

Μελέτη και Κατασκευή Οδικού Επιχώματος επί Πολύ Μαλακής Αργίλου, από Ελαφρά Υλικά Διογκωμένης Πολυστερίνης (EPS)

Design and Construction of a Highway Embankment on Very Soft Clay, using Lightweight Material of Expanded Polystyrene (EPS)

ΠΑΠΑΧΑΡΑΛΑΜΠΟΥΣ, ΓΙΩΡΓΟΣ. Πολιτικός Μηχανικός, MSc, Σωτηρόπουλος και Συν/τες ΑΤΕ
ΚΑΒΒΑΔΑΣ, ΜΙΧΑΛΗΣ. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
ΚΑΡΑΪΣΚΟΥ, ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ. Πολιτικός Μηχανικός, Προϊσταμένη Μελετών ΕΥΔΕ/ΠΑΘΕ
ΚΟΝΤΟΥ, ΜΙΛΕΝΑ. Πολιτικός Μηχανικός MSc, ΕΥΔΕ/ΠΑΘΕ
ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΣ, ΗΛΙΑΣ Πολιτικός Μηχανικός, MSCE, Σωτηρόπουλος και Συν/τες ΑΤΕ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Η χρήση διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) για την κατασκευή επιχωμάτων σε μαλακά και συμπιεστά εδάφη προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, λόγω της ελαχιστοποίησης των επιβαλλόμενων φορτίων στο έδαφος. Η πρώτη εφαρμογή στην Ελλάδα έγινε στον Αυτ/μο ΠΑΘΕ (περιοχή Θερμοπυλών), όπου επικρατούν εξαιρετικά δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες και κατά την αρχική κατασκευή συμβατικού επιχώματος έλαβε χώρα αστοχία. Με τη χρήση υλικών EPS οι καθιζήσεις και ο χρόνος κατασκευής του έργου περιορίστηκαν δραστικά. Στην εργασία παρουσιάζονται οι γεωτεχνικές συνθήκες, τα χαρακτηριστικά του υλικού EPS, τα κριτήρια και η μεθοδολογία σχεδιασμού καθώς και στοιχεία από την κατασκευή, τον ποιοτικό έλεγχο και την παρακολούθηση της συμπεριφοράς του επιχώματος.

ABSTRACT : The use of expanded polystyrene (EPS) in road embankments founded on soft soils is beneficial due to the minimization of the applied loads on the ground. This method was first applied in Greece for the construction of a PATHE highway embankment near Thermopylae, where a global stability failure occurred due to very adverse ground conditions during initial construction of an earth embankment. By the use of EPS, settlements were minimised and construction time was drastically reduced. The paper presents the ground conditions in the area, the characteristics of the EPS material, design criteria and requirements, the proposed quality control and conclusions from the construction and monitoring.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάγκη αντιμετώπισης των προβλημάτων που εμφανίζονται κατά την έδραση επιχωμάτων, κυρίως συγκοινωνιακών έργων, σε μαλακά ή ασταθή εδάφη, οδήγησε στην αναζήτηση εναλλακτικών λύσεων πέραν της βελτίωσης του εδάφους. Η χρήση ελαφρότερων υλικών κατασκευής (ιπτάμενη τέφρα, σκωρίες, διογκωμένη άργιλος, ελαστικά, απορρίμματα πλαστικού, αφρός ελαφροσκυροδέματος, διογκωμένη πολυστερίνη) προσφέρει μείωση του επιβαλλόμενου φορτίου και συνεπώς της καταπόνησης του υπεδάφους. Μεταξύ αυτών των υλικών, η διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) πλεονεκτεί λόγω του πολύ χαμηλού ειδικού βάρους της.

Η διογκωμένη πολυστερίνη είναι ένα ελαφρύ, άκαμπτο, κυψελοειδούς μορφής αφρώδες πλαστικό υλικό, που παράγεται από συμπαγείς κόκκους πολυμερούς στυρενίου, μετά από θέρμανση με ατμό. Τοποθετούμενη σε ειδικές φόρμες (καλούπια) παράγει ορθογώνια παραλληλεπίπεδα τεμάχια πάχους $\geq 0,5\text{m}$ και πλάτους $\geq 1,0\text{m}$ που τοποθετούνται με αλληλεμπλοκή ώστε να μη δημιουργούνται κατακόρυφοι αρμοί. Πρόκειται για χημικώς καθάρo και σταθερό στο χρόνο υλικό, ανθεκτικό έναντι ανόργανων υλών, που διαλύεται όμως από οργανικούς διαλύτες (π.χ. βενζίνη).

Για την εφαρμογή σε οδικά επιχώματα χρησιμοποιείται υλικό με φαινόμενη πυκνότητα $\gamma = 15 \div 30 \text{ kg/m}^3$, θλιπτική αντοχή $\sigma_{c10} =$

60÷200kPa (σε παραμόρφωση $\varepsilon=10\%$) και μέτρο ελαστικής συμπίεσης $E = 4\div10\text{MPa}$.

Το EPS μπορεί να αντικαθιστά το σύνολο ή μέρος του γαιώδους επιχώματος και να τοποθετείται σε συναρμογή με προϋπάρχον επίχωμα ή άλλες κατασκευές. Το υλικό καλύπτεται περιμετρικά με στεγανωτικά υλικά και επιχωμάτωση, ώστε να προστατεύεται έναντι εκχύσεων πετρελαιοειδών, πυρκαϊάς και ανύψωσης λόγω άνωσης. Στη στέψη του η προστασία γίνεται συχνά με πλάκα ελαφρά οπλισμένου σκυροδέματος, που συνεισφέρει επιπλέον στην αύξηση της φέρουσας ικανότητας έδρασης του υπερκείμενου οδοστρώματος.

Η πρώτη κατασκευή επιχώματος από EPS έγινε στη Νορβηγία το 1972. Έκτοτε η εφαρμογή του επεκτάθηκε σε πολλές χώρες και σε πλήθος έργων, υποστηριζόμενη από επιτόπου μετρήσεις της συμπεριφοράς, εργαστηριακό έλεγχο και διαμόρφωση συστάσεων και κανονισμών. Σήμερα με χρήση EPS αντιμετωπίζονται προβλήματα έδρασης επιχωμάτων και ακροβάθρων γεφυρών σε μαλακά εδάφη, διέλευσης σε ασταθείς ή γεωμετρικά περιορισμένες περιοχές, κλπ.

