

**Ανάπτυξη νέου τύπου οδοστρωμάτων σκυροδέματος:
Πιλοτικός δρόμος στη Πάφο**
Development of a new type of concrete pavements:
Demonstration road in Pafos

**Κυριάκος ΝΕΟΚΛΕΟΥΣ¹, Κύπρος ΠΗΛΑΚΟΥΤΑΣ², Διόφαντος
ΧΑΤΖΗΜΙΤΣΗΣ³, Παύλος ΝΕΟΦΥΤΟΥ⁴, Κυριάκος ΘΕΜΙΣΤΟΚΛΕΟΥΣ⁵,
Στέλιος ΚΑΛΛΗΣ⁶**

Λέξεις κλειδιά: οδοστρώματα, ινοπλισμένο κυλινδρούμενο σκυρόδεμα, ανακυκλωμένες χαλύβδινες ίνες, EcoLanes

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Περιγράφεται η ερευνητική εργασία που εκπονήθηκε για το Ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα «EcoLanes» το οποίο απόβλεπε στην ανάπτυξη ενός νέου συστήματος υποδομής στη κατασκευή δρόμων. Το νέο σύστημα αντικαθιστά τα συμβατικά υλικά έδρασης της επιφανειακής ασφαλτικής στρώσης με «μεγάλης ανθεκτικότητας» ινοπλισμένο κυλινδρούμενο σκυρόδεμα. Η μέθοδος αυτή σκοπό έχει να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας, το χρόνο και το κόστος που απαιτείται για την κατασκευή οδοστρωμάτων και να εισαγάγει μια περιβαλλοντολογικά καθαρότερη διαδικασία κατασκευής. Η εργασία παρουσιάζει επίσης και το πιλοτικό οδόστρωμα από ινοπλισμένο κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (με ανακυκλωμένες χαλύβδινες ίνες), το οποίο κατασκευάστηκε στην Επαρχία Πάφου της Κύπρου προς εφαρμογή των ερευνητικών αποτελεσμάτων. Ανάλυση του κύκλου ζωής του πιλοτικού οδοστρώματος απέδειξε ότι είναι φθηνότερο και περιβαλλοντολογικά καθαρότερο από ότι συμβατικά οδοστρώματα ασφάλτου.

ABSTRACT: This paper describes the research work undertaken for the European research project «EcoLanes» which aimed at developing a new type of infrastructure system for the construction of roads. This system replaces the

¹ Ανώτερος Ερευνητικός Συνεργάτης, Τμήμα Πολιτικών και Δομοστατικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο του Sheffield, email: k.neocleous@sheffield.ac.uk

² Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών και Δομοστατικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο του Sheffield, email: K.Pilakoutas@sheffield.ac.uk

³ Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, email: d.hadjimitsis@cut.ac.cy

⁴ Εκτελεστικός Μηχανικός, Επαρχιακό Γραφείο Πάφου, Τμήμα Δημόσιων Έργων, email: pneophytou@pwd.mcw.gov.cy

⁵ Ειδικός Επιστήμονας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, email: kt33@cytanet.com.cy

⁶ Επαρχιακός Μηχανικός, Επαρχιακό Γραφείο Πάφου, Τμήμα Δημόσιων Έργων, email: skallis@pwd.mcw.gov.cy

conventional materials used in the asphalt surface layer with a layer of long lasting rigid pavement made with steel fibre reinforced roller-compacted concrete (SFRC-RCC). This method aimed at reducing energy consumption, time and cost required for the construction of pavements and at introducing an environmentally cleaner manufacturing process. The work also describes the pilot road made with SFRC-RCC (with recycled steel fibres), which was constructed in the Paphos District of Cyprus for the implementation of EcoLanes' research results. Analysis of the life cycle of the pilot road proved that the FRC-RCC pavement is cheaper and environmentally friendlier than conventional asphalt pavements.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

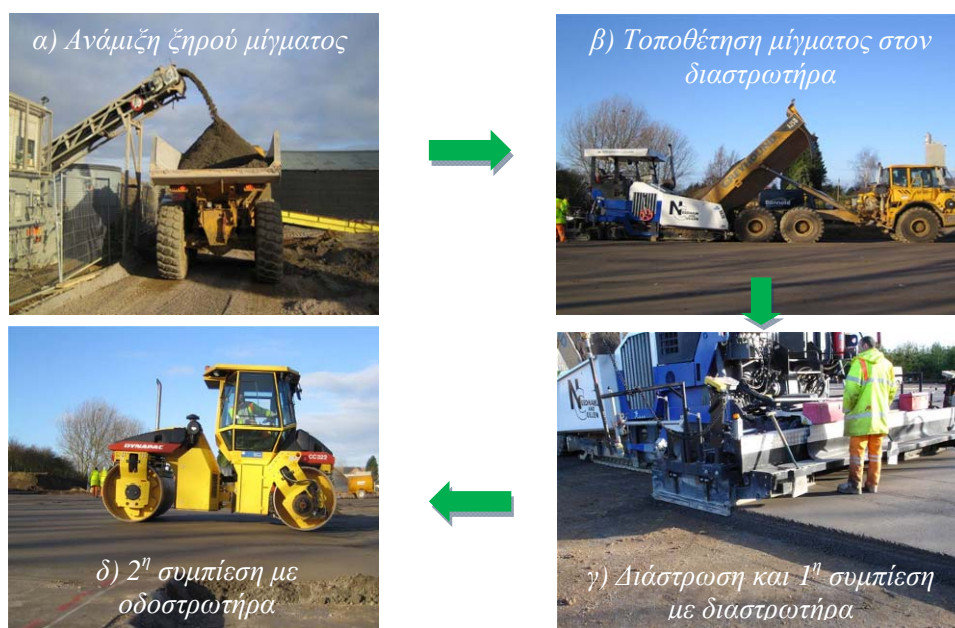
Το βασικό στοιχείο των επίγειων μεταφορικών υποδομών είναι το οδόστρωμα, το οποίο μπορεί να είναι εύκαμπτο ή δύσκαμπτο. Τα εύκαμπτα οδοστρώματα συνήθως κατασκευάζονται από άσφαλτο, ενώ το κύριο υλικό που χρησιμοποιείται στα δύσκαμπτα οδοστρώματα είναι το σκυρόδεμα με τσιμέντο Portland.

