυφη θλιπτική τάση - κορυφή στρώσης έδρασης	σ_{22} (Mpa)
Κατακόρυφη θλιπτική παραμόρφωση - κορυφή στρώσης έδρασης	ε_{22} (μm/m)

Πίνακας 13: Κρίσιμες παράμετροι απόκρισης οδοστρώματος.



Σχήμα 32: Κρίσιμες θέσεις ελέγχου τάσεων και παραμορφώσεων στη διατομή ελέγχου.

5. Αποτελέσματα

5.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης των τριών Υλικών 1-3 που πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό Abaqus και την υπορουτίνα UMAT, που μας δίνει τη δυνατότητα περιγραφής της μηχανικής συμπεριφοράς των ασύνδετων υλικών, μέσω των καταστατικών μοντέλων προσδιορισμού του μέτρου επανάκτησης M_R . Υπενθυμίζεται ότι η συμπεριφορά της ασφαλικής στρώσης και του υπεδάφους του οδοστρώματος θεωρείται γραμμική ελαστική, ενώ κατά την ανάλυση της βάσης/υπόβασης το ασύνδετο υλικό θεωρείται ως ισότροπο και η συμπεριφορά του ως μη γραμμική. Τα τρία Υλικά διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την κοκκομετρική τους διαβάθμιση και ειδικότερα στο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού που περιέχουν και εξετάζονται στο βέλτιστο ποσοστό υγρασίας τους (OMC).

Επιπροσθέτως, πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των τριών υλικών, διατηρώντας όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους κοινές (πάχη στρώσεων, καταστατικό μοντέλο) και σύγκριση των αποτελεσμάτων για διατομές του ίδιου υλικού, αλλά αλλάζοντας κάθε φορά κάποια διαφορετική μεταβλητή της διατομής.

5.2 Αποτελέσματα και Σύγκριση μεταξύ των Υλικών 1-3

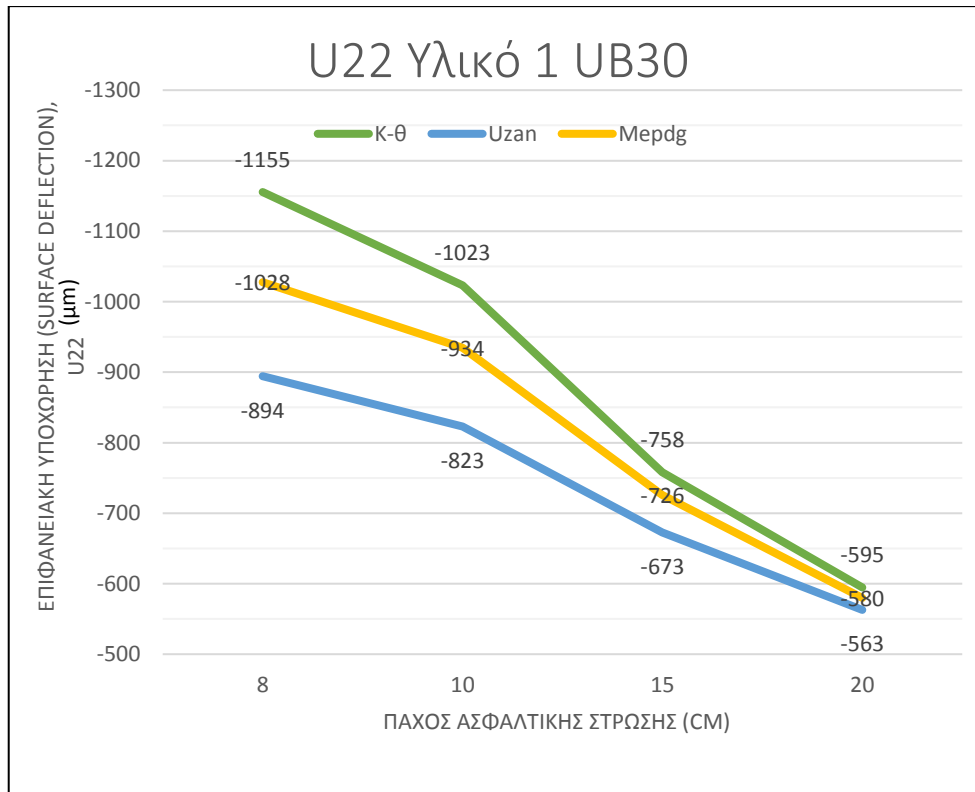
Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τα 3 εξεταζόμενα υλικά και για τις διαφορετικές παραλλαγές των διατομών που ερευνήθηκαν, καθώς και για τα τρία διαφορετικά καταστατικά μοντέλα. Επιπλέον, για κάθε εξεταζόμενη παράμετρο κατασκευάζονται και τα αντίστοιχα συγκριτικά γραφήματα, παρουσιάζοντας τα διάφορα αποτελέσματα για τα διαφορετικά πάχη τόσο της βάσης/υπόβασης, όσο και της ασφαλικής στρώσης, αλλά και για τα τρία διαφορετικά υλικά και τα διαφορετικά καταστατικά μοντέλα.

5.2.1 Επιφανειακή Υποχώρηση U_{22}

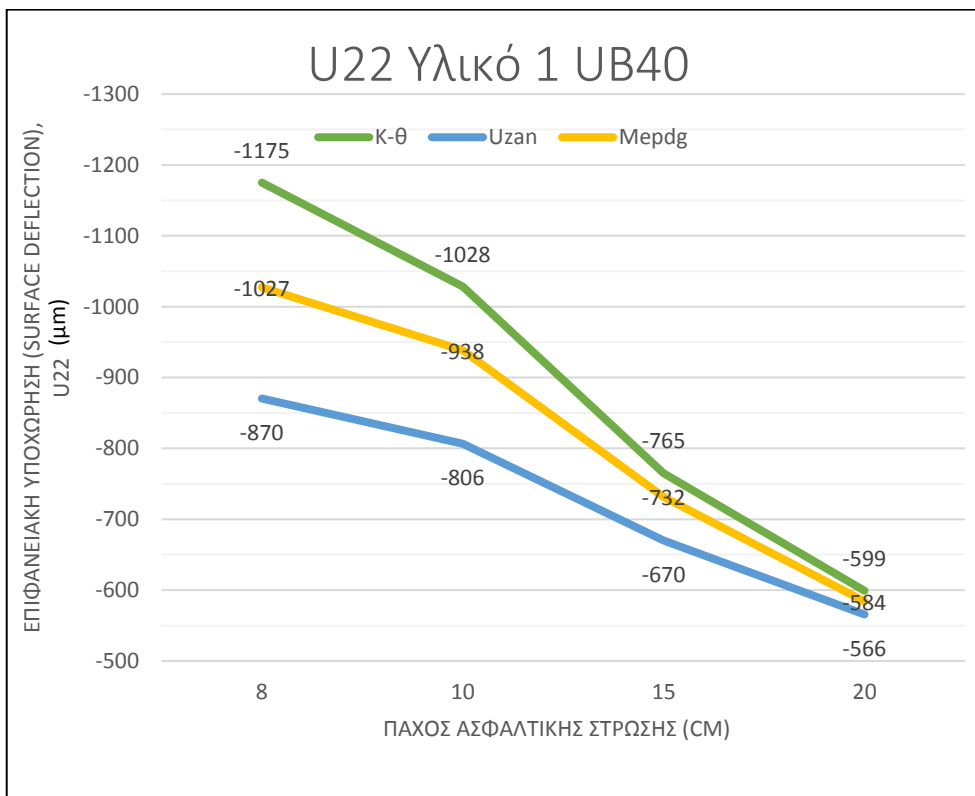
Επιφανειακή υποχώρηση (surface deflection), u_{22} (μm)					
Υλικό	Στρώση βάσης/υπόβασης (cm)	Ασφαλτική στρώση (cm)	Καταστατικά Μοντέλα		
			K-θ	UZAN	MEPDG
1	30	8	-1155	-894	-1028
		10	-1023	-823	-934
		15	-758	-673	-726
		20	-595	-563	-580
	40	8	-1175	-870	-1027
		10	-1028	-806	-938
		15	-765	-670	-732
		20	-599	-566	-584
2	30	8	-1330	-976	-1175
		10	-1150	-920	-1102
		15	-815	-744	-807
		20	-624	-613	-624
	40	8	-1465	-987	-1241
		10	-1191	-912	-1106
		15	-840	-764	-832
		20	-639	-631	-640
3	30	8	-1236	-1003	-1131
		10	-1086	-927	-1032
		15	-798	-738	-779
		20	-619	-604	-613
	40	8	-1296	-1008	-1160
		10	-1112	-923	-1042
		15	-815	-749	-795
		20	-630	-615	-623

Πίνακας 14: Επιφανειακή Υποχώρηση (Surface Deflection – u_{22}), για τις διάφορες στρώσεις και τα τρία εξεταζόμενα υλικά.

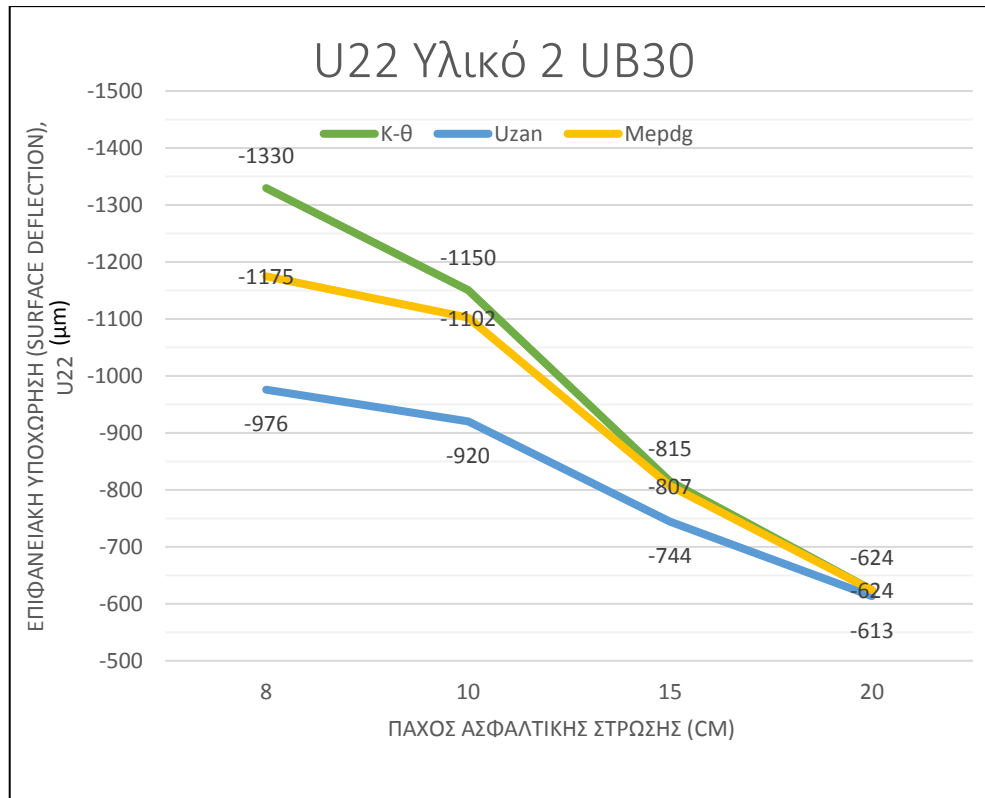
Λαμβάνοντας υπόψιν τα δεδομένα του πίνακα 12, μορφώνονται τα παρακάτω συγκριτικά σχήματα 33-38 στα οποία παρουσιάζονται οι διαφορετικές τιμές της επιφανειακής υποχώρησης για κάθε υλικό, στρώση βάσης/υπόβασης και για τα διαφορετικά πάχη της ασφαλτικής στρώσης.



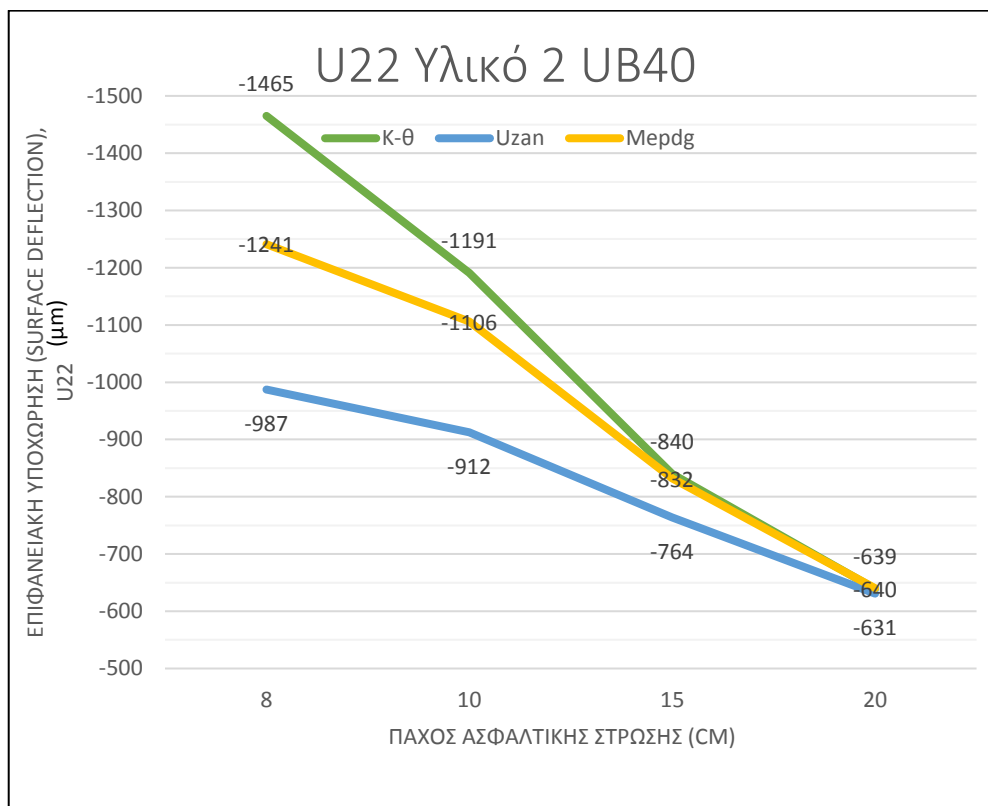
Σχήμα 33 : Επιφανειακή Υποχώρηση (u_{22}) – Υλικό 1 UB30



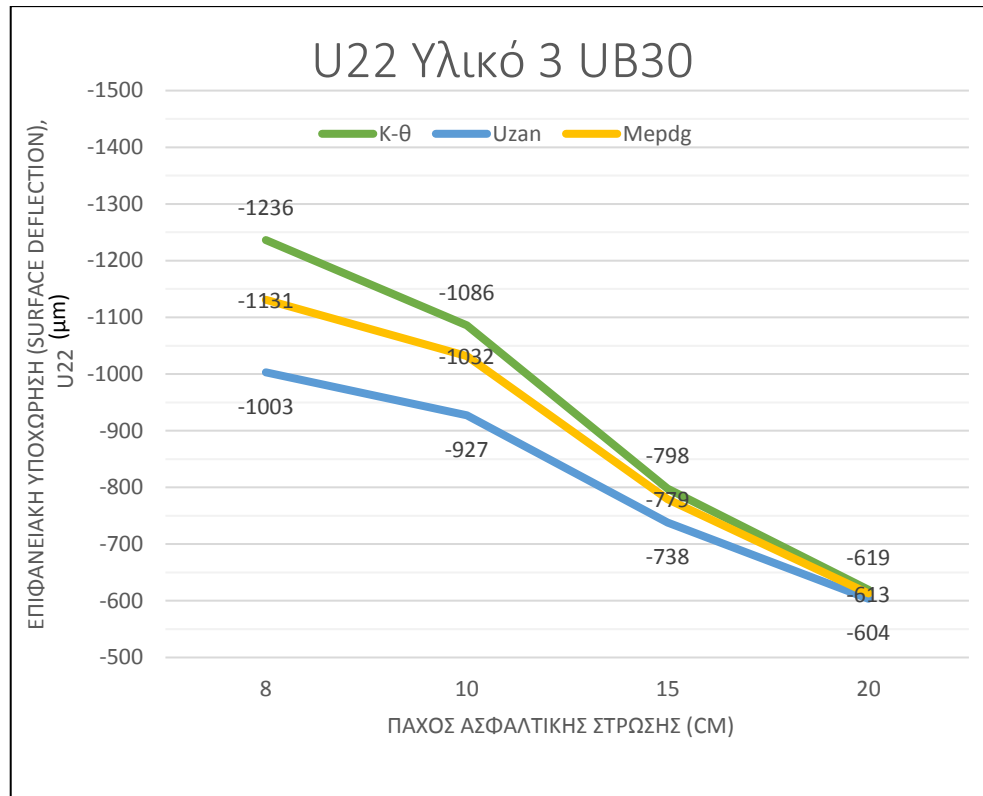
Σχήμα 34: Επιφανειακή Υποχώρηση (u_{22}) – Υλικό 1 UB40