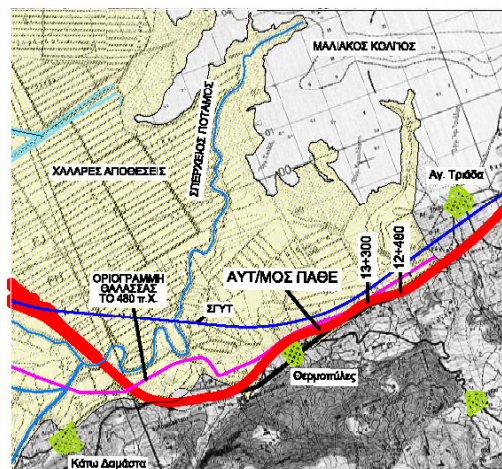
Πλεονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν, πέραν της ελαχιστοποίησης των επιβαλλόμενων φορτίων, η συντόμευση του χρόνου κατασκευής, η βελτίωση της σεισμικής συμπεριφοράς, η μηδενική επιβάρυνση γειτονικών κατασκευών, η αποφυγή μέτρων βελτίωσης του υπεδάφους και η ελαχιστοποίηση των αβεβαιοτήτων λόγω της συμπεριφοράς του, η μείωση χρήσης δανείων και λατομικών υλικών, η δυνατότητα ακριβούς ελέγχου του βιομηχανικά παραγόμενου προϊόντος, η απλοποίηση του σχεδιασμού και η υποστήριξη με βάση τη διεθνή εμπειρία, συστάσεις και κανονισμούς.

Βασική επιφύλαξη ως προς τη χρήση της μεθόδου, πέραν του κόστους, αποτελούσε η μακροχρόνια σταθερότητα του υλικού. Ο εργαστηριακός έλεγχος και η μακροχρόνια εμπειρία εφαρμογής δείχνουν ότι το EPS δεν φθείρεται, δεν χαλαρώνει λόγω διαποτισμού, δεν αποτελεί τροφή για παράσιτα ή τρωκτικά και δεν υπόκειται σε αλλοιώσεις από την πανίδα και χλωρίδα του άμεσου περιβάλλοντος. Τέλος, υπάρχει σήμερα δυνατότητα παραγωγής μη αναφλέξιμου υλικού EPS με χημικά πρόσθετα.

2. ΘΕΣΗ ΕΡΓΟΥ - ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Στην περιοχή ΒΑ του οικισμού των Θερμοπυλών και νοτίως του Μαλιακού Κόλπου (Σχήμα 1), ο αυτοκινητόδρομος ΠΑΘΕ διέρχεται από επίπεδη, βαλτώδη περιοχή, που

καλύπτεται από σύγχρονες θαλάσσιες αποθέσεις, με πολύ πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά. Η περιοχή βρίσκεται σε υψόμετρο $\approx +1\text{m}$, με τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα σχεδόν στην επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 1. Γενική άποψη της περιοχής
Figure 1. General layout of the site

Στην περιοχή αυτή προβλεπόταν επίχωμα ύψους έως 7,5m (και έως 8,5m στον Η/Κ Θερμοπυλών) και βελτίωση του εδάφους έδρασης με εξυγιαντική στρώση πάχους 1m και χαλικοπασσάλους διαμέτρου 80cm και μήκους 11-15m σε τριγωνική διάταξη πλευράς 3m.

Κατά την κατασκευή του επιχώματος του Αυτ/μου, όταν το ύψος έφθασε τα 4÷4,5m, έλαβε χώρα αστοχία σε μήκος 200m περίπου, με καθίζηση κατά $\approx 1\text{m}$ και δημιουργία ρωγμής με άνοιγμα $\geq 2\text{m}$ παράλληλα στον άξονα της χάραξης και σε απόσταση 10÷14m από το άκρο της στέψης (Σχήμα 2).

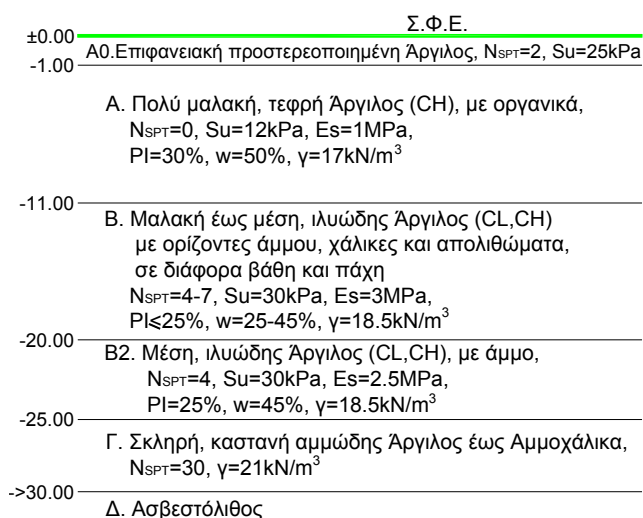


Σχήμα 2. Άποψη αστοχίας
Figure 2. View of failure

Για τη διερεύνηση της αστοχίας και των εδαφικών συνθηκών έγινε (α) αποτύπωση της

ρωγμής και του μεγέθους και της διεύθυνσης των μετακινήσεων, (β) συμπληρωματική γεωτεχνική έρευνα και διερεύνηση της κατάστασης των χαλικοπασσάλων με ερευνητικά φρέατα και γεωτρήσεις και (γ) ανάστροφη ανάλυση της ευστάθειας.

Η στρωματογραφία του εδάφους φαίνεται στο Σχήμα 3 και χαρακτηρίζεται από την παρουσία πολύ μαλακής και συμπιεστής αργίλου, υψηλής γενικά πλαστικότητας έως βάθος 10÷12m, ενώ στη συνέχεια συναντώνται μαλακοί σχηματισμοί αργιλικής κυρίως σύστασης έως βάθος ≈ 25m. Οι γεωτεχνικές συνθήκες εμφανίζονται πολύ δυσμενέστερες από την ευρύτερη περιοχή της κοιλάδας του π. Σπερχειού όπου διέρχεται ο αυτ/μος.

