

## **Κατασκευή οδοστρώματος από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα με υδραυλική κονία που βασίζεται σε ασβεστόχα τέφρα**

**Ιωάννα Παπαγιάννη**

*Καθηγήτρια Α.Π.Θ., [parayian@civil.auth.gr](mailto:parayian@civil.auth.gr)*

**Ελευθέριος Αναστασίου 1**

*Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ., [elan@civil.auth.gr](mailto:elan@civil.auth.gr)*

**Μιχαήλ Παπαχριστοφόρου**

*Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, [parchr@civil.auth.gr](mailto:parchr@civil.auth.gr)*

### **Εισαγωγή**

Στην Ελλάδα η ιπτάμενη τέφρα (Ι.Τ.) είναι ένα παραπροϊόν των εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την καύση λιγνίτη. Παρά τις άφθονες ποσότητες που παράγονται ετησίως, μόνο ένα μικρό ποσοστό αξιοποιείται σε διάφορες εφαρμογές ενώ το υπόλοιπο θάβεται, προκαλώντας σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα. Έχοντας ως στόχο την αύξηση του ποσοστού αξιοποίησης της Ι.Τ., εκδόθηκε ένα Ελληνικό Εθνικό Πρότυπο το 2005 που αφορά τη χρήση της. Οι πιθανές χρήσεις της ασβεστιτικής Ι.Τ. που αναφέρονται σε αυτό το πρότυπο περιλαμβάνουν την κατασκευή δαπέδων από σκυρόδεμα για την παρασκευή των οποίων χρησιμοποιούνται κονίες μεικτού τύπου.

Κονίες μεικτού τύπου ονομάζονται οι κονίες που παράγονται από το συνδυασμό διάφορων λεπτόκοκκων υλικών και αναπτύσσουν τσιμεντοειδής ιδιότητες σε συνδυασμό με το νερό και αντοχή μετά την πήξη και σκλήρυνση. Η ιδέα της αξιοποίησης των δυνατοτήτων των κονιών μεικτού τύπου είναι γνωστή στις κατασκευές από τους προϊστορικούς χρόνους, όπου ποζολάνη προσθέτονταν σε ασβέστη ώστε να αυξηθεί η αντοχή και η αντίσταση στην υγρασία.

Από τον 19<sup>ο</sup> αιώνα μέχρι και σήμερα, το τσιμέντο Portland κυριαρχεί στον κατασκευαστικό τομέα, όμως υπό την πίεση της ανάγκης για οικονομία και βιωσιμότητα, η χρήση κονιών μεικτού τύπου έχει παρουσιάσει αξιοσημείωτη αύξηση, ανεξαρτήτως του τρόπου ενσωμάτωσής τους μέσα στο μίγμα σκυροδέματος, είτε με τη μορφή αλεσμένου τσιμέντου είτε ως ξεχωριστά συστατικά απευθείας μέσα στο μίγμα σκυροδέματος κατά τη διάρκεια της ανάμιξης. Ωστόσο, παγκοσμίως, ένα πολύ μικρό ποσοστό αυτών των εναλλακτικών υλικών (περίπου το 10%) χρησιμοποιείται επωφελώς στις κατασκευές και το έδαφος για την περαιτέρω αξιοποίηση του δυναμικού τους μελλοντικά είναι έφορο (Malhotra, 1999).

Ο τομέας της οδοποιίας μπορεί να απορροφήσει μεγάλες ποσότητες τσιμεντοειδών παραπροϊόντων σε υποβάσεις, βάσεις ή και σε επιφανειακές στρώσεις από σκυρόδεμα. Η πιθανή χρήση Ι.Τ. στην βελτίωση εδαφών έχει επιβεβαιωθεί από πολλούς ερευνητές και εξαρτάται από τον τύπο και την χημική σύσταση της Ι.Τ. (Ferguson, 1993), (Edil, Acosta and Benson, 2006), (ACAA, 2008). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συμπληρωματικό τσιμεντοειδές υλικό σε συνδυασμό με ασβέστη και τσιμέντο ή ως υδραυλική κονία για τη σταθεροποίηση υποβάσεων ή επιχωμάτων και την αύξηση της αδιαπερατότητας σε νερό των εδαφών σε υδραυλικά έργα (Golden, 1999). Από την άλλη πλευρά, το οδόστρωμα από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα (Roller compacting Concrete, RCC) προτείνεται για βιομηχανικά οδοστρώματα, επαρχιακούς δρόμους, εμπορικές περιοχές και αεροδρόμια, κυρίως λόγω του γρήγορου χρόνου κατασκευής χωρίς την απαίτηση ξυλοτύπων και μεταλλικού οπλισμού. Το