Τα οδοστρώματα σκυροδέματος συνήθως οπλίζονται με χαλύβδινα πλέγματα για να βελτιωθούν οι μηχανική ιδιότητες τους, να αυξηθεί η απόσταση μεταξύ των αρμών, και να ελαχιστοποιηθεί το βάθος της θεμελίωσης. Η χρήση χαλύβδινων ινών στο συμβατικό «υγρό» σκυρόδεμα μπορεί να αντικαταστήσει την χρήση του συμβατικού πλέγματος και να μειώσει τις εργατικές δαπάνες που συνδέονται με την τοποθέτηση του οπλισμού και να επιταχύνουν την διαδικασία κατασκευής. Όμως το υψηλό κόστος των χαλύβδινων ινών συγκρατεί την εκτεταμένη χρήση τους στο σκυρόδεμα, ειδικά σε χώρες που οι εργατικές δαπάνες είναι σχετικά χαμηλές. Η τιμή των χαλύβδινων ινών, οι οποίες παράγονται με βιομηχανικά μέσα, κυμαίνεται από €600 ως €10,000 ανά τόνο και είναι τουλάχιστον 20% υψηλότερη από την τιμή του συμβατικού χαλύβδινου οπλισμού. Δεδομένου ότι η διασπορά των ινών στο σκυρόδεμα είναι τυχαία, απαιτούνται μεγαλύτερες ποσότητες ινών για να επιτευχθεί ισοδύναμη δομοστατική επιτελεστικότητα. Οι χαλύβδινες ίνες που ανακυκλώνονται από απόβλητα, όπως για παράδειγμα μετά-από-την-κατανάλωση ελαστικά (Σχήμα 1), μπορούν να προσφέρουν μια εναλλακτική λύση στις βιομηχανικά παραχθείσες ίνες, καθώς η αξία τους (ως άχρηστο υλικό) κυμαίνεται από €20 ως €150 ανά το τόνο (Pilakoutas *et al.*, 2004, LetsRecycle, 2009).



Σχήμα 1. Μηχανική ανακύκλωση μετά-από-την-κατανάλωση ελαστικών

Τα οδοστρώματα σκυροδέματος κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας είτε «υγρό» είτε «ξηρό» μίγμα. Το «υγρό» σκυρόδεμα διαστρώνεται και συμπιέζεται με συμβατικές μεθόδους σκυρόδεσης που είναι επίμοχθες και απαιτούν πλευρικούς ξυλότυπους. Το «ξηρό» σκυρόδεμα διαστρώνεται και συμπιέζεται με συμβατικές τεχνικές ασφαλτόστρωσης (Σχήμα 2) οι οποίες παρέχουν μια γρήγορη, οικονομική, και ανθεκτική λύση. Οι ίνες αναμιγνύονται με δυσκολία στα «ξηρά» μίγματα σκυροδέματος αλλά προηγούμενη έρευνα (π.χ. Nanni, 1989) έχει αποδείξει ότι οι ίνες βελτιώνουν τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος.



Σχήμα 2. Κατασκευή δύσκαμπτων οδοστρωμάτων από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα

Ανάλογα με τις ισχύουσες τιμές των κατασκευαστικών υλικών και ενέργειας, τα οδοστρώματα σκυροδέματος έχουν την δυνατότητα να είναι οικονομικώς αποδοτικότερα από τα ασφαλτικά οδοστρώματα (Johnson, 2008). Όμως για να επιτευχθεί μια πραγματικά αειφόρος λύση για τα οδοστρώματα σκυροδέματος, πρέπει να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας κατά την διάρκεια της κατασκευής του οδοστρώματος (από την εξαγωγή της πρώτης ύλης ως την επίστρωση του σκυροδέματος) όπως επίσης το κόστος των κατασκευαστικών υλικών. Εφόσον η περισσότερη ενέργεια χρησιμοποιείται για την κατασκευή του τσιμέντου και του χάλυβα (Zapata and Gambatese, 2004), η χρήση ανακυκλωμένων υλικών (π.χ. ιπτάμενη τέφρα, χαλύβδινες ίνες από ελαστικά, και αδρανή που προέρχονται από κατεδαφίσεις) όπως επίσης και καινοτόμων υλικών (π.χ. τσιμέντο «χαμηλής ενέργειας»), έχει την δυνατότητα να ελαχιστοποιήσει τις δαπάνες που συνδέονται με την κατανάλωση ενέργειας. Εκτός από την κατανάλωση ενέργειας, η χρήση χαμηλούς κόστους ανακυκλωμένων υλικών θα μειώσει περαιτέρω το κόστος των

υλικών των οδοστρωμάτων σκυροδέματος. Το Ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα «EcoLanes» (2006-09) εξέτασε τα πιο πάνω ζητήματα αποβλέποντας στην ανάπτυξη «μακράς διάρκειας δύσκαμπτων οδοστρωμάτων».