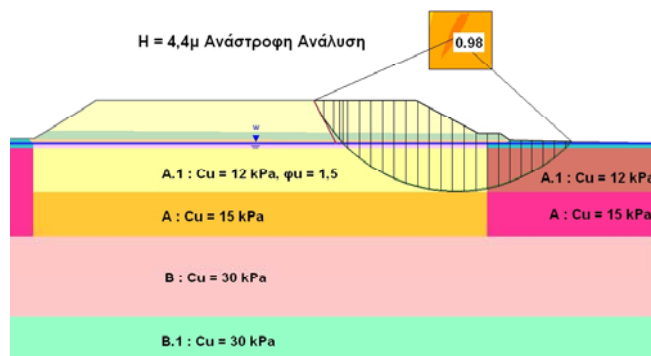


Σχήμα 3. Στρωματογραφία εδάφους
Figure 3. Soil profile

Η αστοχία έλαβε χώρα εντός της στρώσης (A) σε βάθος 5-10m από την επιφάνεια. Οι χαλικοπάσσαλοι φαίνεται ότι είχαν πολύ μικρή συνεισφορά στη βελτίωση των συνθηκών έδρασης του επιχώματος και διαπιστώθηκε ότι εκτός περιοχής αστοχίας διατηρούν τη διατομή τους και την επαφή των θραυστών χαλίκων μεταξύ τους, με μειωμένη όμως διάμετρο λόγω πλευρικής εισροής αργιλικού υλικού ενώ εμφανίζουν με το βάθος πτωχότερα χαρακτηριστικά. Στην περιοχή της αστοχίας οι χαλικοπάσσαλοι βρέθηκαν έντονα αναμεμιγμένοι με το αργιλικό έδαφος, με απώλεια συνέχειας σε βάθος ≈ 3÷5m.

Με την ανάστροφη ανάλυση (Σχήμα 4) προσδιορίστηκε η αστράγγιστη διατμητική αντοχή της μαλακής αργίλου (στρώση A), κρίσιμη παράμετρος για το σχεδιασμό περαιτέρω μέτρων. Οι χαλικοπάσσαλοι λήφθηκαν

υπόψη με μειωμένη διάμετρο (0.5÷0.6m) και πυκνότητα (γωνία τριβής $\phi=32^\circ$). Επίσης εξετάστηκε η περίπτωση μικρότερης αντοχής στο ανώτερο τμήμα του εδάφους, όπου διαπιστώθηκε και έντονη παρουσία οργανικών.



Σχήμα 4. Ανάστροφη ανάλυση της αστοχίας
Figure 4. Back analysis of the failure

Πέραν της αστοχίας, έπρεπε να αντιμετωπιστούν και οι αναμενόμενες μεγάλοι μεγέθους και βραδείες σε εξέλιξη καθιζήσεις των αργιλικών στρώσεων έως βάθος της τάξης των 25m. Για την εκτίμηση του μεγέθους και της χρονικής εξέλιξης των καθιζήσεων, λήφθηκαν υπόψη, πέραν των στοιχείων της γεωτεχνικής έρευνας, και οι μετρήσεις καθιζήσεων υπό τα φορτία επιχωμάτων που είχαν καταγραφεί τόσο στο εν λόγω έργο, όσο και στα γειτονικά επιχώματα της Σιδ. Γραμμής. Με βάση τα παραπάνω εκτιμήθηκε ότι η συνολική καθίζηση φθάνει το 20% του ύψους συμβατικού επιχώματος (δηλαδή ≈1,5m για επίχωμα 7,5m), εκ των οποίων ποσοστό περί το 20÷25% λαμβάνει χώρα κατά την κατασκευή, ενώ οι υπολειπόμενες καθιζήσεις εμφανίζουν βραδεία εξέλιξη με εκτιμώμενο ποσοστό στερεοποίησης 50% σε ένα έτος και ολοκληρώνονται σε χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των 10 ετών.

3. ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΡΩΝ

Ο σχεδιασμός των μέτρων αποκατάστασης έγινε με τα ακόλουθα κριτήρια:

- Την ασφαλή έδραση του επιχώματος έναντι αστοχίας της μαλακής αργίλου
- Τον περιορισμό των μετακατασκευαστικών καθιζήσεων σε ανεκτά μεγέθη <10cm
- Την ανάγκη ταχείας ολοκλήρωσης και απόδοσης του έργου, λόγω των κυκλοφοριακών προβλημάτων στο «πέταλο Μαλιακού»

Έγινε καταρχήν τροποποίηση της μελέτης οδοποιίας και απομακρύνθηκαν τα τεχνικά Κάτω Διαβάσεις, με σκοπό να περιορισθεί το

ύψος των επιχωμάτων του Αυτ/μου έως 4,5m, ενώ για τον κλάδο του Η/Κ Θερμοπυλών διατηρήθηκε υποχρεωτικά το ύψος έως 8,5m.

Κατόπιν διερεύνησης εναλλακτικών λύσεων, ως μοναδική λύση που να ικανοποιεί τα προαναφερθέντα κριτήρια θεωρήθηκε η κατασκευή του επιχώματος από ελαφρά υλικά διογκωμένης πολυστερίνης EPS. Το ελαφρύ επίχωμα εφαρμόστηκε σε μήκος $\approx 820\text{m}$ στον Αυτ/μο και $\approx 210\text{m}$ στον Κλάδο Θερμοπυλών. Τα υπόλοιπα επιχώματα μήκους περίπου 500 μέτρων και ύψους έως 2,5m, εδραζόμενα σε ελαφρώς καλύτερο έδαφος, κατασκευάστηκαν από γαιώδη υλικά, σε συνδυασμό με επιφόρτιση και πλαστικά στραγγιστήρια.