κυλινδρούμενο σκυρόδεμα αποτελεί μια οικονομική, υψηλής αντοχής και ανθεκτικότητας λύση. Εκτός αυτού, για την εφαρμογή του απαιτείται μόνο η χρήση ενός τυπικού ασφαλικού διαστρωτήρα με ελάχιστο εργατικό δυναμικό. Η απαιτούμενη αντοχή συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 20 και 35 MPa και το πάχος μετά τη συμπίκνωση από 20 έως 25 cm, ενώ είναι προτιμότερο η σκυροδέτηση να πραγματοποιείται σε μια στρώση για τη αποφυγή δημιουργίας ψυχρού αρμού.

Η χρήση Ι.Τ. ή σκωριών σε οδοστρώματα από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα είναι αρκετά διαδεδομένη σε χώρες όπως ΗΠΑ, Καναδάς, Αυστραλία και υπάρχουν πολλές τεχνικές οδηγίες για την εφαρμογή τους (National Concrete Pavement Technology Center, 2010), (ACI, 2001), (PCA, 2004). Ωστόσο, μια πιλοτική εφαρμογή λαμβάνοντας υπόψη τοπικές παραμέτρους, όπως τις διαθέσιμες κονίες και τις περιβαλλοντικές συνθήκες, είναι απαραίτητη για τον καθορισμό των λεπτομερειών όπως τα σενάρια σκυροδέτησης και συμπίκνωσης. Έτσι, μια βήμα προς βήμα στρατηγική πρέπει να ακολουθηθεί που να περιλαμβάνει:

- Ανάπτυξη της κονίας μεικτού τύπου και αξιολόγηση της ποιότητας της
- Υπολογισμός αναλογιών των υλικών του μίγματος κυλινδρούμενου σκυροδέματος
- Μελέτη ιδιοτήτων σκυροδέματος σε νωπή και σκληρυμένη κατάσταση
- Πιλοτική κατασκευή οδοστρώματος
- Μέτρηση μακροχρόνιας συμπεριφοράς (αντοχή και ανθεκτικότητα σε παγετό)

Τα πλεονεκτήματα του οδοστρώματος από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα που έχουν αναγνωριστεί σε σχέση με το ασφαλικό οδόστρωμα είναι η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και το χαμηλότερο κόστος συντήρησης, καθώς και το μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα που προκύπτει από τις μετρήσεις εκτίμησης του κύκλου ζωής του έργου. Επιπλέον, το κυλινδρούμενο σκυρόδεμα παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή και ανθεκτικότητα σε βαριά κυκλοφορία φορτηγών. Τέτοιου είδους οδοστρώματα προτείνονται για ράμπες και δρόμους όπου κυκλοφορούν φορτηγά σε ζεστό κλίμα. Τα μειονεκτήματα των οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα είναι ο θόρυβος κύλισης λόγω της τραχύτητας της επιφάνειας και η μειωμένη άνεση κύλισης. Υπάρχει φυσικά η δυνατότητα προσθήκης μιας τελικής ασφαλικής στρώσης μικρού πάχους (4-5 cm), αλλά κάποια από τα πλεονεκτήματα όπως η μειωμένες θερμικές εκπομπές και η αντανάκλαση του φωτός χάνονται. Το αρχικό κόστος κατασκευής είναι ελάχιστα υψηλότερο σε σχέση με το ασφαλικό οδόστρωμα, αλλά οι κονίες μεικτού τύπου συνεισφέρουν στη μείωση του κόστους.

