

## **ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΕΦΡΑ ΑΝΑΚΥΚΛΟΥΜΕΝΟΥ ΧΑΡΤΙΟΥ**

Γ. Συγγούνας

*Πολιτικός Μηχανικός. Υποψήφιος Διδάκτωρ Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης  
Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων*

Θ.Ε. Ματίκας

*Αν. Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων*

*Λέξεις κλειδιά:* Σκυρόδεμα από ανακυκλώσιμα υλικά, σκωρία υψικαμίνου, τέφρα ανακυκλούμενου χαρτιού

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Η παρούσα εργασία παρουσιάζει την δημιουργία σκυροδέματος αποτελούμενου από διαφορετικές αναλογίες ανακυκλωμένων υλικών. Η μέθοδος που εξετάζεται είναι η ποσοτική αφαίρεση του τσιμέντου πόρτλαντ (PC) στο σκυρόδεμα και η αντικατάστασή του με ισόποση ποσότητα ανακυκλωμένων υλικών. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία του σκυροδέματος είναι το τσιμέντο πορτλαντ, σκωρία υψικαμίνων (Ground Granulated Blastfurnace Slag, GGBS), τέφρα ανακυκλωμένου χαρτιού (Wastepaper Sludge Ash, WSA), χοντρόκοκκα και λεπτόκοκκα αδρανή και νερό. Το σκυρόδεμα παρασκευάστηκε χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικές αναλογίες νερού/συνδετικού υλικού ίσες με 0,5, 0,4 και 0,35. Για κάθε τύπο σκυροδέματος δημιουργήθηκαν τρία κυβικά δοκίμια διαστάσεων (150 mm x 150 mm x 150 mm) στα οποία εξετάστηκε η αντοχή τους σε θλίψη σε ηλικία 7 ημερών σε δεξαμενή νερού. Σε ηλικία 28 ημερών στην δεξαμενή νερού σε τρία κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων (ύψος 300 mm και διάμετρος 150 mm) δοκιμάστηκε η εφελκυστική τους αντοχή σε διάρρηξη και σε τρία δοκίμια των ίδιων διαστάσεων εξετάστηκε το στατικό μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή τους σε θλίψη. Η εργασιμότητα μέσω της δοκιμής κάθισης και η κορεσμένη πυκνότητα είναι δυο ιδιότητες του σκυροδέματος που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

### **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Το τσιμέντο αποτελεί το πιο διαδεδομένο και εύχρηστο δομικό υλικό στον κόσμο. Η παρασκευή, όμως του τσιμέντου είναι μια διαδικασία ρυπογόνος και απαιτεί μεγάλο κόστος και απώλεια σε ενέργεια. Σύμφωνα με τον Έτησιο Απολογισμό

Ενέργειας και Περιβάλλοντος, το 2001, η βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου είναι υπεύθυνη για το 5% της παγκόσμιας εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Στόχος αυτής της έρευνας ήταν η μείωση της χρήσης του τσιμέντου στο σκυρόδεμα και η αντικατάστασή του με ανακυκλωμένα υλικά.

Έρευνες που είχαν ως αντικείμενο τη χρήση του WSA στο σκυρόδεμα στο πανεπιστήμιο Glamorgan της Ουαλίας συμπεραίνουν ότι η χρήση του WSA από μόνο του στο σκυρόδεμα ως μοναδικό συνδετικό υλικό δεν είναι εφικτή. Για τη δημιουργία συνδετικού ιστού στο σκυρόδεμα με τη χρήση του WSA χρειαζόνταν η προσθήκη μεγάλης ποσότητας νερού. Η λύση δόθηκε με την προσθήκη άλλων συνδετικών υλικών όπως GGBS, PFA και Πόρτλαντ τσιμέντο (CEM I/42,5N) και ταυτόχρονα με την ισόποση αφαίρεση ποσότητας WSA για τη μείωση της απαίτησης σε νερό του παραγόμενου σκυροδέματος

## 2. ΥΛΙΚΑ

Η φύση και οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρασκευή του σκυροδέματος παρουσιάζονται αναλυτικά στο συγκεκριμένο κεφάλαιο. Τα υλικά αυτά είναι το τσιμέντο πορτλαντ (PC), σκωρία υψικαμίνου (GGBS), τέφρα από την παραγωγή ανακυκλωμένου χαρτιού (WSA), χοντρόκοκκα και λεπτόκοκκα αδρανή και νερό.