Για την αποτελεσματικότητα της λύσης EPS επιδιώχθηκε ο μέγιστος δυνατός περιορισμός του πάχους των γαιωδών επιχωμάτων και των στρώσεων οδοστρώσας, αντιμετωπίζοντας επιπλέον και την υψομετρική διαφορά μεταξύ των δύο άκρων της στέψης του επιχώματος λόγω έντονης επίκλισης. Προβλέφθηκαν κατά σειρά τα ακόλουθα (Σχήμα 5):

- Αφαίρεση του κατασκευασθέντος γαιώδους επιχώματος, ύψους $\geq 1\text{m}$ και του επιφανειακού εδάφους σε όλη την επιφάνεια έδρασης, έως βάθος 0,75m από τη φυσική στάθμη.

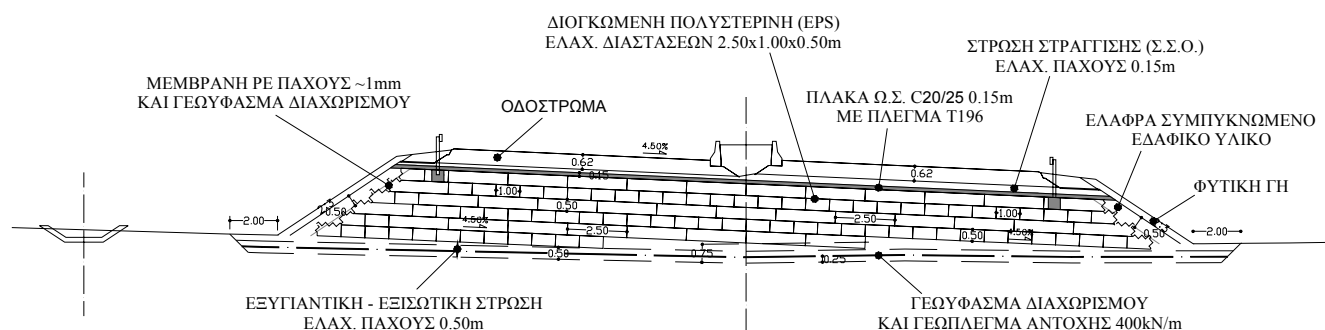
- Περιορισμός του πάχους των στρώσεων στράγγισης-εξυγίανσης σε ελάχιστο 50cm, με καταρχήν τοποθέτηση στρώσης 25cm, ως δάπεδο εργασίας. Επί της στρώσης αυτής διαστρώνονται κατά σειρά γεωύφασμα διαχωρισμού και γεώπλεγμα υψηλής αντοχής. Η εξυγίανση ολοκληρώνεται με κατασκευή στρώσης στράγγισης-έδρασης-εξομάλυνσης μεταβλητού πάχους 0,25m έως 0,75m, που διαμορφώνεται με τελική κεκλιμένη επιφάνεια, ακολουθώντας την κατά μήκος κλίση και επίκλιση της οδού.

- Κατασκευή του ελαφρού επιχώματος, με τοποθέτηση επί της κεκλιμένης επιφάνειας προκατασκευασμένων μπλοκ EPS 100 (κατά EN 14933, 2007), θλιπτικής αντοχής 100kPa και ελαχίστων διαστάσεων 1,0x2,0m. Το EPS τοποθετείται κατά στρώσεις, ελαχίστου πάχους 50cm εκάστη, σε κλιμακωτή διάταξη με μέση κλίση πρανών 2:3 (υ:β). Για την αποφυγή κατακόρυφων αρμών, οι διαδοχικές στρώσεις διαμορφώνονται με εναλλάξ τοποθέτηση των μπλοκ με τη μεγάλη διάσταση κατά μήκος και κατά πλάτος αντίστοιχα. Για να αποφεύγεται ολίσθηση κατά τη διάρκεια της ενσωμάτωσης τα μπλοκ EPS των διαδοχικών στρώσεων συνδέονται μεταξύ τους με μεταλλικά στοιχεία.

- Τα πλευρικά πρανή καλύπτονται μέσω μεμβράνης πολυαιθυλενίου πάχους 1mm και γεωυφάσματος διαχωρισμού και διαμορφώνονται τα τελικά πρανή του επιχώματος με ελαφρά συμπυκνωμένα υλικά κατηγορίας E1 και τελική κλίση 2:3(υ:β) και επικάλυψη με φυτική στρώση πάχους 0,3m.

- Στη στέψη του ελαφρού επιχώματος και τη βάση του οδοστρώματος κατασκευάζεται πλάκα σκυροδέματος C20/25, πάχους 15cm, με δομικό πλέγμα T196 στον άξονα, για την εξασφάλιση της προστασίας του EPS, την απαιτούμενη φέρουσα ικανότητα έδρασης του οδοστρώματος και τη διευκόλυνση αποστράγγισης. Η πλάκα εκτείνεται έως το όριο των πρανών του επιχώματος, διατηρώντας, όπως και οι στρώσεις EPS τη διαμήκη κλίση και επίκλιση του οδοστρώματος.

- Το εύκαμπτο οδόστρωμα της οδού διατηρεί τα χαρακτηριστικά και το πάχος του, ενώ η στράγγιση γίνεται μέσω μονοκλινούς στραγγιστικής στρώσης επί της πλάκας Ω.Σ. Στις θέσεις έδρασης στηθαίων και καναλιού εκφόρτισης του οδοστρώματος τα τεμάχια της



Σχήμα 5: Τυπική διατομή επιχώματος και διάταξης μέτρων βελτίωσης
Figure 5: Typical embankment section and layout of improvement measures

διογκωμένης πολυστερίνης προσαρμόζονται κατάλληλα με επιτόπου κοπή, προ της σκυροδέτησης της πλάκας.

Τέλος στη συναρμογή ελαφρού επιχώματος και συμβατικού επιχώματος διαμορφώνονται κλιμακωτοί αναβαθμοί, ύψους 0,5m και ακολουθεί τοποθέτηση κοκκώδους υλικού στο εύρος των αναβαθμών, διάστρωση γεωυφασματος και στεγανωτικής μεμβράνης και τοποθέτηση των μπλοκ διογκωμένης πολυστερίνης σε κλιμακωτή διάταξη, με αύξηση από κάτω προς τα άνω. Στη βάση προβλέπεται εγκάρσιος διάτρητος πλαστικός σωλήνας για την αποφυγή εμποτισμού.

