

# Θεωρητική προσέγγιση των μεθόδων ενίσχυσης χαλικόστρωτων οδών

Α. Μουρατίδης

*Καθηγητής ΑΠΘ*

Λ. Παντελίδης

*Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφιος Διδάκτορας ΑΠΘ*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ:

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι το ζήτημα της κατασκευής και ενίσχυσης χαλικόστρωτων οδών (αγροτικών, δασικών, διακοινοτικών), οι οποίες υφίστανται την καταπόνηση βαρέων οχημάτων. Η προσέγγιση του προβλήματος αφορά χαλικόστρωτα οδοστρώματα που προσομοιώνονται ως διστρωματικά μέσα, αποτελούμενα δηλαδή από μία βάση από ασύνδετα αδρανή επί εδάφους θεμελίωσης. Εξετάζεται το ενδεχόμενο της αντικατάστασης της στρώσης κυκλοφορίας θραυστού υλικού από φυσικό αμμοχάλικο και επίσης η χρήση γεωφάσματος ως ενίσχυση στο οδόστρωμα. Η έρευνα βασίζεται σε μία αριθμητική ανάλυση μέσω ενός τρισδιάστατου μοντέλου σε H/Y, κατά την οποία η ενίσχυση από υγιή υλικά τοποθετείται επί ασθενούς εδάφους και το διστρωματικό μέσο μελετάται υπό συνθήκες “ελαστικής-πλαστικής” συμπεριφοράς.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται το ζήτημα της κατασκευής και ενίσχυσης ανασφάλτων οδών, όπως οι διακοινοτικές, οι αγροτικές, δασικές και οι εργοταξιακές, οι οποίες υφίστανται την καταπόνηση από την κυκλοφορία βαρέων ή ημιβαρέων οχημάτων. Ένα έδαφος πρέπει να φέρει τα φορτία κυκλοφορίας, χωρίς ταυτόχρονα να παρουσιάζει μεγάλες παραμορφώσεις. Για να συμβαίνει αυτό θα πρέπει το έδαφος να έχει υψηλή φέρουσα ικανότητα, πράγμα που εξαρτάται από τον τύπο του εδαφικού υλικού, τον βαθμό συμπίκνωσης και την περιεκτικότητα σε υγρασία. Στην πράξη, τα φυσικά εδάφη σπάνια ικανοποιούν τα κριτήρια μηχανικής συμπεριφοράς που απαιτούνται στα έργα οδοποιίας και για τον λόγο αυτόν, στην κατασκευή των οδών χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές βελτίωσης εδαφικών υλικών.

## 2. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΧΑΛΙΚΟΣΤΡΩΤΩΝ ΟΔΩΝ

Στη σημερινή εποχή, οι χαλικόστρωτες οδοί δεν τυγχάνουν ευρείας εφαρμογής όπως παλαιότερα, εν τούτοις, για τον σκοπό που εξυπηρετούν, παραμένουν πολύ σημαντικές. Ο μηχανικός είναι σε θέση να επιλέξει μεταξύ διαφόρων τεχνικών κατασκευής, ώστε να συνδυαστεί αρμονικά το κόστος με τον ρόλο της οδού και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Η τεχνική κατασκευής, που σε κάθε περίπτωση επιλέγεται, θα πρέπει να αξιολογείται με βάση την αποτελεσματικότητα, το κόστος και τη δυνατότητα εφαρμογής της.

Οι τεχνικές κατασκευής των χαλικόστρωτων οδών πάνω από πολύ ασθενές – συμπιεστό έδαφος συνοψίζονται ως εξής:

- α. συμβατική κατασκευή στρώσης βάσης-κυκλοφορίας από θραυστά υλικά,
- β. κατασκευή στρώσης βάσης-κυκλοφορίας από φυσικό αμμοχάλικο,
- γ. αντικατάσταση μιας επιφανειακής στρώσης ασθενούς εδάφους, με υγιή υλικά,
- δ. χημική σταθεροποίηση του εδάφους ή των αδρανών οδοστρωσίας, με τσιμέντο, υδράσβεστο ή με βιομηχανικά παραπροϊόντα (ιπτάμενη τέφρα, ερυθρά ιλύς, φωσφογύψος κ.α.), εφόσον αυτά είναι διαθέσιμα στην περιοχή κοντά του έργου και
- ε. ενίσχυση του οδοστρώματος με γεωφάσματα, σε συνδυασμό κυρίως με τις τεχνικές α και β.