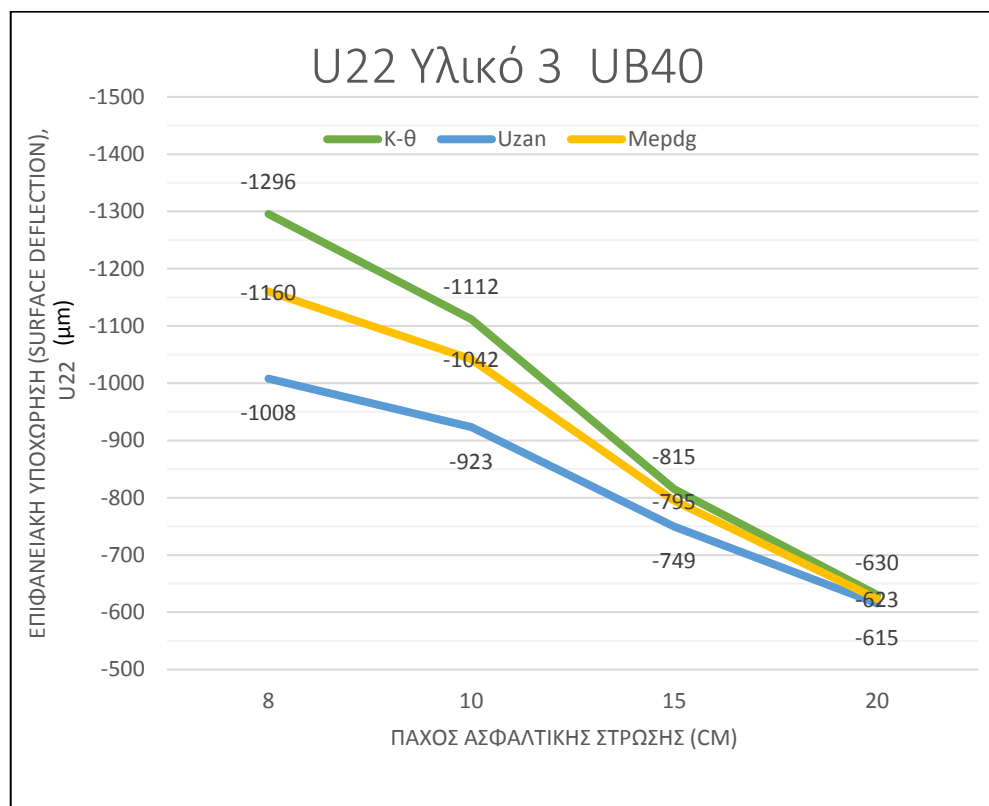
Σχήμα 35: Επιφανειακή Υποχώρηση (u_{22}) – Υλικό 2 UB30



Σχήμα 36: Επιφανειακή Υποχώρηση (u_{22}) – Υλικό 2 UB40



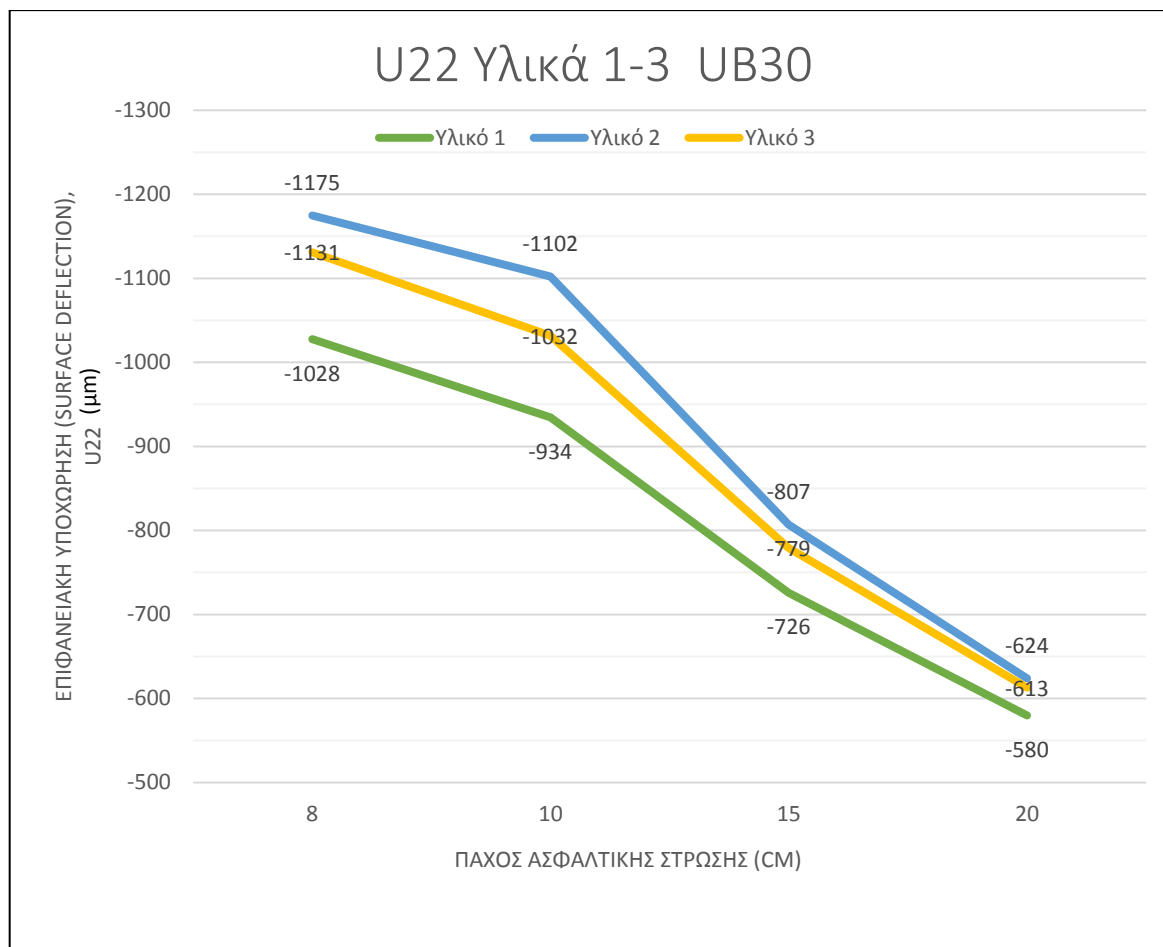
Σχήμα 37: Επιφανειακή Υποχώρηση (u_{22}) – Υλικό 3 UB30



Σχήμα 38: Επιφανειακή Υποχώρηση (u_{22}) – Υλικό 3 UB40

Παρατηρώντας τα παραπάνω σχήματα 33-38, για όλα τα υλικά και τα καταστατικά μοντέλα, η τιμή της επιφανειακής υποχώρησης είναι μεγαλύτερη για το μικρότερο πάχος ασφαλτικής στρώσης, ενώ όσο το πάχος αυξάνεται εκείνη μειώνεται σημαντικά. Αναλυτικότερα, η τιμή της για το υλικό 1 με στρώση βάσης/υπόβασης UB30 και το μοντέλο K-θ, μειώνεται κατά 11% για την στρώση 10cm από εκείνη των 8cm, κατά 26% για εκείνη των 15cm από των 10cm και κατά 21.5% για εκείνη των 20cm από τα 15cm, ενώ η ολική μείωση για την στρώση των 20cm από την μικρότερη των 8cm είναι 48.5%. Αντίστοιχα για το μοντέλο UZAN, μειώνεται κατά 8% για την στρώση 10cm από εκείνη των 8cm, κατά 18% για εκείνη των 15cm από των 10cm και κατά 16% για εκείνη των 20cm από τα 15cm, ενώ η ολική μείωση για την στρώση των 20cm από την μικρότερη των 8cm είναι 37%. Τέλος για το μοντέλο MEPDG, μειώνεται κατά 9% για την στρώση 10cm από εκείνη των 8cm, κατά 22% για εκείνη των 15cm από των 10cm και κατά 20% για εκείνη των 20cm από τα 15cm, ενώ η ολική μείωση για την στρώση των 20cm από την μικρότερη των 8cm είναι 43.5%. Σημειώνεται ωστόσο, ότι οι φθίνουσες κλίσεις των ευθειών είναι μεγαλύτερες σε κάθε περίπτωση για το καταστατικό μοντέλο K-θ και μικρότερες για εκείνο του Uzan.. Επίσης, για κάθε υλικό, η επιρροή της στρώσης βάσης/υπόβασης δεν δείχνει να επιφέρει αξιοσημείωτες μεταβολές στην τιμή της επιφανειακής υποχώρησης, αφού για το ίδιο πάχος ασφαλτικής στρώσης και καταστατικό μοντέλο είναι <5%.

Στο σχήμα 39 που ακολουθεί πραγματοποιείται μια σύγκριση μεταξύ των τριών διαφορετικών υλικών, για τα διάφορα πάχη ασφαλτικής στρώσης (8, 10, 15, 20 cm) και για πάχος βάσης/υπόβασης UB30 cm. Δεδομένου ότι και τα τρία καταστατικά μοντέλα ακολουθούν παρόμοια μορφή στα παραπάνω γραφήματα για κάθε υλικό, επιλέγεται η σύγκριση μεταξύ των υλικών να πραγματοποιηθεί με το μοντέλο MEPDG.



Σχήμα 39: Επιφανειακή Υποχώρηση (u_{22}) – Υλικά 1- 3 UB30 – MEPDG

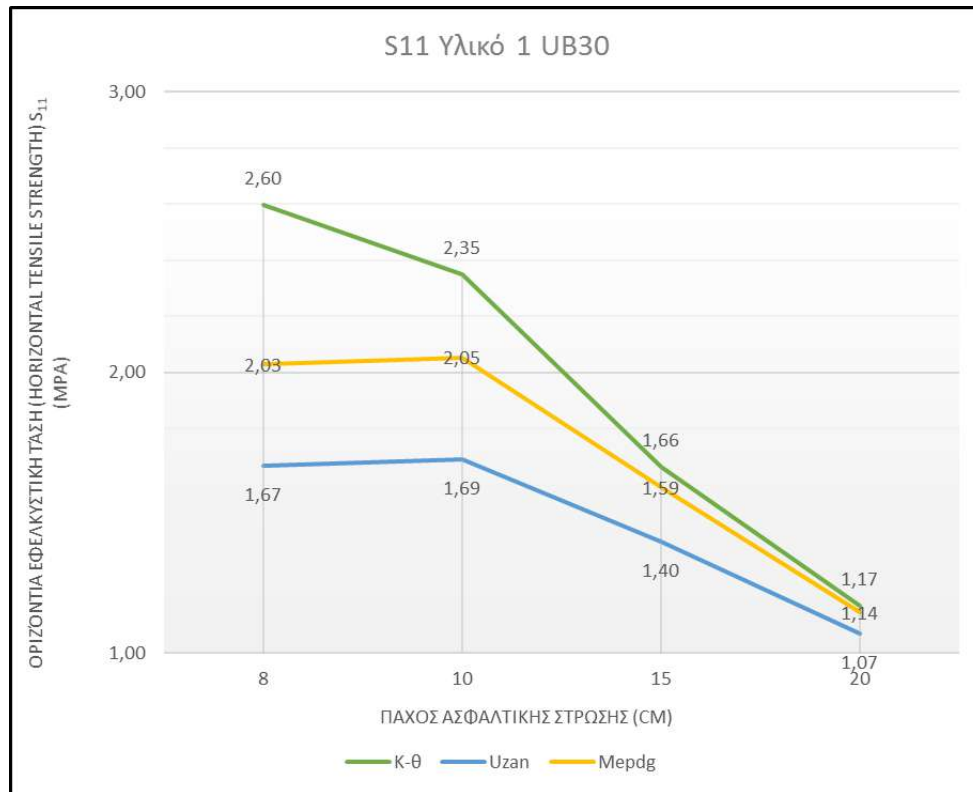
Όπως φαίνεται από το σχήμα 39, την υψηλότερη τιμή επιφανειακής υποχώρησης για κάθε τιμή του πάχους της ασφαλτικής στρώσης, λαμβάνει το υλικό 2 (μικρότερη περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο), ενώ τη μικρότερη το υλικό 1 (μέση περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο). Το υλικό 3 (υψηλότερη περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο) λαμβάνει ενδιάμεσες των άλλων δυο υλικών τιμές, προσεγγίζοντας περισσότερο εκείνες του υλικού 2. Για το ασφαλτικό πάχος των 8 cm η διαφορά μεταξύ υψηλότερης και χαμηλότερης τιμής είναι 12.5%, για τα 10cm 15% για τα 15cm 10%, ενώ τέλος για πάχος ασφαλτικής στρώσης ίσο με 20cm η διαφορά μειώνεται στο 7%.

5.2.2 Οριζόντια Εφελκυστική Τάση σ_{11}

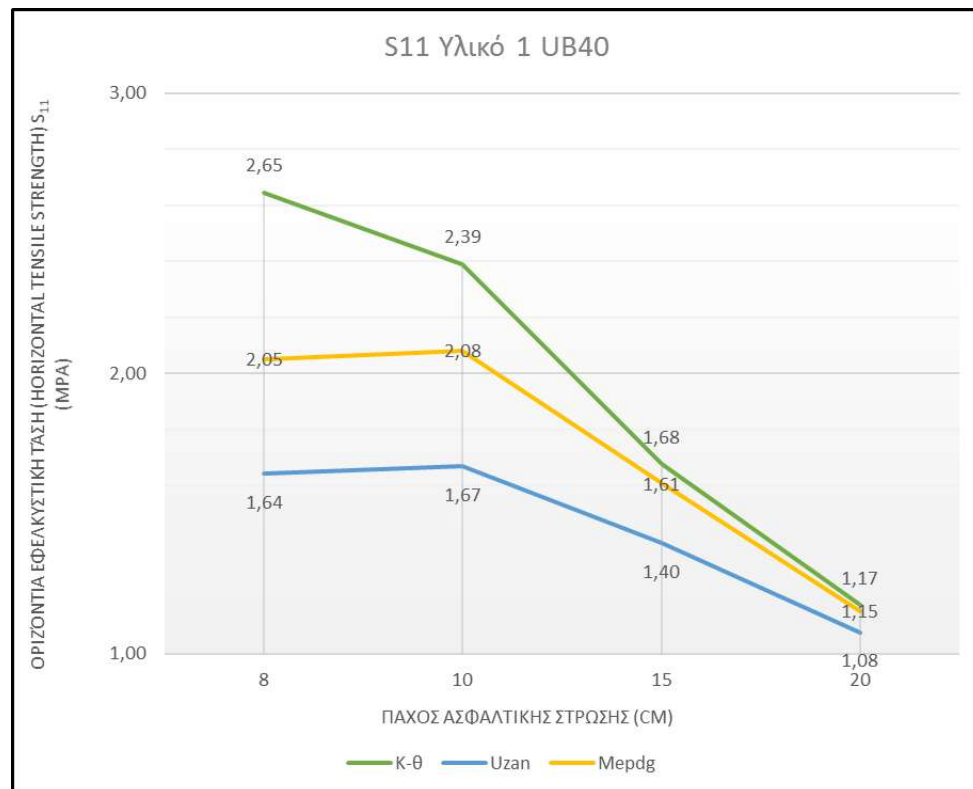
Οριζόντια εφελκυστική τάση (Horizontal tensile strength), σ_{11} (Mpa)					
Υλικό	Στρώση βάσης/υπόβασης (cm)	Ασφαλτική στρώση (cm)	Καταστατικά Μοντέλα		
			K-θ	UZAN	MEPDG
1	30	8	2,60	1,67	2,03
		10	2,35	1,69	2,05
		15	1,66	1,40	1,59
		20	1,17	1,07	1,14
	40	8	2,65	1,64	2,05
		10	2,39	1,67	2,08
		15	1,68	1,40	1,61
		20	1,17	1,08	1,15
2	30	8	3,05	1,64	2,15
		10	2,76	1,73	2,25
		15	1,84	1,52	1,78
		20	1,24	1,17	1,24
	40	8	3,03	1,59	2,13
		10	2,83	1,74	2,39
		15	1,88	1,54	1,82
		20	1,26	1,20	1,26
3	30	8	2,73	1,88	2,23
		10	2,50	1,89	2,22
		15	1,76	1,53	1,69
		20	1,22	1,15	1,20
	40	8	2,76	1,86	2,26
		10	2,55	1,90	2,28
		15	1,78	1,55	1,72
		20	1,23	1,17	1,21

Πίνακας 15: Οριζόντια Εφελκυστική Τάση (Horizontal Tensile Strength – s_{11}), για τις διάφορες στρώσεις και τα τρία εξεταζόμενα υλικά.

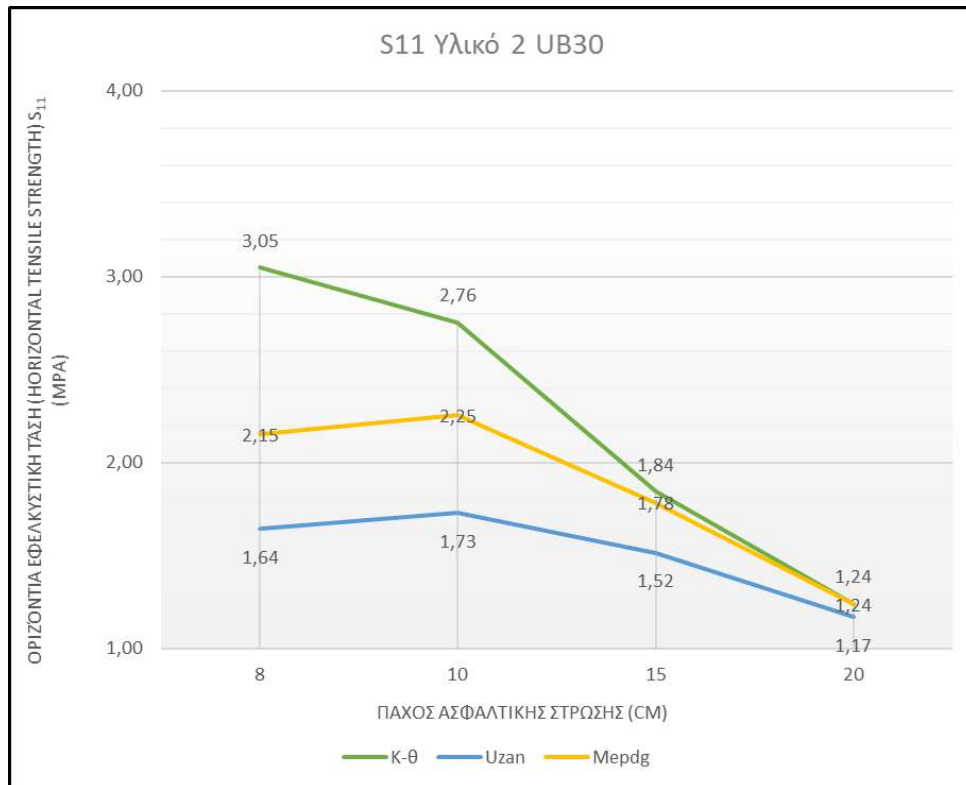
Λαμβάνοντας υπόψιν τα δεδομένα του πίνακα 13, μορφώνονται τα παρακάτω συγκριτικά σχήματα 40-45 στα οποία παρουσιάζονται οι διαφορετικές τιμές της οριζόντιας εφελκυστικής τάσης για κάθε υλικό, στρώση βάσης/υπόβασης και για τα διαφορετικά πάχη της ασφαλτικής στρώσης.