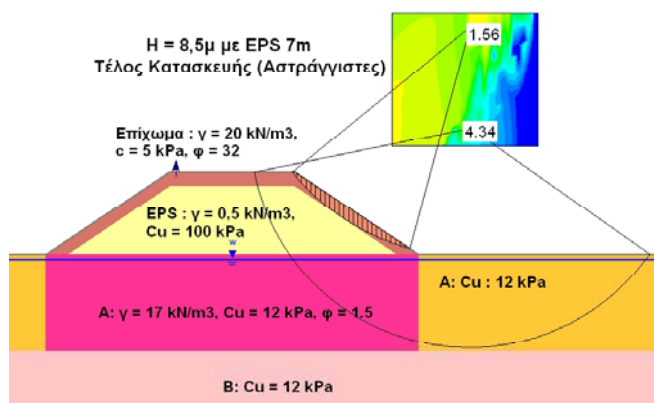
4. ΕΛΕΓΧΟΙ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Για τη διαστασιολόγηση του ελαφρού επιχώματος έγιναν οι ακόλουθοι έλεγχοι:

Έλεγχος γενικής ευστάθειας

Η συνολική ευστάθεια ελαφρού επιχώματος και μαλακού εδάφους έδρασης ελέγχεται έναντι γενικευμένης διατμητικής αστοχίας. Ο έλεγχος έγινε με τη μέθοδο λωρίδων κατά Bishop, με το λογισμικό SLIDE για πιθανές κυκλικές επιφάνειες, διερχόμενες εντός της μαλακής αργιλικής στρώσης Α. Εξετάστηκαν περιπτώσεις άμεσης θραύσης (αστράγγιστες συνθήκες) και στη φάση λειτουργίας με ενεργές παραμέτρους καθώς και σε σεισμική φόρτιση κατά ΕΑΚ, με ολικές και ενεργές παραμέτρους. Για τις αναλύσεις θεωρήθηκαν για το ελαφρό επίχωμα $c_u=100\text{kPa}$ και $\gamma = 0,5 \text{ kN/m}^3$ και για τα γαιώδη πρανή $c=5 \text{ kPa}$, $\phi = 32^\circ$, $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$.

Από τις αναλύσεις προέκυψαν πολύ ικανοποιητικοί συντελεστές ασφαλείας, για δε την κρίσιμη για συμβατικό επίχωμα περίπτωση αστοχίας σε αστράγγιστες συνθήκες και για μέγιστο ύψος επιχώματος 8,5m, προκύπτει Σ.Α. =4,34 για βαθιά θραύση (Σχήμα 6).



Σχήμα 6. Έλεγχος ευστάθειας
Figure 6. Stability analysis

Εκτίμηση εδαφικών καθιζήσεων

Η εκτίμηση των άμεσων και μακροχρόνιων καθιζήσεων στερεοποίησης των πάχους $\approx 25\text{m}$ ιδιαίτερα συμπιεστών αργιλικών στρώσεων, έγινε με δι-διάσταση ανάλυση με το λογισμικό Fossa. Για την εκτίμηση των μετακατασκευαστικών καθιζήσεων λήφθηκε υπόψη η συντελεσθείσα προφόρτιση με το ήδη κατασκευασθέν επίχωμα ύψους $1\div 1,5\text{m}$. Η συνολική καθίζηση εκτιμήθηκε $\approx 20\text{cm}$, στο σύνολό της σχεδόν στην ανώτερη στρώση Α, καθώς βαθύτερα δεν υπάρχει επιρροή. Η απομένουσα μετακατασκευαστική καθίζηση, μετά την προφόρτιση δεν ξεπερνά τα 5cm .

Έλεγχος ισορροπίας έναντι άνωσης

Αστοχίες σε κατασκευασθέντα επιχώματα EPS έχουν παρατηρηθεί κυρίως λόγω απώλειας ισορροπίας έναντι άνωσης (Frydenlund, 2001). Για την αντιμετώπιση του φαινομένου λήφθηκαν μέτρα αποστράγγισης και συλλογής με δίκτυο πλευρικών τάφρων και έγιναν οι παρακάτω έλεγχοι (NRLL, 1992):

Συνολική Ισορροπία :

$$F.S. = W_p + W_{sl} + W_{eps} / A = 1,96 > 1,3 \quad (1a)$$

Τοπική ανύψωση πρανούς :

$$F.S. = (\gamma H_{sl}) / [\gamma_w \times (D + A\Sigma Y)] > 1,2 \quad (1b)$$

όπου W_p = βάρος οδοστρώματος και πλάκας Ω.Σ., W_{sl} = βάρος ελάχιστης επίχωσης πρανούς, W_{eps} = βάρος υλικού EPS, με θεώρηση $\gamma_{eps} = 0,2 \text{ kN/m}^3$, H_{sl} = ελάχιστη επίχωση πρανούς = $0,8\text{m}$, D = μέγιστο βάθος τοποθέτησης EPS $0,25\text{m}$, $A\Sigma Y$ = ανώτατη πλημμυρική στάθμη = $1,0\text{m}$, γ = φαινόμεν. βάρος εδάφους = 20 kN/m^3 , γ_w = ειδικό βάρος νερού = 10 kN/m^3

Έλεγχος εσωτερικής ευστάθειας

Ελέγχεται ολίσθηση σε επίπεδο επαφής μεταξύ δύο στρώσεων EPS, στη στέψη του επιχώματος όπου ελαχιστοποιείται το βάρος και μεγιστοποιείται η σεισμική δράση. Ελέγχονται τρεις περιπτώσεις: στατική φόρτιση (λόγω κλίσης των στρώσεων), ανεμοπύεση, σεισμική φόρτιση με βάση τις σχέσεις (TRB, 2004):

$$F.S.s = W_p \times \tan(\delta) / W_t \geq 2,0 \quad (3a)$$

$$F.S.w = W_p \times b \times \tan(\delta) / (P \times h + W_t \times b) \geq 1,2 \quad (3b)$$

$$F.S.e = [W_p - E_h \sin(\alpha) - E_v \cos(\alpha)] b \times \tan(\delta) / (W_t + E_h \cos(\alpha) + E_v \cos(\alpha)) \geq 1.0 \quad (3\gamma)$$