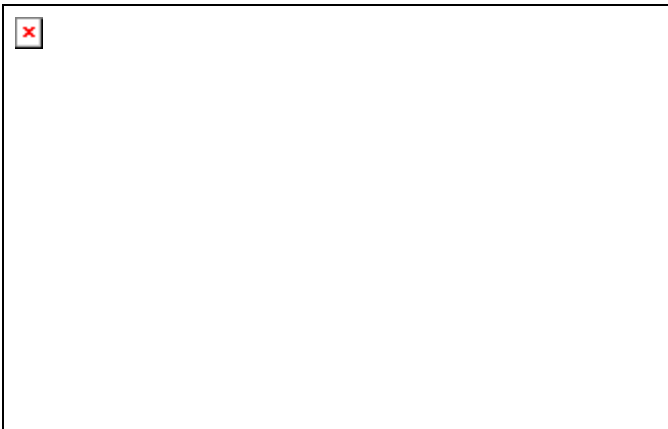
Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να συνεκτιμηθεί ότι, σημαντικός παράγοντας στην επιλογή της τεχνικής ενίσχυσης μιας δευτερεύουσας οδού είναι το μέγεθος του (εναπομένουτος) πλάτους καταστρώματος. Στρώση ενίσχυσης μεγαλύτερου πάχους έχει ως αποτέλεσμα, το πλάτος καταστρώματος της οδού να γίνεται μικρότερο. Σημαντικό πλεονέκτημα, στην περίπτωση αυτήν, παρουσιάζει η τεχνική της χημικής σταθεροποίησης της βάσης ή του ασθενούς εδάφους, η οποία προσφέρει σημαντική μείωση του πάχους της βάσης και αύξηση της φέρουσας ικανότητας της οδού. Το ζήτημα όμως της κατασκευής οδών με τη μέθοδο της χημικής σταθεροποίησης είναι ένα κρίσιμο ζήτημα, ιδιαίτερα για δίκτυα δευτερευουσών αρτηριών, που δεν αποτελεί αντικείμενο της εργασίας.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μία θεωρητική αξιολόγηση των διαφόρων μεθόδων κατασκευής ανασφάλτων οδών με υγιή δάνεια και θραυστά υλικά.

### 3. Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΕ ΟΔΟΥΣ ΧΩΡΙΣ ΤΑΠΗΤΑ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ

Ένα μεγάλο μέρος των τοπικών δικτύων αποτελείται από χωμάτινες ή σκυρόστρωτες οδούς, που παρουσιάζουν σοβαρά προβλήματα βατότητας κατά τους χειμερινούς μήνες. Τα προβλήματα αυτά δημιουργούνται, κατά κύριο λόγο, από βροχοπτώσεις, χιονοπτώσεις και εν γένει προσβολή από όμβρια του εδαφικού υλικού του οδοστρώματος. Η προσθήκη / ενίσχυση με μία στρώση βελτιωμένων μηχανικών χαρακτηριστικών αποτελεί, στις περιπτώσεις αυτές, απόλυτη προτεραιότητα.

Ο υψηλός υδροφόρος ορίζοντας έχει σημαντική επιρροή στην περιεκτικότητα της υγρασίας στο έδαφος θεμελίωσης. Είναι γνωστό ότι, σε αργιλικά εδάφη ή σε εδάφη με μεγάλη περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα συστατικά, αύξηση της υγρασίας μπορεί να οδηγήσει σε αξιοσημείωτη μείωση της διατμητικής αντοχής. Τα επιφανειακά-όμβρια ύδατα δημιουργούν, σε χωμάτινες οδούς, λασπώδη επιφάνεια και, επακόλουθα, δημιουργούν μόνιμες και βαθιές τροχοαυλακώσεις που επιφέρουν πλήρη καταστροφή της επιφάνειας κυκλοφορίας.



Εικόνα 1. Βύθιση φορτηγού οχήματος σε ασθενές – κορεσμένο έδαφος

Η προσθήκη στρώσης ενός υλικού υγιέστερου και ανθεκτικότερου στην υγρασία, προσφέρει αφενός μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα και αφετέρου δυνατότητα αποστράγγισης και απομάκρυνσης των υδάτων. Έτσι για τις χωμάτινες οδούς του δευτερεύοντος δικτύου, κλαστική και αρκετά αποτελεσματική μέθοδος θεραπείας είναι η ενίσχυση μέσω προσθήκης επιφανειακής στρώσης, εν είδει στρώσης κυκλοφορίας, από υλικά βελτιωμένων χαρακτηριστικών.

#### 4. ΟΡΙΑΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΕΔΑΦΩΝ

Βασικός άξονας της παρούσας μελέτης ήταν η διερεύνηση της αύξησης της φέρουσας ικανότητας των ανασφάλτων οδών με την προσθήκη θραυστού ή φυσικού αμμοχάλικου. Η στρώση αυτή της ενίσχυσης παίζει αφενός ρόλο βάσης οδοστρώματος και συντελεί στην κατανομή των φορτίων και αφετέρου στρώσης κυκλοφορίας εξασφαλίζοντας βατότητα. Κατά συνέπεια, αναφέρεται εναλλακτικά ως “βάση” ή “στρώση κυκλοφορίας”.

Το συγκεκριμένο ζήτημα της ενίσχυσης / βελτίωσης χωμάτινων οδών, που αφορά οδούς του δευτερεύοντος δικτύου έχει, από πλευράς μηχανικής αντοχής, δύο συνιστώσες που καθορίζουν, αντίστοιχα, δύο στόχους της πρακτικής της ενίσχυσης:

- α) επάρκεια διατμητικής, κυρίως αντοχής στην επιφάνεια κυκλοφορίας,
- β) σημαντική κατανομή των τάσεων στην επιφάνεια του εδάφους έδρασης, το οποίο συνήθως εμφανίζει μεγάλη παραμορφωσιμότητα

Το πρώτο από τα δύο ζητήματα αντιμετωπίζεται με την παρεμβολή στρώσεων ενίσχυσης από υλικά υψηλής μηχανικής αντοχής ( $\phi > 35^\circ$ ), τα οποία επιπροσθέτως είναι σκόπιμο να παρουσιάζουν και μία κατανεμημένη κοκκομετρία ( $U > 5$ ), ώστε να εξασφαλίζεται υψηλή διατμητική αντοχή. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι μία ισόκοκκη άμμος εσωτερικής γωνίας τριβής  $\phi = 35^\circ$  είναι εντελώς ακατάλληλη για τον συγκεκριμένο σκοπό.

