

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΕΛΑΦΙΚΗ ΣΤΡΩΣΗ ΜΕ ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ ΚΑΙ Η ΧΩΡΙΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟ

Σ. Κόλιας, Α.Καραγάλιος

Εργαστήριο Οδοποιίας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, 15773 Αθήνα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Παρουσιάζεται ο αναλυτικός υπολογισμός του πάχους ενός οδοστρώματος με στρώση έδρασης από σταθεροποιημένο αργιλώδες εδαφικό υλικό με ασβεστόχο ιπτάμενη τέφρα και ή χωρίς τσιμέντο. Το οδόστρωμα αυτό συγκρίνεται με σύνηθες εύκαμπτο οδόστρωμα με στρώση έδρασης που προκύπτει μετά από εξυγίανση του επιτόπου εδάφους. Για την ανάλυση χρησιμοποιούνται τα μηχανικά χαρακτηριστικά των σταθεροποιημένων εδαφών με ιπτάμενη τέφρα που προσδιορίστηκαν στο εργαστήριο. Συμπεραίνεται ότι η επιτόπου σταθεροποίηση εδαφικών υλικών με μικρή φέρουσα ικανότητα προσφέρει τεχνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά αξιόλογες λύσεις που πρέπει να εξετάζονται υποχρεωτικά στις περιπτώσεις εδαφών με μικρή φέρουσα ικανότητα πριν αποφασιστεί η κατασκευή του οδοστρώματος.

Λέξεις κλειδιά: ασβεστόχος ιπτάμενη τέφρα (ακατέργαστη), σταθεροποίηση αργιλωδών εδαφών, τσιμέντο, αντοχή σε θλίψη, εφελκυσμό σταθεροποιημένων αργιλωδών εδαφών, CBR σταθεροποιημένων εδαφών

ANALYTICAL DESIGN OF PAVEMENTS INCORPORATING A CAPPING LAYER OF STABILIZED SOIL WITH HIGH CALCIUM FLY ASH AND OR CEMENT

S. Kolias, A. Karahalios

Highway Engineering Laboratory of NTUA, 5, Irroon Polytechniou 15773 Athens

ABSTRACT: The analytical design of a pavement incorporating a capping layer of stabilized fine grained clayey soil with high calcium fly ash is presented and compared with a conventional flexible pavement with a capping layer with improved imported granular material. For the analysis the mechanical properties of soils stabilized with fly ash and or cement measured in the laboratory are used. It is concluded that the in-situ stabilization of low bearing capacity soils, offers solutions with technical, economic and environmental advantages in comparison to the conventional flexible pavements. It is suggested that the investigation of the possibility of in-situ stabilization should always be examined in case of low bearing capacity soils.

Keywords: high calcium fly ash, stabilization of fine-grained soils, cement compressive, tensile strength of stabilized soils, CBR of stabilized soils

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για την πλήρη ανάλυση της συμπεριφοράς ενός οδοστρώματος με τη χρήση σταθεροποιημένης στρώσης στη βάση ή στην υπόβαση ή στην ενισχυμένη στρώση έδρασης απαιτείται η ανάλυση αυτή να γίνει σε δύο χρονικές στιγμές: φάση κατασκευής και φάση λειτουργίας. Αρχικά, στη φάση κατασκευής η μόλις αποπερατωμένη σταθεροποιημένη στρώση θα καταπονείται από την επιβολή φορτίων της κατασκευαστικής κυκλοφορίας και την επιβολή παραμορφώσεων (ξήρανση και θερμοκρασιακές μεταβολές). Στη συνέχεια στη φάση λειτουργίας θα καταπονείται κυρίως από τα φορτία λειτουργίας (κυκλοφορία λειτουργίας). Οι επιπνήσεις λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών είναι συνήθως ηπιότερες διότι έχει επέλθει εντωμεταξύ θερμοκρασιακή ρηγμάτωση. Ως τυπικό φορτίο θεωρήθηκε άξονας 11.5 tn με δίδυμους τροχούς, το οποίο αναμένεται ότι θα καθιερωθεί ως το τυπικό φορτίο μελέτης και ανάλυσης οδοστρωμάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Για να αντιμετωπισθούν τα φαινόμενα της ξήρανσης και των θερμοκρασιακών διαφορών μέσα στη στρώση φαινόμενα τα οποία έχουν ως συνέπεια την ανάπτυξη έντονων παραμορφώσεων οι οποίες παρεμποδίζονται προτείνεται η κατασκευή μιας προστατευτικής στρώσης από θραυστό αμμοχάλικο (ΠΤΠ Ο155 ή Ο150) ελάχιστου πάχους από 150mm. έως 200mm. Η στρώση αυτή δρα σαν μονωτική στρώση παρεμποδίζοντας τις έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές και την εξάτμιση της υγρασίας από τη σταθεροποιημένη στρώση ενώ ταυτόχρονα την προστατεύει από τα φορτία των οχημάτων.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ

