

## **ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΣΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

**Ι. Παπαγιάννη, Ε. Αναστασίου**

*Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αποτελεί ένα σύγχρονο υλικό που βρίσκει εφαρμογή κυρίως στην κατασκευή σηράγγων και στην επισκευή υφιστάμενων κατασκευών σκυροδέματος. Αποτελεί ένα τεχνολογικό επίτευγμα στο χώρο της δόμησης καθώς συνδυάζει τεχνική εκτόξευσης και πρόσμικτα με τα συμβατικά υλικά του σκυροδέματος, και επιτρέπει εφαρμογές όπου απαιτείται ταχεία ανάπτυξη αντοχής ή εφαρμογές που δεν μπορούν να αντιμετωπισθούν με το συμβατικό σκυρόδεμα. Όσον αφορά τα συστατικά του, είναι ένα σκυρόδεμα ιδιαίτερα πλούσιο σε τσιμέντο και μάλιστα τσιμέντο υψηλής καθαρότητας σε clinker Portland και μεγάλης λεπτότητας, όπως τα I42,5 και I52,5. Παράλληλα με το τσιμέντο χρησιμοποιούνται, ανάλογα με την απαιτούμενη πρώιμη αντοχή, πρόσθετα υλικά πουζολανικής δράσης για λόγους οικονομίας, καλύτερης αντοχής και μεγαλύτερης ανθεκτικότητας του αναμίγματος. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εργαστηριακής έρευνας όπου το τσιμέντο Portland αντικαταστάθηκε σε μικρά ποσοστά με βιομηχανικά παραπροϊόντα, όπως είναι η ιπτάμενη τέφρα και η σκωρία κάδου.

*Λέξεις κλειδιά: εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, πουζολανικά υλικά, ιπτάμενη τέφρα, σκωρία κάδου.*

# USE OF SUPPLEMENTARY CEMENTING MATERIALS FOR THE PRODUCTION OF SHOTCRETE

**I. Papayianni, E. Anastasiou**

*Laboratory of Building Materials, Aristotle University of Thessaloniki.*

**ABSTRACT:** Shotcrete is a common technique used mainly for tunneling and repair of concrete structures. It is an important technological achievement in construction as it combines spraying techniques and admixtures along with traditional concrete constituents, and allows for applications requiring rapid strength development or for applications where conventional concrete is not suitable. Regarding its ingredients, shotcrete is rich in cement –a cement with high Portland clinker content and fineness, usually types CEM I42,5 or CEM I52,5. Depending on the required early strength, pozzolanic supplementary cementing materials are used along with cement for reasons of economy, improved strength, and durability of the mixture. In this report are presented the results of an experimental research where Portland cement was substituted in small percentages by industrial by-products, like high calcium fly ash and ladle furnace slag.

*Keywords: shotcrete, supplementary cementing materials, fly ash, ladle furnace slag*

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete, sprayed concrete, gunit) αναφέρεται ένα πλούσιο σε κονία σκυρόδεμα με λεπτόκοκκα κυρίως αδρανή, το οποίο εφαρμόζεται με την τεχνική της εκτόξευσης υπό πίεση. Στα έργα χρησιμοποιείται κυρίως στην κατασκευή σηράγγων και ως επισκευαστικό υλικό. Εμφανίστηκε ως τεχνική στις αρχές του αιώνα (Carl Akeley, 1910) και αναπτύχθηκε ταχέως και ως προς την τεχνική (dry-mix και wet-mix shotcrete) και ως προς τα πρόσθετα υλικά που ενσωματώθηκαν για βελτίωση της επιτελεστικότητάς του. Ήδη στη δεκαετία του 80, στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ενσωματώνονται, ανάλογα με τις ειδικές απαιτήσεις του έργου, ίνες χάλυβα ή ίνες πολυπροπυλενίου, πουζολανικά υλικά όπως τέφρα, πυριτική κονία και χρησιμοποιούνται υψηλής αρχικής αντοχής τσιμέντα [1], [2]. Στον ελληνικό χώρο η χρήση της υγρής μεθόδου εφαρμογής εκτοξευόμενου εξεπλώνεται ευρύτερα μετά από την εμπειρία από την κατασκευή του μετρό στην Αθήνα. Η αυξανόμενη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στα έργα υποδομής επέβαλε τη σύνταξη κανονισμών. Ως κανονιστικό πλαίσιο για τη χρήση του υπάρχουν οι κανονισμοί της επιτροπής EFNARC 1996 [3], καθώς και το Σχέδιο Προδιαγραφής για Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα [4].