Σε αυτό το άρθρο μελετάται η χρήση ιπτάμενης τέφρας σε μεγάλο ποσοστό για την παραγωγή κονίας μεικτού τύπου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κυλινδρούμενο σκυρόδεμα οδοστρωσίας. Η έρευνα αυτή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος ΤΕΦΡΟΔΟΣ 2011-2014 που χρηματοδοτήθηκε από την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας. Οι εταίροι του έργου ήταν η τσιμεντοβιομηχανία TITAN, το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης σαν συντονιστής του έργου. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν περιγράφονται παρακάτω:

### **Ανάπτυξη και αξιολόγηση κονίας μεικτού τύπου**

Η ασβεστιτική Ι.Τ. αποτελεί άνω του 50% της συνολικής ποσότητας ιπτάμενης τέφρας που παράγεται στην Ευρώπη και το σύνολο σχεδόν της ιπτάμενης τέφρας που παράγεται στην Ελλάδα, με την ετήσια παραγωγή να φτάνει τους 8 εκατ. τόνους το 2013. Η χρήση της ασβεστιτικής Ι.Τ. δεν καλύπτεται από

σχετικές προδιαγραφές όπως συμβαίνει με την πυριτική (Feuerborn, Müller and Walter, 2012), ωστόσο σύμφωνα με το πρότυπο EN 13282 - European Standard for Hydraulic Road Binders (EN, 2013), αυτού του είδους η τέφρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή υδραυλικών κονιών μεικτού τύπου. Ως εκ τούτου, ξεκίνησε μια συστηματική μελέτη της ποιότητας της ασβεστιτικής Ι.Τ. που παράγεται στην Ελλάδα. Οι παράμετροι που εστιάστηκε η έρευνα ήταν η περιεκτικότητα  $\text{CaO}_{\text{free}}$ ,  $\text{SO}_3$ , η απώλεια πύρωσης (Loss on ignition) και η λεπτότητα (fineness). Από τα αποτελέσματα αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί Ι.Τ. από το εργοστάσιο του Αγίου Δημητρίου χωρίς καμία επεξεργασία και προεπιλογή. Στη συνέχεια, στην εταιρία ΤΙΤΑΝ παράχθηκαν διάφορα μίγματα κονιάς που αποτελούνταν από τέσσερα συστατικά: Ι.Τ, κλίνκερ, ποζολάνη και ασβεστολιθικό φίλερ. Στα μίγματα αυτά μετρήθηκε η λεπτότητα, ο χρόνος άλεσης, απαίτηση νερού, χρόνος πήξης, σταθερότητα όγκου και θλιπτική αντοχή 2, 7 και 28 ημερών. Τα χαρακτηριστικά των συστατικών των υδραυλικών κονιών δίνονται στον Πίνακα 1, ενώ στον Πίνακα 2 δίνεται η τελική σύνθεση της υδραυλικής κονιάς που επιλέχθηκε με 50% Ι.Τ., 25% κλίνκερ, 12,5% φυσική ποζολάνη και 12,5% ασβεστολιθικό φίλερ. Η άλεση ώστε να επιτευχθεί υψηλή λεπτότητα (υψηλή Blaine τιμή) κρίθηκε απαραίτητη για την ανάπτυξη θλιπτικής αντοχής 28 ημερών 40 MPa στο εργαστήριο, έτσι ώστε στο έργο να επιτευχθεί αντοχή τουλάχιστον 30 MPa. Η απαίτηση νερού της υδραυλικής κονιάς για επίτευξη ικανής συνεκτικότητας ήταν 41,5% και θεωρείται σχετικά υψηλή, αλλά ήταν αναμενόμενη λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας σε Ι.Τ. Ωστόσο, η σταθερότητα όγκου ήταν φυσιολογική χωρίς να παρουσιάζονται προβλήματα.

Πίνακας 1. Χημική ανάλυση και χαρακτηριστικά των συστατικών της υδραυλικής κονιάς

Content/ Property	Τσιμέντο κλίνκερ	Ασβεστιτική Ι.Τ	Ασβεστολιθικό φίλερ	Φυσική ποζολάνη
$\text{SiO}_2$ (%)	21,35	34,40	0,20	63,80
$\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)	5,40	13,60	0,20	18,10
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	3,40	6,10	0,05	4,10
$\text{CaO}$ (%)	65,75	32,80	55,00	2,80
$\text{MgO}$ (%)	1,60	3,80	0,60	1,00
$\text{CaO}_{\text{free}}$ (%)	1,30	6,40	n/a	n/a
$\text{SiO}_2\text{-reactive}$ (%)	n/a*	n/a	n/a	35,00
$\text{SO}_3$ (%)	1,20	6,78	0,00	0,00
L.O.I. (%)	0,00	3,26	44,10	3,20
Insoluble residue (%)	0,00	23,80	0,00	82,80