### 2.1 Τσιμέντο Πόρτλαντ (PC)

Το τσιμέντο πορτλαντ που χρησιμοποιήθηκε είναι χρώματος γκρι και το φαινόμενο ειδικό βάρος του είναι 3,15. Η ορυκτολογική και χημική του σύνθεση παρουσιάζεται στον πίνακα 1. Ο τύπος του τσιμέντου πόρτλαντ κατά EN 197-1 ήταν CEM I/ 42,5 N.

Πίνακας 1. Ορυκτολογική και χημική σύνθεση τσιμέντου Πόρτλαντ

Ορυκτολογική	Περιεχόμενο (%)	Χημική σύνθεση	Περιεχόμενο (%)
C <sub>3</sub> S	54.22	SO <sub>3</sub>	3.22
C <sub>2</sub> S	15.2	CL	0.018
C <sub>3</sub> A	7.79	EqNa <sub>2</sub>	0.5
C <sub>4</sub> AF	6.18	CaOf	1.48

## 2.2 Τέφρα από Ανακυκλωμένο Χαρτί (WSA)

Το WSA προμηθεύτηκε από την εταιρία παραγωγής ανακυκλωμένου χαρτιού Aylesford Newsprint Ltd του Ηνωμένου Βασιλείου, το οποίο έχει μέγεθος παιπάλης και φαινόμενο ειδικό βάρος 2,6. Η χημική του σύνθεση παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Χημική σύνθεση WSA

Χημική σύνθεση	Περιεχόμενο (%)	Χημική σύνθεση	Περιεχόμενο (%)
SiO <sub>2</sub>	35.75	Na <sub>2</sub> O	0.43
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.8	K <sub>2</sub> O	0.64
CaO	35.52	Li <sub>2</sub> O	0.042
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.98	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.31
MgO	3.28	TiO <sub>2</sub>	0.6
MnO	0.045	BaO	0.031
SrO	0.19	SO <sub>3</sub>	0.52

## 2.3 Σκωρία Υψικαμίνου (GGBS)

Η σκωρία υψικαμίνου προμηθεύτηκε από την εταιρία Civil and Marine Slag Cement Ltd.UK. του Ηνωμένου Βασιλείου. Το GGBS έχει μέγεθος παιπάλης και φαινόμενο ειδικό βάρος 2,9. Η χημική του σύνθεση παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Χημική σύνθεση GGBS

Χημική σύνθεση	Περιεχόμενο (%)	Χημική σύνθεση	Περιεχόμενο (%)
CaO	<b>42.0</b>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>0.4</b>
SiO <sub>2</sub>	<b>35.5</b>	MnO	<b>0.4</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>12</b>	SO <sub>2</sub>	<b>1.2</b>
MgO	<b>8</b>	SO <sub>3</sub>	<b>0.2</b>

## 2.4 Λεπτόκοκκα και Χοντρόκοκκα Αδρανή

Η άμμος που χρησιμοποιήθηκε είναι φυσική άμμος θαλάσσης από το κανάλι του Μπρίστολ. Η άμμος ξεπλύθηκε προκειμένου να απομακρυνθούν η ποσότητες του αλατιού σύμφωνα με τον Βρετανικό κανονισμό BS 8110: Part 1:1985 (Structural use of concrete).

Τα χοντρόκοκκα αδρανή αποτελούνταν από δυο διαφορετικά μεγέθη 10 mm και 20 mm. Η προέλευση τους είναι από ασβεστολιθικά πετρώματα.