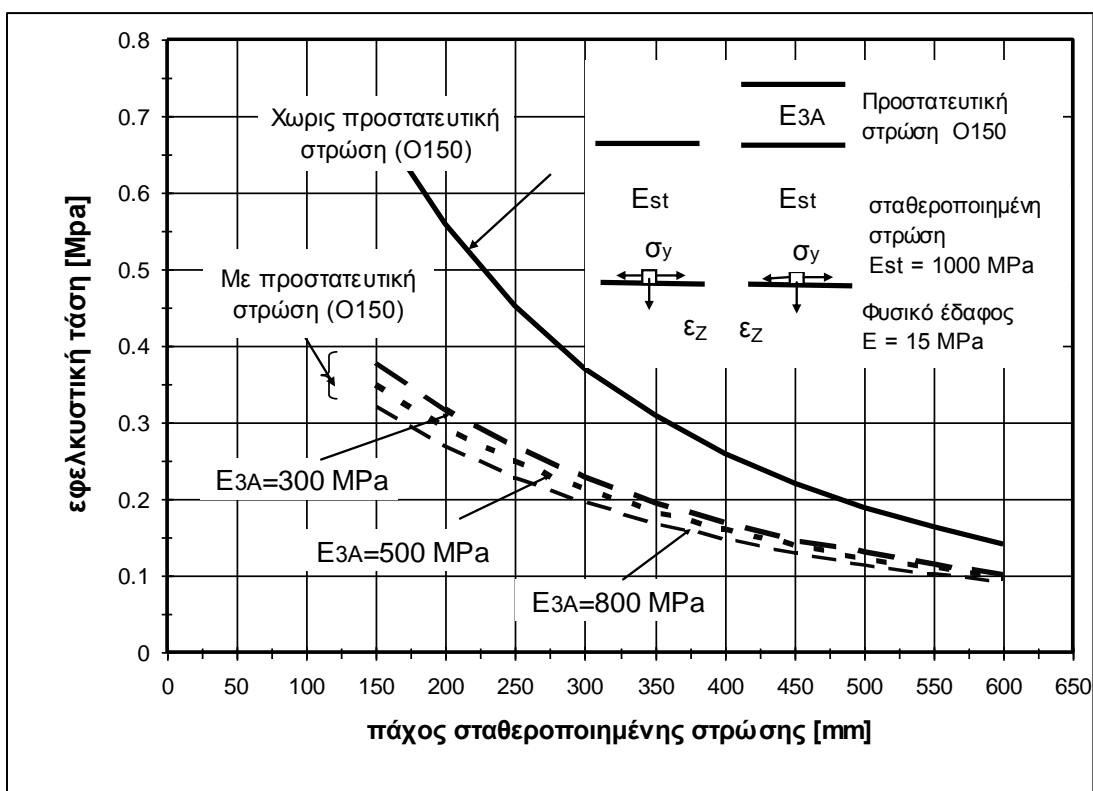
Φάση κατασκευής

Στη φάση της κατασκευής εξετάζονται δύο τύποι οδοστρωμάτων όπως φαίνεται στο Σχ1. Το οδόστρωμα Α αποτελείται από την στρώση από σταθεροποιημένο εδαφικό υλικό που εδράζεται στο φυσικό έδαφος και επιπλέον έχει μία προστατευτική στρώση από αμμοχάλικο ΠΤΠ Ο150 ή Ο155 πάχους 200mm. Το οδόστρωμα Β είναι όπως το Α χωρίς όμως την προστατευτική στρώση. Τα οδοστρώματα εξετάζονται έναντι αστοχίας της σταθεροποιημένης στρώσης από υπέρβαση της επιτρεπόμενης οριζόντιας εφελκυστικής τάσης σ_y και έναντι αστοχίας της στρώσης του φυσικού εδάφους από υπερβολική παραμόρφωση λόγω υπέρβασης της ανηγμένης κατακόρυφης παραμόρφωσης ϵ_z , βλ Σχ1.