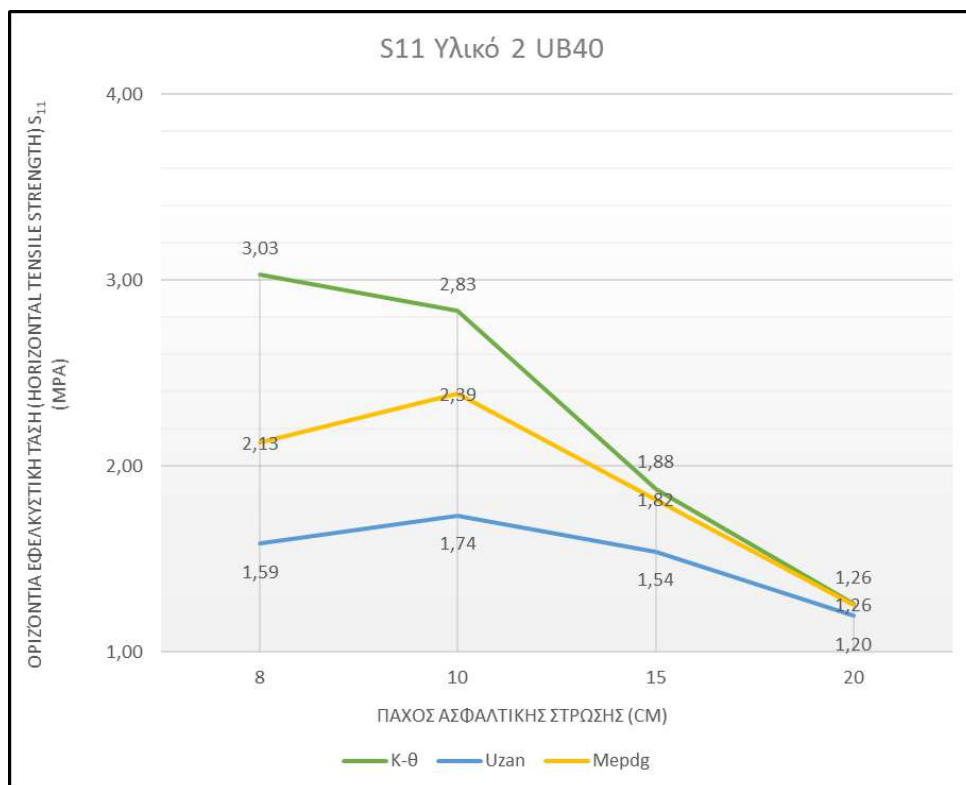
Σχήμα 40: Οριζόντια Εφελκυστική Τάση (s_{11}) – Υλικό 1 – UB30



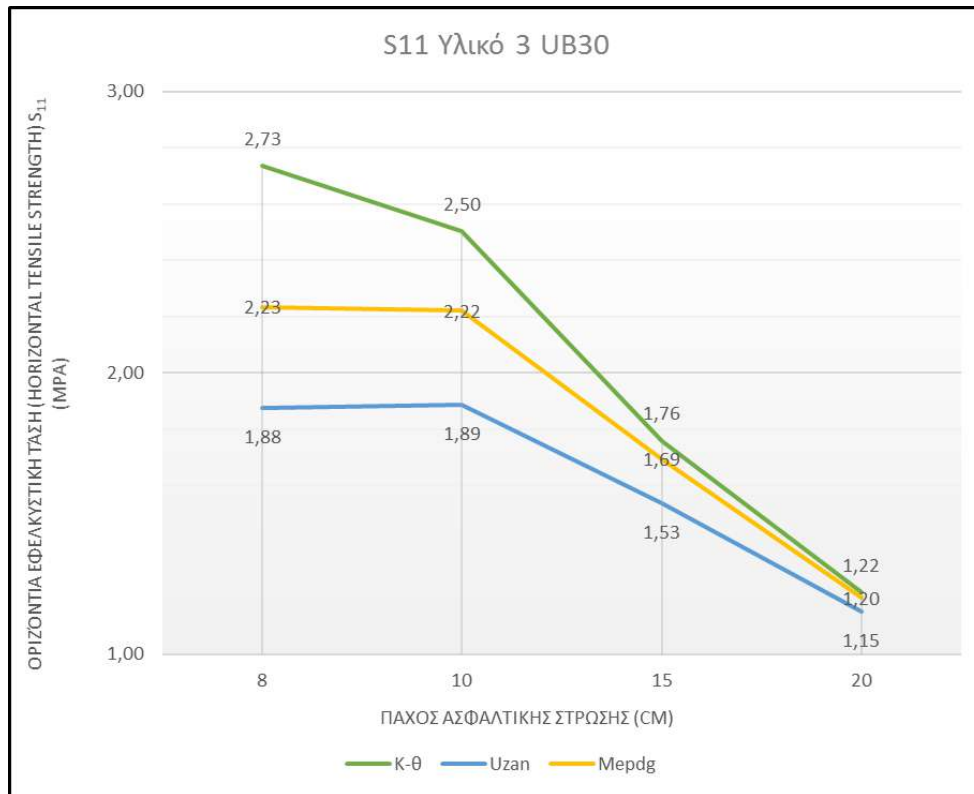
Σχήμα 41: Οριζόντια Εφελκυστική Τάση (s_{11}) – Υλικό 1 – UB40



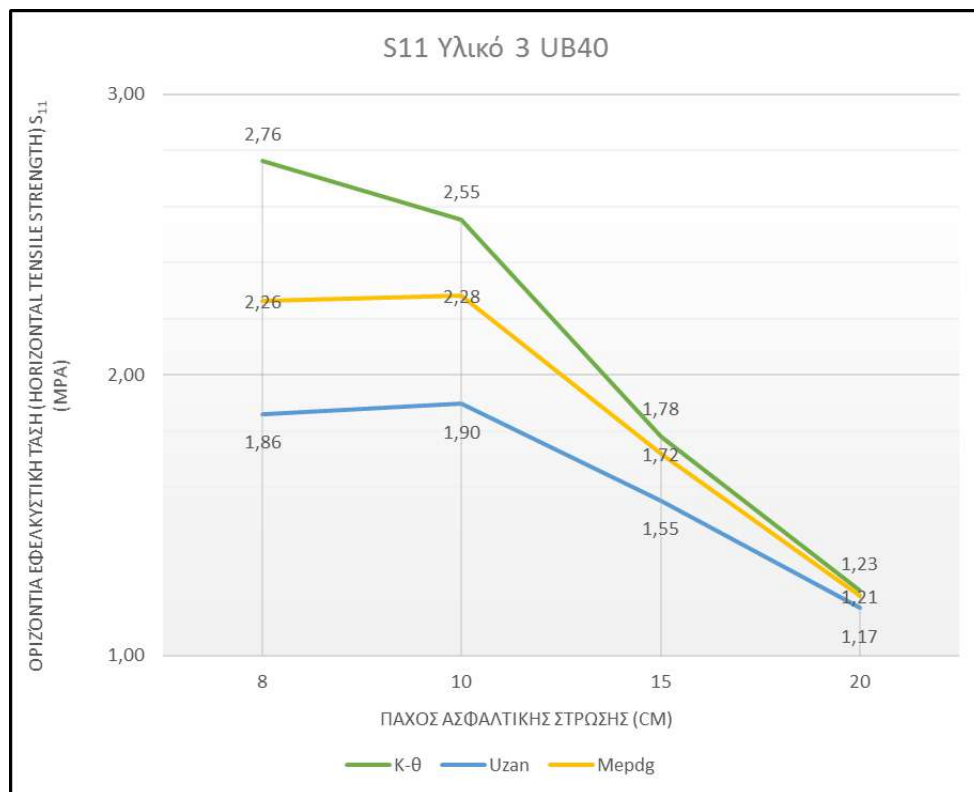
Σχήμα 42: Οριζόντια Εφελκυστική Τάση (s_{11}) – Υλικό 2 – UB30



Σχήμα 43: Οριζόντια Εφελκυστική Τάση (s_{11}) – Υλικό 2 – UB40



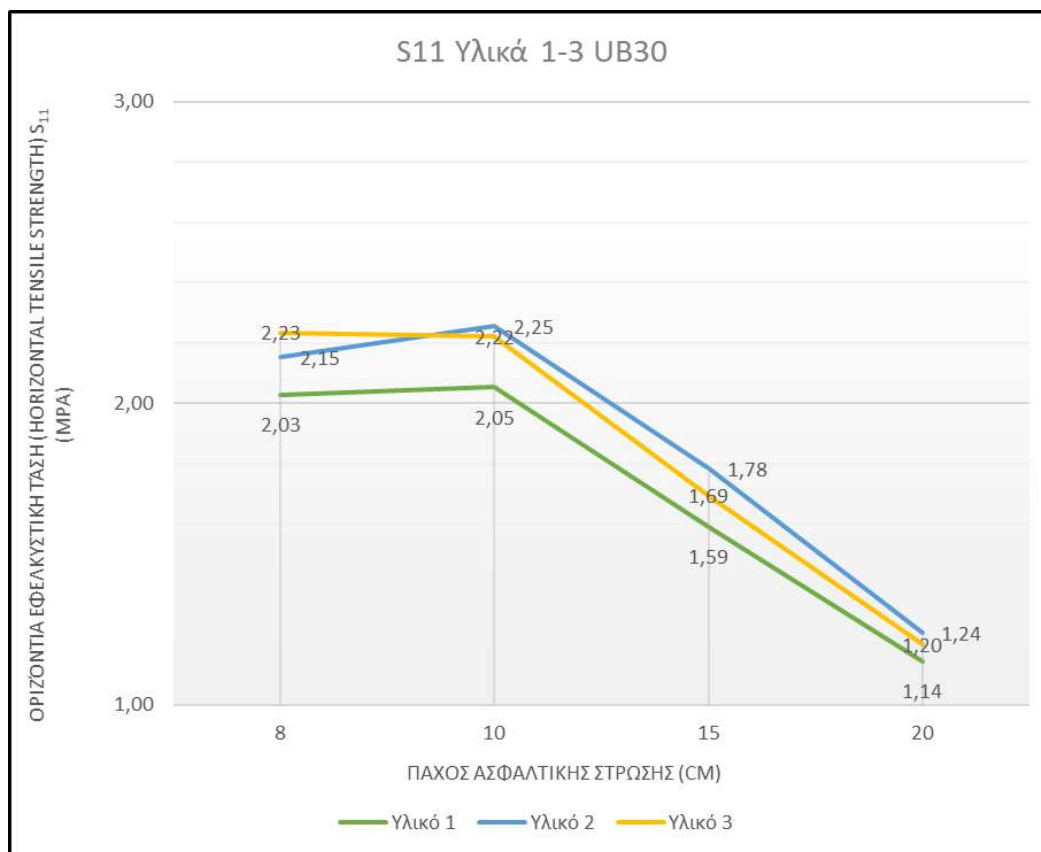
Σχήμα 44: Οριζόντια Εφελκυστική Τάση (s_{11}) – Υλικό 3 – UB30



Σχήμα 45: Οριζόντια Εφελκυστική Τάση (s_{11}) – Υλικό 3 – UB40

Παρατηρώντας τα παραπάνω σχήματα 40-45, για όλα τα υλικά και τα καταστατικά μοντέλα, η τιμή της οριζόντιας εφελκυστικής τάσης είναι μεγαλύτερη για το μικρότερο πάχος ασφαλικής στρώσης, ενώ όσο το πάχος αυξάνεται εκείνη μειώνεται σημαντικά. Αναλυτικότερα, η τιμή της για το υλικό 1 με στρώση βάσης/υπόβασης UB30 και το μοντέλο K-θ, μειώνεται κατά 9.6% για την στρώση 10cm από εκείνη των 8cm, κατά 29% για εκείνη των 15cm από των 10cm και κατά 29% για εκείνη των 20cm από τα 15cm, ενώ η ολική μείωση για την στρώση των 20cm από την μικρότερη των 8cm είναι 55%. Αντίστοιχα για το μοντέλο UZAN, αυξάνεται κατά 1.2% για την στρώση 10cm από εκείνη των 8cm, ενώ για τις υπόλοιπες μειώνεται κατά 29% για εκείνη των 15cm από των 10cm και κατά 29.5% για εκείνη των 20cm από τα 15cm, ενώ η ολική μείωση για την στρώση των 20cm από την μικρότερη των 8cm είναι 36%. Τέλος για το μοντέλο MEPDG, αυξάνεται κατά 1% για την στρώση 10cm από εκείνη των 8cm, ενώ για τις υπόλοιπες μειώνεται κατά 22.4% για εκείνη των 15cm από των 10cm και κατά 28% για εκείνη των 20cm από τα 15cm, ενώ η ολική μείωση για την στρώση των 20cm από την μικρότερη των 8cm είναι 44%. Εξαίρεση αποτελούν οι τιμές των καταστατικών μοντέλων του Uzan και το MEPDG όπου για κάθε περίπτωση η τιμή για hac 8cm είναι χαμηλότερη από ότι για 10cm, χωρίς ωστόσο να μεταβάλλεται ιδιαίτερα (<5%). Αντίστοιχη εικόνα διακρίνεται και στα υπόλοιπα γραφήματα για τα υπόλοιπα υλικά και καταστατικά μοντέλα. Σημειώνεται ωστόσο, ότι οι φθίνουσες κλίσεις των ευθειών είναι μεγαλύτερες σε κάθε περίπτωση για το καταστατικό μοντέλο K-θ και προσεγγιστικά παράλληλες για τα υπόλοιπα δυο μοντέλα και τις στρώσεις 8-10cm, ενώ για το υπόλοιπο διάγραμμα τις μικρότερες κλίσεις έχει εκείνο του Uzan. Επίσης, για κάθε υλικό, η επιρροή της στρώσης βάσης/υπόβασης δεν δείχνει να επιφέρει αξιοσημείωτες μεταβολές στην τιμή της οριζόντιας εφελκυστικής τάσης, αφού για το ίδιο πάχος ασφαλικής στρώσης και καταστατικό μοντέλο είναι <5%.

Στο σχήμα 46 που ακολουθεί πραγματοποιείται μια σύγκριση μεταξύ των τριών διαφορετικών υλικών, για τα διάφορα πάχη ασφαλικής στρώσης (8, 10, 15, 20 cm) και για πάχος βάσης/υπόβασης UB30 cm. Δεδομένου ότι και τα καταστατικά μοντέλα Uzan και MEPDG ακολουθούν παρόμοια μορφή στα παραπάνω γραφήματα για κάθε υλικό, επιλέγεται η σύγκριση μεταξύ των υλικών να πραγματοποιηθεί με το μοντέλο MEPDG. Βέβαια σε περίπτωση που επιλεγόταν το μοντέλο K-θ θα υπήρχε διαφοροποίηση της μορφής στο κομμάτι 8-10cm.



Σχήμα 46: Οριζόντια Εφελκυστική Τάση (s_{11}) – Υλικά 1-3 – UB30 – MEPDG

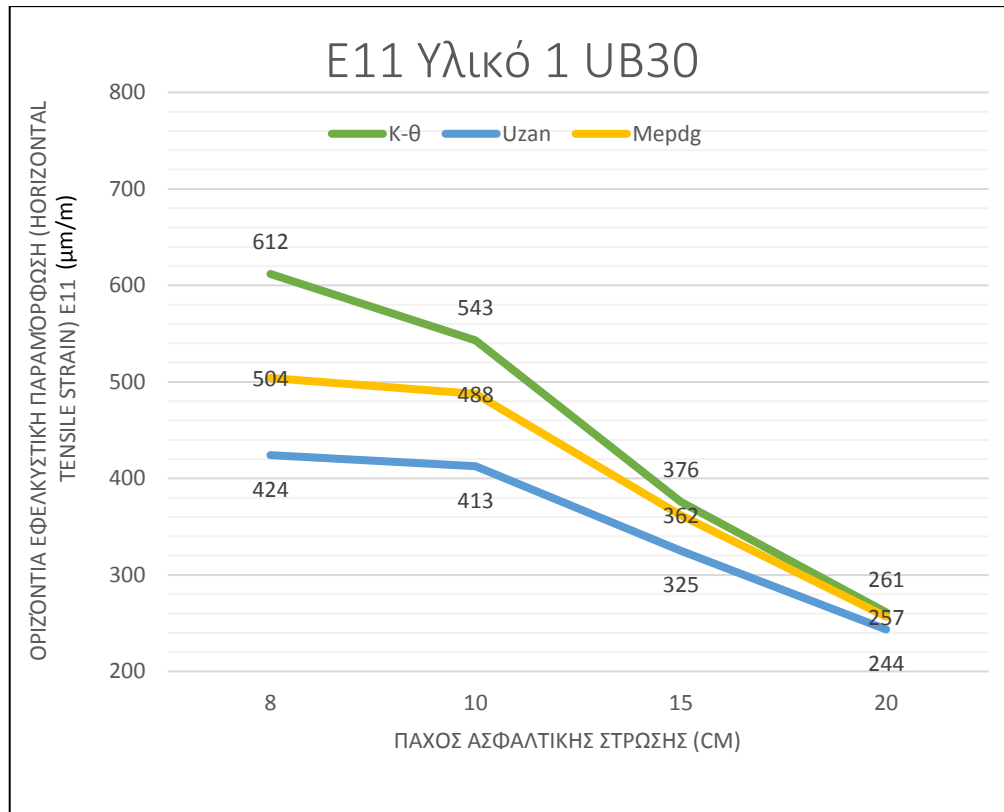
Όπως φαίνεται από το σχήμα 46, την υψηλότερη τιμή οριζόντιας εφελκυστικής τάσης για κάθε τιμή του πάχους της ασφαλτικής στρώσης εκτός της στρώσης των 8cm, λαμβάνει το υλικό 2 (μικρότερη περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο), ενώ τη μικρότερη το υλικό 1 (μέση περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο). Για την στρώση των 8cm την υψηλότερη τιμή την λαμβάνει το υλικό 3. Το υλικό 3 (υψηλότερη περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο) λαμβάνει ενδιάμεσες των άλλων δυο υλικών τιμές, προσεγγίζοντας περισσότερο εκείνες του υλικού 2. Για το ασφαλτικό πάχος των 8 cm η διαφορά μεταξύ υψηλότερης και χαμηλότερης τιμής είναι 9%, για τα 10cm 9%, για τα 15cm 10%, ενώ τέλος για πάχος ασφαλτικής στρώσης ίσο με 20cm η διαφορά μειώνεται στο 8%. Ειδικά για τα υλικά 2 και 3, οι αποκλίσεις τους για τα διάφορα πάχη είναι πάντα <5%.