## 2.5 Υπερρυστοποιητής Daracem® SPI

Στην διαδικασία δημιουργίας του σκυροδέματος για ένα μόνο δείγμα χρησιμοποιήθηκε ποσότητα υπερρυστοποιητή. Η ονομασία του υπερρυστοποιητή είναι Daracem® SPI και οι τυπικές του ιδιότητες αναφέρονται παρακάτω.

Τυπικές ιδιότητες

- Μορφή: καφέ υγρό - Περιεχόμενο αλκαλίου: 0.5% Na<sub>2</sub>O
- Περιεχόμενο αλκαλίου: 0.5% Na<sub>2</sub>O - Περιεχόμενο θείου: 0.20% SO<sub>3</sub>
- Εισροή αέρος: καμία - Περιεχόμενο χλωριούχου άλατος: 0% σύμφωνα με τον κανονισμό BS 5075: Part 1: 1982 - Σημείο πήξης: -5°C
- Προτεινόμενη ποσότητα: 500 ml - 1500 ml ανά 100 kg τσιμέντο

## 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- 1) Ημέρα 1<sup>η</sup>: Την προετοιμασία των υλικών (ζύγιση), την τοποθέτηση τους στο μίξερ και την παρασκευή του νωπού σκυροδέματος.
- 2) Την χρήση ποσότητας νωπού σκυροδέματος για τη δοκιμή κάθισης.
- 3) Την τοποθέτηση του σκυροδέματος στις μήτρες και την ομοιογενοποίηση των δοκιμίων με το τραπέζι δόνησης.
- 4) Ημέρα 2<sup>η</sup>: Την εξαγωγή των δοκιμίων σκυροδέματος από τις μήτρες, την μέτρηση της κορεσμένης πυκνότητας των δοκιμίων και την τοποθέτηση τους σε δεξαμενές νερού.
- 5) Ημέρα 7<sup>η</sup>: Την θραύση τριών κυβικών δοκιμίων για την εύρεση της αντοχής τους σε θλίψη.
- 6) Ημέρα 28<sup>η</sup>: Την δοκιμή εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη τριών κυλινδρικών δοκιμίων και την δοκιμή για την εύρεση του στατικού μέτρου ελαστικότητας για τρία κυλινδρικά δοκίμια των ίδιων διαστάσεων.

### 3.1 Προετοιμασία και Δημιουργία του Σκυροδέματος

Τα ποσοστά, οι ποσότητες των υλικών και ο λόγος νερού/συνδετικού υλικού που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή του σκυροδέματος περιγράφονται στους πίνακες 4, 5, 6 και 7. Η μέθοδος που εφαρμόστηκε για τον καθορισμό των ποσοτήτων και των αναλογιών των υλικών του σκυροδέματος είναι η 'British Method of mix selection' :

Πίνακας 4. Ποσοστά τσιμέντου πόρτλαντ και ανακυκλωμένων υλικών στο σκυροδέμα (λόγος νερού/συνδετικού υλικού: 0,5, 0,4 και 0,35)

PC %	WSA %	GGBS %
100	0	0
80	10	10
70	15	15
60	20	20
40*	30*	30*

\* Το PC-WSA-GGBS (40-30-30) σκυροδέμα παρασκευάστηκε μονό για λόγο νερού/συνδετικού υλικού ίσο με 0,5

Πίνακας 4. Ποσότητες υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρασκευή του σκυροδέματος για λόγο νερού/συνδετικού ίσο με 0,5

A/A	PC (%)	WS (%)	GGB (%)	Συνδετικό υλικό (g)	PC (g)	WS (g)	GGB (g)	Νερό (g)	Άμμος (g)	10 mm Αδρανή (g)	20 mm Αδρανή (g)
1	100	0	0	18797	18797	0	0	9450	22096	15651	31302
2	80	10	10	18797	15037	1880	1880	9450	22096	15651	31302
3	70	15	15	18797	13158	3524	3524	9450	22096	15651	31302
4	60	20	20	18797	11278	3759	3759	9450	22096	15651	31302
5	40	30	30	18797	7519	5639	5639	9450	22096	15651	31302