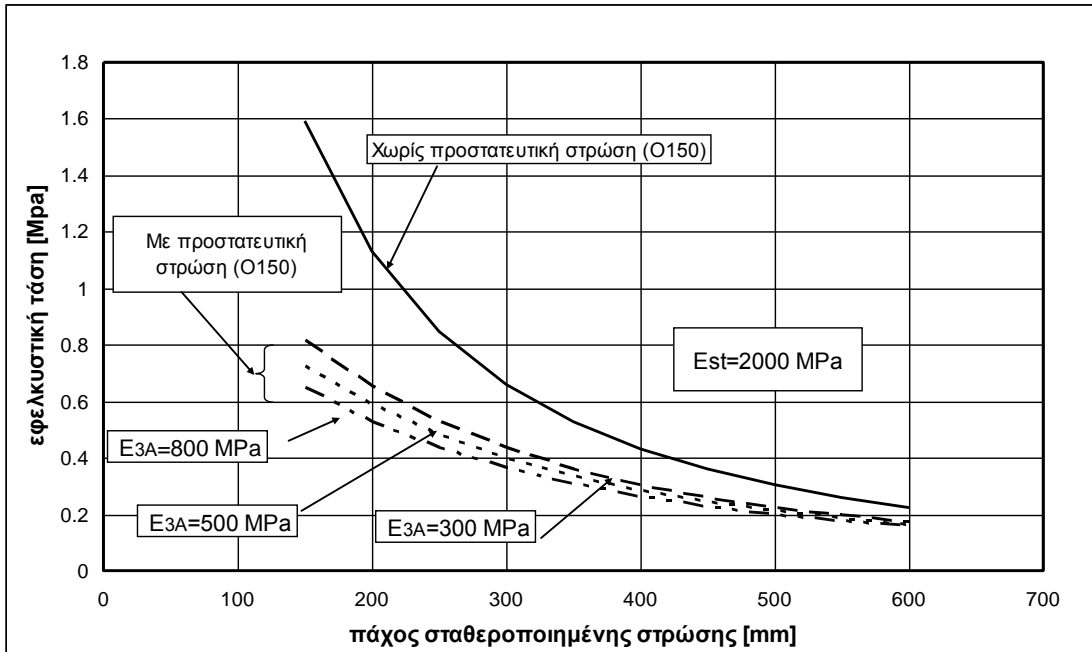
Σχ. 1: Τύποι οδοστρωμάτων που αναλύονται για την φάση της κατασκευής

Στα σχήματα 2 και 3 φαίνεται η μεταβολή της τάσεως σ_y στη σταθεροποιημένη στρώση συναρτήσει του πάχους αυτής και του μέτρου ελαστικότητας (E_{3A}) του υλικού της προστατευτικής στρώσης. Επίσης παρουσιάζεται η ίδια μεταβολή για την περίπτωση μη ύπαρξης προστατευτικής στρώσης. Το μέτρο ελαστικότητας της σταθεροποιημένης στρώσης E_{st} , λήφθηκε ίσο με 1000 MPa για το οδόστρωμα του σχήματος 2 και 2000MPa για το οδόστρωμα του σχήματος 3. Η τάση σ_y καθορίζει τον κίνδυνο ρηγμάτων της σταθεροποιημένης στρώσης από την κυκλοφορία οχημάτων κατασκευής.