Η εργασία αρχικά συνοψίζει τις δραστηριότητες του προγράμματος «EcoLanes», όπως η ανάπτυξη ανακυκλωμένων χαλύβδινων και κατάλληλων μιγμάτων ινοπλισμένου κυλινδρούμενου σκυροδέματος (ΙΚΣ). Παρουσιάζεται επίσης η μεθοδολογία που έχει αναπτυχθεί για την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής επίδρασης, καθώς και στην εκτίμηση του κόστους κύκλου ζωής που συνδέονται με τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής οδοστρωμάτων και του νέου τύπου οδοστρωμάτων. Το δεύτερο μέρος της εργασίας περιγράφει την εφαρμογή των αποτελεσμάτων της ερευνητικής προσπάθειας για την ανακατασκευή τμήματος υφιστάμενου δρόμου στην Επαρχία Πάφου της Κύπρου. Επίσης, αναφέρονται η αξιολόγηση της περιβαλλοντικής επίδρασης, καθώς και η εκτίμηση του κόστους κύκλου ζωής για το οδόστρωμα σύμφωνα με τις τρέχουσες δαπάνες και με συγκεκριμένο χρόνο ζωής.

ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΟΥ «ECOLANES»

Το ερευνητικό πρόγραμμα «EcoLanes» χρηματοδοτήθηκε για τρία χρόνια (2006-09) από το θεματικό τομέα προτεραιότητας «Sustainable Surface Transport» του 6^{ου} προγράμματος πλαισίου της Ευρωπαϊκής Κοινότητας. Οι εργασίες του προγράμματος άρχισαν τον Οκτώβριο του 2006 και η κοινοπραξία του αποτελείτο από έντεκα εταίρους που προέρχονταν από έξι Ευρωπαϊκές χώρες: τέσσερα πανεπιστήμια, τρεις βιομηχανικούς εταίρους, την Ευρωπαϊκή ένωση για την ανακύκλωση των ελαστικών και τρεις τελικούς χρήστες. Ο συντονιστής του προγράμματος ήταν το Πανεπιστήμιο του Sheffield και περιλάμβανε το Τμήμα Δημόσιων Έργων της Κύπρου και το Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου.

Ο κύριος στόχος του «EcoLanes» ήταν η ανάπτυξη οδοστρωμάτων σκυροδέματος χρησιμοποιώντας συμβατικά μηχανήματα ασφαλτόστρωσης (Σχήμα 2) και ΙΚΣ το οποίο είναι οπλισμένο με ανακυκλωμένες χαλύβδινες ίνες που προέρχονται από μετά-την-κατανάλωση-ελαστικά. Τα οφέλη από αυτήν την μέθοδο είναι πολλαπλή, όπως μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, του χρόνου και της δαπάνης που απαιτούνται για την κατασκευή των οδοστρωμάτων, όπως και εισαγωγή μιας περιβαλλοντολογικά καθαρότερης διαδικασίας κατασκευής. Μέσω εννέα δεσμών εργασίας, το πρόγραμμα παρέδωσε νέες διαδικασίες και μοντέλα για το σχεδιασμό και κατασκευή οδοστρωμάτων σκυροδέματος, καθώς και πρότυπα για την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής επίδρασης και του κόστους του κύκλου ζωής. Τα αποτελέσματα του προγράμματος επικυρωθήκανε το 2009 με την κατασκευή, σε πραγματικού μεγέθους, πιλοτικών οδοστρωμάτων σε τέσσερα διαφορετικά Ευρωπαϊκά κλίματα (Ηνωμένο Βασίλειο, Κύπρο, Ρουμανία και Τουρκία). Για να επιτύχει τους στόχους και σκοπούς του, το πρόγραμμα έπρεπε να υπερνικήσει επιστημονικά και τεχνολογικά εμπόδια στην επεξεργασία ανακυκλωμένων ινών, στην κατασκευή σκυροδέματος και σχεδιασμό οδοστρωμάτων.

Επεξεργασία ινών

Προηγούμενη έρευνα απόδειξε ότι οι χαλύβδινες ίνες που ανακυκλώνονται από μετά-από-την-κατανάλωση ελαστικά (ΑΧΙ) βελτιώνουν τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος (Pilakoutas *et al.*, 2004, Νεοκλέους και άλλοι, 2006). Ωστόσο, ένα από τα κύρια προβλήματα που αντιμετωπίζονται κατά την ανάμιξη των ινών στο σκυρόδεμα είναι η τάση τους να συμμαζεύονται και να σχηματίζουν σβώλους που δημιουργούν κενά στο σκυρόδεμα (Pilakoutas *et al.*, 2004). Για να αποφευχθεί ο σχηματισμός σβώλων και για να βελτιστοποιηθεί η χρήση των ΑΧΙ στο σκυρόδεμα, το «EcoLanes» ανέπτυξε τεχνικές και εξοπλισμό που αφαιρούν τα λαστιχένια σωματίδια και ελαχιστοποιούν την γεωμετρική ανομοιογένεια των ινών. Κατά την τριετή διάρκεια του «EcoLanes» παράχθηκαν πάνω από 90 τόνοι ΑΧΙ από τους οποίους οι 70 τόνοι χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των πιλοτικών οδοστρωμάτων.