\*not measured

Πίνακας 2. Ιδιότητες της υδραυλικής κονιάς που παράχθηκε

Physical properties	
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	9550
Fineness (retained at 45 μm)	0,4
Water requirement (%)	41,5
Initial setting time (min)	210
Le Chatelier dilation (mm)	0,0
2-day compressive strength (MPa)	15,9
7-day compressive strength (MPa)	26,3
28-day compressive strength (MPa)	40,1
Chemical properties	
L.O.I. (%)	8,40
SO <sub>3</sub> (%)	3,20
Insoluble residue (%)	26,40
CaO <sub>free</sub> (%)	4,80
Chemical analysis	
SiO <sub>2</sub> (%)	29,90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	12,65
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3,80
CaO (%)	42,90
MgO (%)	2,20

### Μελέτη σύνθεσης και ιδιότητες κυλινδρούμενου σκυροδέματος

Η σύνθεση του κυλινδρούμενου σκυροδέματος βασίστηκε σε συστάσεις από βιβλιογραφικές αναφορές, καθώς και από την εμπειρία του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών Α.Π.Θ. στη χρήση Ι.Τ. στην κατασκευή φραγμάτων και δαπέδων από RCC (Parayianni, 2010). Η κατηγορία σκυροδέματος που επιλέχθηκε για το έργο ήταν C25/30 και ο σχεδιασμός των μιγμάτων βασίστηκε στη φαινόμενη πυκνότητα του σκυροδέματος από τη δοκιμή Vebe, σύμφωνα με το ACI 325.10R-95, και άλλα σχετικά πρότυπα. Επιλέχθηκαν δυο κοκκομετρικές καμπύλες ασβεστολιθικών αδρανών, μια με μέγιστο κόκκο 16 mm και μια με 31,5 mm, όπως φαίνονται στο Σχήμα 1.



Σχ. 1 Κοκκομετρικές καμπύλες ασβεστολιθικών αδρανών με μέγιστο κόκκο 16 και 31.5 mm

Η ποσότητα της νέας υδραυλικής κονιάς που ονομάστηκε «τεφροτσιμέντο» κυμάνθηκε μεταξύ 270 και 300 kg/m<sup>3</sup>. Ο λόγος νερού / κονία επιλέχθηκε να είναι κάτω από 0,50 όταν είναι εφικτό ενώ υπερρυστοποιητής προστέθηκε σε διαφορετικά ποσοστά. Υλοποιήθηκαν δυο σειρές μιγμάτων: Σειρά Α με μέγιστο κόκκο αδρανών 16 mm και Σειρά Β με μέγιστο κόκκο αδρανών 31,5 mm, όπως φαίνεται παρακάτω.

Πίνακας 3. Σειρά Α και Β των εργαστηριακών μιγμάτων

Μίγμα	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
Τεφροτσιμέντο (kg/m <sup>3</sup> )	280	280	280	280	300	270	280	280
Νερό (kg/m <sup>3</sup> )	153	153	196	163	120	135	150	148
Λεπτόκοκκα αδρανή (kg/m <sup>3</sup> )	1096	1096	1096	1096	1096	1096	1096	1096
Χονδρόκοκκα αδρανή (kg/m <sup>3</sup> )	897	897	897	897	897	897	897	897
Μέγιστος κόκκος (mm)	16	16	16	16	31,5	31,5	31,5	31,5
Υπερρυστοποιητής (%κ.β. κονιάς)	0,0%	1,0%	1,0%	0,0%	1,0%	1,0%	1,0%	0,5%
w/cem	0,54	0,54	0,70	0,58	0,40	0,50	0,54	0,53
Vebe time (s)	-	-	20	60	8	9	60	35
Vebe density (kg/m <sup>3</sup> )	2427	2396	2428	2410	2396	-	2389	2404
Electrical hammer density (kg/m <sup>3</sup> )	2480	2355	2446	2447	-	-	2408	2478
7-d compressive strength (MPa)	33,5	28,3	22,4	32,4	-	22,0	28,6	31,1
28-d compressive strength (MPa)	43,8	35,7	30,9	46,0	35,4	35,3	37,5	42,3