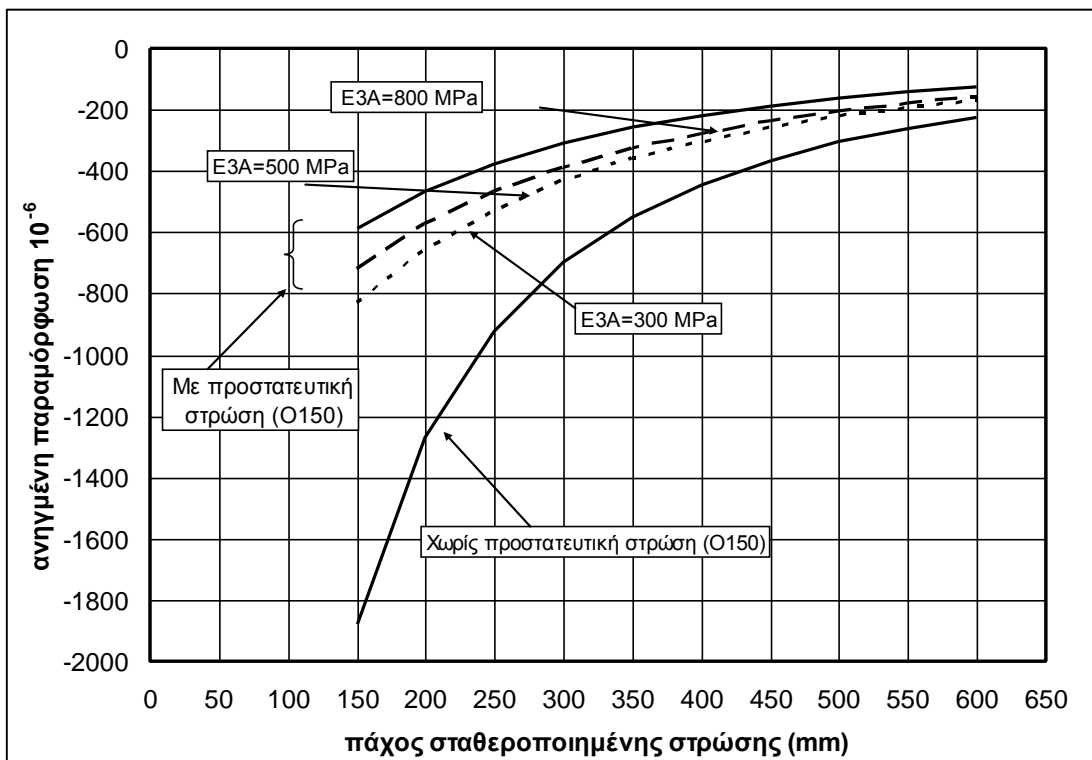


Σχ. 2: Μεταβολή της οριζόντιας εφελκυστικής τάσης σ_y στον πυθμένα της σταθεροποιημένης στρώσης με το πάχος της στρώσης για $E_{st} = 1000$ MPa

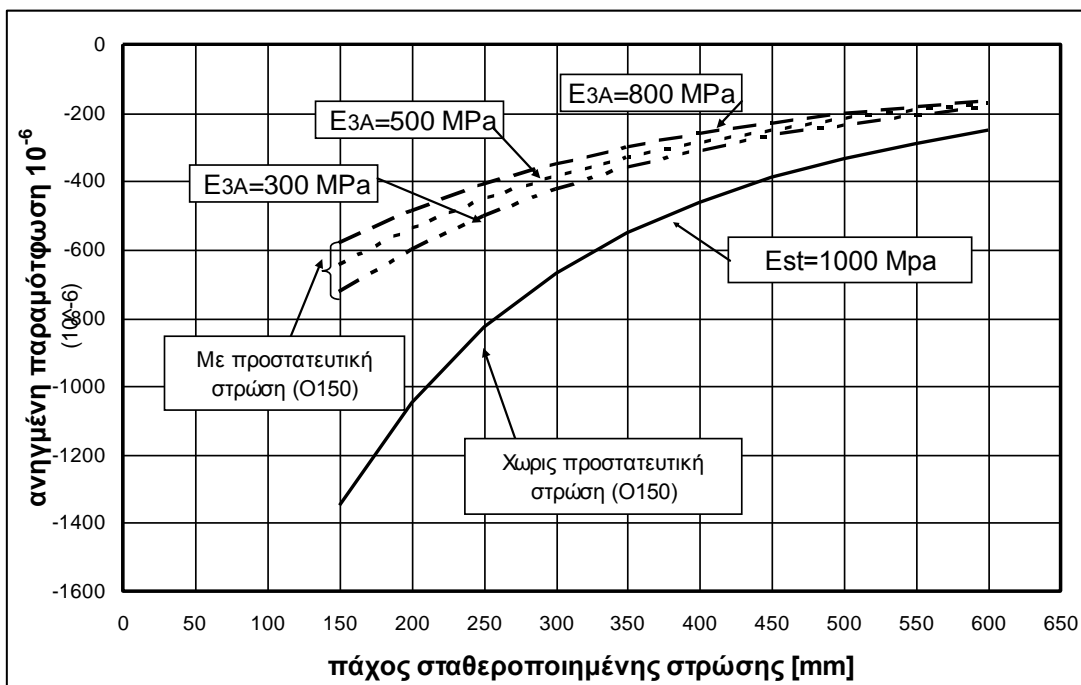
Αν θεωρηθεί επιτρεπόμενη τάση σε κάμψη του σταθεροποιημένου υλικού 0.13 MPa με μέτρο ελαστικότητας $E_{st}=1000$ MPa για την φάση κατασκευής προκύπτει ότι το απαιτούμενο πάχος της σταθεροποιημένης στρώσης είναι περίπου 450mm (σχήμα 2). Ανάλογο πάχος προκύπτει από το σχήμα 3 για την περίπτωση $E_{st}=2000$ MPa και αντοχή σε κάμψη 0,25MPa. Θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι πρόσθετες ευεργετικές επιδράσεις της προστατευτικής στρώσης η οποία δρα μονωτικά σε θερμοκρασιακές μεταβολές και σε ξήρανση. Επιπλέον η στρώση αυτή εμποδίζει πλήρως την ανάδυση των ρωγμών που ενδεχομένως θα αναπτυχθούν στη σταθεροποιημένη στρώση προς την επιφάνεια του οδοστρώματος.