Τα οφέλη από τη χρήση συμπληρωματικών του τσιμέντου υλικών όπως είναι τα βιομηχανικά παραπροϊόντα με πουζολανική δραστηριότητα έχουν επισημανθεί σε διεθνές επίπεδο από πολλούς ερευνητές [5], κυρίως λόγω της οικονομίας που προκύπτει, της βελτίωσης της ανθεκτικότητας στο χρόνο και, γενικότερα, του περιβαλλοντικού οφέλους από την απορρόφηση των παραπροϊόντων επωφελώς.

Στον ελληνικό χώρο υπάρχουν πουζολανικά υλικά φυσικής προέλευσης, όπως είναι η μηλαϊκή γη, και βιομηχανικά παραπροϊόντα με πουζολανική δράση, όπως είναι οι ιπτάμενες τέφρες και η σκωρία κάδου υψικαμίνων παραγωγής χάλυβα. Στην εργασία αυτή έγινε εργαστηριακή έρευνα συνδυασμού των ελληνικών πουζολανικών υλικών ως συμπληρωματικών του τσιμέντου σε αναμίγματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Η εργασία αυτή εντάσσεται στην ερευνητική δραστηριότητα του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών του Α.Π.Θ., έδρα της εταιρείας ΕΒΙΠΑΡ, για την αξιοποίηση των βιομηχανικών παραπροϊόντων και εμπίπτει στους στόχους της εταιρείας. Στη διεξαγωγή του πειραματικού μέρους έχει συνεισφέρει ο φοιτητής του Πανεπιστημίου της Brescia Federico Orizio, που εργάστηκε την περίοδο Μάρτιος-Σεπτέμβριος 2005 στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών, στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού Προγράμματος Ανταλλαγής Φοιτητών Erasmus.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν:

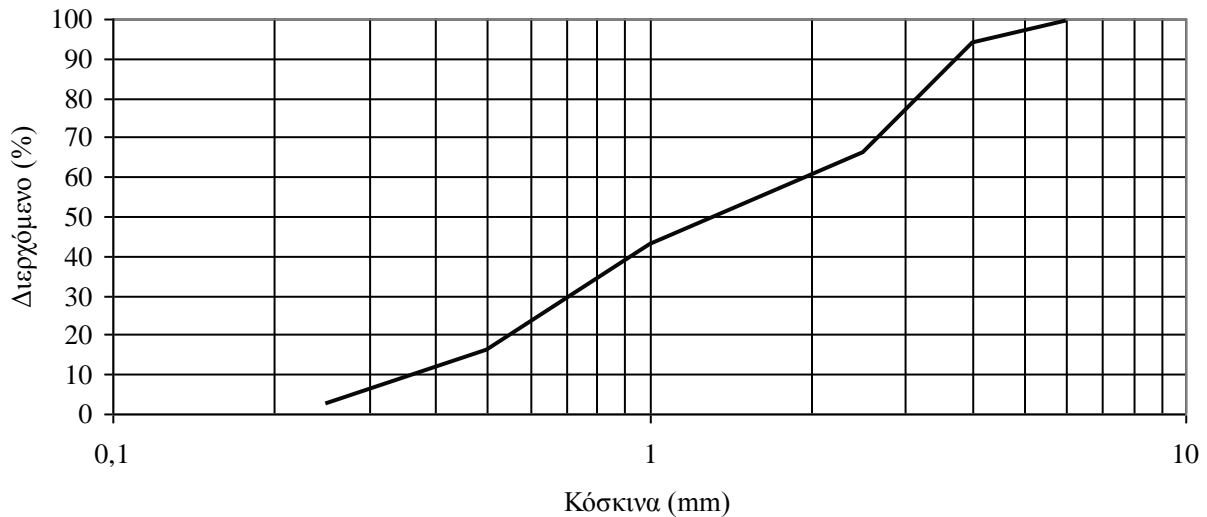
- Τσιμέντο Portland τύπου CEM I42,5 και τύπου CEM IV32,5 με 35% συναλεσμένη ιπτάμενη τέφρα (TITAN)
- Ιπτάμενη τέφρα περιοχής Πτολεμαΐδας αλεσμένη (ΔΕΗ)
- Σκωρία κάδου χαλυβουργίας αλεσμένη (ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε.)
- Μηλαϊκή γη αλεσμένη (ΚΟΥΡΑΣΑΝΙΤ)
- Ρευστοποιητής Rheobuild 1-2 (Degussa)
- Αδρανές υλικό: ποτάμια άμμος 0-4mm περιοχής Αξιού