Με βάση τα αποτελέσματα του Πίνακα 3, αποφασίστηκε ότι η ποσότητα της κονιάς στα 280 kg/m<sup>3</sup> είναι αρκετή για τα επίπεδα αντοχής που απαιτούνται. Έτσι, οι επόμενες δοκιμαστικές συνθέσεις σκυροδετήθηκαν με τη συγκεκριμένη ποσότητα τεφροτσιμέντου. Κατά τη παραγωγή των μιγμάτων στο εργαστήριο παρατηρήθηκε ότι ο χρόνος πήξης ήταν σχετικά μικρός και ότι ο χρόνος Vebe θα έπρεπε να μετρηθεί και μετά από κάποιο χρονικό διάστημα ώστε να ληφθεί υπόψη ο χρόνος μεταφοράς του σκυροδέματος στο έργο. Έτσι, ο χρόνος Vebe μετρήθηκε στα χρονικά διαστήματα t = 0' και t = 30' μετά από την προσθήκη νερού στο μίγμα σε μια νέα σειρά δοκιμαστικών μιγμάτων. Επίσης, μετρήθηκε η πυκνότητα Vebe η οποία συγκρίθηκε με την πυκνότητα που προκύπτει μετά από συμπίκνωση δοκιμίου με ηλεκτρική σφύρα (Πίνακας 4). Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, οι τιμές της φαινόμενης πυκνότητας που μετρήθηκε με τις δυο διαφορετικές μεθόδους είναι παρόμοιες.

Πίνακας 4. Νέες σειρές εργαστηριακών μιγμάτων Α και Β όπου λήφθηκε υπόψη ο χρόνος μεταφοράς του σκυροδέματος στο έργο

Μίγμα	A5	A6	B5	B6
Τεφροτσιμέντο (kg/m <sup>3</sup> )	280	280	280	280
Νερό (kg/m <sup>3</sup> )	148	148	159	148
Λεπτόκοκκα αδρανή (kg/m <sup>3</sup> )	1096	1095,8	1095,8	1096
Χονδρόκοκκα αδρανή (kg/m <sup>3</sup> )	912,6	912,6	629,2	629,2
Μέγιστη διάμετρος κόκκων (mm)	16	16	31,5	31,5
Υπερρυστοποιητής (%κ.β. κονιάς)	0.0%	0.5%	1.0%	0.0%
Λόγος N/T	0,53	0,53	0,57	0,53
Vebe time (s), t=0'	60	40	12	50
Vebe time (s), t=30'	100	80	30	80
Vebe density (kg/m <sup>3</sup> ), t=0'	2385	2313	2430	2447
Vebe density (kg/m <sup>3</sup> ), t=30'	2420	2410	2415	2400
Electrical hammer density (kg/m <sup>3</sup> ), t=0'	2474	2505	2466	2490
7-d compressive strength (MPa)	31,4	30,7	25,5	33,7



28-d compressive strength (MPa)	45,6	43,4	37,9	49,3
---------------------------------	------	------	------	------

### Πιλοτική κατασκευή οδοστρώματος και μετρήσεις μακροχρόνιας αντοχής

Στην Ελλάδα δεν υπάρχει μεγάλη εμπειρία στην κατασκευή οδοστρώματων από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα. Για τον καθορισμό των λεπτομερειών της κατασκευής με τη χρήση εξοπλισμού που χρησιμοποιείται σε συνήθη ασφαλτικά οδοστρώματα, πραγματοποιήθηκε πιλοτική κατασκευή οδοστρώματος από σκυρόδεμα σε τμήμα βοηθητικού (αγροτικής χρήσης) δρόμου της Εθνικής Οδού Θεσσαλονίκης-Σερρών. Στο μισό τμήμα του δρόμου (500 μ) χρησιμοποιήθηκαν συμβατικά ασβεστολιθικά αδρανή και στο υπόλοιπο σκωριοαδρανή. Υλοποιήθηκαν οι συνθέσεις σκυροδέματος που αναπτύχθηκαν στο εργαστήριο και πιο συγκεκριμένα η Α6, με το χονδρόκοκκο ασβεστολιθικό κλάσμα να αντικαθίσταται από σκωριοαδρανή, και η Β4 με ασβεστολιθικά αδρανή. Και στις δυο συνθέσεις προστέθηκε υπερρρευστοποιητής Chemium 174 σε ποσοστό 0,6 έως 1% κ.β. κονιάς.