Σχ. 3: Μεταβολή της οριζόντιας εφελκυστικής τάσης σ_y στον πυθμένα της σταθεροποιημένης στρώσης με το πάχος της στρώσης για $E_{st} = 2000 \text{ MPa}$



Σχ. 4: Μεταβολή της κατακόρυφης ανηγμένης παραμόρφωσης στην επιφάνεια του εδάφους ως συνάρτηση του πάχους της σταθεροποιημένης στρώσης για $E_{st} = 1000 \text{ MPa}$



Σχ. 5: Μεταβολή της κατακόρυφης ανηγμένης παραμόρφωσης στην επιφάνεια του εδάφους ως συνάρτηση του πάχους της σταθεροποιημένης στρώσης για $E_{st} = 2000 \text{ MPa}$

Στα σχήματα 4 και 5 φαίνεται η μεταβολή της παραμόρφωσης ϵ_z στην επιφάνεια του φυσικού εδάφους η οποία καθορίζει τον κίνδυνο αστοχίας του φυσικού εδάφους από τα φορτία των οχημάτων κατασκευής για τιμές του μέτρου ελαστικότητας $E_{st} 1000 \text{ MPa}$ και 2000 MPa αντίστοιχα. Είναι φανερή η σημαντική βελτίωση που επιφέρει η προστατευτική στρώση.

Φάση λειτουργίας

Για τη φάση αυτή αναλύονται δύο τύποι οδοστρωμάτων (βλ Σχ. 6) που κατασκευάζονται σε έδαφος με μικρή φέρουσα ικανότητα $\text{CBR}=2$. Το οδόστρωμα Α είναι ένα οδόστρωμα το οποίο – λόγω ασθενούς εδάφους – έχει μία στρώση πάχους 450 mm από το επιτόπου έδαφος σταθεροποιημένο με ιπτάμενη τέφρα. Το πάχος των 450 mm έχει εξαχθεί από την προηγούμενη ανάλυση έτσι ώστε η στρώση αυτή να μην αστοχήσει από την κυκλοφορία κατασκευής. Πάνω στη στρώση αυτή προβλέπεται στρώση από ασύνδετο αμμοχάλικο ΠΤΠ Ο155 πάχους 300 mm και τελικά επ' αυτής στρώσεις ασφαλτομιγμάτων με συνολικό πάχος που καθορίζεται από την μελέτη του οδοστρώματος. Το οδόστρωμα Β είναι ένα σύνηθες εύκαμπτο οδόστρωμα για περίπτωση εδάφους με μικρή φέρουσα ικανότητα με $\text{CBR}=2\%$. Με εξυγιαντική στρώση από κοκκώδη εδαφικά υλικά πάχους 400 mm και υπόβαση και βάση από ασύνδετα αμμοχάλικα ΠΤΠ Ο150 και Ο155. Το συνολικό πάχος των ασφαλτικών στρώσεων καθορίζεται από την μελέτη του οδοστρώματος και συγκρίνεται με το αντίστοιχα πάχος του οδοστρώματος Α.

Ο νόμος αστοχίας που υιοθετήθηκε για τον έλεγχο της ασφαλικής στρώσης από αστοχία από κόπωση είναι (σχέση 1):

$$\varepsilon_{\varepsilon\pi} = 1.11 \times 90 \cdot 10^{-6} \times (N/10^6)^{-0.207} \quad (1)$$