Το δεύτερο ζήτημα, που είναι το κυρίως αντικείμενο της εργασίας, αντιμετωπίζεται με την παρεμβολή στρώσεων υψηλής μηχανικής αντοχής και μεγάλου πάχους. Το ζήτημα αυτό διερευνήθηκε μέσω θεωρητικών υπολογισμών της εντατικής κατάστασης για διάφορους συνδυασμούς υλικών.

Εν προκειμένω για την αναπαράσταση των χαρακτηριστικών του φυσικού εδάφους, επιλέχθηκαν τέσσερα είδη εδαφών, αυτό της οργανικής αργίλου (OH), της οργανικής ιλύος (OL), της ιλυώδους αργίλου (CL) και της πλαστικής αργίλου (CH).

Για τα τέσσερα παραπάνω εδάφη, υπολογίστηκε η οριακή αντοχή, σύμφωνα με μέθοδο του Terzaghi, στην περίπτωση άκαμπτης κυκλικής πλάκας, διαμέτρου  $B = 450\text{mm}$  που προσομοιώνει δίδυμο τροχό βαρέος οχήματος:

$$q_u = 1.2 \cdot c \cdot N_c + \gamma \cdot D_f \cdot N_q + 0.6 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \quad (1)$$

Όπου:  $B$  = η διάμετρος της πλάκας,  $D_f$  = βάθος θεμελίωσης,  $\gamma$  = το φαινόμενο βάρος του εδάφους,  $N_\gamma$ ,  $N_c$ ,  $N_q$ , συντελεστές επιφανειακής αντοχής του εδάφους, συνοχής και βάθους θεμελίωσης αντίστοιχα

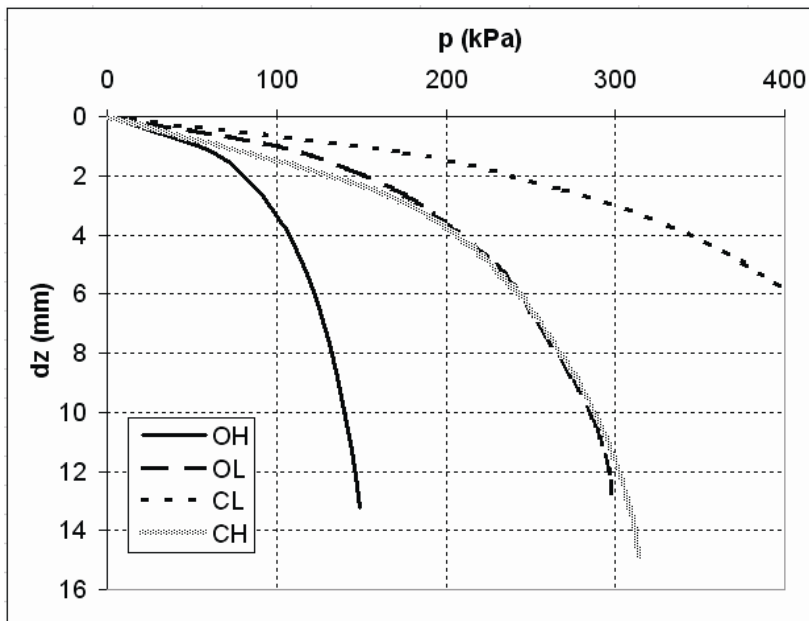
Οι παράμετροι διατμητικής αντοχής που υπεισήλθαν στους υπολογισμούς αποτελούν μέσες τιμές που προέκυψαν από συναφείς έρευνες του Εργαστηρίου Οδοποιίας (Μουρατίδης, 2005).

Πίνακας 1. Παράμετροι διατμητικής αντοχής εδαφών

Τύπος Εδάφους	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	Οριακή Αντοχή $q_u$ κατά Terzaghi (kPa)
OH	7	17	140
OL	10	22	280
CL	15	25	500
CH	20	15	320

Σε μία πρώτη φάση επιχειρήθηκε να αξιολογηθεί η προοπτική κυκλοφορίας οχημάτων επί των εδαφών αυτών, σε οδούς, δηλαδή, χωρίς χαλικόστρωτα οδοστρώματα..

Στην Εικόνα 2 απεικονίζονται οι καμπύλες πίεσης – κατακόρυφης βύθισης, όπως προέκυψαν από τους υπολογισμούς, στην περίπτωση αξονοσυμμετρικής φόρτισης, που εφαρμόζεται, ως καταναμημένο φορτίο  $p$  σε εύκαμπτη κυκλική πλάκα διαμέτρου  $2a=450\text{mm}$ .



Εικόνα 2. Διάγραμμα πίεσης – κατακόρυφης βύθισης

Παρατηρείται ότι η οριακή αντοχή της ιλυώδους αργίλου (CL) είναι μεγαλύτερη του φορτίου που ασκείται από τον δίδυμο τροχό βαρέος οχήματος (περίπου 400kPa). Αντίθετα στην περίπτωση της αργιλώδους ιλύος (OL), το φορτίο του δίδυμου τροχού είναι μεγαλύτερο της οριακής αντοχής και η φόρτιση συνοδεύεται με μεγάλες βυθίσεις. Τέλος η οριακή αντοχή της οργανικής αργίλου (OH) είναι εξαιρετικά μικρή.