5.2.3 Οριζόντια Εφελκυστική Παραμόρφωση ε_{11}

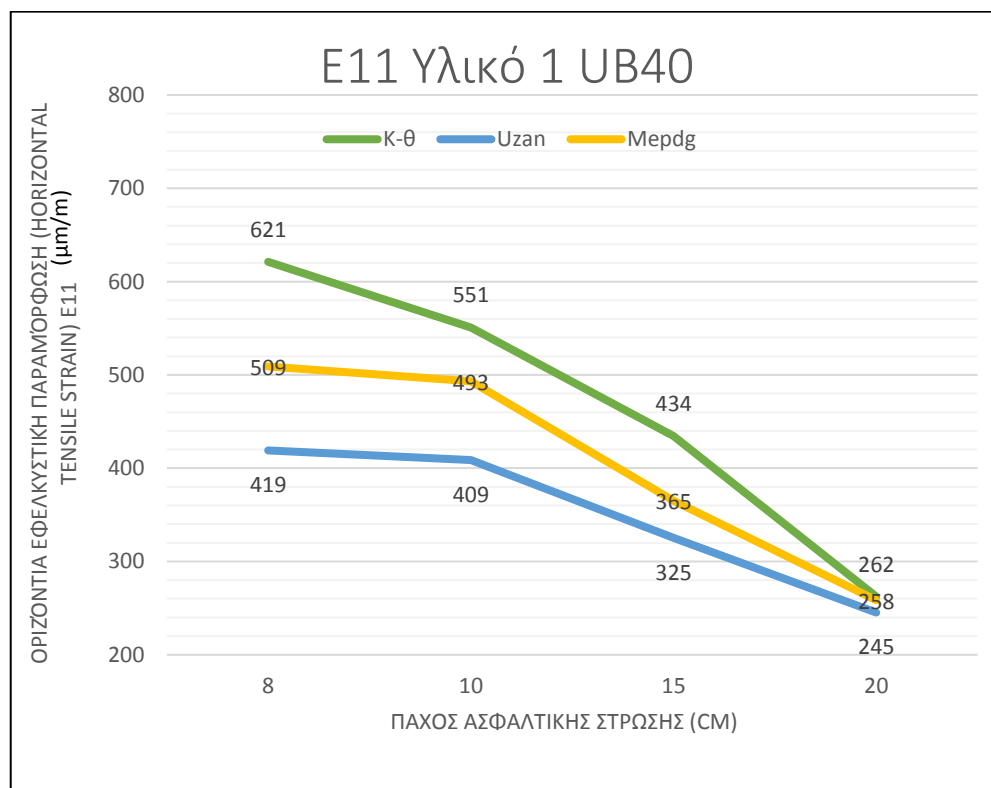
Οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση (Horizontal tensile strain), ε_{11} ($\mu\text{m/m}$)					
Υλικό	Στρώση βάσης/υπόβασης (cm)	Ασφαλτική στρώση (cm)	Καταστατικά Μοντέλα		
			K-θ	UZAN	MEPDG
1	30	8	612	424	504
		10	543	413	488
		15	376	325	362
		20	261	244	257
	40	8	621	419	509
		10	551	409	493
		15	434	325	365
		20	262	245	258
2	30	8	710	427	544
		10	627	426	536
		15	410	351	400
		20	275	264	274
	40	8	708	416	540
		10	642	429	561
		15	416	357	408
		20	278	269	278
3	30	8	644	470	549
		10	576	455	523
		15	395	353	383
		20	271	260	268
	40	8	649	468	555
		10	586	457	535
		15	399	357	388
		20	274	263	270

Πίνακας 16: Οριζόντια Εφελκυστική Παραμόρφωση (Horizontal Tensile Strain – ε_{11}), για τις διάφορες στρώσεις και τα τρία εξεταζόμενα υλικά.

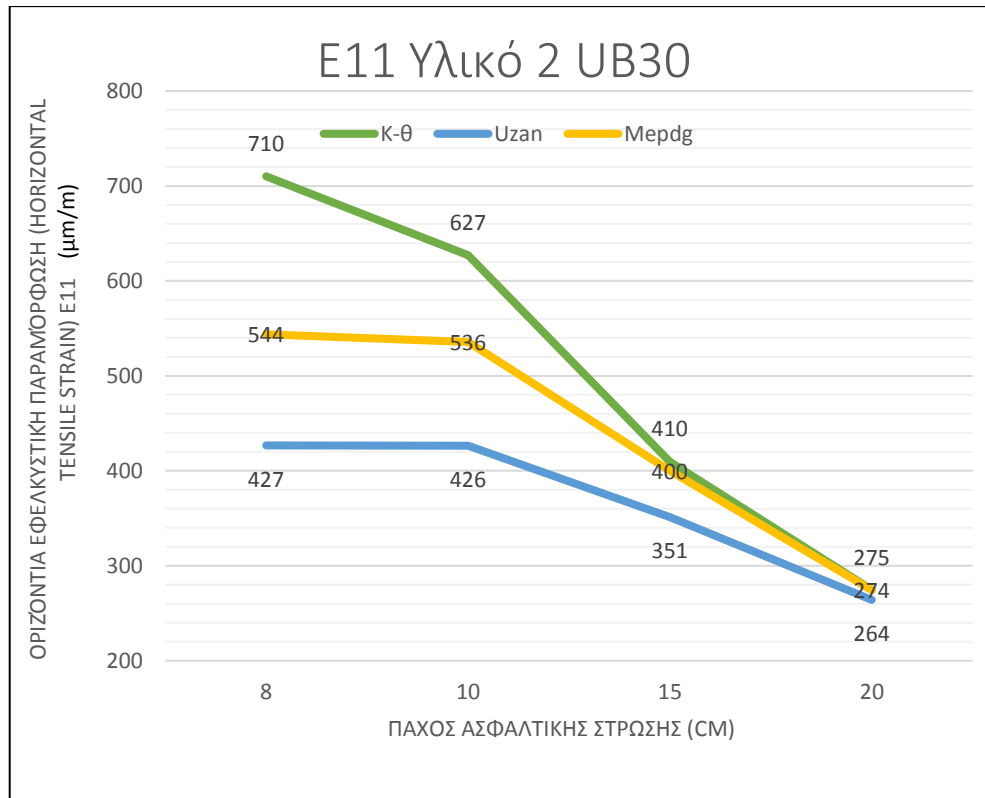
Λαμβάνοντας υπόψιν τα δεδομένα του πίνακα 14, μορφώνονται τα παρακάτω συγκριτικά σχήματα 47-52 στα οποία παρουσιάζονται οι διαφορετικές τιμές της οριζόντιας εφελκυστικής παραμόρφωσης για κάθε υλικό, στρώση βάσης/υπόβασης και για τα διαφορετικά πάχη της ασφαλτικής στρώσης.



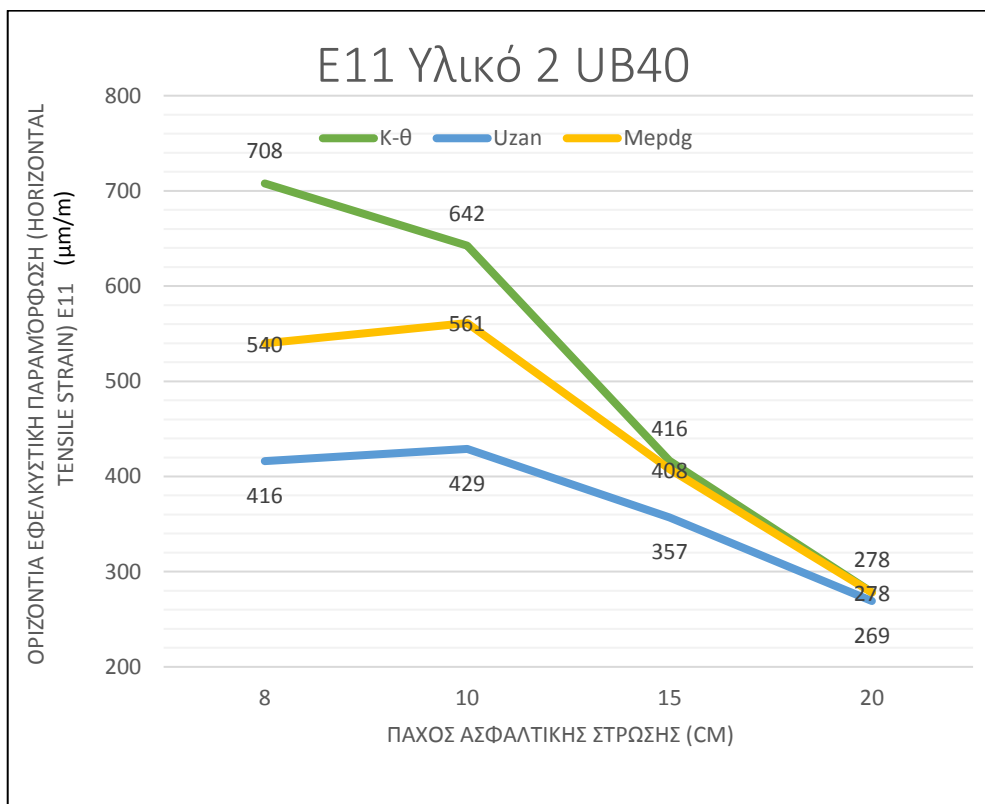
Σχήμα 47: Οριζόντια Εφελκυστική Παραμόρφωση (ϵ_{11}) – Υλικό 1 – UB30



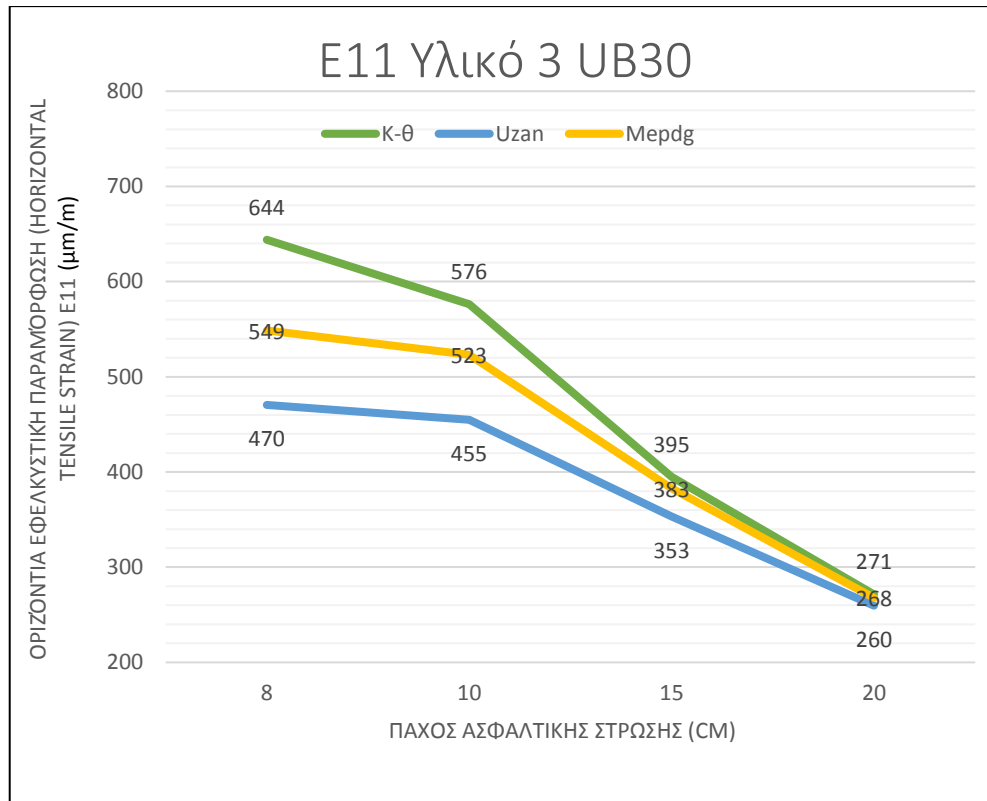
Σχήμα 48: Οριζόντια Εφελκυστική Παραμόρφωση (ϵ_{11}) – Υλικό 1 – UB40



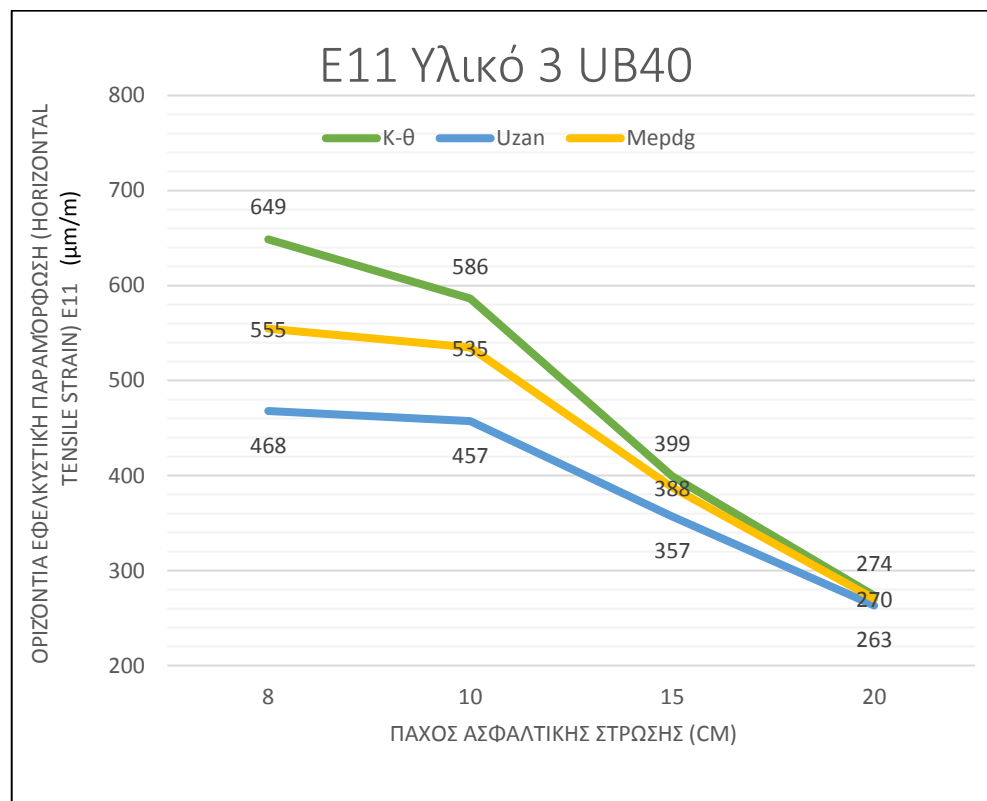
Σχήμα 49: Οριζόντια Εφελκυστική Παραμόρφωση (ϵ_{11}) – Υλικό 2 – UB30



Σχήμα 50: Οριζόντια Εφελκυστική Παραμόρφωση (ϵ_{11}) – Υλικό 2 – UB40



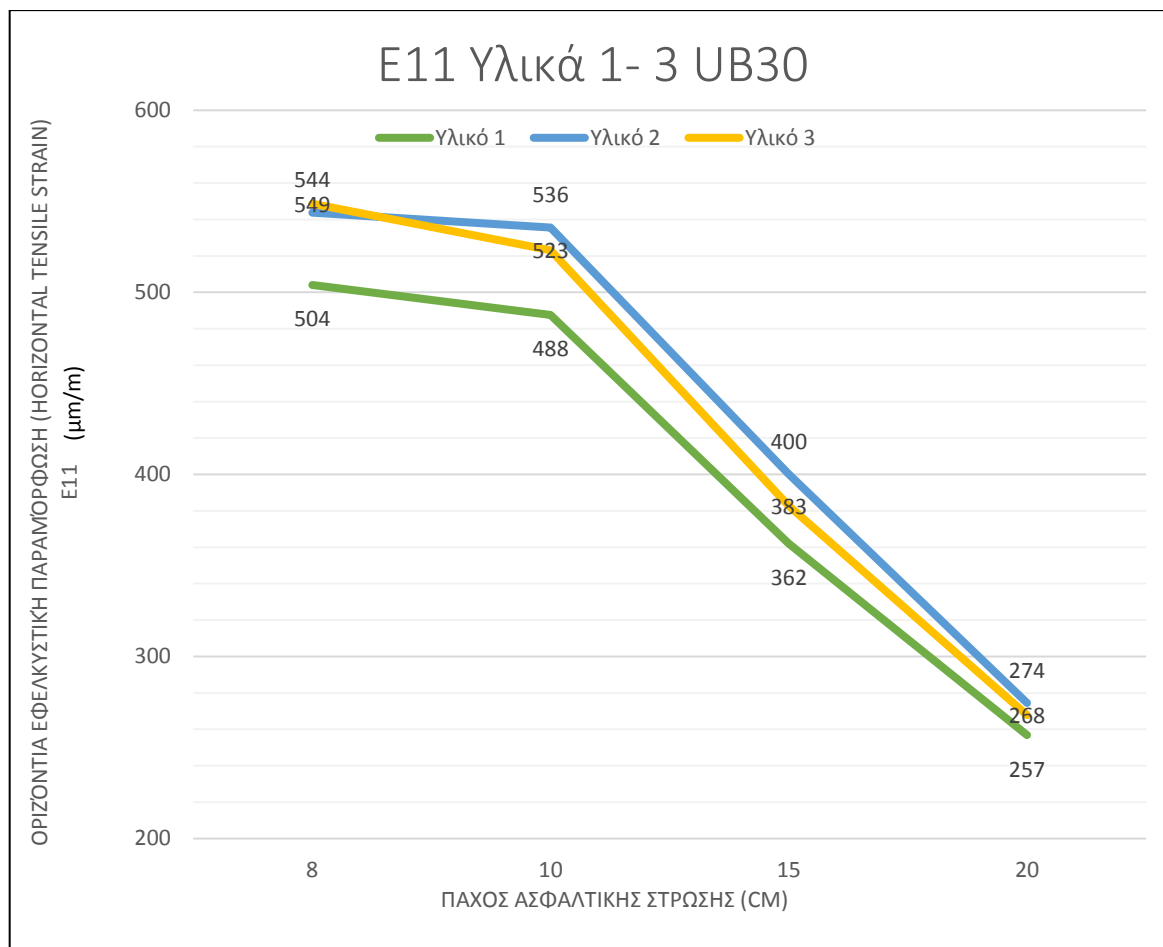
Σχήμα 51: Οριζόντια Εφελκυστική Παραμόρφωση (ϵ_{11}) – Υλικό 3 – UB30