Το εργοστάσιο παραγωγής σκυροδέματος βρισκόταν σε απόσταση 30 λεπτών από το έργο και για τη μεταφορά του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν ανατρεπόμενα φορτηγά με κάλυψη της καρότσας που έριχναν το σκυρόδεμα στον διαστρωτήρα (Σχήμα 2). Από προηγούμενη πιλοτική εφαρμογή κατασκευής οδοστρώματος από σκυρόδεμα είχε επισημανθεί ότι η συνεχής και σταθερή τροφοδοσία του διαστρωτήρα ήταν κρίσιμος παράγοντας για το συγκεκριμένο τύπο σκυροδέματος με ασβεστολιθική Ι.Τ., λόγω του μικρού χρόνου πήξης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, η καθυστέρηση της άφιξης του σκυροδέματος είχε προκαλέσει δυσκολίες στο ξεφόρτωμα από το φορτηγό στον διαστρωτήρα. Το επίπεδο συμπίκνωσης που επιτεύχθηκε από τον διαστρωτήρα και από τα περάσματα που έκανε ο οδοστρωτήρας, μετρήθηκε με πυρηνικό μετρητή (Humboldt nuclear gauge), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4. Τα αποτελέσματα από αυτές τις μετρήσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.



Σχ. 2 Τροφοδοσία του σκυροδέματος από το φορτηγό στον διαστρωτήρα (paver) και διάστρωση του δρόμου



Σχ. 3 Το νωπό σκυρόδεμα έχει κολλήσει στο φορτηγό λόγω καθυστέρησης στη μεταφορά



Σχ. 4 Μέτρηση της πυκνότητας του νωπού σκυροδέματος με το Humbolt

Πίνακας 5. Μετρήσεις συμπίκνωσης του νωπού σκυροδέματος RCC από το Humbolt (εκφρασμένες ως % της πυκνότητας Vebe)

Βάθος	αμέσως μετά το paver	μετά τη συμπίκνωση με οδοστρωτήρα
5 cm	81,8%	90,4%
10 cm	81,2%	91,3%
15 cm	81,0%	90,6%
20 cm	79,7%	89,3%
Μέσο πάχος οδοστρώματος (cm)	-	22,1

Επίσης προέκυψε ότι ένα αποτελεσματικό σενάριο συμπίκνωσης ήταν 3 διελεύσεις χωρίς δόνηση με 4 τόνο οδοστρωτήρα και στη συνέχεια 2 διελεύσεις με δόνηση με 10 τόνο οδοστρωτήρα (Σχήμα 5). Με τον διαθέσιμο διαστρωτήρα η συμπίκνωση που επιτεύχθηκε δεν ξεπέρασε το 80% της μέγιστης πυκνότητας. Επιπλέον, το μέγιστο πάχος μιας στρώσης μετά τη συμπίκνωση ήταν κάτω από 20 cm. Αφού το σκυρόδεμα είχε σκληρυνθεί, διαμορφώθηκαν αρμοί συστολής ανά 5.5-6.0 m με τροχό σε βάθος που αντιστοιχεί στο 1/4 με 1/3 του πάχους του δρόμου (Σχήμα 6). Για την συντήρηση του σκυροδέματος εφαρμόστηκε ψεκασμός με νερό.



Σχ. 5 Συμπύκνωση οδοστρώματος με οδοστρωτήρα



Σχ. 6 Δημιουργία αρμού με τροχό

### Μετρήσεις μακροχρόνιας αντοχής

Δυο μήνες μετά την κατασκευή 1 km δρόμου από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα, πραγματοποιήθηκε πυρηνοληψία (Σχήμα 7) και μετρήθηκε η πυκνότητα και η αντοχή του σκυροδέματος (Πίνακας 6). Επίσης, η αντίσταση σε παγετό μετρήθηκε υποβάλλοντας τα δοκίμια σε κύκλους ψύξης-απόψυξης από -25°C έως 20°C. Μετά από 50 κύκλους παρουσιάστηκε μέση απώλεια υλικού 8%, ενώ το συμβατικό σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25 που χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά είχε απώλεια υλικού 5%.