Σημειώνεται ότι, η πίεση που μεταδίδεται από τους εμπρόσθιους τροχούς στην επιφάνεια κυκλοφορίας είναι της τάξεως των 650kPa, για ένα βαρύ φορτηγό όχημα, οι βυθίσεις όμως που αυτοί προκαλούν, λόγω της μικρότερης διαμέτρου περιτυπώματος τους, είναι μικρότερες των δίδυμων τροχών του πίσω άξονα.

## 5. ΔΡΟΜΟΙ ΧΩΡΙΣ ΤΑΠΗΤΑ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΜΕ ΣΤΡΩΣΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΑΠΟ ΘΡΑΥΣΤΟ Ή ΦΥΣΙΚΟ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟ

Κατά την πρακτική της κατασκευής ανασφάλτων οδοστρωμάτων τίθεται το ζήτημα της ενίσχυσης του φυσικού εδάφους με στρώσεις θραυστού ή φυσικού αμμοχάλικου, ούτως ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα μόνιμων παραμορφώσεων. Το θέμα αυτό παρουσιάζει μία τεχνική και μία οικονομική διάσταση που αναλύονται στη συνέχεια.

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης ανάλυσης, θεωρείται ότι το έδαφος είναι λεπτόκοκκο και αποτελείται από υλικό OH, OL ή CL. Η σχέση τάσεων – μετατοπίσεων μελετάται με τη βοήθεια μιας ιδεατής δοκιμής εύκαμπτης πλάκας. Η αντίστοιχη επίλυση για ένα μοντέλο ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς σε πρόγραμμα H/Y δίδει τρία ζεύγη διαγραμμάτων (Εικ.3, 4 και 5) για τα τρία είδη εδαφών, OH, OL και CL και για τα δύο αντίστοιχα υλικά ενίσχυσης. Τα διαγράμματα αναφέρονται σε στατική φόρτιση, όπου το φορτίο είναι κατανομημένο ομοιόμορφα σε εύκαμπτη κυκλική πλάκα διαμέτρου  $B=450\text{mm}$ . Στο πρώτο διάγραμμα του κάθε ζεύγους, η στρώση των ασύνδετων αδρανών έχει χαρακτηριστικά θραυστού αμμοχάλικου με παραμέτρους διατμητικής αντοχής,  $c'=15\text{kPa}$ ,  $\phi'=40^\circ$  και  $\text{CBR}=80$  (Εικ.3α, 4α και 5α), ενώ στο δεύτερο, φυσικού αμμοχάλικου με  $c'=15\text{kPa}$ ,  $\phi'=35^\circ$  και  $\text{CBR}=40$  (Εικ.3β, 4β και 5β).

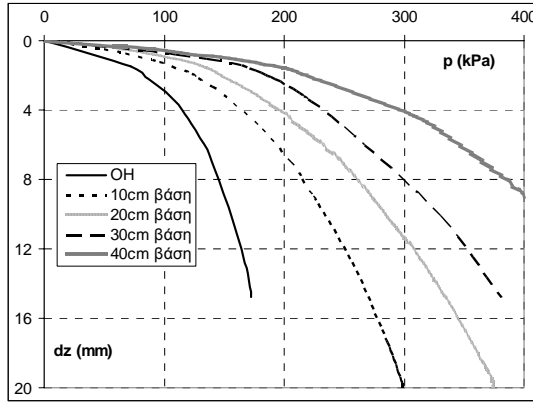
Παρατηρείται ότι σημαντική βελτίωση στη μηχανική συμπεριφορά της φορτιζόμενης δομής εμφανίζεται με την ενίσχυση θραυστού ή φυσικού αμμοχάλικου, αντίστοιχου πάχους  $e_1=10\text{cm}$  ή  $e_2=10\text{cm}$ . Οι βυθίσεις για τις περιπτώσεις αυτές ουσιαστικά υποδιπλασιάζονται σε σχέση με την πρωτογενή χωμάτινη δομή. Εν συνεχεία και όσο αυξάνεται το πάχος της ενίσχυσης υπάρχει μία βελτίωση, η οποία, ωστόσο, δεν είναι τόσο έντονη όσο εκείνη που αντιστοιχεί στο πάχος των πρώτων  $10\text{cm}$ .

Αποτιμώντας τα επιμέρους διαγράμματα, παρατηρήθηκε ότι, αν θεωρηθεί ως μέγιστη επιτρεπόμενη βύθιση  $dz=1\text{cm}$  υπό στατική φόρτιση, στην περίπτωση της οργανικής αργίλου (OH) (Εικ.3) απαιτείται πάχος βάσης θραυστού υλικού,  $e_1=40\text{cm}$  ή φυσικού,  $e_2=47\text{cm}$ . Επίσης παρατηρείται ότι, για το ίδιο υλικό, το οδόστρωμα με βάση θραυστού αμμοχάλικου πάχους  $20\text{cm}$  και φυσικού  $25\text{cm}$ , δε μπορεί να φέρει το φορτίο των  $400\text{kPa}$ .