Σχήμα 52: Οριζόντια Εφελκυστική Παραμόρφωση (ϵ_{11}) – Υλικό 3 – UB40

Παρατηρώντας τα παραπάνω σχήματα 47-52, για όλα τα υλικά και τα καταστατικά μοντέλα, η τιμή της οριζόντιας εφελκυστικής παραμόρφωσης είναι μεγαλύτερη για το μικρότερο πάχος ασφαλικής στρώσης, ενώ όσο το πάχος αυξάνεται εκείνη μειώνεται σημαντικά. Αναλυτικότερα, η τιμή της για το υλικό 1 με στρώση βάσης/υπόβασης UB30 και το μοντέλο K-θ, μειώνεται κατά 11.25% για την στρώση 10cm από εκείνη των 8cm, κατά 30% για εκείνη των 15cm από των 10cm και κατά 30% για εκείνη των 20cm από τα 15cm, ενώ η ολική μείωση για την στρώση των 20cm από την μικρότερη των 8cm είναι 57%. Αντίστοιχα για το μοντέλο UZAN, μειώνεται κατά 3% για την στρώση 10cm από εκείνη των 8cm, κατά 21% για εκείνη των 15cm από των 10cm και κατά 25% για εκείνη των 20cm από τα 15cm, ενώ η ολική μείωση για την στρώση των 20cm από την μικρότερη των 8cm είναι 42%. Τέλος για το μοντέλο MEPDG, μειώνεται κατά 3% για την στρώση 10cm από εκείνη των 8cm, κατά 26% για εκείνη των 15cm από των 10cm και κατά 29% για εκείνη των 20cm από τα 15cm, ενώ η ολική μείωση για την στρώση των 20cm από την μικρότερη των 8cm είναι 49%. Εξαιρέση αποτελούν οι τιμές των καταστατικών μοντέλων του Uzan και το MEPDG για το υλικό 2 και UB40 όπου για κάθε περίπτωση η τιμή για hac 8cm είναι χαμηλότερη από ότι για 10cm, χωρίς ωστόσο να μεταβάλλεται ιδιαίτερα (<5%). Αντίστοιχη εικόνα διακρίνεται και στα υπόλοιπα γραφήματα για τα υπόλοιπα υλικά και καταστατικά μοντέλα. Σημειώνεται ωστόσο, ότι οι φθίνουσες κλίσεις των ευθειών είναι μεγαλύτερες σε κάθε περίπτωση για το καταστατικό μοντέλο K-θ και προσεγγιστικά παράλληλες για τα υπόλοιπα δυο μοντέλα και τις στρώσεις 8-10cm, ενώ για το υπόλοιπο διάγραμμα τις μικρότερες κλίσεις έχει εκείνο του Uzan. Επίσης, για κάθε υλικό, η επιρροή της στρώσης βάσης/υπόβασης δεν δείχνει να επιφέρει αξιοσημείωτες μεταβολές στην τιμή της οριζόντιας εφελκυστικής παραμόρφωσης, αφού για το ίδιο πάχος ασφαλικής στρώσης και καταστατικό μοντέλο είναι <5%.

Στο σχήμα 53 που ακολουθεί πραγματοποιείται μια σύγκριση μεταξύ των τριών διαφορετικών υλικών, για τα διάφορα πάχη ασφαλικής στρώσης (8, 10, 15, 20 cm) και για πάχος βάσης/υπόβασης UB30 cm. Δεδομένου ότι και τα καταστατικά μοντέλα Uzan και MEPDG ακολουθούν παρόμοια μορφή στα παραπάνω γραφήματα για κάθε υλικό, επιλέγεται η σύγκριση μεταξύ των υλικών να πραγματοποιηθεί με το μοντέλο MEPDG.



Σχήμα 53: Οριζόντια Εφελκυστική Παραμόρφωση (ϵ_{11}) – Υλικά 1-3 – UB30 – MEPDG

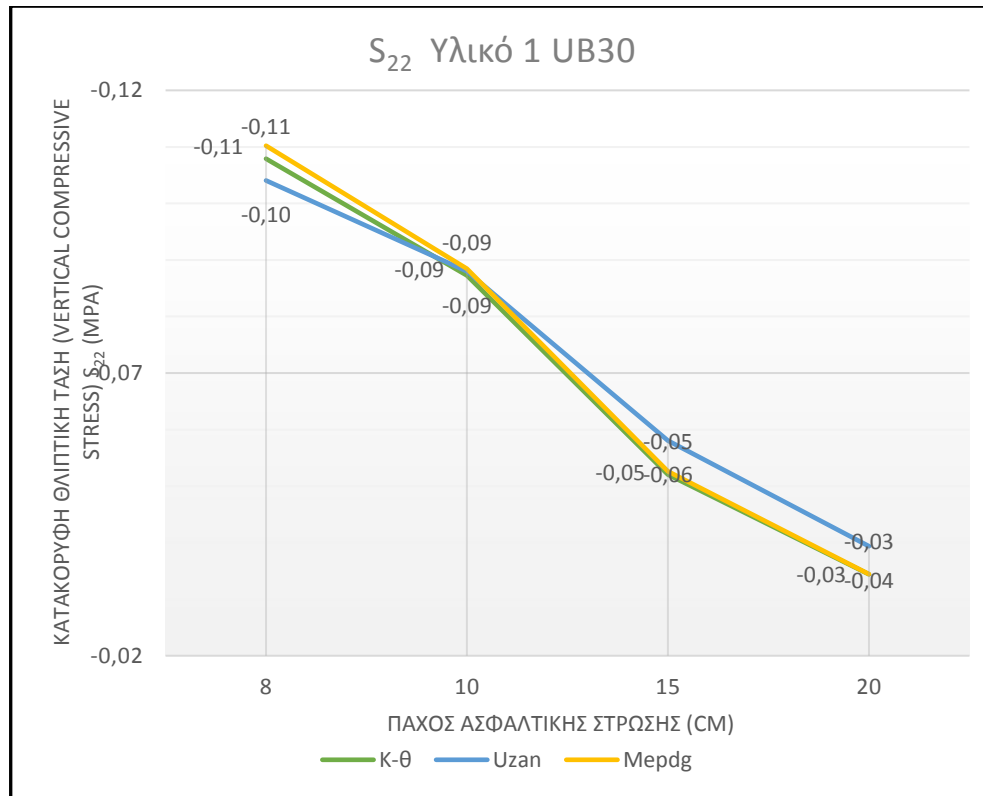
Όπως φαίνεται από το σχήμα 53, την υψηλότερη τιμή οριζόντιας εφελκυστικής τάσης για κάθε τιμή του πάχους της ασφαλτικής στρώσης εκτός της στρώσης των 8cm, λαμβάνει το υλικό 2 (μικρότερη περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο), ενώ τη μικρότερη το υλικό 1 (μέση περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο). Για την στρώση των 8cm την υψηλότερη τιμή την λαμβάνει το υλικό 3, με πολύ μικρή απόκλιση από το υλικό 2. Το υλικό 3 (υψηλότερη περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο) λαμβάνει ενδιάμεσες των άλλων δυο υλικών τιμές, προσεγγίζοντας περισσότερο εκείνες του υλικού 2. Για το ασφαλτικό πάχος των 8 cm η διαφορά μεταξύ υψηλότερης και χαμηλότερης τιμής είναι 7.9%, για τα 10cm 9%, για τα 15cm 9.5%, ενώ τέλος για πάχος ασφαλτικής στρώσης ίσο με 20cm η διαφορά μειώνεται στο 6.9%. Ειδικά για τα υλικά 2 και 3, οι αποκλίσεις τους για τα διάφορα πάχη είναι πάντα <5%.

5.2.4 Κατακόρυφη Θλιπτική Τάση σ_{22}

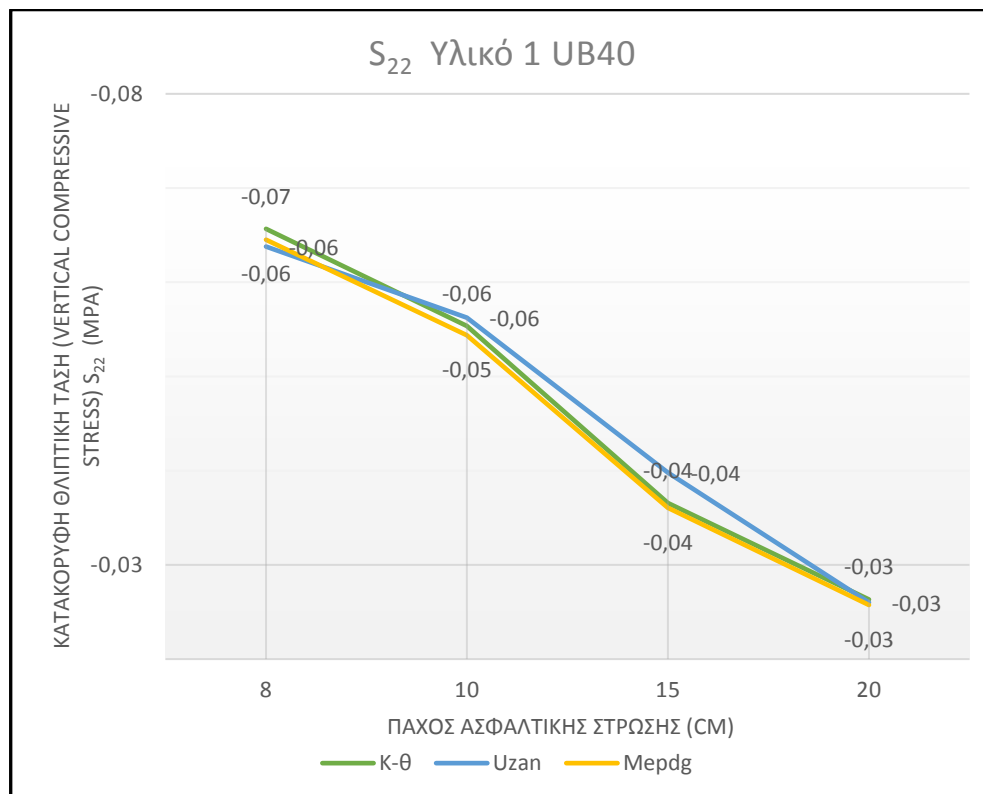
Κατακόρυφη θλιπτική τάση (Vertical compressive stress), σ_{22} (Mpa)					
Υλικό	Στρώση βάσης/υπόβασης (cm)	Ασφαλτική στρώση (cm)	Καταστατικά Μοντέλα		
			K-θ	UZAN	MEPDG
1	30	8	-0,11	-0,10	-0,11
		10	-0,09	-0,09	-0,09
		15	-0,05	-0,06	-0,05
		20	-0,03	-0,04	-0,03
	40	8	-0,07	-0,06	-0,06
		10	-0,06	-0,06	-0,05
		15	-0,04	-0,04	-0,04
		20	-0,03	-0,03	-0,03
2	30	8	-0,12	-0,12	-0,13
		10	-0,08	-0,10	-0,10
		15	-0,04	-0,06	-0,05
		20	-0,03	-0,04	-0,03
	40	8	-0,08	-0,08	-0,08
		10	-0,05	-0,07	-0,06
		15	-0,03	-0,04	-0,03
		20	-0,02	-0,03	-0,02
3	30	8	-0,12	-0,11	-0,12
		10	-0,09	-0,10	-0,09
		15	-0,05	-0,06	-0,05
		20	-0,03	-0,04	-0,03
	40	8	-0,07	-0,07	-0,07
		10	-0,06	-0,06	-0,06
		15	-0,04	-0,04	-0,04
		20	-0,02	-0,03	-0,03

Πίνακας 17: Κατακόρυφη Θλιπτική Τάση (Vertical Compressive Stress – σ_{22}), για τις διάφορες στρώσεις και τα τρία εξεταζόμενα υλικά.

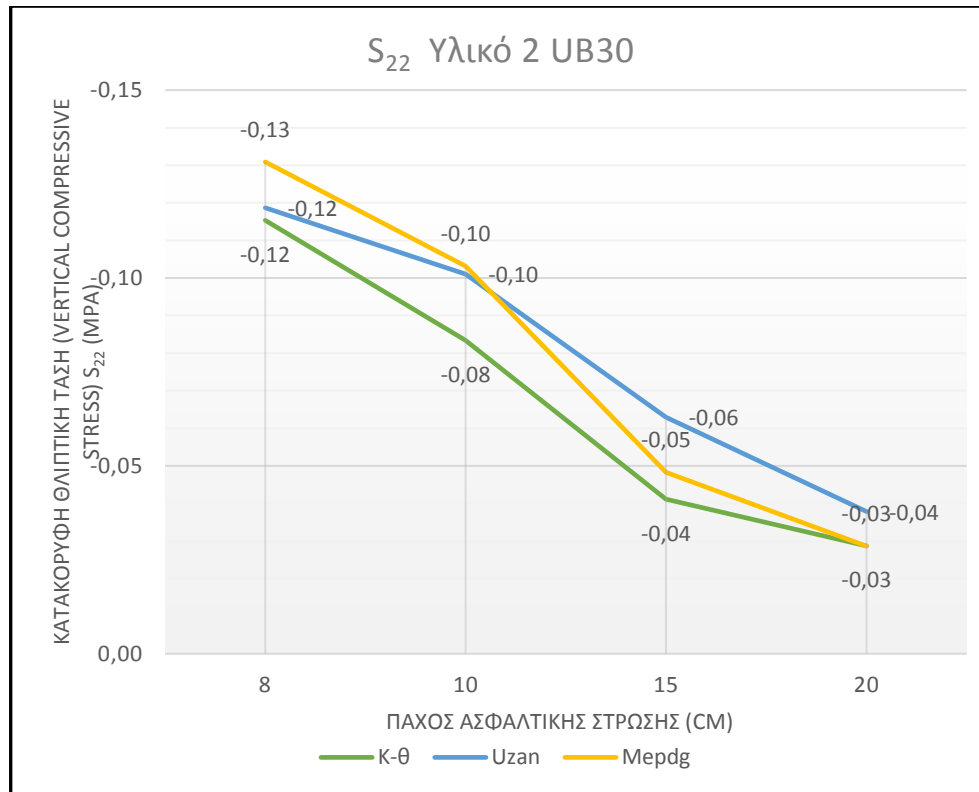
Λαμβάνοντας υπόψιν τα δεδομένα του πίνακα 15, μορφώνονται τα παρακάτω συγκριτικά σχήματα 54-59 στα οποία παρουσιάζονται οι διαφορετικές τιμές της κατακόρυφης θλιπτικής τάσης για κάθε υλικό, στρώση βάσης/υπόβασης και για τα διαφορετικά πάχη της ασφαλτικής στρώσης.