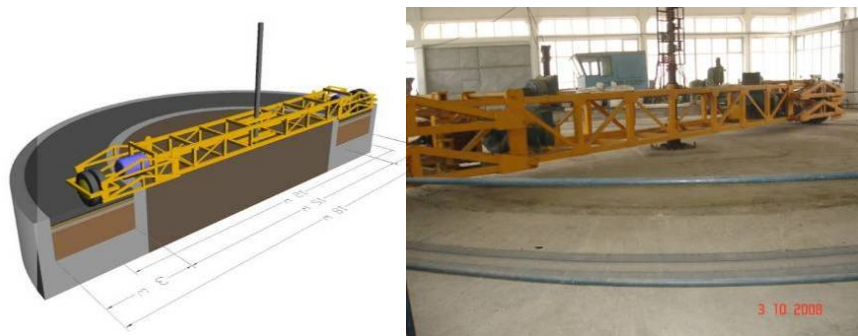
Μηχανική σκυροδέματος

Παρά τις βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες του ΙΚΣ, η προσθήκη των ινών μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα πυκνότητας του σκυροδέματος λόγω ανεπαρκούς συμπίεσης του. Επίσης, όπως προαναφέρθηκε, η ανάμιξη των ινών στο «ξηρό» σκυρόδεμα δεν είναι πάντοτε εφικτή στο εργοτάξιο. Αυτά τα προβλήματα εξετάστηκαν μέσω εκτενών εργαστηριακών μελετών και δοκιμών εργοταξίου όπου αναπτύχθηκαν τεχνικές ανάμιξης των ινών στο «ξηρό» σκυρόδεμα.

Οι εργαστηριακές μελέτες εξέτασαν ένα ευρύ φάσμα του ΙΚΣ, όπως βελτιστοποίηση μιγμάτων με διάφορα υλικά (όπως τσιμέντα «χαμηλής ενέργειας», ιπτάμενη τέφρα και ανακυκλωμένα αδρανή), αποτίμηση της αντοχής σε σύνθλιψη και κάμψη, καθώς και της ανθεκτικότητας του. Η εργασία του Αγγελακόπουλου και άλλων (2009) παρουσιάζει περισσότερες πληροφορίες για τις εργαστηριακές μελέτες του «EcoLanes». Οι δοκιμές εργοταξίου απέδειξαν ότι το ΙΚΣ μπορεί να παραχθεί επιτυχώς σε μονάδες παρασκευής έτοιμου σκυροδέματος χωρίς να απαιτείται μετατροπή του εξοπλισμού τους. Οι δοκιμές έδειξαν ότι οι ΑΧΙ διανέμονται ομοιόμορφα στο ΙΚΣ και το φαινόμενο των «χαλύβδινων σβώλων» είναι ελάχιστο.

Σχεδιασμός οδοστρωμάτων

Ο οικονομικός και αειφόρος σχεδιασμός οδοστρωμάτων από ΙΚΣ είναι ένας σύνθετος υπολογισμός που απαιτεί δεδομένα για τις φυσικές, μηχανικές και χημικές ιδιότητες και το κόστος των κατασκευαστικών υλικών, τις εργατικές δαπάνες, την κατανάλωση και το κόστος της ενέργειας, καθώς για προηγμένες αριθμητικές τεχνικές. Όλοι αυτοί οι παράμετροι χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη της έννοιας των «μακράς διάρκειας δύσκαμπτων οδοστρωμάτων». Αυτή η έννοια επικυρώθηκε εργαστηριακά στο Τεχνικό Πανεπιστήμιο του Ιασίου μέσω 1 εκατομμυρίου κυκλικών επιταχυνόμενων φορτίσεων (Σχήμα 3), αριθμητικών αναλύσεων και παραμετρικών μελετών όπως συνοψίζονται από την εργασία της Jafarifar *et al.* (2009).



Σχήμα 3. Κυκλική επιταχυνόμενη δοκιμή οδοστρώματος από ΙΚΣ

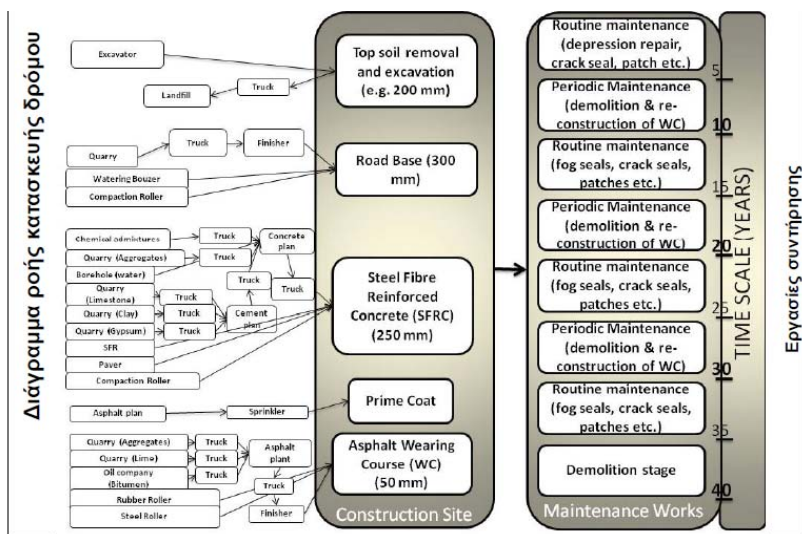
Περιβαλλοντολογική επίδραση και κόστος κύκλου ζωής