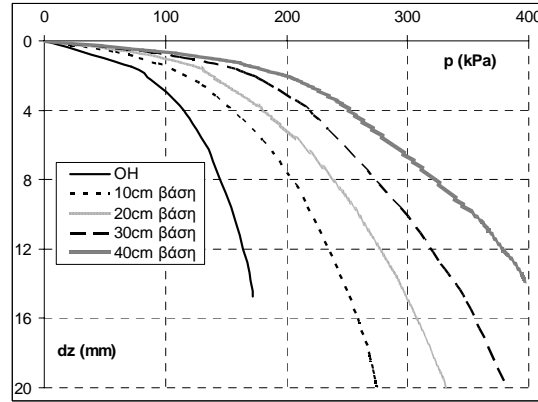
Αντιθέτως, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4, στρώση πάχους  $10\text{cm}$  θραυστού ή φυσικού αμμοχάλικου πάνω από έδαφος αργιλώδους ιλύος (OL) είναι αρκετή, για να διατηρηθούν οι βυθίσεις κάτω από το επιτρεπτό όριο.

Στην περίπτωση της ιλυώδους αργίλου CL (Εικ.5) διαπιστώνεται ότι οι βυθίσεις είναι σημαντικά μικρές, ακόμη και χωρίς την παρουσία βάσης από θραυστό ή φυσικό αμμοχάλικο. Στην περίπτωση αυτήν ένα λεπτό στρώμα βάσης προσφέρει μια λειτουργικά καλή επιφάνεια κύλισης, ομαλή και με λιγότερη δημιουργία σκόνης. Πάχος βάσης μεγαλύτερο των  $10\text{cm}$  προσφέρει πολύ μικρή βελτίωση, ενώ, όπως προκύπτει από την ανάλυση, στη θέση θραυστού αμμοχάλικου μπορεί να τοποθετηθεί φυσικό οδηγώντας σε πιο οικονομική κατασκευή.

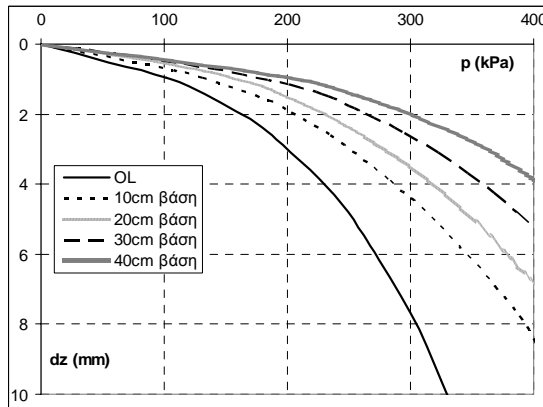
Από πλευράς κατασκευαστικής πρακτικής, ωστόσο, η απευθείας ενίσχυση λεπτόκοκκου εδάφους με αμμοχάλικο είναι μάλλον αδόκιμη μέθοδος. Τα λεπτόκοκκα συστατικά του εδάφους θα εισέλθουν στα κενά του στρώματος του θραυστού υλικού, μειώνοντας έτσι την ικανότητα αποστράγγισης του και σταδιακά τα αδρανή θα απορροφηθούν από το φυσικό έδαφος και η στρώση εξυγιών υλικών θα εξαφανισθεί. Έτσι συνιστάται η παρεμβολή στρώσης χονδρόκοκκου υλικού (κροκάλα) πάχους  $10\text{cm}$  ή γεωφύσματος για τον διαχωρισμό των δύο ανόμοιων υλικών.



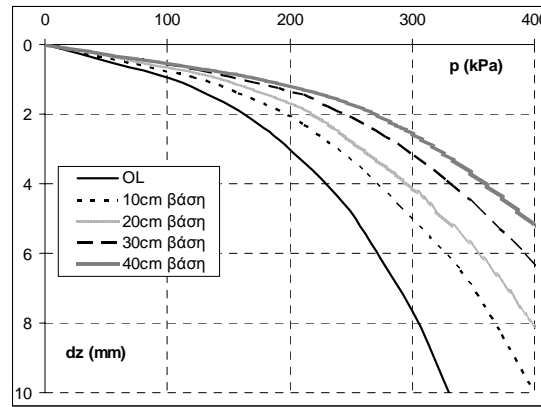
Εικόνα 3α. Διάγραμμα πίεσης-βύθισης για την Οργανική Άργιλο (OH) και για διάφορα πάχη βάσης θραυστού αμμοχάλικου (CBR=80)



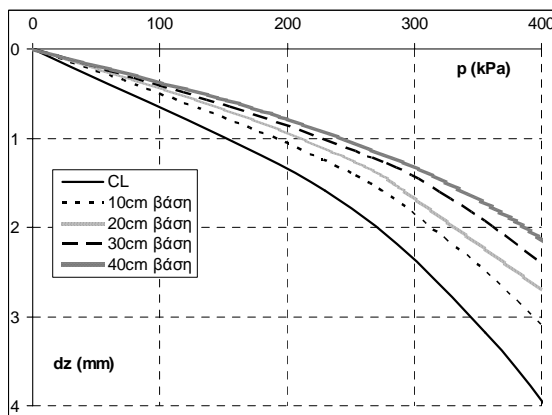
Εικόνα 3β. Διάγραμμα πίεσης-βύθισης για την Οργανική Άργιλο (OH) και για διάφορα πάχη βάσης φυσικού αμμοχάλικου (CBR=40)