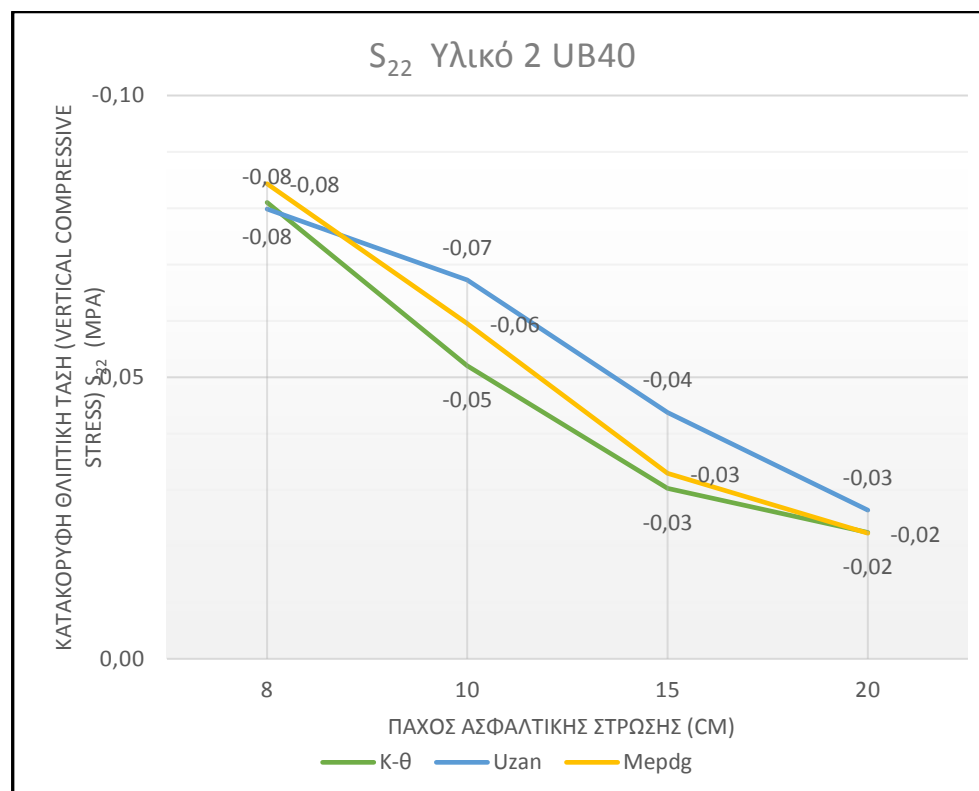
Σχήμα 54: Κατακόρυφη Θλιπτική Τάση (s_{22}) – Υλικό 1 – UB30



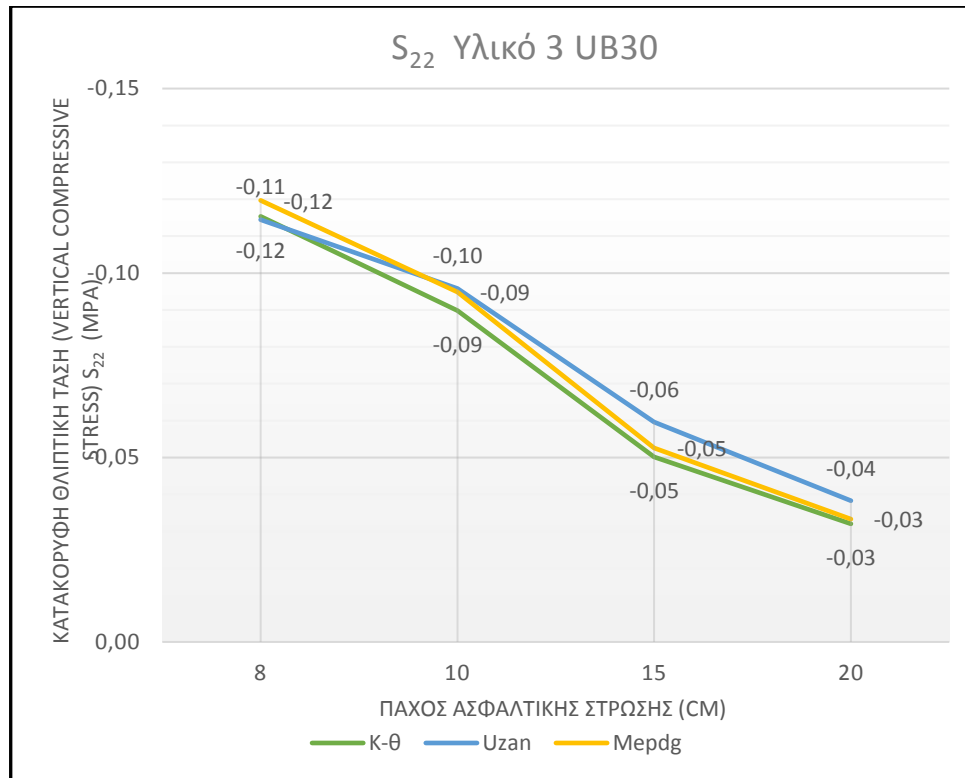
Σχήμα 55: Κατακόρυφη Θλιπτική Τάση (s_{22}) – Υλικό 1 – UB40



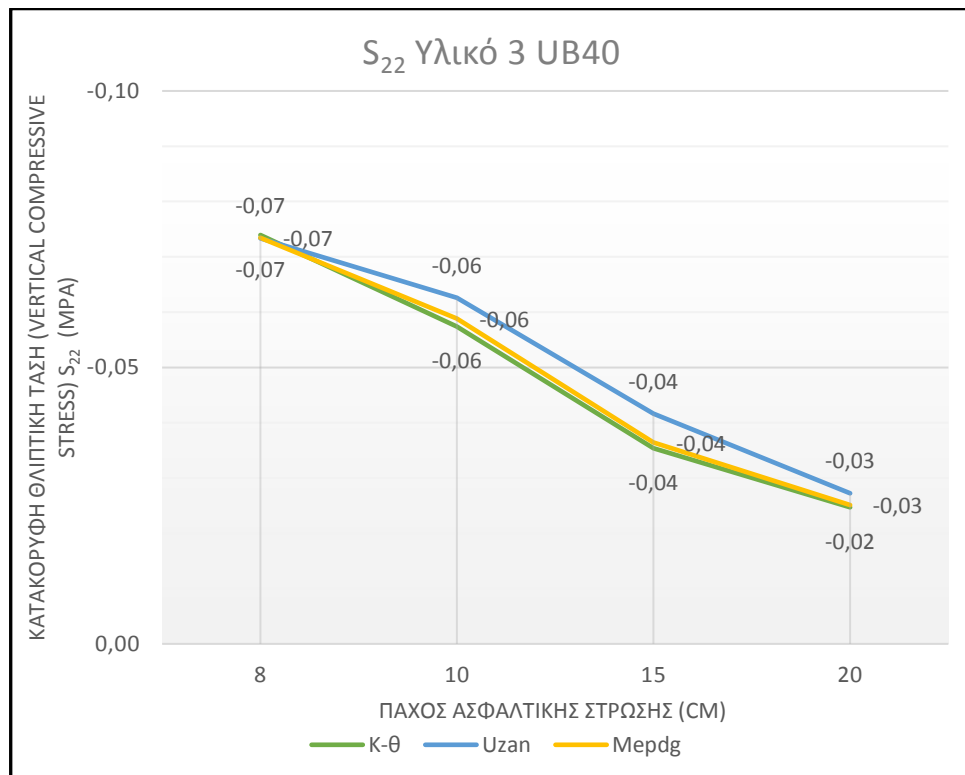
Σχήμα 56: Κατακόρυφη Θλιπτική Τάση (s_{22}) – Υλικό 2 – UB30



Σχήμα 57: Κατακόρυφη Θλιπτική Τάση (s_{22}) – Υλικό 2 – UB40



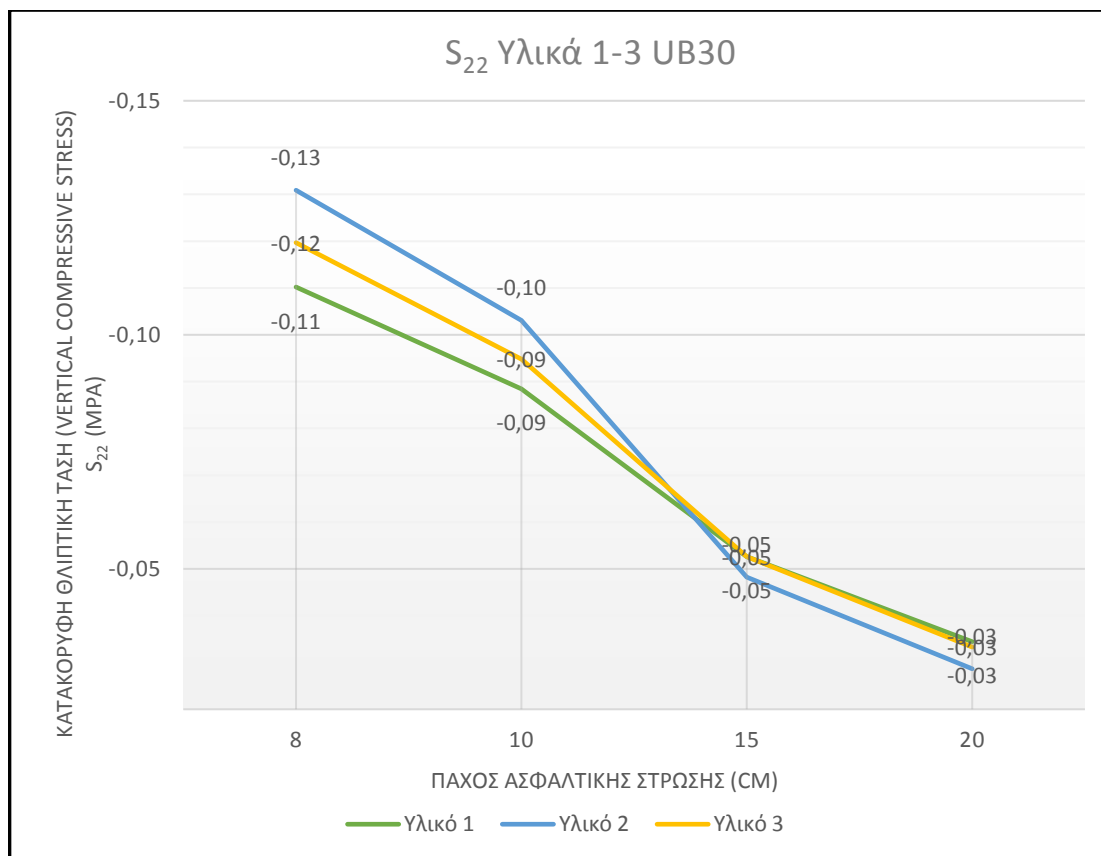
Σχήμα 58: Κατακόρυφη Θλιπτική Τάση (s_{22}) – Υλικό 3 – UB30



Σχήμα 59: Κατακόρυφη Θλιπτική Τάση (s_{22}) – Υλικό 3 – UB40

Παρατηρώντας τα παραπάνω σχήματα 54-59, για όλα τα υλικά και τα καταστατικά μοντέλα, η τιμή της κατακόρυφης θλιπτικής τάσης είναι μεγαλύτερη για το μικρότερο πάχος ασφαλικής στρώσης, ενώ όσο το πάχος αυξάνεται εκείνη μειώνεται σημαντικά. Αναλυτικότερα, η τιμή της για το υλικό 1 με στρώση βάσης/υπόβασης UB30 και το μοντέλο K-θ, μειώνεται κατά 10% για την στρώση 10cm από εκείνη των 8cm, κατά 44.5% για εκείνη των 15cm από των 10cm και κατά 33.5% για εκείνη των 20cm από τα 15cm, ενώ η ολική μείωση για την στρώση των 20cm από την μικρότερη των 8cm είναι 64%. Αντίστοιχα για το μοντέλο UZAN, μειώνεται κατά 15% για την στρώση 10cm από εκείνη των 8cm, κατά 34% για εκείνη των 15cm από των 10cm και κατά 32% για εκείνη των 20cm από τα 15cm, ενώ η ολική μείωση για την στρώση των 20cm από την μικρότερη των 8cm είναι 60%. Τέλος για το μοντέλο MEPDG, μειώνεται κατά 20% για την στρώση 10cm από εκείνη των 8cm, κατά 41% για εκείνη των 15cm από των 10cm και κατά 35% για εκείνη των 20cm από τα 15cm, ενώ η ολική μείωση για την στρώση των 20cm από την μικρότερη των 8cm είναι 73%. Επίσης, η μεταβολή στο πάχος της στρώσης βάσης/υπόβασης από 30cm σε 40cm δείχνει να επιφέρει αξιοσημείωτες μεταβολές στην τιμή της κατακόρυφης θλιπτικής τάσης, αφού για το ίδιο πάχος ασφαλικής στρώσης και καταστατικό μοντέλο οι διαφορές είναι της τάξεως του 30-40% για όλες τις περιπτώσεις για κάθε υλικό.

Στο σχήμα 60 που ακολουθεί πραγματοποιείται μια σύγκριση μεταξύ των τριών διαφορετικών υλικών, για τα διάφορα πάχη ασφαλικής στρώσης (8, 10, 15, 20 cm) και για πάχος βάσης/υπόβασης UB30 cm. Δεδομένου ότι και τα τρία καταστατικά μοντέλα ακολουθούν παρόμοια μορφή στα παραπάνω γραφήματα για κάθε υλικό, επιλέγεται η σύγκριση μεταξύ των υλικών να πραγματοποιηθεί με το μοντέλο MEPDG.



Σχήμα 60: Κατακόρυφη Θλιπτική Τάση (s_{22}) – Υλικά 1- 3 – UB30 – MEPDG

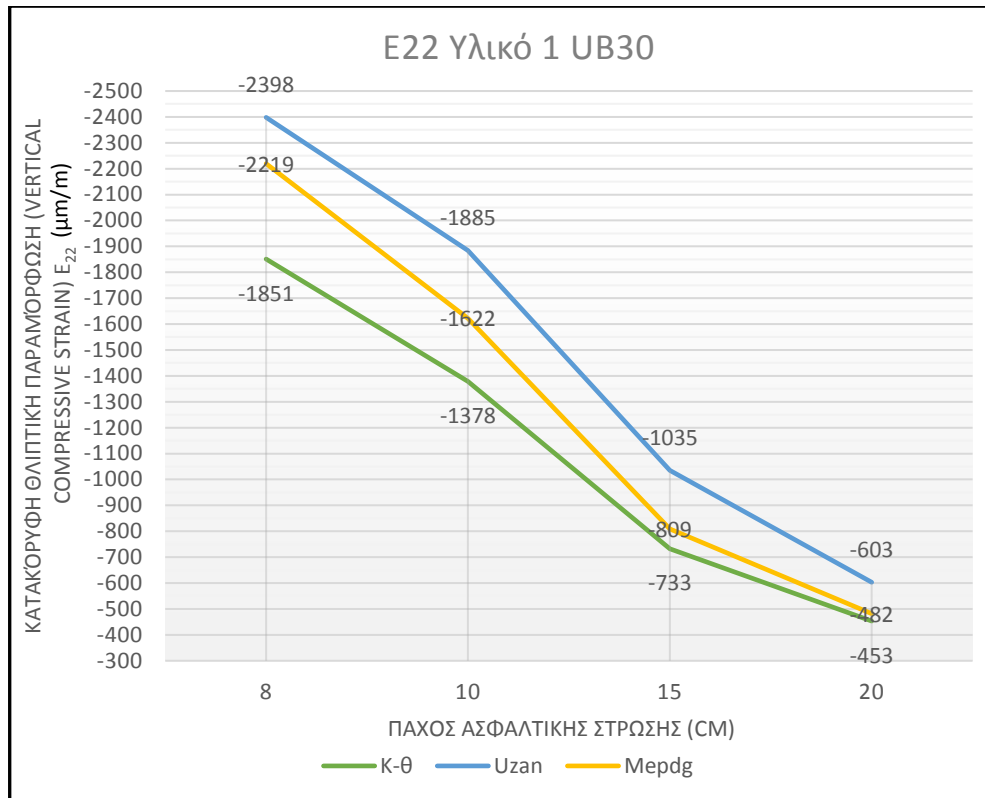
Όπως φαίνεται από το σχήμα 60, την υψηλότερη τιμή κατακόρυφης θλιπτικής τάσης για κάθε τιμή του πάχους της ασφαλτικής στρώσης εκτός των στρώσεων 15 και 20cm, λαμβάνει το υλικό 2 (μικρότερη περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο), ενώ τη μικρότερη το υλικό 1 (μέση περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο). Για τι. Το υλικό 3 (υψηλότερη περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο) λαμβάνει ενδιάμεσες των άλλων δυο υλικών τιμές, προσεγγίζοντας περισσότερο εκείνες του υλικού 2. Για τα ασφαλτικά πάχη των 15 και 20 cm η διαφορά μεταξύ υψηλότερης και χαμηλότερης τιμής είναι στο 3^ο δεκαδικό ψηφίο και ειδικά για τα υλικά 2 και 3, είναι προσεγγιστικά ίσες οι τιμές τους.

5.2.5 Κατακόρυφη Θλιπτική Παραμόρφωση ε_{22}

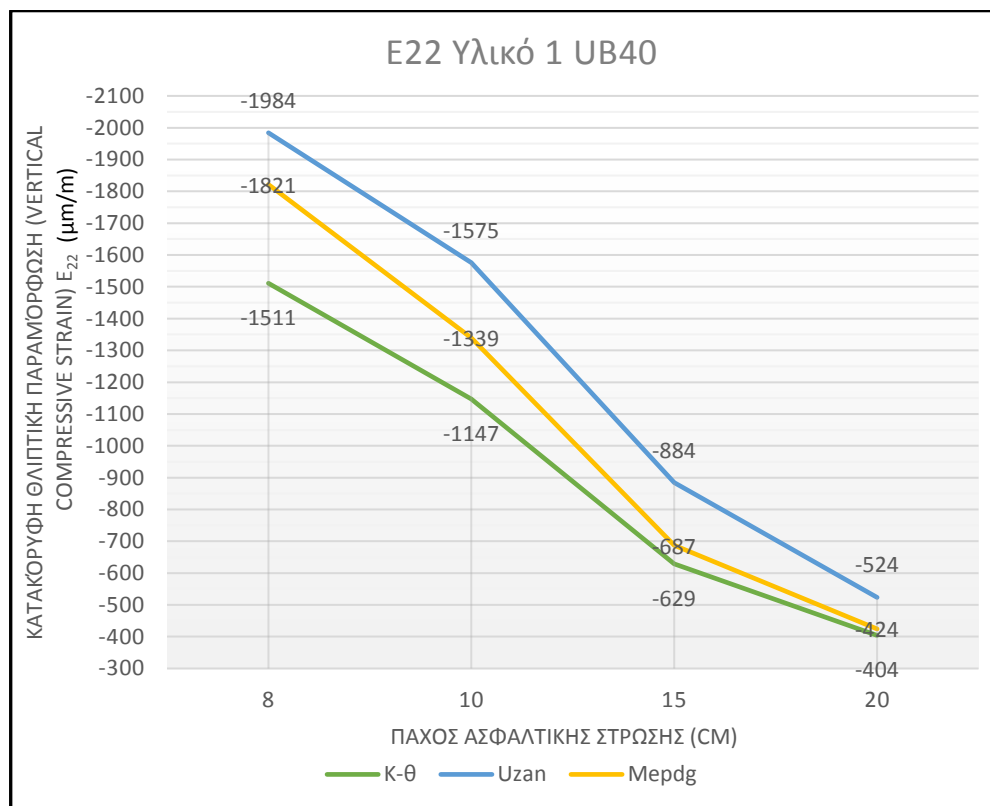
Κατακόρυφη θλιπτική παραμόρφωση (Vertical compressive strain), ε_{22} ($\mu\text{m/m}$)					
Υλικό	Στρώση βάσης/υπόβασης (cm)	Ασφαλτική στρώση (cm)	Καταστατικά Μοντέλα		
			K-θ	UZAN	MEPDG
1	30	8	-1851	-2398	-2219
		10	-1378	-1885	-1622
		15	-733	-1035	-809
		20	-453	-603	-482
	40	8	-1511	-1984	-1821
		10	-1147	-1575	-1339
		15	-629	-884	-687
		20	-404	-524	-424
2	30	8	-1692	-2430	-2232
		10	-1154	-1860	-1513
		15	-536	-933	-627
		20	-353	-479	-355
	40	8	-1403	-2018	-1840
		10	-946	-1571	-1213
		15	-465	-787	-527
		20	-313	-401	-314
3	30	8	-1814	-2281	-2115
		10	-1310	-1734	-1505
		15	-648	-892	-714
		20	-388	-497	-417
	40	8	-1478	-1880	-1727
		10	-1082	-1451	-1240
		15	-554	-757	-606
		20	-346	-433	-367

Πίνακας 18: Κατακόρυφη Θλιπτική Παραμόρφωση (Vertical Compressive Strain – ε_{22}), για τις διάφορες στρώσεις και τα τρία εξεταζόμενα υλικά.