Η περιβαλλοντολογική επίδραση της κατασκευής και της συντήρησης των οδοστρωμάτων από ΙΚΣ εκτιμήθηκε με τη μέθοδο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) τους, προσδιορίζοντας την ενέργεια και τις πρώτες ύλες, καθώς και τους ρύπους που απελευθερώνονται στο περιβάλλον, με σκοπό την ορθολογική χρήση πρώτων υλών και ενέργειας για εξάλειψη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η μεθοδολογία της ΑΚΖ αξιολογεί όλα τα στάδια της ζωής του οδοστρώματος από τη φάση σχεδιασμού, κατασκευής, συντήρησης και τη τελική φάση της αποξήλωσης όλου του οδοστρώματος.

Για σκοπούς συγκριτικής έρευνας, πραγματοποιήθηκαν ΑΚΖ για δύο επιπρόσθετους τύπους οδοστρωμάτων: ασφαλτικό οδόστρωμα και οδόστρωμα με «υγρό» σκυρόδεμα. Η διάρκεια του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων καθορίστηκε στα 40 χρόνια.

Για την ανάλυση και την αξιολόγηση του κόστους ζωής των οδοστρωμάτων χρησιμοποιήθηκαν δυο μοντέλα για την επεξεργασία των δεδομένων, ώστε οι εναλλακτικές λύσεις να μπορούν να συγκριθούν και να αξιολογηθούν με ίσα χαρακτηριστικά και δεδομένα. Στην μεθοδολογία του Κόστου Κύκλου Ζωής (ΚΚΖ) έγινε η εκτίμηση των δαπανών και των διεργασιών του κύκλου ζωής του οδοστρώματος με τη χρήση μοντέλου που έχει αναπτυχθεί από το Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου.

Η ΑΚΖ του οδοστρώματος έγινε εισάγοντας δεδομένα ενέργειας και περιβαλλοντικών εκπομπών των διεργασιών που περικλείονται στην κατασκευή φάση αλλά και στην φάση συντήρησης του οδοστρώματος (Σχήμα 4) με την χρήση του λογισμικού GaBi 4. Τα εισαγόμενα δεδομένα για την εκτίμηση της περιβαλλοντολογικής επίδρασης και του κόστους λήφθηκαν από δημόσιους (Τμήμα Δημόσιων Έργων, Υπηρεσία Περιβάλλοντος, Τμήμα Επιθεώρησης Εργασίας) και ιδιωτικούς φορείς (Λατομεία, Κατασκευαστικές Εταιρείες, Μονάδες Ασφαλτικού και Έτοιμου Σκυροδέματος).



Σχήμα 4. Διάγραμμα διεργασιών στη κατασκευή και συντήρηση οδοστρώματος.

ΠΙΛΟΤΙΚΟΣ ΔΡΟΜΟΣ ΣΤΗΝ ΠΑΦΟ

Προβλήματα έδρασης υφιστάμενου δρόμου

Ο πιλοτικός δρόμος κατασκευάστηκε σε τμήμα υφιστάμενου δρόμου εύκαμπτου οδοστρώματος, με τον κωδικό F624, ο οποίος οδηγεί στα χωριά Γαλαταριά και Κοιλίνια της επαρχίας Πάφου. Ο δρόμος βρίσκεται σε μια λοφώδη μέχρι ορεινή περιοχή, σε υψόμετρο 740 μέτρων πάνω από τη Μέση Στάθμη Θαλάσσης, και διέρχεται από απόκρημνη πλαγιά ψηλού λόφου. Η περιοχή είναι τεκτονικά πολύ διαταραγμένη, λόγω ρήγματος και κατολισθήσεων που συνέβησαν στο παρελθόν, αρκετές από τις οποίες εξακολουθούν να είναι ενεργές. Επίσης, στην πλαγιά του λόφου από όπου διέρχεται ο δρόμος έχουν παρατηρηθεί αλλεπάλληλοι ενεργοί ερυσμοί του εδάφους (Σχήμα 5).