Πίνακας 5. Ποσότητες υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρασκευή του σκυροδέματος για λόγο νερού\συνδετικού ίσο με 0,4

A/A	P C (%)	WS A (%)	GGB S (%)	Συνδετικό υλικό (g)	PC (g)	WS A (g)	GGB S (g)	Νερό (g)	Άμμος (g)	10 mm Αδρανή (g)	20 mm Αδρανή (g)
6	100	0	0	23496	23496	0	0	9398	20471	14500	29001
7	80	10	10	23496	18797	2350	2350	9398	20471	14500	29001
8	70	15	15	23496	16447	3524	3524	9398	20471	14500	29001
9	60	20	20	23496	14097	4699	4699	9398	20471	14500	29001

Πίνακας 6. Ποσότητες υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρασκευή του σκυροδέματος για λόγο νερού\συνδετικού ίσο με 0,35

A/A	PC (%)	WS A (%)	GGB S (%)	Συνδετικό υλικό (g)	PC (g)	WS A (g)	GGB S (g)	Νερό (g)	Άμμος (g)	10 mm Αδρανή (g)	20 mm Αδρανή (g)
10	100	0	0	26852	26852	0	0	9398	19397	13740	27479
11	80	10	10	26852	21482	2685	2685	9398	19397	13740	27479
12	70	15	15	26852	18797	4028	4028	9398	19397	13740	27479
13	60	20	20	26852	16111	5370	5370	9398	19397	13740	27479

### 3.2 Δοκιμή Κάθισης

Η δοκιμή κάθισης εφαρμόστηκε σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό κανονισμό BS EN 12350-2:2000 (Slump Test). Ο εξοπλισμός αναφέρεται αναλυτικά στον κανονισμό και η μεθοδολογία της δοκιμής περιγράφεται συνοπτικά στον πίνακα 7.

Πίνακας 7. Μεθοδολογία δοκιμής κάθισης

Διάρκεια Λεπτά	Διάρκεια Δευτερόλεπτα	Διαδικασία	
0,78	47	Τοποθέτηση ποσότητας σκυροδέματος ίση με το 1/3 του ύψους του κόλουρου κώνου και εφαρμογή 25 ραβδώσεων	
0,78	47	Τοποθέτηση ποσότητας σκυροδέματος ίση με τα 2/3 του ύψους του κόλουρου κώνου και εφαρμογή 25 ραβδώσεων	
0,78	47	Τοποθέτηση ποσότητας σκυροδέματος ίση με τα 3/3 του ύψους του κόλουρου κώνου και εφαρμογή 25 ραβδώσεων	
0,083 to 0,167	5 to 10	Ανύψωση του κόλουρου κώνου και μέτρηση της κάθισης του σκυροδέματος	
Συνολικός χρόνος	2,5	150	Τοποθέτηση του σκυροδέματος στις μήτρες και ομοιογενοποίηση του σκυροδέματος στο τραπέζι δόνησης

### 3.3 Χρόνος Σκλήρυνσης

Όλα τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε δεξαμενές νερού σύμφωνα με τον κανονισμό BS EN 12390: Part 2 (Making and curing specimens for strength tests). Η θερμοκρασία του νερού των δεξαμενών ρυθμίζονταν ώστε να είναι σταθερή και ίση με  $20 \pm 1$  °C.

Ο χρόνος σκλήρυνσης των κυβικών και των κυλινδρικών δοκιμίων σκυροδέματος στο νερό ήταν 7 και 28 ημέρες αντίστοιχα.