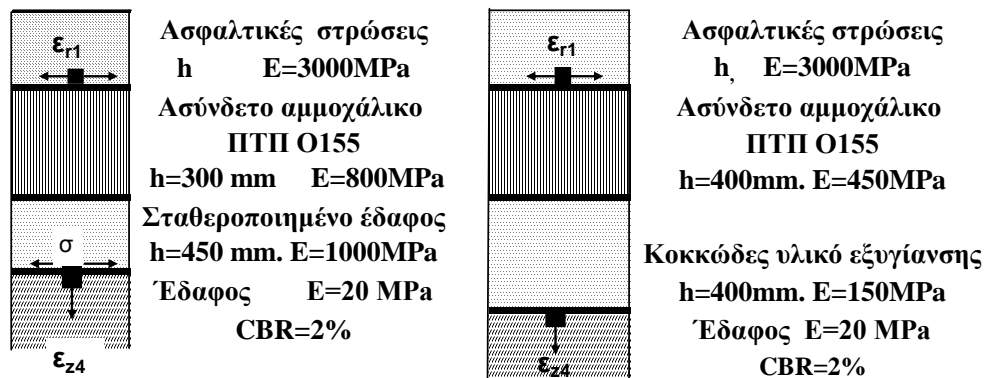
όπου $\varepsilon_{\varepsilon\pi}$ είναι η ανηγμένη οριζόντια παραμόρφωση ε_{r1} στον πυθμένα της ασφαλικής στρώσης για την οποία επιτρέπονται N επαναλήψεις φορτίσεων.

Ο νόμος αστοχίας που χρησιμοποιήθηκε, για τον έλεγχο της στρώσης έδρασης (φυσικό έδαφος), είναι το κριτήριο που προτείνει το TRRL (σχέση 2) και εξασφαλίζει την στρώση έδρασης και επομένως το οδόστρωμα από υπερβολική παραμόρφωση.

$$\varepsilon_{\varepsilon\pi} = 1,46 \times 10^{-2} \times N^{-0,253} \quad (2)$$

όπου $\varepsilon_{\varepsilon\pi}$ είναι η αναπτυσσόμενη παραμόρφωση ε_{z4} στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης για την οποία επιτρέπονται N επαναλήψεις φορτίσεων.

Στα σχήματα 7 και 8 παρουσιάζεται για τους δύο τύπους οδοστρωμάτων αντίστοιχα η μεταβολή του κρίσιμων μεγεθών των ανηγμένων παραμορφώσεων ε_{r1} και ε_{z4} που υπολογίστηκαν με πρόγραμμα H/Y με βάση ελαστικές επάλληλες στρώσεις. Για τη φόρτιση του οδοστρώματος θεωρήθηκε το δυσμενές φορτίο του απλού άξονα με τους νέους τύπους απλών τροχών (supper single) φορτίου 70000 N και ακτίνας 0.1575 m. Η θεώρηση αυτή έγινε για να ληφθεί κατά κάποιο τρόπο υπόψη το γεγονός ότι στη χώρα μας τα υπέρβαρα αυτοκίνητα αποτελούν ένα σημαντικό ποσοστό της κυκλοφορίας.



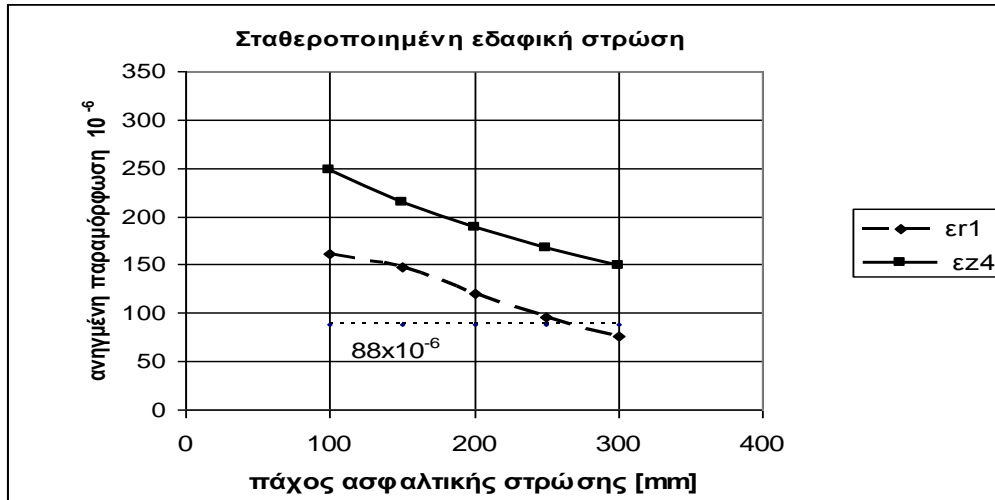
Σχ. 6: Συγκρινόμενοι δύο τύποι οδοστρωμάτων. Το συνολικό πάχος των ασφαλικών στρώσεων μεταβάλλεται.