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά Πουζολανικών Υλικών

Υλικό	Ιπτάμενη τέφρα	Σκωρία κάδου	Μηλαϊκή γη
Συγκρ. στο κόσκινό 45μm	19%	21%	10%
Φαιν. ειδική πυκνότητα	2,40	2,59	2,22
<u>Χημική σύσταση</u>	(%)	(%)	(%)
SiO <sub>2</sub>	26,0	26,1	68,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,6	4,6	15,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,6	1,5	1,5
CaO	42,1	55,7	1,4
MgO	1,5	4,3	1,0
SO <sub>3</sub>	4,6	2,3	0,4
Na <sub>2</sub> O	0,2	0,9	1,8
K <sub>2</sub> O	0,8	0,2	3,0
Αδιάλυτο υπόλειμμα	21,5	-	-
Απώλεια πύρωσης	4,6	3,2	5,6

Τα χαρακτηριστικά της ιπτάμενης τέφρας, της σκωρίας κάδου και της φυσικής πουζολάνης δίνονται στον Πίνακα 1. Η κοκκομετρία της άμμου στο Διάγραμμα 1.

Σε προηγούμενη σχετική εργασία [6], σε συνεργασία με την εταιρεία Α.Τ.Ε.Β.Ε.-ΘΕΜΕΛΙΟΔΟΜΗ, καθορίστηκε –με συσχετισμό στο έργο μέτρου εξάπλωσης και εκτοξευτικότητας– το επίπεδο ρευστότητας ενός αναμίγματος ώστε να είναι κατάλληλο για εκτόξευση και βρέθηκε ότι η απαιτούμενη εξάπλωση του μίγματος (μέτρο εξάπλωσης) πρέπει να είναι 44-45 cm. Τα αναμίγματα κονιών που ελέγχθηκαν με την ανάλογη ποσότητα άμμου και νερού για 44 cm εξάπλωση φαίνονται στον Πίνακα 2.



Διάγραμμα 1. Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου

Πίνακας 2. Συνθέσεις αναμιγμάτων για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