Σχ. 7 Πυρηνοληψία

Πίνακας 6. Μηχανικές ιδιότητες πυρήνων που ελήφθησαν από διαφορετικά σημεία του δρόμου (μέσος αριθμός 6 πυρήνων ανά σημείο)

Τμήμα δρόμου	Με	Με	Με
	ασβεστολιθικά αδρανή	ασβεστολιθικά αδρανή	χονδρόκοκκα σκωριοαδρανή
pulse velocity u (m/sec)	4625	5022	4713
Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	2295	2394	2345
Θλιπτική αντοχή $f_c$ (MPa)	25,0	32,0	31,8

### Συμπεράσματα

Η ασβεστιτική ιπτάμενη τέφρα χωρίς καμία διαδικασία προεπιλογής χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή μεικτού τύπου υδραυλικής κονιάς για την παραγωγή σκυροδέματος οδοστρωσίας, σύμφωνα με το πρότυπο EN 13282. Η κονία αυτή αποτελείται από 50% Ι.Τ., 25% κλίνκερ, 12,5% φυσική ποζολάνη και 12,5% ασβεστολιθικό φίλερ και μπορεί να αναπτύξει αντοχή 28 ημερών 20-30 MPa. Το επίπεδο αυτό της αντοχής είναι επαρκές για οδόστρωμα ενώ φάνηκε ότι η κατασκευή ενός τέτοιου έργου είναι εφικτή και τα τεχνικά προβλήματα που εμφανίζονται μπορούν να αντιμετωπιστούν. Η μακροχρόνια αντοχή και ανθεκτικότητα ήταν επαρκής ώστε να εξασφαλιστεί η μεγάλη διάρκεια ζωής του έργου.

Επίσης, η ενσωμάτωση χαμηλού κόστους βιομηχανικών παραπροϊόντων στην υδραυλική κονία συνεισφέρει στο να μειώνεται το αρχικό κόστος του οδοστρώματος από σκυρόδεμα, αποδίδοντας σε αυτή την βιώσιμη εναλλακτική και χαρακτηριστικά οικονομίας.

### Βιβλιογραφία

ACAA, (2008), “Soil Stabilization and Pavement Recycling with Self Cementing Coal Fly ash”, Education Foundation ACAA, 2008, pp 1-58.



ACI 325.10R-95 (2001). "State-of-the-art report on roller-compacted concrete pavements". *ACI Manual of Concrete Practice*, ACI, USA.

Edil, T.B., Acosta, H., Benson, C.H., (2006), "Stabilizing fine grained soils with fly ash", *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 18 (2) 283-294.

EN 13282-2, (2013), "Hydraulic road binders – Part 2: Composition, specifications and conformity criteria of normal hardening hydraulic road binders", CEN.

Ferguson, G., (1993), "Use of Self Cementious Fly Ashes as a Soil Stabilization Agent", *ASCE Geotechnical Special Publication*, 36:ASCE.

Feuerborn, H.-J., Müller, B., Walter, E., (2012), "Use of Calcareous Fly Ash in Germany". *Proceedings of the International Conference Eurocoalash 2012*, Thessaloniki, Greece, September 25-27, 2012.

Golden, D., (1999), "Expanding Coal ash Utilization in Concrete Construction", *Proc. Of Conf. Concrete Technology for Sustainable Development in the Twenty-First Century*, Hyderabad, India, 9-11Feb 1999, Editor P.K. Mehta, pp 97-125.

Malhotra, V. M., (1999), "Making concrete" greener" with fly ash". *Concrete International*, 21(5)

National Concrete Pavement Technology Center (2010). "Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements". Iowa State University and Portland Cement Association, USA.

Papayianni, I., (2010), "Use of calcareous ash in civil engineering". *Proceedings of the International Conference Eurocoalash 2010*, Copenhagen, Denmark, May 27-28, 2010.

PCA (2004). "Guide Specification for Construction of Roller-Compacted Concrete Pavements", *Portland Cement Association*, Illinois, USA.