### 3.4 Κορεσμένη Ποκνότητα

Για κάθε δοκίμιο σκυροδέματος βρέθηκε η κορεσμένη πυκνότητα εφαρμόζοντας τον κανονισμό BS EN 12390: Part 7 (Density of Hardened Concrete). Τα δοκίμια

σκυροδέματος ζυγίστηκαν στον αέρα και στο νερό με τη βοήθεια της Sartorius (Calibration 08154) ζυγαριάς. Η μάζα του δοκιμίου στο νερό και στο αέρα χρησιμοποιήθηκαν στην εύρεση της κορεσμένης πυκνότητας.



Εικόνα 1. Ζυγαριά Sartorius (Calibration 08154).

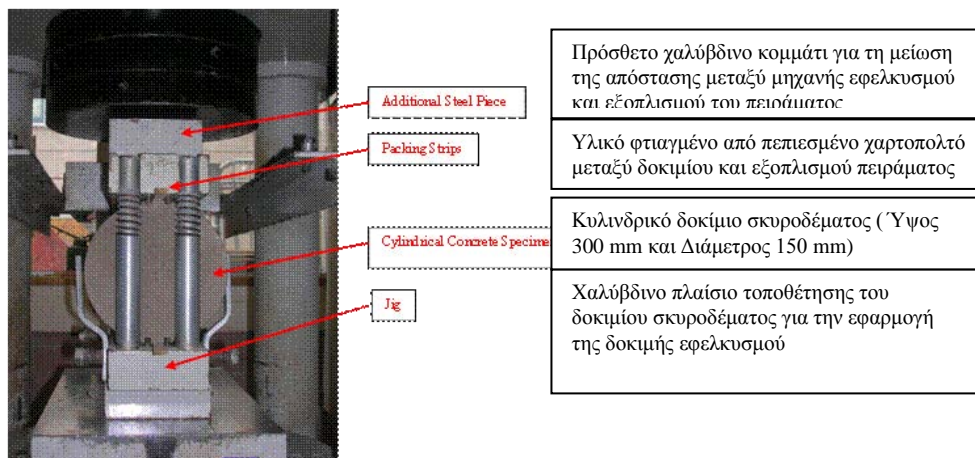
### **3.5 Δοκιμή Αντοχής σε Θλίψη**

Σε τρία κυβικά δοκίμια διαστάσεων (150x150x150 mm) και σε τρία κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων (Ύψος 300 mm και Διάμετρος 150 mm) για κάθε τύπο σκυροδέματος που δημιουργήθηκε εξετάστηκε η αντοχή τους σε θλίψη σύμφωνα με τον κανονισμό BS EN 12390: Part 3 (Compressive strength of test specimens). Η μηχανή θλίψης που χρησιμοποιήθηκε (Denison Mayes testing machine No. 832118) είχε δυνατότητα μέγιστου φορτίου θλίψης ίσο με 3000 kN. Αναλυτικότερα εφαρμόστηκαν δυο σταθεροί ρυθμοί επιβολής του φορτίου 180 kN/min για τα κυβικά δοκίμια και 336 kN/min για τα κυλινδρικά δοκίμια. Ο χρόνος σκλήρυνσης και εφαρμογής της δοκιμής θλίψης ήταν 7 ημέρες και 28 ημέρες για τα κυβικά και τα κυλινδρικά δοκίμια αντίστοιχα.

### **3.6 Δοκιμή Εφελκυστικής Αντοχής σε Διάρρηξη Δοκιμίων**

Η δοκιμή εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη δοκιμίων εφαρμόστηκε σε τρία κυλινδρικά δοκίμια (Ύψος 300 mm και Διάμετρος 150 mm), ηλικίας σκλήρυνσης 28 ημερών, για κάθε τύπο σκυροδέματος που παρασκευάστηκε. Η δοκιμή έγινε σύμφωνα με τον κανονισμό BS EN 12390: Part 6 (Tensile splitting strength of test specimens). Η μηχανή εφελκυσμού είναι η ίδια που προαναφέρθηκε στη δοκιμή αντοχής σε θλίψη. Ο εξοπλισμός της δοκιμής περιγράφεται στην (Εικόνα 2). Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στη μηχανή εφελκυσμού χρησιμοποιώντας τον εξοπλισμό του πειράματος και ένας σταθερός ρυθμός επιβολής του φορτίου εφαρμόστηκε ίσος με 212 kN/min. Μετά το πέρας της διάρρηξης του δοκιμίου η εφελκυστική αντοχή των δοκιμίων σκυροδέματος καταγράφηκε.