α/α	Σύνολο κονίας (kg/m <sup>3</sup> )	Τσιμέντο CEMI42,5 (kg)	Τσιμέντο CEMIV32,5 (kg)	Ιπτάμενη Τέφρα (kg)	Σκωρία κάδου (kg)	Μηλαϊκή γη (kg)	Άμμος (kg)	Νερό* (kg)	Ρευστ. (kg)
1	450	450	-	-	-	-	1635	225	4,5
2	450	-	450	-	-	-	1635	225	4,5
3	432	216 (50%)	-	86,5 (20%)	86,5 (20%)	43,4 (10%)	1583	225	5,5
4	574	287 (50%)	-	114 (20%)	114 (20%)	57,4 (10%)	1126	325	9,5
5	507	205 (40%)	-	152,5 (30%)	94,5 (20%)	50,9 (10%)	1340	275	7,7
6	574	228 (40%)	-	172 (30%)	114,9 (20%)	57,5 (10%)	1055	325	9,7
7	568	284 (50%)	-	-	113,7 (20%)	170,7 (30%)	1055	375	8,25
8	503	251,5 (50%)	-	-	100,6 (20%)	150,8 (30%)	1055	275	8,25
9	579	-	-	347,6 (60%)	115,8 (20%)	115,8 (20%)	1366	275	8,25

\* απαιτούμενο νερό για εξάπλωση 44-45 cm

Στην εργαστηριακή αυτή έρευνα δεν έχουν χρησιμοποιηθεί επιταχυντές που προστίθενται στο ανάμιγμα που εκτοξεύεται στο έργο. Εν τούτοις, η συμβατότητα των πουζολανικών υλικών με τα πρόσμικτα αυτά έχει ελεγχθεί σε προηγούμενη εργασία [6].

Παρασκευάστηκαν κυβικά δοκίμια 15x15x15cm, κυλινδρικά 15x30cm και πρισματικά 10x10x40cm. Όλα τα δοκίμια συντηρήθηκαν κατάλληλα σε θάλαμο για 28 ημέρες. Στη συνέχεια έγινε θραύση των δοκιμίων σε θλίψη, κάμψη, εφελκυσμό από διάρρηξη και μετρήθηκε το στατικό μέτρο ελαστικότητας από τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των μηχανικών χαρακτηριστικών φαίνονται στον Πίνακα 3 και στα Διαγράμματα 2-9.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μπορεί να λεχθεί:

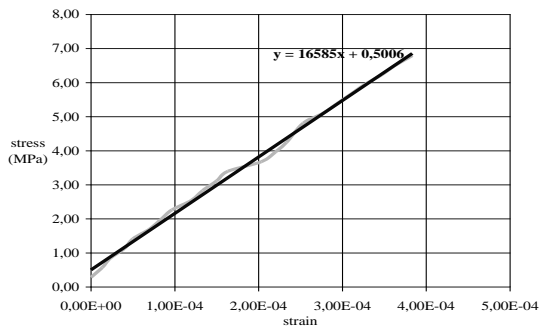
1. Υψηλότερη αντοχή αναπτύσσεται στις 28 ημέρες στο ανάμιγμα σκυροδέματος με καθαρό τσιμέντο CEM I42,5
2. Ο συνδυασμός 50-20-20-10 ή 40-30-20-10 τσιμέντου-τέφρας-σκωρίας-μηλαϊκής γης αποδίδει στις 28 ημέρες το 75-79% του αντίστοιχου αναμίγματος με CEM I42,5
3. Το τσιμέντο CEM IV32,5 ανέπτυξε σε 28 ημέρες το 55,3% της αντοχής του αντίστοιχου CEM I42,5
4. Ο συνδυασμός 50-20-30 τσιμέντου-σκωρίας-μηλαϊκής γης ανέπτυξε στις 28 ημέρες το 38% του αντίστοιχου με CEM I42,5

Θα πρέπει να σχολιασθεί βέβαια ότι λόγω της πουζολανικότητας των πρόσθετων υλικών, σε όλες τις συνθέσεις εκτός της 1 αναμένεται μεγαλύτερος ρυθμός αύξησης της αντοχής, κάτι που αποτελεί και ένα από τα πλεονεκτήματα των υλικών αυτών.