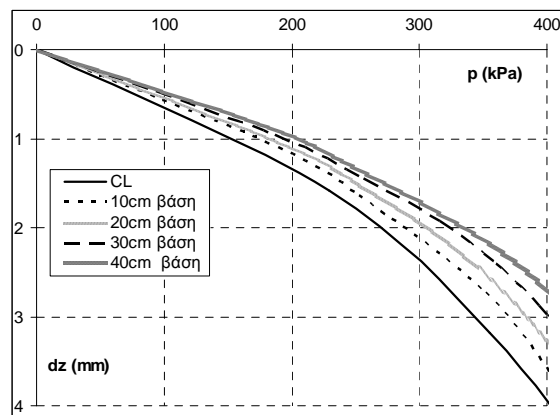
Εικόνα 4α. Διάγραμμα πίεσης-βύθισης για την Αργιλώδη Ιλύ (OL) και για διάφορα πάχη βάσης θραυστού αμμοχάλικου (CBR=80)



Εικόνα 4β. Διάγραμμα πίεσης-βύθισης για την Αργιλώδη Ιλύ (OL) και για διάφορα πάχη βάσης φυσικού αμμοχάλικου (CBR=40)



Εικόνα 5α. Διάγραμμα πίεσης-βύθισης για την Ιλυώδη Άργιλο (CL) και για διάφορα πάχη βάσης θραυστού αμμοχάλικου (CBR=80)



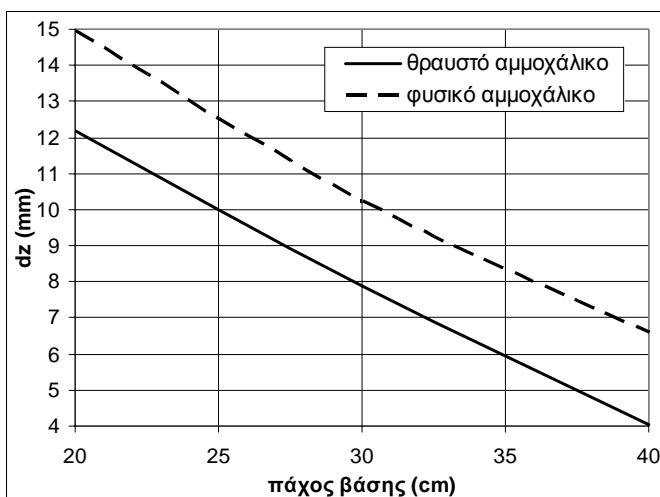
Εικόνα 5β. Διάγραμμα πίεσης-βύθισης για την Ιλυώδη Άργιλο (CL) και για διάφορα πάχη βάσης φυσικού αμμοχάλικου (CBR=40)

## 6 ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ ΜΕΤΑΞΥ ΠΑΧΟΥΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΕΚ ΘΡΑΥΣΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ

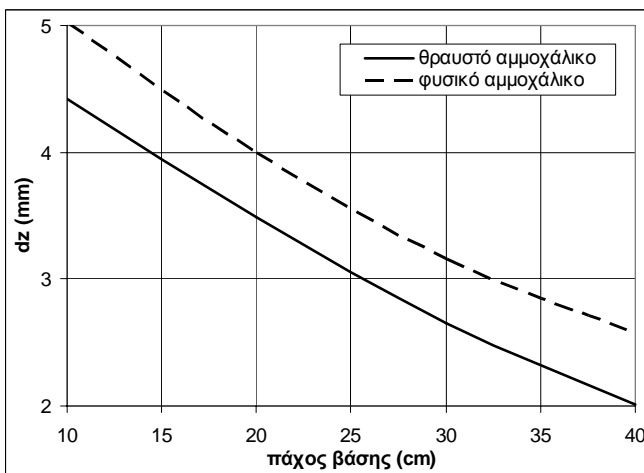
Θεωρητικά, στη θέση του ισχυρού θραυστού υλικού βάσης, μπορεί να τοποθετηθεί φυσικό αμμοχάλικο, μεγαλύτερου πάχους, που θα προσφέρει στο οδόστρωμα την ίδια επάρκεια μηχανικής αντοχής. Στις Εικόνες 6 και 7 δίνονται παραδείγματα αντιστοιχίας για δύο τύπους εδαφών (ΟΛ και ΟΗ) και φορτίο 300kPa κατά περίπτωση. Η οριζόντια απόσταση μεταξύ των δύο καμπυλών σε κάθε διάγραμμα, δίδει τη διαφορά απαιτούμενου πάχους ενίσχυσης ( $\Delta H$ ) μεταξύ θραυστού και φυσικού αμμοχάλικου για ίδιο μέγεθος βύθισης. Στην περίπτωση αυτήν ισχύει μια σχέση της μορφής:

$$H_{\text{φυσικού}} = H_{\text{θραυστού}} + \Delta H$$

Για παράδειγμα, για το έδαφος της οργανικής ιλύος (ΟΗ) και φορτίο  $p=300\text{kPa}$  (Εικ.6), απαιτείται βάση φυσικού αμμοχάλικου κατά 6cm μεγαλύτερης της αντίστοιχης με θραυστό υλικό ( $\Delta H=6\text{cm}$ ), ώστε η βύθιση να είναι  $dz=8\text{mm}$



Εικόνα 6. Διάγραμμα πάχους ενίσχυσης-βυθίσεων, εδάφους οργανικής αργίλου (ΟΗ), για φόρτιση  $p=300\text{kPa}$