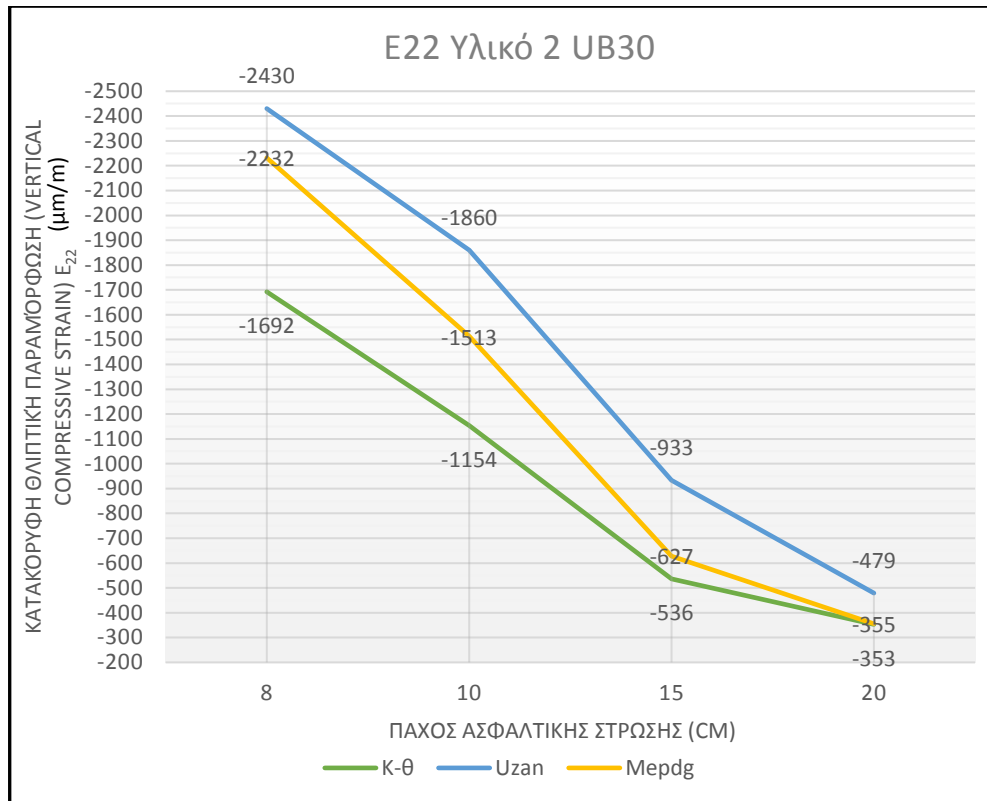
Λαμβάνοντας υπόψιν τα δεδομένα του πίνακα 16, μορφώνονται τα παρακάτω συγκριτικά σχήματα 61-66 στα οποία παρουσιάζονται οι διαφορετικές τιμές της κατακόρυφης θλιπτικής τάσης για κάθε υλικό, στρώση βάσης/υπόβασης και για τα διαφορετικά πάχη της ασφαλτικής στρώσης.



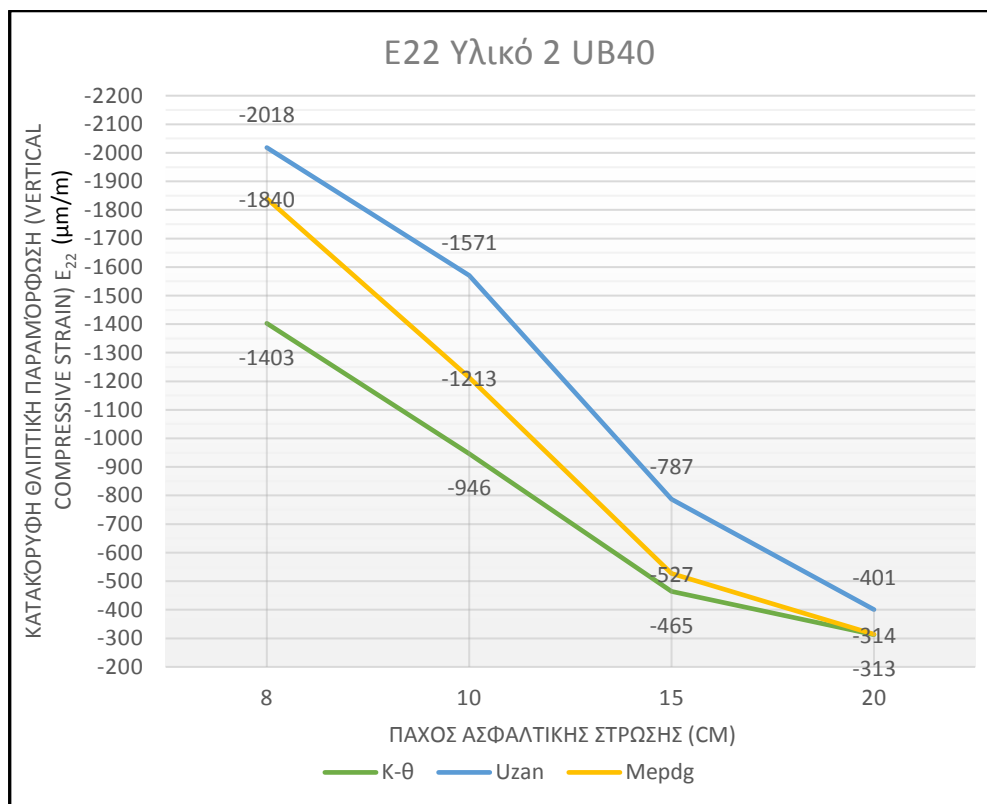
Σχήμα 61: Κατακόρυφη Θλιπτική Παραμόρφωση (ϵ_{22}) – Υλικό 1 – UB30



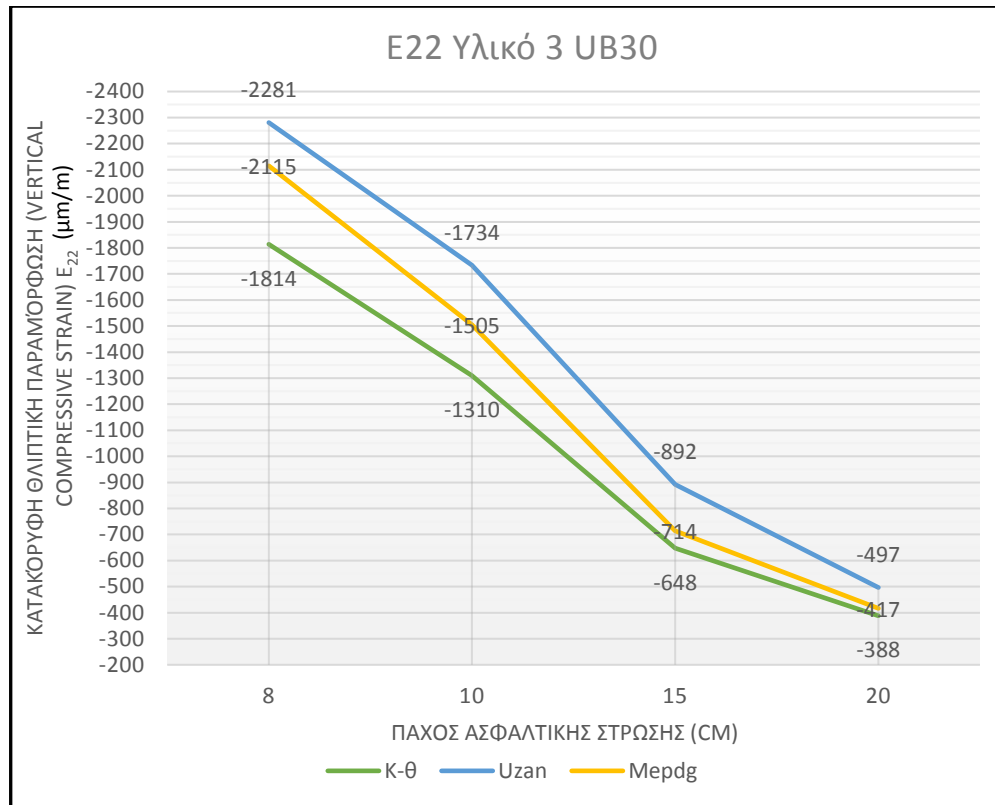
Σχήμα 62: Κατακόρυφη Θλιπτική Παραμόρφωση (ϵ_{22}) – Υλικό 1 – UB40



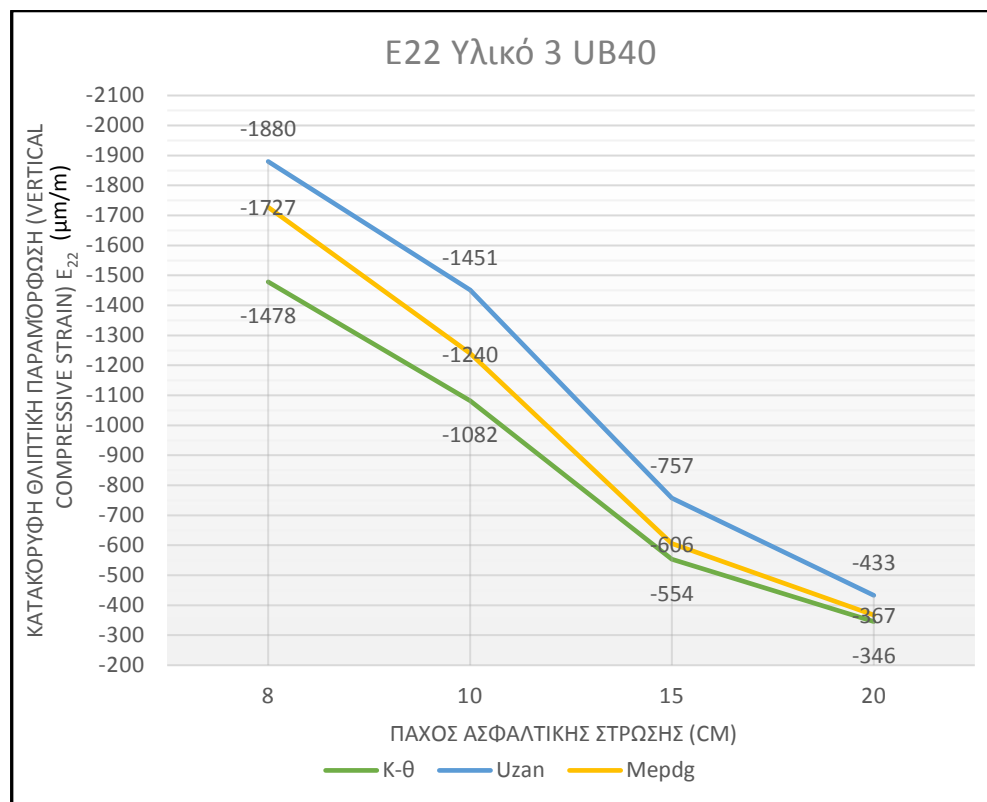
Σχήμα 63: Κατακόρυφη Θλιπτική Παραμόρφωση (ϵ_{22}) – Υλικό 2 – UB30



Σχήμα 64: Κατακόρυφη Θλιπτική Παραμόρφωση (ϵ_{22}) – Υλικό 2 – UB40



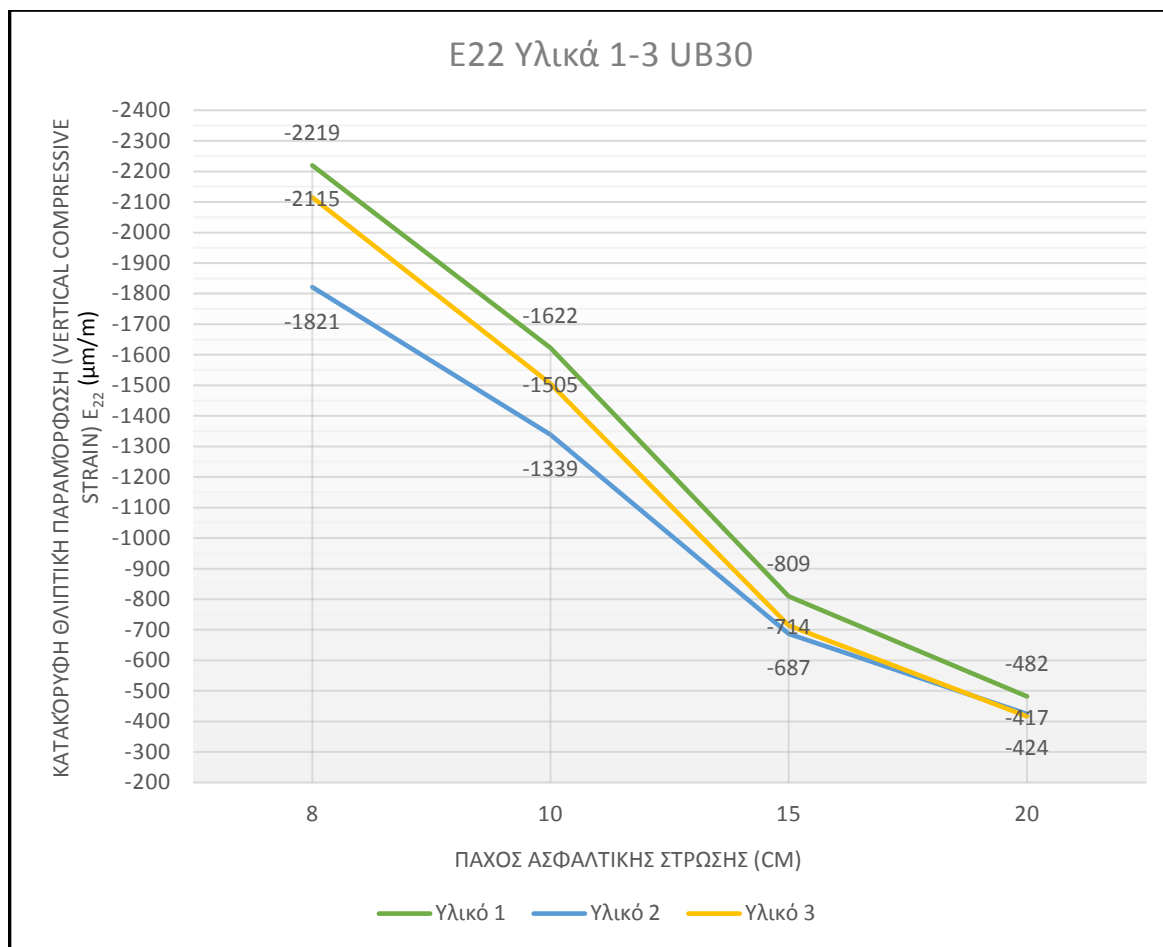
Σχήμα 65: Κατακόρυφη Θλιπτική Παραμόρφωση (ϵ_{22}) – Υλικό 3 – UB30



Σχήμα 66: Κατακόρυφη Θλιπτική Παραμόρφωση (ϵ_{22}) – Υλικό 3 – UB40

Παρατηρώντας τα παραπάνω σχήματα 61-66, για όλα τα υλικά και τα καταστατικά μοντέλα, η τιμή της κατακόρυφης θλιπτικής παραμόρφωσης είναι μεγαλύτερη για το μικρότερο πάχος ασφαλικής στρώσης, ενώ όσο το πάχος αυξάνεται εκείνη μειώνεται σημαντικά. Αναλυτικότερα, η τιμή της για το υλικό 1 με στρώση βάσης/υπόβασης UB30 και το μοντέλο K-θ, μειώνεται κατά 21.5% για την στρώση 10cm από εκείνη των 8cm, κατά 45% για εκείνη των 15cm από των 10cm και κατά 42% για εκείνη των 20cm από τα 15cm, ενώ η ολική μείωση για την στρώση των 20cm από την μικρότερη των 8cm είναι 75%. Αντίστοιχα για το μοντέλο UZAN, μειώνεται κατά 21% για την στρώση 10cm από εκείνη των 8cm, κατά 45% για εκείνη των 15cm από των 10cm και κατά 42% για εκείνη των 20cm από τα 15cm, ενώ η ολική μείωση για την στρώση των 20cm από την μικρότερη των 8cm είναι 75%. Τέλος για το μοντέλο MEPDG, μειώνεται κατά 27% για την στρώση 10cm από εκείνη των 8cm, κατά 50% για εκείνη των 15cm από των 10cm και κατά 40% για εκείνη των 20cm από τα 15cm, ενώ η ολική μείωση για την στρώση των 20cm από την μικρότερη των 8cm είναι 78%. Επίσης, η μεταβολή στο πάχος της στρώσης βάσης/υπόβασης από 30cm σε 40cm δείχνει να επιφέρει αξιοσημείωτες μεταβολές στην τιμή της κατακόρυφης θλιπτικής παραμόρφωσης, αφού για το ίδιο πάχος ασφαλικής στρώσης και καταστατικό μοντέλο οι διαφορές είναι της τάξεως του 15-20% για όλες τις περιπτώσεις για κάθε υλικό. Υψηλότερες τιμές σε κάθε περίπτωση παρατηρούνται στην περίπτωση του καταστατικού μοντέλου του Uzan, ενώ μικρότερες για το μοντέλο K-θ, με το μοντέλο MEPDG να λαμβάνει ενδιάμεσες τιμές.