Όπου: $W_{p,t}$ = κάθετη και παράλληλη στην επιφάνεια ολίσθησης συνιστώσα του βάρους υπερκειμένων (ασφαλτικά, στρώσεις οδοστρωσίας, πλάκα σκυροδέματος), δ = γωνία τριβής μεταξύ στρώσεων EPS = 30° , P = κάθε-

τη συνιστώσα ανεμοπίεσης στη στέψη, b, h = πλάτος και πάχος στρώσης EPS, $E_{v,h}$ = κάθετη και οριζόντια συνιστώσα της σεισμικής δράσης στη στέψη, κατά Ε.Α.Κ. (παρ. 5.4), α = κλίση (επίκλιση) στρώσεων EPS = 3,15°

Έλεγχος επιτρεπομένων τάσεων EPS

Τα μόνιμα επιβαλλόμενα φορτία στο EPS δεν ξεπερνούν τα 20-25kPa. Για τα φορτία αυτής της τάξης, $< 30\% \sigma_{cult}$, δεν αναμένονται αξιόλογες ερπυστικές παραμορφώσεις (NRRL, 1992, TRB, 2004, VSV, 1995). Η άμεση ελαστική παραμόρφωση, που λαμβάνει χώρα κατά την κατασκευή υπολογίζεται με τη σχέση (4) σε 1÷3cm, μεγέθη ασήμαντα σε σχέση με τις αντίστοιχες καθιζήσεις του υπεδάφους:

$$s_{EPS} = q \cdot H_{EPS} / E_{EPS} \leq 20 \cdot 8 / 5000 \quad (4)$$

Οι τάσεις Δq στη στέψη του EPS από τα φορτία κυκλοφορίας υπολογίζονται με κλίση διανομής $I_p = 1:1$ εντός του οδοστρώματος πάχους $T_p = 0,77m$ και $I_c = 2:1$ εντός της πλάκας Ω.Σ. πάχους $T_c = 0,15cm$ και προκύπτει $\Delta q < 15kPa$.

Κατά τη μελέτη παραλήφθηκαν οι ακόλουθοι έλεγχοι είτε γιατί η προβλεπόμενη διάταξη υπερπληρούσε τις αντίστοιχες απαιτήσεις των κανονισμών (NRRL, 1992, VSV, 1995), είτε λόγω απουσίας δόκιμης μεθοδολογίας και παρατήρησης αντίστοιχων προβλημάτων από τη διεθνή εμπειρία (TRB, 2004): α) Έδρασης οδοστρώματος, β) Συνολικής απώλειας ισορροπίας λόγω ανεμοπίεσης, γ) Ολίσθησης λόγω μονόπλευρης πλημμύρας και δ) Άνωσης στη φάση κατασκευής

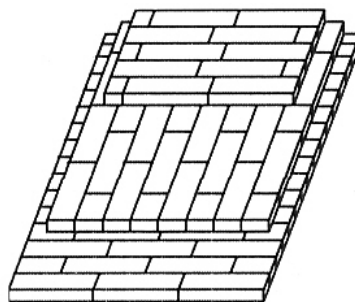
5. ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΥΛΙΚΟΥ

Προδιαγράφηκε υλικό κατηγορίας EPS50 κατά ASTM-D578-95 ή EPS 100 RF κατά EN 14933, φαινόμενου βάρους $20kg/m^3$, ονομαστικής θλιπτικής αντοχής $\sigma_{c10} = 100kPa$ και επιτρεπόμενης φέρουσας ικανότητας $\sigma_{c2} = 50kPa$, για παραμόρφωση στην ελαστική περιοχή $\varepsilon=2\%$, το οποίο φέρει με ασφάλεια τα φορτία και είναι το συνηθέστερο στην εφαρμογή σε ελαφρά επιχώματα. Για την αποφυγή κινδύνου ανάφλεξης επιλέχθηκε δύσκολα αναφλέξιμο υλικό με δείκτη $OI>24$ κατά ASTM. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού συνοψίζονται στον Πίνακα 1. Η ενσωμάτωση των προκατασκευασμένων μπλοκ γίνεται σύμφωνα με τα σχέδια της μελέτης χωρίς να δημιουργούνται αρμοί ή κοιλότητες.

Πίνακας 1: Απαιτήσεις - Έλεγχοι – ανοχές EPS
Table 1: Properties and Quality control for EPS

Περιγραφή	Σύμβολο-Μονάδες	Απαίτηση	Ανοχή	Συχνότητα ελέγχων
Διαστάσεις	LxWxT (m)	≥2.0x1.0x0.5	± 0,5%	ανά 50 τεμάχια
Ορθογωνικότητα	(x,y,z)	3mm/ 500mm μήκος		
Επιπεδότητα		10mm/ 3m ή 5mm μεταξύ διαδοχικών μπλοκ		Εύρος διατομής / 10m μήκος
Πυκνότητα (EN 1602)	ρ (kg/m ³)	20		ανά 500 τεμάχια
Θλιπτική αντοχή (EN 826)	σ _{c10} (kPa)	100	± 10%	
	σ _{c2} (kPa)	50	σε μεμονωμένες	
Απορρόφηση νερού	w _{dV} (%)	<7		

Ακολουθείται εναλλάξ προσανατολισμός για την αποφυγή συχνών αρμών (Σχήμα 7). Αποφεύγεται η χρήση τεμαχίων συναρμογής και η τακτική κοπή, με αναγκαστική εξαίρεση σε θέσεις τεχνικών ή συναρμογής, όπου γίνεται ηλεκτρική συρματοκοπή στο εργοτάξιο και κατά το δυνατόν στην εσωτερική περιοχή του επιχώματος και όχι στην ανώτερη στρώση. Σε θέσεις έντονης καμπυλότητας είναι ανεκτά κενά έως 2-3cm, ενώ κενά έως 5cm σε θέσεις συναρμογής επιτρέπεται να πληρώνονται με άμμο. Εκτός θέσεων ορίων και σύνδεσης η πλήρωση αποτελείται από δύο τουλάχιστον στρώσεις.