Εικόνα 7. Διάγραμμα πάχους ενίσχυσης-βυθίσεων, εδάφους αργιλώδους ιλύος (ΟΛ), για φόρτιση  $p=300\text{kPa}$

Αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη σχέση έχει την μορφή που προαναφέρθηκε. Το απαιτούμενο (ισοδύναμο) πάχος φυσικού αμμοχάλικου είναι σε όλες τις περιπτώσεις κατά τι μεγαλύτερο του αντίστοιχου του θραυστού αδρανούς. Έτσι, αν για  $e_1(\text{θραυστού})=10\text{cm}$  το πάχος του φυσικού αμμοχάλικου είναι  $e_2=15\text{cm}$ , για  $e_1=30\text{cm}$  το απαιτούμενο  $e_2$  είναι  $35\text{cm}$  περίπου και όχι κατ' αναλογία  $45\text{cm}$ . Παρατηρείται δηλαδή, ότι το πρωταρχικό και καθοριστικό κριτήριο για τη μείωση των τάσεων στο φυσικό έδαφος είναι το πάχος της στρώσης και όχι τα μηχανικά χαρακτηριστικά της ενίσχυσης. Σε επίπεδο κατασκευαστικής πρακτικής, αν υποθεθεί ότι το κόστος του θραυστού υλικού είναι διπλάσιο εκείνου των δανείων, τότε η επιλογή του μεγαλύτερου στρώματος ενίσχυσης εκ φυσικού αμμοχάλικου είναι η ενδεδειγμένη λύση (Εικ.3,4,5)

## 7. Η ΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΥΦΑΣΜΑΤΩΝ ΣΕ ΔΡΟΜΟΥΣ ΧΩΡΙΣ ΤΑΠΗΤΑ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ

Υπό το πρίσμα της ενίσχυσης ασθενών εδαφών, θεωρείται ότι, αν κάποια δευτερεύουσα αρτηρία θεμελιωθεί πάνω σε ασθενές έδαφος και ενισχυθεί με γεωύφασμα, το απαιτούμενο πάχος της βάσης από ασύνδετα αδρανή μπορεί να μειωθεί. Ωστόσο, για να μπορέσει να λειτουργήσει το γεωύφασμα ως ενίσχυση θα πρέπει να έχει την απαραίτητη εφελκυστική αντοχή, αλλά και να ενεργοποιηθεί αυτή μέσω της παραμόρφωσης του εδάφους. Εκτιμάται γενικώς ότι, για τα εδάφη με  $\text{CBR}<3$  (California Bearing Ratio) το γεωύφασμα έχει ως πρωταρχική λειτουργία την ενίσχυση, ενώ για αυτά με  $\text{CBR}>6$ , η κύρια λειτουργία είναι ο διαχωρισμός. Για ενδιάμεσες τιμές  $\text{CBR}$  η δράση του γεωυφάσματος ποικίλλει ανά περίπτωση.

Για τα ως άνω αναφερθέντα συστήματα οδοστρωμάτων και για γεωυφάσματα διαφορετικών εφελκυστικών αντοχών (7, 22, 30kN/m), η προσέγγιση του προβλήματος με H/Y έδειξε μία μικρή επιρροή των γεωυφασμάτων στη μηχανική συμπεριφορά αυτών. Η επιρροή αυτή αναμενόταν άλλωστε μικρή, ως όφειλε, για ένα στοιχείο μηδενικής δυσκαμψίας και η όποια θετική επίδραση που παρατηρήθηκε αποδίδεται αποκλειστικά και μόνο στην εφελκυστική αντοχή του.

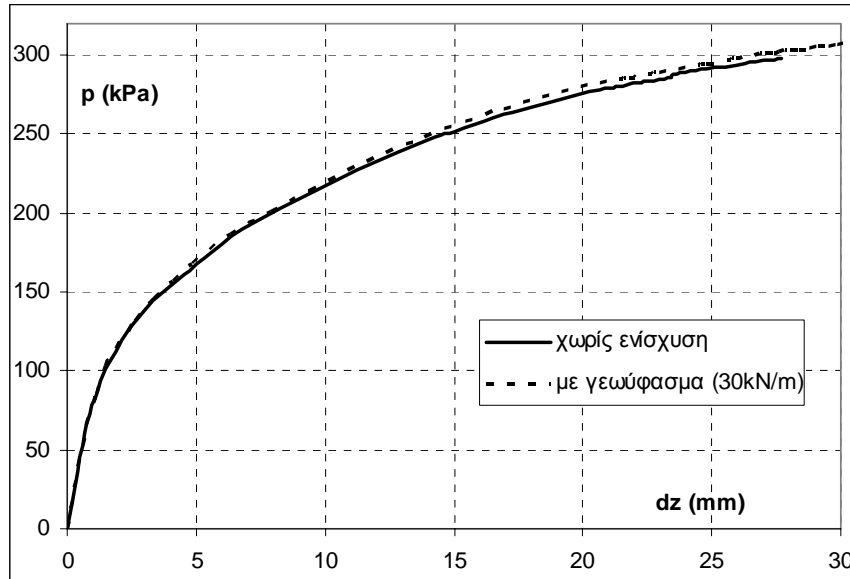
Αν και η θετική επίδραση του γεωυφάσματος στην ενίσχυση του είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερη είναι η εφελκυστική αντοχή του, ένα ισχυρό γεωύφασμα της τάξης των 30kN/m προσφέρει αύξηση της οριακής αντοχής  $q_u$  των οδοστρωμάτων μόλις το πολύ κατά 10%, μέγεθος που εκτιμάται ως αμελητέο, ενώ αντίστοιχα εκείνο των 7kN/m κατά 3%.