Στο σχήμα 67 που ακολουθεί πραγματοποιείται μια σύγκριση μεταξύ των τριών διαφορετικών υλικών, για τα διάφορα πάχη ασφαλικής στρώσης (8, 10, 15, 20 cm) και για πάχος βάσης/υπόβασης UB30 cm. Δεδομένου ότι και τα τρία καταστατικά μοντέλα ακολουθούν παρόμοια μορφή στα παραπάνω γραφήματα για κάθε υλικό, επιλέγεται η σύγκριση μεταξύ των υλικών να πραγματοποιηθεί με το μοντέλο MEPDG.



Σχήμα 67: Κατακόρυφη Θλιπτική Παραμόρφωση (ϵ_{22}) – Υλικά 1-3 – UB30 - MEPDG

Όπως φαίνεται από το σχήμα 67, την υψηλότερη τιμή κατακόρυφης θλιπτικής παραμόρφωσης για κάθε τιμή του πάχους της ασφαλτικής στρώσης, λαμβάνει το υλικό 1 (μέση περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο), ενώ τη μικρότερη το υλικό 2 (μικρότερη περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο). Για τι. Το υλικό 3 (υψηλότερη περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο) λαμβάνει ενδιάμεσες των άλλων δυο υλικών τιμές, προσεγγίζοντας περισσότερο εκείνες του υλικού 2. Για τα ασφαλτικά πάχη των 15 και 20 cm η διαφορά μεταξύ υψηλότερης και χαμηλότερης τιμής είναι <5%.

6. Συμπεράσματα

Η ορθή πρόβλεψη της απόκρισης του οδοστρώματος αποτελεί μια από τις κρίσιμότερες διαδικασίες, για τον σωστό σχεδιασμό και την καταλληλότερη μελέτη συντήρησής του. Στο προηγούμενο κεφάλαιο 5, παρατηρήσαμε τα διάφορα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης, βασιζόμενη σε τρία διαφορετικά καταστατικά μοντέλα (K-θ, Uzan, MEPDG) και ποικίλων διατομών εύκαμπτου οδοστρώματος, οι οποίες διέφεραν μεταξύ τους αποκλειστικά σε συγκεκριμένες παραμέτρους κατά περίπτωση. Οι παράμετροι αυτοί είναι το πάχος της ασφαλικής στρώσης, το πάχος της στρώσης της βάσης/υπόβασης, και κυρίως το χρησιμοποιούμενο ασύνδετο υλικό πλήρωσης της στρώσης της βάσης/υπόβασης. Επιπλέον, όλες οι πραγματοποιούμενες αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στην ίδια μοντελοποιημένη διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος, απαλείφοντας διαφοροποιήσεις στο μοντέλο αλλά και τη διακριτοποίηση του φορέα, ενώ κάθε υλικό εξετάστηκε στη βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία (συνθήκες O.M.C.) και κάτω από τις ίδιες συνθήκες φόρτισης. Ο συνδυασμός των παραπάνω στοιχείων, καθιστά δυνατή την δημιουργία συγκριτικών αντιπροσωπευτικών διαγραμμάτων για κάθε διαφορετική εξεταζόμενη παράμετρο ξεχωριστά, όπως φαίνεται στο κεφάλαιο 5 και άρα την εξαγωγή συμπερασμάτων για την επιρροή τους στην συνολική απόκριση του φορέα.

Όσον αφορά τα τρία διαφορετικά υλικά, επιλέγεται η σύγκριση να προκύψει από τα αποτελέσματα της ανάλυσης λαμβάνοντας υπόψιν το MEPDG καταστατικό μοντέλο και τη διατομή με πάχος στρώσης βάσης/υπόβασης $h_{UB} = 30\text{cm}$ για τα διάφορα πάχη της ασφαλικής στρώσης. Από τα σχήματα 39, 46, 53, 60, 67, παρατηρούμε ότι το υλικό 2 (χαμηλό ποσοστό λεπτόκοκκου), εμφανίζει μεγαλύτερη τιμή οριζόντιας και κατακόρυφης τάσης από τα υπόλοιπα και τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις u_{22} και ϵ_{11} , ενώ το υλικό 1 (μέτριο ποσοστό λεπτόκοκκου) τη μικρότερη οριζόντια τάση και τις μικρότερες παραμορφώσεις. Αντίθετα για την κατακόρυφη θλιπτική παραμόρφωση ϵ_{22} , το υλικό 1 εμφανίζει την υψηλότερη τιμή και το υλικό 2 την χαμηλότερη. Το υλικό 3 (υψηλότερο ποσοστό σε λεπτόκοκκο) λαμβάνει ενδιάμεσες τιμές, προσεγγίζοντας περισσότερο εκείνες του υλικού 2.

Όσον αφορά τα τρία καταστατικά μοντέλα K-θ, Uzan, MEPDG, παρατηρώντας τα σχήματα 33-38, 40-45, 47-52, 54-59, 61-66, βλέπουμε ότι για κάθε κρίσιμη παράμετρο τα αποτελέσματα του εκάστοτε καταστατικού μοντέλου είναι ομοειδή για κάθε υλικό, με

εξαίρεση τις παραμέτρους ε_{11} και s_{11} , και συγκεκριμένα τις ασφαλικές στρώσεις 8 και 10 cm, όπου το μοντέλο K-θ έχει αρνητικές κλίσεις, ενώ τα υπόλοιπα καταστατικά μοντέλα είτε έχουν μηδενική είτε θετική κλίση. Επίσης για τις παραμέτρους της επιφανειακής υποχώρησης και της οριζόντιας τάσης και παραμόρφωσης το μοντέλο K-θ παράγει τις υψηλότερες τιμές, ενώ για τις παραμέτρους της κατακόρυφης τάσης και παραμόρφωσης τις υψηλότερες τιμές τις παράγει το μοντέλο του Uzan. Επιπλέον, τα αποτελέσματα του μοντέλου MEPDG κυμαίνονται ανάμεσα σε εκείνα των έτερων δύο καταστατικών μοντέλων προσεγγίζοντας γενικά για τις ασφαλικές στρώσεις των 15 και 20cm εκείνα του K-θ.

Όσον αφορά στην επιρροή του πάχους της ασφαλικής στρώσης, παρατηρούμε ότι για τα μικρά πάχη οι αποκλίσεις των τιμών μεταξύ των μοντέλων για το ίδιο υλικό είναι εμφανώς μεγαλύτερες από τις διατομές με μεγάλα πάχη ασφαλικών στρώσεων, όπου οι αποκλίσεις είναι εμφανώς μικρότερες και τα μοντέλα K-θ και MEPDG εμφανίζουν παραπλήσιες τιμές. Παρατηρούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις για το ίδιο υλικό, η διατομή με το μικρότερο πάχος ασφαλικής στρώσης έχει σημαντικά μεγαλύτερες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων από εκείνη με το μεγαλύτερο πάχος με αποκλίσεις 48.5% για την επιφανειακή υποχώρηση, 55% και 57% για την οριζόντια τάση και παραμόρφωση αντίστοιχα και 64% και 75% για την κατακόρυφη τάση και παραμόρφωση αντίστοιχα.

Όσον αφορά στην επιρροή του πάχους της στρώσης βάσης/υπόβασης, για κάθε παράμετρο μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το πάχος της στρώσης βάσης/υπόβασης δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα των μοντέλων για κάθε υλικό, όπως στην περίπτωση του πάχους της ασφαλικής στρώσης. Οι τάσεις και οι παραμορφώσεις στα κρίσιμα σημεία είναι υψηλότερα στην περίπτωση του μικρότερου πάχους, αλλά δεν υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις για κάθε μέγεθος, όσον αφορά τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τα διαφορετικά μοντέλα. Εξαίρεση αποτελούν οι περιπτώσεις των παραμέτρων της κατακόρυφης θλιπτικής τάσης και της κατακόρυφης παραμόρφωσης, καθώς η αύξηση του πάχους από 30 σε 40 cm επιφέρει σημαντικές μειώσεις (15-20%) στις αντίστοιχες τιμές τους.

Πραγματοποιώντας μια ανασκόπηση των προαναφερθέντων, συμπεραίνουμε ότι οι παράμετροι που επηρεάζουν περισσότερο τα αποτελέσματα για το ίδιο υλικό, είναι η επιλογή του καταστατικού μοντέλου με το οποίο θα γίνει η ανάλυση, αφού για κάθε εξεταζόμενη παράμετρο παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στις τιμές των εκάστοτε καταστατικών μοντέλων, και το πάχος της ασφαλικής στρώσης. Παρατηρείται ότι η μη

γραμμική ανάλυση με τα διαφορετικά καταστατικά μοντέλα επηρεάζει σημαντικά τις διατομές εύκαμπτου οδοστρώματος με μικρά πάχη ασφαλικής στρώσης, ενώ για τα μεγάλα πάχη ασφαλικής στρώσης οι τιμές και των τριών καταστατικών μοντέλων οριακά ταυτίζονται. Οδηγούμεστε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι η επιλογή του καταστατικού μοντέλου με το οποίο θα πραγματοποιηθεί η μη γραμμική ανάλυση καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική κατά την μελέτη δευτερευουσών έργων οδοποιίας και πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή του καταστατικού μοντέλου με το οποίο θα πραγματοποιηθεί η διαστασιολόγηση της διατομής, αφού για κάθε εξεταζόμενη παράμετρο οι αποκλίσεις μεταξύ των μοντέλων είναι σημαντικές και οφείλεται να διασφαλιστεί η ασφάλεια του έργου.

Επιπροσθέτως, πρόταση μελλοντικής έρευνας θα αποτελούσε η επέκταση της παρούσας μελέτης:

- αναλύοντας διατομές εύκαμπτου οδοστρώματος όπου το ασύνδετο υλικό της βάσης να εξετάζεται σε ποικίλα ποσοστά υγρασίας και όχι μόνο στο βέλτιστο,
- εξετάζοντας παρεμφερή Ελληνικά υλικά με διαφορετικές καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης, προκειμένου να καλύπτεται το σύνολο του επιτρεπόμενου φάσματος των Ελληνικών προδιαγραφών,
- μελετώντας περισσότερα πάχη ασφαλικών στρώσεων και στρώσεων βάσης,
- σύγκριση αποτελεσμάτων μη γραμμικής και γραμμικής ανάλυσης για τις ίδιες παραμέτρους διατομής και προδιαγραφών υλικού.

Επαγωγικά σκεπτόμενοι, οδηγούμεστε στην δημιουργία μιας βάσης δεδομένων, η οποία αποτελείται από αποτελέσματα μη γραμμικής ανάλυσης διατομών εύκαμπτου οδοστρώματος, η οποία μπορεί να αποτελέσει μελλοντικά τη βάση ενός λογισμικού διαστασιολόγησης και υπολογισμού αντοχής διατομών οδοστρώσεως, το οποίο πραγματοποιεί μη γραμμική ανάλυση. Το κύριο πλεονέκτημα ενός τέτοιου λογισμικού, θα ήταν όχι μόνο ότι λαμβάνει υπόψιν του τρία καταστατικά μοντέλα υπέρ της ασφαλείας, αλλά το γεγονός ότι βασίζεται σε Ελληνικά ασύνδετα υλικά που έχουν προέλθει από υφιστάμενα έργα οδοποιίας.

Κλείνοντας, πρόταση μελλοντικής έρευνας θα αποτελούσε μια συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών, των επί τόπου (in situ) δοκιμών και των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, που αναφέρονται σε συγκεκριμένη

διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος. Σε κάθε περίπτωση, τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε διατομής (υλικά, πάχη, ποσοστό υγρασίας κλπ) θα πρέπει προσεγγιστικά να είναι κοινά για τις τρεις προαναφερθείσες μεθόδους ανάλυσης. Κατά αυτόν τον τρόπο, ο μελετητής θα είναι σε θέση να διαπιστώσει κατά πόσο οι εργαστηριακές (AASHTO T307-99, κλπ) και οι υπολογιστικές δοκιμές (Πεπερασμένα στοιχεία – καταστατικά μοντέλα) , ανταποκρίνονται στις πραγματικές συνθήκες διατομής εύκαμπτου οδοστρώματος.

7. Βιβλιογραφία

AASHTO (1993). "Guide for Design of Pavement Structures", American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO (2013). "Standard Specification for Transportation Materials and Methods of Sample and Testing", American Association of the State Highway and Transportation Officials, 33rd edition.

AASHTO T307-99 (2007). "Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials", American Association of State Highway and Transportation Officials.

Allen, J.J. and M.R. Thompson, Resilient Response of Granular Materials Subjected to Time-Dependent Lateral Stresses. Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board 1974. 510: p. 1-13

Araya, A. (2011). "Characterization of Unbound Granular Materials for Pavements", Road and Railway Engineering Section, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology.

Ayan Mehrotra (2014). Evaluating the Influence of Moisture Variation on Resilient Modulus for Unsaturated Pavement Subgrades. Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College

Barksdale, R.D. and S.Y. Itani, Influence of aggregate shape on base behavior. Transportation Research Record, 1989(1227).

Barksdale, R., The Aggregate Handbook. 1991, Washington DC: National Stone Association

Chen et al (2009). Mechanical Responses and Modeling of Rutting in Flexible Pavements, Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.7.

Dawson, A. R., Thom, N. H., and Paute, J. L. (1996). "Mechanical characteristics of unbound granular materials as a function of condition." Flexible Pavements, Eur. Symp. Euroflex 1993, A. G. Correia, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, p. 35–44.

Drumm, E. C., Madgett M. R., Reeves, J. S., and Tronlinger, W. D., “Subgrade Resilient Modulus Correction for Saturation Effects”. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 123, Issue 7, 1997, pp. 663-670.

Fwa, T.F. and Wei, Liu. "Design of Rigid Pavements." The Handbook of Highway Engineering. Ed. T.W. Fwa. CRC Press, 2005

Hicks, R. G. (1970). “Factors influencing the resilient properties of granular materials”, Ph.D thesis, University of California, Berkeley.

Hicks, R. G. and Monismith, C. L. (1971). “Factors influencing the resilient properties of granular materials”, Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, 345, p. 15-31.

Itani, S. (1990). "Behavior of Base Materials Containing Large Sized Particles", Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, School of Civil and Environmental Engineering.

Kim, M. 2007. Three-dimensional finite element analysis of flexible pavements considering nonlinear pavement foundation behavior. PhD dissertation. The University of Illinois at Urban-Champaign.

Kolisoja, P. (1997). “Resilient deformation characteristics of granular materials,” PhD thesis, Tampere University of Technology, Publ. No. 223, Tampere, Finland.

Li, P. 2013. Characterization and implementation of stress dependent resilient modulus of asphalt treated base for flexible pavement design. PhD dissertation. The University of Alaska Fairbanks, Alaska.

Li Jia (2013). Permanent deformation and resilient modulus of unbound granular materials. Iowa State University

Mamlouk, Michael S. "Design of Flexible Pavements." The Handbook of Highway Engineering. Ed. T.W. Fwa. CRC Press, 2005.

Monismith, C. L., Seed, H. B., Mitry, F. G., and Chan, C. K. (1967). “Prediction of pavement deflections from laboratory tests.” Proc., 2nd Int. Conf. Struct. Des. of Asphalt Pavements, 109–140.

Pavement Tools Consortium (PTC), Pavement Guide Interactive, *University of Washington*, (2011), <http://training.ce.washington.edu/PGI/>.

Seed, H. B., Chan, C. K., Lee, C. E. (1962). “Resilient Characteristics of Subgrade Soils and Their Relation to Fatigue Failures in Asphalt Pavements”, International Conference Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, p. 77-

Steven, B.D. 2005. The development and verification of a pavement response and performance model for unbound granular materials. PhD dissertation. The University of Canterbury, New Zealand.

Sutharsan, T. 2013. Modeling the deformation of unsaturated granular pavement subgrade materials. PhD dissertation. Washington State University.

Thom, N. H., and Brown, S. F. (1987). “Effect of moisture on the structural performance of a crushed-limestone road base.” Transp. Res. Rec. 1121, Transportation Research Board, Washington, D.C., 50–56.

Uzan, J. (1985). "Characterization of Granular Materials", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1022, p. 52-59.

Witczak, M. W., and Uzan, J. (1988). “The universal airport pavement design system, Report I of IV: Granular material characterization.” University of Maryland, College Park, Md

ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-05-03-05-01:2009-ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ

Λοΐζος, Α. , Πλατή, Χ. , Cliatt, B. (2016). Investigating Resilient Modulus Interdependence to Moisture for Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates. The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016)

Λοΐζος, Α., Β. Παπαβασιλείου (2005). Αποκατάσταση Οδικών Τμημάτων Αυτοκινητοδρόμων με Χρήση της Τεχνικής της Ανακύκλωσης με Αφρώδη Άσφαλτο. 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας, Βόλος, 18-20 Μαΐου 2005

Λοΐζος, Α. και Πλατή, Χ. (2014). "Σημειώσεις για το Μάθημα Οδοστρώματα", Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Οδοποιίας.

Λοΐζος Α. , Σπηλιόπουλος Κ., Cliatt B., Γκυρτής Κ. (2017). Structural pavement responses using nonlinear finite element analysis of unbound materials. Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields- Λοΐζος et al.

Παπαδρακάκης Μ. (2001). Ανάλυση φορέων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα

Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές, ΠΕΤΕΠ 05-03-03-00, Έκδοση 1, Μάιος 2006