Σχήμα 5. Ορατά ίχνη ερυσμού στην περιοχή του υφιστάμενου δρόμου

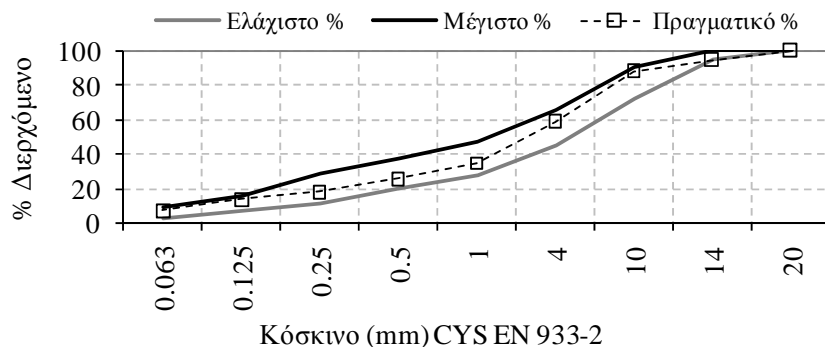
Το εύκαμπτο οδόστρωμα λόγω του ότι εδράζεται σε «ασταθές» έδαφος, παρουσίαζε μονίμως ρωγματώσεις και ελαφρές παραμορφώσεις (Σχήμα 6). Για να μην διαταραχτεί η «ασταθής» ισορροπία των εδαφών, αποφασίστηκε η κατασκευή οδοστρώματος από ΙΚΣ, ευελπιστώντας ότι οι τοπικές μετατοπίσεις του υπεδάφους δεν θα ανακλώνται στην επιφάνεια κύλισης, μιας και το δύσκαμπτο οδόστρωμα θα μπορεί να παραλάβει το κυκλοφοριακό φόρτο και να τα κατανείμει σε μεγαλύτερες επιφάνειες στα κατώτερα στρώματα, μειώνοντας τις τάσεις που αναπτύσσονται σε αυτά. Η πλάκα αυτή θα δύναται επίσης να παραλάβει όλες τις αναπτυσσόμενες σε αυτή τάσεις, οι οποίες προέρχονται και από άλλους παράγοντες, όπως η θερμοκρασιακές μεταβολές της πλάκας και η ογκομετρική αλλαγή του υπεδάφους. Σαν βάση πάνω έδρασης χρησιμοποιήθηκαν οι υφιστάμενες υποκείμενες στρώσεις, οι οποίες έμειναν ανέγγιχτες.



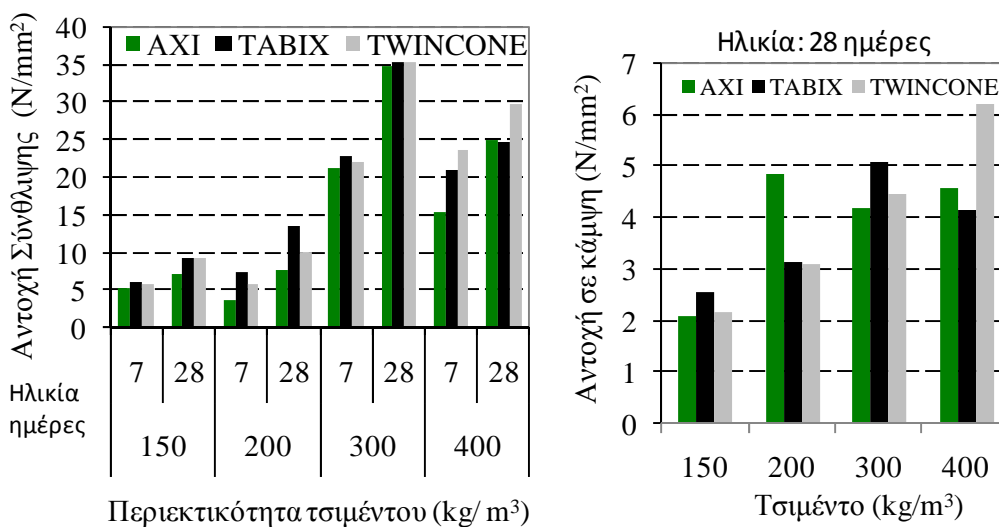
Σχήμα 6. Ρηγματώσεις υφιστάμενου εύκαμπτου οδοστρώματος

Εργαστηριακές δοκιμές και σχεδιασμός οδοστρώματος από ΙΚΣ

Πριν από το σχεδιασμό και κατασκευή του δύσκαμπτου οδοστρώματος, τα Δημόσια Έργα της Κύπρου ανέπτυξαν μίγματα ΙΚΣ, με διαφορετικές περιεκτικότητες σε τσιμέντο (τύπου CEM II A-M(L-P)), και διαφορετικούς τύπους χαλύβδινων ινών. Η περιεκτικότητα των χαλύβδινων ινών ήταν 2% (ανά μάζα σκυροδέματος) για όλα τα μίγματα. Χρησιμοποιήθηκαν διαβασικά αδρανή των οποίων η κοκκομετρική διαβάθμιση παρουσιάζεται στο Σχήμα 7. Ακολουθώντας την διαδικασία που εφαρμόστηκε στο «EcoLanes», σκυροδετήθηκαν εργαστηριακά δοκίμια: (α) κύβοι (διαστάσεων 150mm x 150mm x 150mm) για αποτίμηση της θλιπτικής αντοχής και (β) δοκοί (διαστάσεων 150mm x 150mm x 700mm) για αποτίμηση της καμπτικής αντοχής. Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών ελέγχων φαίνονται στο Σχήμα 8. Οι παραδοχές που έγιναν για τη χαρακτηριστική θλιπτική και καμπτική αντοχή του ΙΚΣ ήταν 30 MPa και 4 MPa αντίστοιχα και επομένως επιλέχθηκε το μίγμα με περιεκτικότητα τσιμέντου 300 kg ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος (Πίνακας 1).