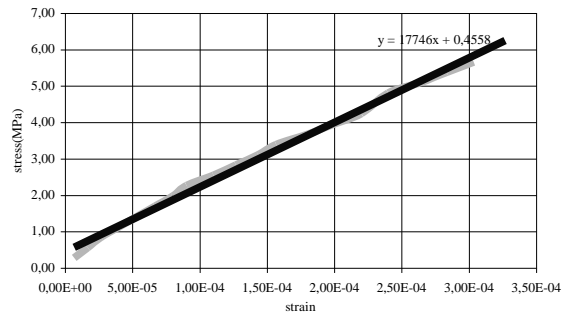
Είναι επίσης φανερό ότι για απαιτήσεις αντοχής εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατηγορίας 8/10 ή 12/15 μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συμπληρωματικά υλικά οι ιπτάμενες τέφρες και η σκωρία ή οι συνδυασμοί των υλικών, τα οποία είναι δυνατόν να αντικαταστήσουν έως το 50% του τσιμέντου CEM I42,5 είτε με συνάλεση, είτε με προσθήκη στον αναμικτήρα.

Πίνακας 3. Μηχανικά χαρακτηριστικά συνθέσεων

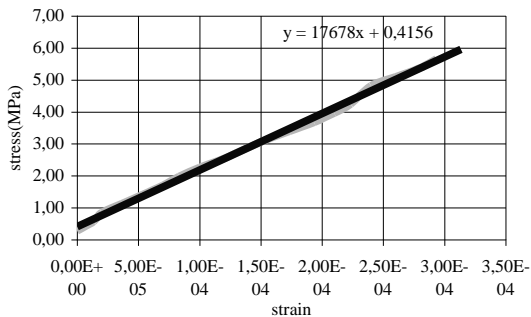
Κονία	$E_{στ}$ (GPa)	Αντοχή σε θλίψη (MPa)	Αντοχή σε διάρρηξη (MPa)	Αντοχή σε κάμψη (MPa)	Λόγος N/K	Εξάπλωση (cm)
450kg/m <sup>3</sup> CEMI 42,5	16,585	22,510	1,690	3,550	0,54	44
450kg/m <sup>3</sup> CEMI titan	17,746	12,435	1,240	2,710	0,54	44
~450kg/m <sup>3</sup> 50% cement, 20% fly ash 20% slag, 10% pozz.	10,096	14,185	0,849	2,370	0,57	44
~575kg/m <sup>3</sup> 50% cement, 20% fly ash 20% slag, 10% pozz	17,678	17,845	1,225	3,700	0,52	44
~500kg/m <sup>3</sup> 40% cement, 30% fly ash 20% slag, 10% pozz	15,158	16,405	1,230	2,330	0,53	45
~575kg/m <sup>3</sup> 40% cement, 20% fly ash 20% slag, 10% pozz	16,275	17,080	1,255	2,710	0,52	45
~575kg/m <sup>3</sup> 50% cement, 20% slag 30% pozz	14,121	15,360	1,350	3,660	0,54	45
~500kg/m <sup>3</sup> 50% cement, 20% slag 30% pozz	13,649	14,515	1,250	3,150	0,55	45
~575kg/m <sup>3</sup> 60% fly ash, 20% slag 20% pozz	10,231	8,750	0,640	2,070	0,56	42,5



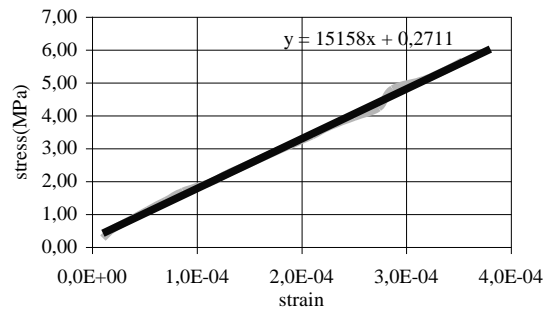
Διάγραμμα 2. Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων 1<sup>ης</sup> σύνθεσης