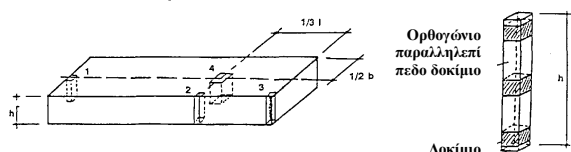
Σχήμα 7: Ενδεικτική τοποθέτηση μπλοκ EPS
Figure 7: Suggested placement of EPS blocks

Τα μπλοκ πρέπει να καλύπτονται άμεσα και να γίνεται συνεχής άντληση κατά την κατασκευή, εφόσον συναντηθεί νερό, έως ότου τοποθετηθεί αντίστοιχο φορτίο έναντι άνωσης. Απαγορεύεται η κυκλοφορία και συμπίκνωση

επάνω στα μπλοκ μέχρι να τοποθετηθεί στρώση 30cm επί της πλάκας προστασίας.

Προβλέφθηκαν, σύμφωνα με τις προδιαγραφές, τακτικοί έλεγχοι κατά την κατασκευή των διαστάσεων, της επιπεδότητας, της ορθογωνικότητας και των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών του υλικού με τήρηση των απαιτήσεων του Πίνακα 1.

Οι έλεγχοι μηχανικών χαρακτηριστικών γίνονται σε κυβικά δοκίμια, ακμής 50mm, που λαμβάνονται από τη μεσαία και μία εκ των εξωτερικών περιοχών του μπλοκ (Σχήμα 8). Πέραν των ελέγχων τα μπλοκ πρέπει να συνοδεύονται με εγχειρίδιο ποιότητας του κατασκευαστή.



Σχήμα 8: Λήψη δοκιμίων για έλεγχο
Figure 8: Specimen sampling for testing

Επιπλέον προβλέφθηκε γεωτεχνική παρακολούθηση της συμπεριφοράς του επιχώματος με τοποθέτηση μαρτύρων καθίζησης σε τακτές αποστάσεις 100÷150m και εβδομαδιαία λήψη μετρήσεων κατά το διάστημα κατασκευής.

6. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Η μελέτη έγινε από την εταιρία Σωτηρόπουλος και Συν/τες ΑΤΕ με τη συνεργασία και επιτόπου παρουσία των Νορβηγών Συμβούλων K.Flaate, T.E. Frydenlund και A. Sagbakken από το Norwegian Public Roads Administration, με εξαιρετική εμπειρία στο αντικείμενο. Η κατασκευή του ελαφρού επιχώματος έγινε από την Ανάδοχο του έργου εταιρία ΑΤΤΙΚΑΤ Α.Τ.Ε. και ολοκληρώθηκε σε διάστημα 2,5 μηνών (06-08/2008). Το έργο παραδόθηκε στην κυκλοφορία στις 18/09/08.

Κατασκευάστηκαν περίπου 65,000 m³ ελαφρού επιχώματος, σε συνολικό μήκος 1,030m (Σχήμα 9) με μέσο ρυθμό παραγωγής περί τα 1000 m³/ημέρα, συμπεριλαμβανομένων των λοιπών μέτρων προστασίας και των προαναφερθέντων ελέγχων, επιβεβαιώνοντας την ταχύτητα εφαρμογής της μεθόδου.

Προ της κατασκευής έγινε τροποποίηση των ενδεικτικών διαστάσεων των μπλοκ, ώστε να υπάρξει προσαρμογή στη διατιθέμενη βιομηχανική παραγωγή, λαμβάνοντας υπόψη τη μεγάλη απαιτούμενη ποσότητα και την ανάγκη επιτάχυνσης της εκτέλεσης. Χρησιμοποιήθη-

καν διαφορετικών διαστάσεων τυποποιημένα τεμάχια, μήκους 3÷5m, πλάτους 1,0÷1,35m και πάχους 0,6÷1,0m με τα παχύτερα τεμάχια στην ανώτερη σειρά. Εκπονήθηκε μελέτη εφαρμογής με σημείωση των επιμέρους τεμαχίων σε κάθε στρώση, οριζοντιογραφικά και υψομετρικά σε όλη την έκταση του έργου.



Σχήμα 9: Άποψη του επιχώματος EPS
Figure 9: View of EPS construction

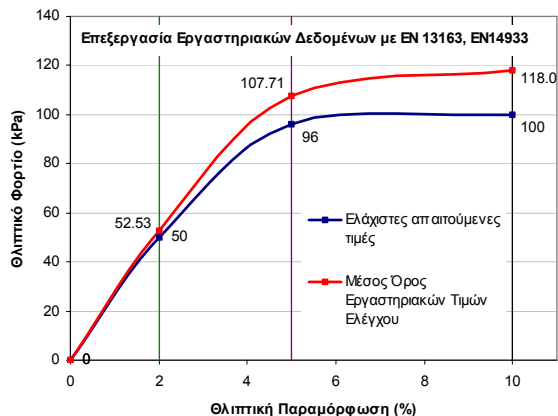
Στην αρχική φάση εργασιών εντοπίστηκαν και τροποποιήθηκαν τα ακόλουθα:

- Παραμόρφωση λόγω κάμψης κάποιων επιμήκων τεμαχίων εκ του τρόπου τοποθέτησης στο εργοστάσιο με στήριξη μόνο στα άκρα τους
- επαναδιάταξη ορισμένων στρώσεων ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη αλληλεμπλοκή και να μη δημιουργούνται οριζόντιοι αρμοί στην εγκάρσια διεύθυνση
- κατασκευή και των πλευρικών στηθαίων από Ω.Σ. για την καλύτερη και ευκολότερα υλοποίησιμη έδρασή τους εντός του EPS
- πλήρωση των όποιων κενών μεταξύ EPS και σκυροδέματος τεχνικών με αφρό πολυουρεθάνης και στερέωση της προστατευτικής μεμβράνης στο EPS
- εφαρμογή ποιοτικού ελέγχου κατά το πρότυπο EN14933 και επιπλέον έλεγχο της καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων με απαίτηση $\sigma_c 2\% \geq 50 \text{ kPa}$

7. ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ

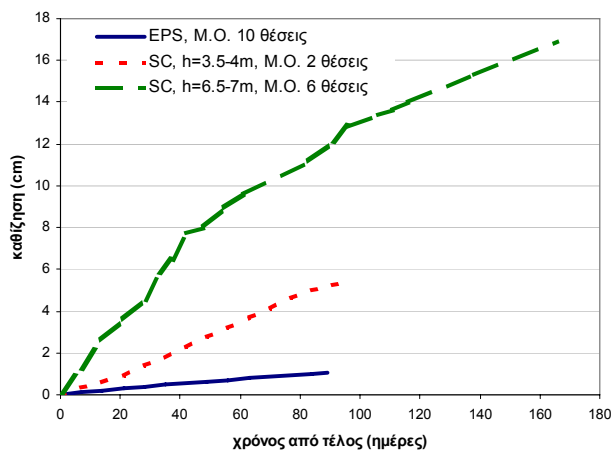
Ο ποιοτικός έλεγχος του υλικού πραγματοποιήθηκε τόσο εργοστασιακά όσο και εργοταξιακά αλλά παράλληλα και από ανεξάρτητα εργαστήρια για λογαριασμό τόσο του Αναδόχου όσο και της ΕΥΔΕ/ΠΑΘΕ. Από το εκτεταμένο πρόγραμμα ελέγχου δεν παρατηρήθηκαν προβλήματα και αποκλίσεις από τη μελέτη. Μετρήθηκε θλιπτική αντοχή σ_{c10} περί τα 120kPa>100kPa, και σ_{c2} >50kPa, ενώ διαπιστώθηκε ελαστική συμπεριφορά του υλικού

έως παραμόρφωση $\approx 5\%$ με $\sigma_{c5} \approx 0,8 \div 0,85 \sigma_{c10}$. Στο Σχήμα 10 δείχνεται η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων από μέσο όρο μετρήσεων, συγκρινόμενη με την καμπύλη των κριτηρίων.



Σχήμα 10: Ποιοτικός έλεγχος θλίψης δοκιμίου
Figure 10: Quality control – compression test

Το κατασκευασθέν επίχωμα δεν έχει εμφανίσει έως σήμερα προβλήματα. Οι μετρηθείσες υποχωρήσεις στους εγκατεστημένους μάρτυρες σε 11 θέσεις, κατά μήκος του ελαφρού επιχώματος, ήταν ομοιόμορφες και πολύ χαμηλές, της τάξης του 1cm μετά την ολοκλήρωση του έργου και πολύ χαμηλότερες των θεωρηθέντων από τη μελέτη (Σχήμα 11). Το ευνοϊκό αυτό αποτέλεσμα αποδίδεται στο πολύ μικρό επιβαλλόμενο φορτίο και την ομοιόμορφη διανομή που επιτυγχάνεται μέσω της κατάλληλης τοποθέτησης του EPS και της ισχυρής στρώσης εξυγίανσης, ώστε ακόμη και στο πολύ πτωχό, προφορτισμένο όμως με μεγαλύτερο φορτίο, έδαφος της περιοχής να μετράται αμελητέα καθίζηση.



Σχήμα 11: Μετρηθείσες καθιζήσεις
Figure 11: Settlement measurements

Στο σχήμα 11 συγκρίνονται οι μέσες μετρηθείσες καθιζήσεις κατά το πρώτο τρίμηνο μετά την ολοκλήρωσή του ελαφρού επιχώματος (EPS), με αντίστοιχες μετρήσεις σε άλλες δύο θέσεις του έργου, για ύψος επιχώματος έως 4m και 7m αντίστοιχα, με πτωχές αλλά πολύ καλύτερες από την εξεταζόμενη θέση εδαφικές συνθήκες, όπου εφαρμόστηκαν χαλικοπάσσαλοι (SC).

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η κατασκευή ελαφρού επιχώματος από διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στη χώρα μας σε περιοχή με εξαιρετικά δυσμενείς εδαφικές συνθήκες προς αντιμετώπιση σημαντικών προβλημάτων και αστοχιών που είχαν λάβει χώρα.

Η κατασκευή επιχωμάτων ύψους έως και 8,5m έγινε με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την ασφάλεια, την ταχύτητα κατασκευής και την έως σήμερα, δύο έτη μετά την παράδοση του έργου, μετακατασκευαστική συμπεριφορά.

Η επιτυχής πρώτη εφαρμογή ανοίγει τον δρόμο για την αξιοποίηση της μεθόδου στην κατασκευή εδραζόμενων σε μαλακά εδάφη οδικών επιχωμάτων, αλλά και την ανακούφιση ακροβάθρων γεφυρών.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ΕΛΟΤ EN 14933 (2007), “Θερμομονωτικά και ελαφροβαρή προϊόντα πλήρωσης για εφαρμογές πολιτικού μηχανικού – Βιομηχανικώς παραγόμενα προϊόντα από διογκωμένη πολυστερίνη (EPS)”, Αθήνα
- ASTM D578-95 (1999), “Standard Specification for Rigid, Cellular Polystyrene Thermal Insulation”, Vol. 04.06, USA
- Norwegian Road Research Laboratory (1992), “Expanded Polystyrene used in road embankments”, Oslo, Form 482E
- Frydenlund, T.E. and Aaboe, R., (2001), “Long term performance and durability of EPS as a lightweight filling material”, EPS Geofoam 3rd Intern. Conference, Salt Lake City, Utah
- Vorschungsgesellschaft fur Strassen und Verkehrswesen (1995), “Merkblatt fur die Verwendung von EPS Hartshaumstoffen beim Bau von Strassendammen”, Koln
- Transportation Research Board NA (2004), “Geofoam Applications in the Design and Construction of Highway Embankments”, Illinois, NCHRP65