Η σύγκριση των δύο οδοστρωμάτων γίνεται για συνολικό αριθμό ισοδύναμων διελεύσεων για το ως άνω φορτίο άξονα με τους νέους τύπους απλών τροχών (supper single) ίσο με $N = 10^6$.

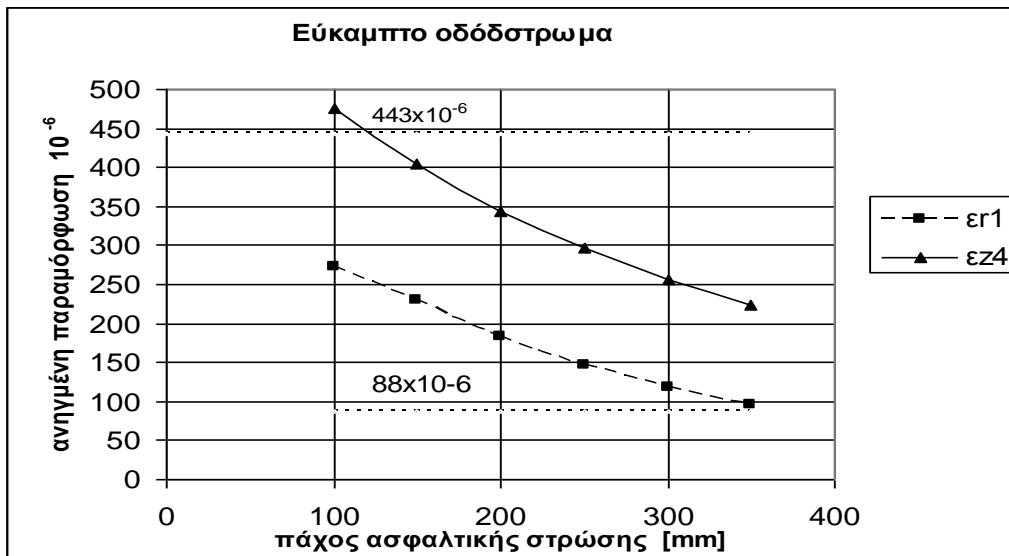
Για $N = 10^6$ οι επιτρεπόμενες τιμές ε_{r1} και ε_{z4} από τις σχέσεις (1) και (2) είναι :

Επιτρεπόμενη ανηγμένη οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση στον πυθμένα της ασφαλικής $\varepsilon_{\varepsilon\pi r1} = 88 \times 10^{-6}$

Επιτρεπόμενη ανηγμένη κατακόρυφη θλιπτική παραμόρφωση στην επιφάνεια του εδάφους $\epsilon_{\pi z4} = 443 \times 10^{-6}$



Σχ. 7 : Μεταβολή των ανηγμένων παραμορφώσεων ϵ_{r1} και ϵ_{z4} με το πάχος της ασφαλτικής στρώσης για το οδόστρωμα Α

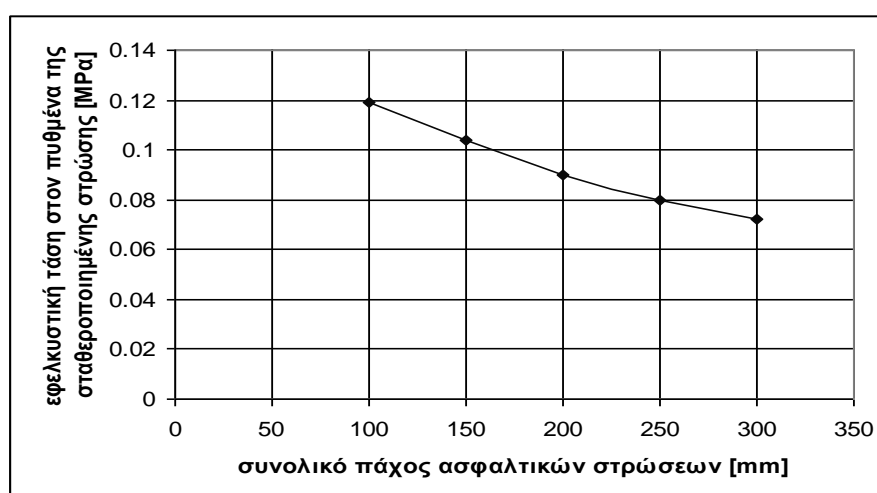


Σχ. 8: Μεταβολή των ανηγμένων παραμορφώσεων ϵ_{r1} και ϵ_{z4} με το πάχος της ασφαλτικής στρώσης για το οδόστρωμα Β.