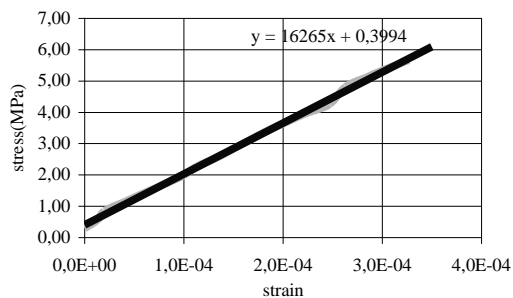
Διάγραμμα 3. Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων 2<sup>ης</sup> σύνθεσης



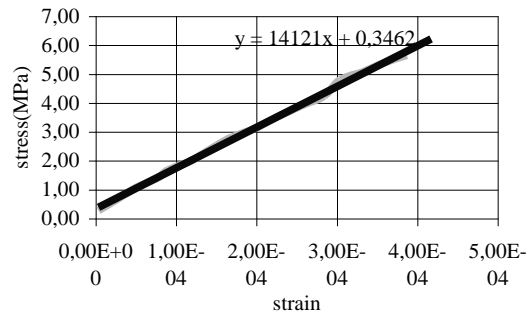
Διάγραμμα 4. Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων 4<sup>ης</sup> σύνθεσης



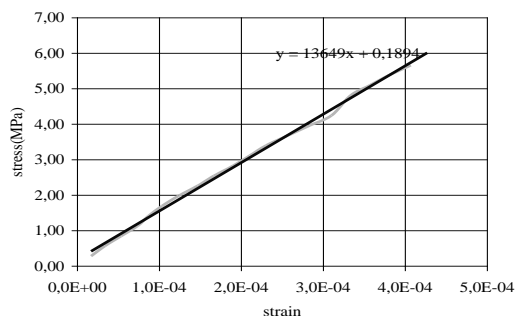
Διάγραμμα 5. Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων 5<sup>ης</sup> σύνθεσης



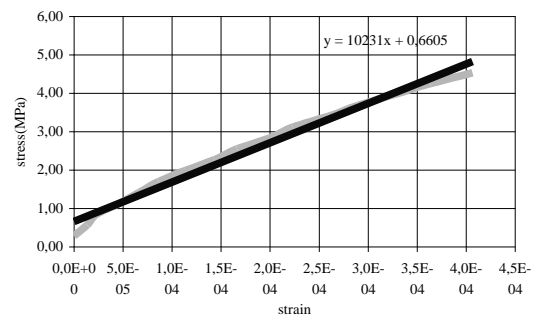
Διάγραμμα 6. Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων 6<sup>ης</sup> σύνθεσης



Διάγραμμα 7. Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων 7<sup>ης</sup> σύνθεσης



Διάγραμμα 8. Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων 8<sup>ης</sup> σύνθεσης



Διάγραμμα 9. Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων 9<sup>ης</sup> σύνθεσης

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Morgan D.R. 'Use of Supplementary Cementing Materials in Shotcrete' in Ryan W.G. ed. *Proc. of the Int. Workshop on the Use of Fly Ash, Slag and Silica Fume and other Siliceous Materials in Concrete* Concrete Institute of Australia, Sydney (1998) 403-432.
- [2] ACI 506R-90 Guide to Shotcrete.
- [3] EFNARC. 'Specification for sprayed concrete: Guidelines for specifiers and contractors', 1999.
- [4] ΥΠΕΧΩΔΕ / ΓΓΔΕ / ΓΔΠΔΕ / ΔΚΕΔΕ: 'Σχέδιο Προδιαγραφών για το Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα' Ενημερωτικό Δελτίο ΤΕΕ, 2114, 28-8-2000.
- [5] Kim Y.Y. et al 'Mechanical Performance of sprayed engineered cementitious composite using wet-mix shotcrete process for repair applications', *ACI Materials* **101** (2004) 42-49.
- [6] Α.Π.Θ. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Φ. Λυτόπουλος – Β. Φανός 'Χρήση Ιπτάμενης Τέφρας στην Παραγωγή Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος' Διπλωματική Εργασία, Θεσσαλονίκη (2002).