Σχήμα 7. Κοκκομετρική διαβάθμιση διαβαστικών αδρανών



Σχήμα 8. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών για μίγματα από ΙΚΣ με περιεκτικότητα χαλύβδινων ινών 2% (ανά μάζα)

Πινάκας 1. Σύνθεση του ΙΚΣ που χρησιμοποιήθηκε για την ανακατασκευή του δρόμου

Συστατικά υλικά	Ποσότητα (kg / m ³)
Σκύρα 8/20	191,0
Σκύρα 4/10	573,0
Άμμος 0/4 – Τύπος Α	1008,0
Άμμος 0/4 – Τύπος Β	114,2
Τσιμέντο CEM II A-M(L-P) 42,5R	300,0
Νερό	213,0
Ίνες AXI (2% ανά μάζα)	47,3
Σύνολο	2446,5

Η διαστασιολόγηση του δύσκαμπτου οδοστρώματος από ΙΚΣ έγινε σύμφωνα με τις πρόνοιες του Ρουμανικού Προτύπου NP081-2002, το οποίο χρησιμοποιήθηκε μαζί με τα εργαστηριακά αποτελέσματα ως βάση για τον σχεδιασμό των πιλοτικών δρόμων. Η διάρκεια ζωής του πιλοτικού δρόμου στο τέλος της οποίας το οδόστρωμα αναμένεται να αστοχήσει, θεωρήθηκε ότι είναι 40 χρόνια. Άλλες σχεδιαστικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό του πιλοτικού δρόμου είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος σχεδιασμού (υπολογίστηκε σε 1.28 εκατομμύρια ισοδύναμους τυπικούς άξονες, το μέτρο αντίδρασης του υπεδάφους ($k = 58 \text{ MN/m}^3$) και η επιτρεπόμενη εφελκυστική τάση του σκυροδέματος λόγω κάμψης ($\sigma_{t,adm} = 3,05 \text{ MPa}$). Υπολογίστηκε ότι βάσει αυτών των δεδομένων, το απαραίτητο πάχος του οδοστρώματος από ΙΚΣ είναι 240 mm.

Κατασκευή οδοστρώματος από ΙΚΣ

Το πιλοτικό οδόστρωμα κατασκευάστηκε αρχές Απριλίου 2009. Η παρασκευή του μίγματος ΙΚΣ έγινε σε μονάδα παρασκευής έτοιμου σκυροδέματος στη βιομηχανική περιοχή της Πάφου. Οι ΑΧΙ αναμίχθηκαν με τα αδρανή (σε προκαθορισμένες ποσότητες, με αναλογία 2% κατά μάζα) πριν τη τοποθέτηση τους στα μεταλλικά δοχεία για τα αδρανή. Η δοσολογία ρυθμιζόταν με ακρίβεια μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Το ομοιόμορφο διασκόρπισμα των υλικών στο μίγμα επιτεύχθηκε αυξάνοντας λίγο το χρόνο ανάμιξης των υλικών. Η εκκένωση του μίγματος στα αυτοκίνητα μεταφοράς γινόταν από ύψος μικρότερο των δύο μέτρων για αποφυγή απόμιξης και διαχωρισμού του σκυροδέματος. Το ΙΚΣ μεταφέρθηκε με φορτηγά και καλύφθηκε για να προφυλαχτεί από εξάτμιση ή διαβροχή λόγω βροχόπτωσης. Το ΙΚΣ διαστρώθηκε και συμπίεστηκε βάσει της μεθόδου που αναπτύχθηκε από το πρόγραμμα «EcoLanes» (Σχήμα 9).

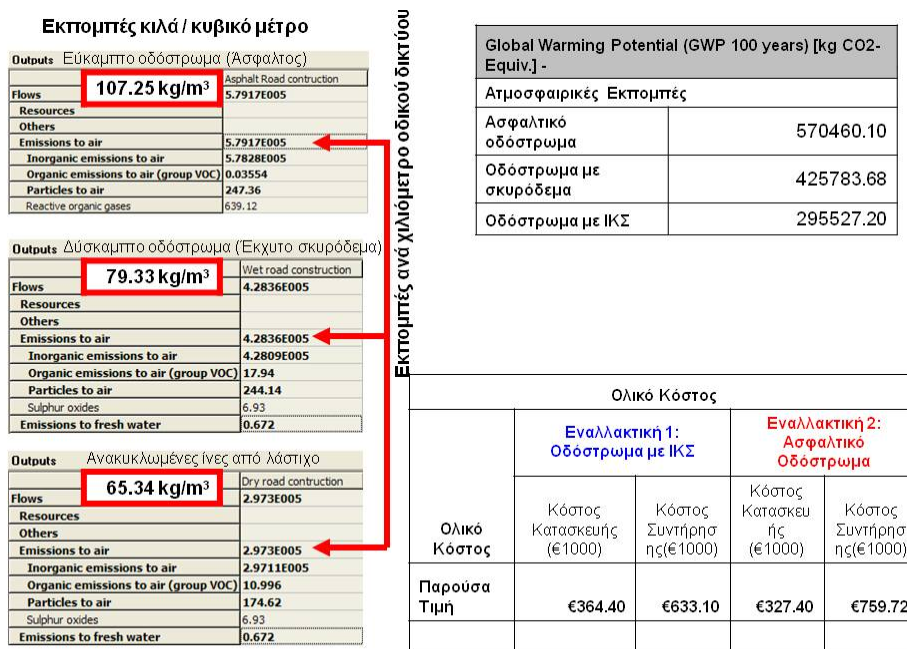


Σχήμα 9. Κατασκευή πιλοτικού οδοστρώματος ΙΚΣ στην Γαλαταριά

Για τη συμπύκνωση του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε δονητικός οδοστρωτήρας, με λείους μεταλλικούς κυλίνδρους με στατικό φορτίο στη γενέτειρα 30 kP/cm. Με συνδυασμό του δονητικού πήχυ και των δοκών κοπανίσματος εξασφαλίστηκε υψηλή προσυμπύκνωση και επιτεύχθηκε η επιθυμητή επιπεδότητα. Το μίγμα διαστρώθηκε σε όλο το πλάτος του δρόμου (6 μέτρα) με μία διέλευση. Το μήκος του πιλοτικού οδοστρώματος ήταν 40 μέτρα και το κυλινδρούμενο πάχος 250 mm. Η συντήρηση του σκυροδέματος έγινε με ψεκασμό υλικών συντήρησης. Πριν από αυτό, η επιφάνεια του σκυροδέματος παρέμεινε διαρκώς υγρή. Κατά τη διάρκεια της κατασκευής διενεργήθηκαν έλεγχος πάχους στρώσης, γεωμετρικός έλεγχος τελειωμένης επιφάνειας και έλεγχος διασποράς των ινών (σβολιάσματος).