Αξιοσημείωτο είναι ότι οι καμπύλες πίεσης-βύθισης, με και χωρίς γεωσυνθετική ενίσχυση, συμπίπτουν μέχρι κάποιο μέγεθος επιβαλλόμενης φόρτισης και κατόπιν ακολουθούν ξεχωριστά ίχνη (Εικ. 8), οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι το γεωύφασμα παραμένει ανενεργό για ένα μεγάλο μέρος της διαδικασίας φόρτισης.

Το γεωύφασμα όπως φαίνεται στην Εικόνα 8, ενεργοποιείται όταν οι διατμητικές παραμορφώσεις παίρνουν πολύ μεγάλες τιμές (γραφικά όταν ο ρυθμός αύξησης του φορτίου  $dp/dz$  γίνεται πολύ μικρός), δηλαδή λίγο πριν τη διατμητική αστοχία.

Τα ίδια συμπεράσματα προκύπτουν και από αντίστοιχες μελέτες αποτελεσμάτων υπαίθρου. Σειρά πειραμάτων με άκαμπτη φορτιζόμενη πλάκα διαμέτρου  $2a=300\text{mm}$  σε ιλυώδες έδαφος (ML), μεγάλης παραμορφωσιμότητας λόγω του υψηλού υδροφόρου ορίζοντα, επί του οποίου διαστρώθηκε κατά περίπτωση βάση θραυστών αδρανών πάχους 15cm και 25cm (Κοκκάλης, 1989) επιβεβαίωσε το συμπέρασμα της μεγάλης απαιτούμενης διατμητικής παραμόρφωσης για την ενεργοποίηση του γεωυφάσματος και τη μικρή αύξηση στη φέρουσα ικανότητα του συστήματος.





Εικόνα 8. Διάγραμμα “πίεσης-βύθισης”, οδοστρώματος χωρίς τάπητα κυκλοφορίας, με πάχος βάσης 10cm φυσικού αμμοχάλικου, πάνω από έδαφος οργανικής αργίλου, με και χωρίς ενίσχυση ισχυρού γεωφάσματος (30kN/m)

## 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη σημερινή πραγματικότητα της οδοποιίας, οι χαλικόστρωτες οδοί αν και δεν τυγχάνουν ευρείας εφαρμογής όπως παλαιότερα, παραμένουν πολύ σημαντικές για τον σκοπό που εξυπηρετούν. Η τεχνική κατασκευής, που σε κάθε περίπτωση επιλέγεται, θα πρέπει να αξιολογείται με βάση την αποτελεσματικότητα, το κόστος και τη δυνατότητα εφαρμογής της.

Βάσει των θεωρητικών επιλύσεων σε μοντέλο ελαστικής-πλαστικής συμπεριφοράς στον H/Y παρατηρήθηκε ότι, σημαντική βελτίωση στη μηχανική συμπεριφορά της φορτιζόμενης δομής εμφανίζεται με την ενίσχυση πάχους 10cm θραυστού υλικού ή φυσικού αμμοχάλικου. Εν συνεχεία και όσο το πάχος της ενίσχυσης αυξάνεται, υπάρχει μία βελτίωση, η οποία, ωστόσο, δεν είναι τόσο έντονη όσο η αρχική.

Επίσης, συγκρίνοντας τεχνικά και οικονομικά την πιθανότητα ενίσχυσης μέσω στρώσεων φυσικών και θραυστών αμμοχάλικων προκύπτει ότι το φυσικό αμμοχάλικο μπορεί να προτιμηθεί, εφόσον το κόστος παραμένει σημαντικά μικρότερο του υλικού 3A.

Όσον αφορά το ζήτημα της ενίσχυσης των χαλικόστρωτων οδών με γεωφάσματα, θεωρητικές επιλύσεις και συναφείς ερευνητικές εργασίες, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι αυτή είναι μάλλον μία αδόκιμη μέθοδος. Ένα ισχυρό μάλιστα γεωφάσμα προσφέρει αύξηση της οριακής αντοχής του εδάφους μόλις κατά περίπου 10%, ενώ για την ενεργοποίησή του απαιτούνται πολύ μεγάλες παραμορφώσεις και άρα, μεγάλες βυθίσεις στην επιφάνεια. Ένα μέτριας αντοχής γεωφάσμα όμως, μπορεί να τοποθετηθεί στη διεπιφάνεια ασθενούς εδάφους-βάσης κυκλοφορίας ως μέσο διαχωρισμού ανόμοιων υλικών.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Κοκκάλης, Α. 1989. Θεωρητική και πρακτική διερεύνηση της εφαρμογής των γεωφασμάτων στην ενίσχυση δρόμων χαμηλής κυκλοφορίας  
 Terzaghi, K. 1943. Theoretical Soil Mechanics, J. Wiley, New York  
 Μουρατίδης, Α. 2005. Οδοποιία: Η κατασκευή των Οδικών Έργων, Univ. Studio Press, 492σελ