Με βάση τις τιμές αυτές προσδιορίζεται από τα σχήματα 7 και 8 το απαιτούμενο συνολικό πάχος ασφαλτικών στρώσεων για το οδόστρωμα Α, 270 mm και για το οδόστρωμα Β 365 mm. Τα πάχη αυτά εξασφαλίζουν τα δύο οδοστρώματα από αστοχία της ασφαλτικής στρώσης από κόπωση. Το σχετικά μεγάλο μέγεθος της επιτρεπόμενης ανηγμένης κατακόρυφης παραμόρφωσης στην επιφάνεια του εδάφους, $\epsilon_{\pi z4} = 443 \times 10^{-6}$, υποδεικνύει ότι δεν υφίσταται κίνδυνος αστοχίας των

οδοστρώματων από υπερβολική παραμόρφωση του εδάφους, εκτός της περίπτωσης του οδοστρώματος Β για συνολικό πάχος ασφαλτικών στρώσεων μικρότερο από 120 mm. Σημειώνεται επίσης ότι όπως επιβεβαιώνεται και από το Σχ. 9 η σταθεροποιημένη στρώση δεν διατρέχει κανένα κίνδυνο ρηγματώσης από κόπωση λόγω κυκλοφορίας διότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι πολύ μικρότερες από την αντοχή σε κάμψη του υλικού (Κόλιας 2005).

Η παραπάνω ανάλυση για οδοστρώματα σε περιπτώσεις εδάφους με μικρή φέρουσα ικανότητα καταδεικνύει την δυνατότητα χρησιμοποίησης της μεθόδου σταθεροποίησης για την βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του επιτόπου εδαφικού υλικού αντί της κλασσικής μεθόδου εξυγίανσης (απομάκρυνσης εδαφικής στρώσης σημαντικού πάχους και αντικατάστασή της από άλλη με κατάλληλο κοκκώδες).



Σχ. 9: Αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις στον πυθμένα της σταθεροποιημένης στρώσης για διάφορα συνολικά πάχη ασφαλτικών στρώσεων.

Από την ανάλυση προκύπτει ότι το οδόστρωμα με σταθεροποιημένη στρώση (Α) έχει συνολικό πάχος ασφαλτικών στρώσεων κατά 95mm -100mm μικρότερο από το κλασσικού τύπου εύκαμπτο οδόστρωμα (Β). Ομοίως το πάχος βάσεως από υλικό ΠΤΠ Ο155 του οδοστρώματος (Α) είναι κατά 100mm μικρότερο από εκείνο του (Β). Πέραν αυτών των διαφορών η απομάκρυνση του ακατάλληλου υλικού, η εναπόθεση αυτού σε κατάλληλες θέσεις και η μεταφορά-διάστρωση και συμπύκνωση νέου κοκκώδους υλικού συνιστούν εργασίες οι οποίες επιφέρουν μεγαλύτερη περιβαλλοντική επιβάρυνση αλλά και πιθανόν μεγαλύτερο κόστος σε σχέση με την επιτόπου σταθεροποίηση.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Είναι φανερό ότι η μέθοδος της επιτόπου σταθεροποίησης των εδαφών με ακατέργαστη ιπτάμενη τέφρα ή και τσιμέντο προσφέρει τεχνικά αξιόλογες και οικονομικά συμφέρουσες λύσεις σε περιπτώσεις εδαφών με μικρή φέρουσα ικανότητα. Πιστεύεται ότι η δυνατότητα αυτή πρέπει να εξετάζεται υποχρεωτικά σε όλες τις περιπτώσεις εδαφών με μικρή φέρουσα ικανότητα ($CBR < 5\%$) και η τελική απόφαση να εξάγεται μετά από οικονομική σύγκριση των δύο λύσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Powell, Potter, Mayhew, Nunn (1984) The structural design of bituminous roads, - TRRL Laboratory Report 1132, Transport and Road Research Laboratory, 1984.
2. Σ. Κόλιας,, Α. Καραχάλιος (2005) Σταθεροποίηση αργιλικών εδαφικών υλικών με ασβεστόχο ιπτάμενη τέφρα με ή και χωρίς τσιμέντο β) Αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό, σε κάμψη και μέτρο ελαστικότητας . 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Ε.ΒΙ.ΠΑΡ. Θεσσαλονίκη 24-26 Νοεμβρίου, 2005.