Ανάλυση του κύκλου ζωής του οδοστρώματος

Η ΑΚΖ των οδοστρωμάτων επέδειξε το οδόστρωμα με ΙΚΣ το λιγότερο δαπανηρό, παρόλο το υψηλότερο κατασκευαστικό κόστος (Σχήμα 10). Όμως, η συντήρηση του ασφαλτικού οδοστρώματος κυρίως περιλαμβάνει περισσότερες εργασίες, λόγω της αναγκαίας ολικής αποκατάστασης του στα 20 χρόνια. Η περιβαλλοντική επίδραση κατασκευής και συντήρησης των οδοστρωμάτων είναι σημαντικότερη στην περίπτωση του ασφαλτικού οδοστρώματος, όπως υπογραμμίζεται στην ΑΚΖ, λόγω της χρήσης και παραγωγής ασφάλτου. Συγκεκριμένα το οδόστρωμα με ΙΚΣ αναφέρεται ως το τύπο οδοστρώματος με τις μικρότερες περιβαλλοντικές εκπομπές.



Σχήμα 10. Αποτελέσματα ΑΚΚΖ και των περιβαλλοντικών εκπομπών.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το προτεινόμενο οδόστρωμα με ΙΚΣ είναι το λιγότερο δαπανηρό στο κύκλο ζωής του και το πιο περιβαλλοντικά κατάλληλο για την υιοθέτηση του στην σύγχρονη κατασκευαστική βιομηχανία. Επιπλέον η ανακύκλωση ελαστικών που επιτυγχάνεται με τη χρήση των ινών για την κατασκευή του οδοστρώματος, αυξάνει την περιβαλλοντική σημασία για προώθηση του. Οι περιβαλλοντικές εκπομπές είναι αποτέλεσμα κυρίως της παραγωγής των πρώτων υλών και υλικών του οδοστρώματος και της μεταφοράς τους. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, που αποτελεί και το αέριο υπεύθυνο για το φαινόμενο θερμοκηπίου (Global Warming Potential), είναι αποτέλεσμα κυρίως της μεταφοράς των κατασκευαστικών υλικών του οδοστρώματος αλλά και την ενέργεια, ηλεκτρικό ρεύμα ή πετρέλαιο, που καταναλώνεται για τη παραγωγή τους.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αυτή η έρευνα (μέρος του προγράμματος EcoLanes) χρηματοδοτήθηκε από το 6^ο πρόγραμμα-πλαίσιο της ΕΕ, στο πλαίσιο της σύμβασης με αριθμό 031530.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Αγγελακόπουλος Χ., Graeff, Α., Νεοκλέους, Κ. και Πηλακούτας, Κ., «Μηχανική συμπεριφορά και ανθεκτικότητα ινοπλισμένου κυλινδρούμενου σκυροδέματος», 16^ο Πανελλήνιο συνέδριο Σκυροδέματος, 21-23 Οκτωβρίου 2009.

Νεοκλέους, Κ., Πηλακούτας, Κ. και Waldron P., «Σκυρόδεμα οπλισμένο με χαλύβδινες ίνες ανακυκλωμένες από μεταχειρισμένα ελαστικά οχημάτων», 15^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Σκυροδέματος, 25- 27 Οκτωβρίου 2006.

EcoLanes (2008). Economical and sustainable pavement infrastructure for surface transport. EU FP6 STREP project, contract 031530, <http://ecolanes.shef.ac.uk>.

Jafarifar, N., Πηλακούτας, Κ. και Νεοκλέους Κ., «Κατασκευαστική συμπεριφορά οδοστρωμάτων από ινοπλισμένο σκυρόδεμα με χαλύβδινες ίνες», 16^ο Πανελλήνιο συνέδριο Σκυροδέματος, 21-23 Οκτωβρίου 2009.

Johnson, J., RCC pavement provides performance and economy at Denver international airport. Portland Cement Association, (2008) http://www.cement.org/pavements/pv_rcc_DIA.asp.

LetsRecycle, Metal prices, <http://www.letsrecycle.com/prices/metalsPrices.jsp> (2009)

Nanni, A. (1989). Properties and design of fibres reinforced roller compacted concrete. Transportation Research Record, No. 1226, pp 61-68.

Pilakoutas, K., Neocleous, K. and Tlemat, H., “Reuse of steel fibres as concrete reinforcement”, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Engineering Sustainability, Vol. 157, Issue ES3 (2004) 131-138

Zapata P. and Gambatese J.A. (2004). Energy consumption of asphalt and reinforced concrete pavement materials and construction. Journal of Infrastructure Systems, Vol. 11 (1), pp 9-20, 2004.