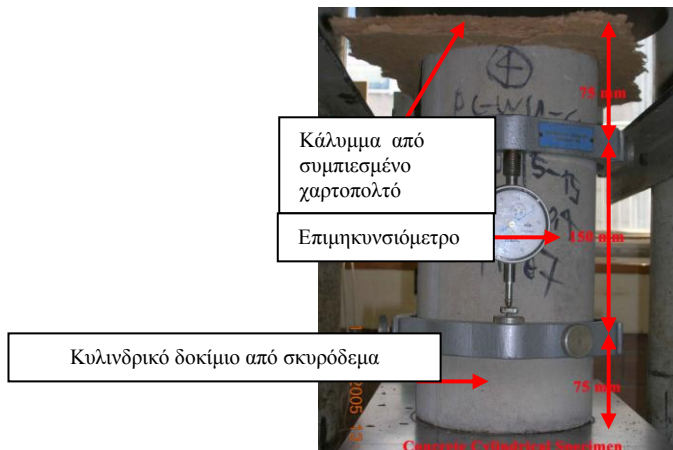




Εικόνα 2. Εξοπλισμός δοκιμής εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη δοκιμίων.

### 3.7 Δοκιμή Εύρεσης Στατικού Μέτρου Ελαστικότητας σε Θλίψη Δοκιμίων

Τρία κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος (Ύψος 300 mm και Διάμετρος 150 mm) και σε ηλικία σκλήρυνσης 28 ημερών χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση του στατικού μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη. Η δοκιμή εφαρμόστηκε σύμφωνα με τον Βρετανικό κανονισμό BS 1881-121: 1983 (Method for determination of static modulus of elasticity in compression). Η μηχανή θλίψης είναι η ίδια των προηγούμενων πειραμάτων. Ο εξοπλισμός του πειράματος περιλάμβανε ένα πλαίσιο επιμηκυσιόμετρου και ένα κάλυμμα στην κορυφή του κυλίνδρου έτσι ώστε η επιφάνεια θλίψης μεταξύ δοκιμίου και μηχανής να είναι επίπεδη (Εικόνα 3). Η δοκιμή ξεκίνησε εφαρμόζοντας μια βασική τάση ίση με  $0.50 \text{ N/mm}^2$  για 30 δευτερόλεπτα όπου οι ενδείξεις του επιμηκυσιόμετρου καταγράφονταν. Στη συνέχεια με σταθερό ρυθμό αύξησης του φορτίου ίσο με  $636 \text{ kN/min}$  επιβλήθηκε τάση ίση με το  $1/3$  της αντοχής σε θλίψη του δοκιμίου. Το συγκεκριμένο φορτίο έμεινε σταθερό για 60 δευτερόλεπτα όπου οι ενδείξεις του επιμηκυσιόμετρου καταγράφονταν ανά 30 δευτερόλεπτα. Μετά το πέρας των 60 δευτερολέπτων το δοκίμιο αποφορτίστηκε και εφαρμόστηκε η βασική τάση ( $0.50 \text{ N/mm}^2$ ) και οι ενδείξεις του επιμηκυσιόμετρου επανακαταγράφηκαν. Στην δοκιμή εφαρμόστηκαν τρεις κύκλοι αύξησης και μείωσης του φορτίου και αφού το πλαίσιο του επιμηκυσιόμετρου αφαιρέθηκε από το δοκίμιο, έγινε δοκιμή σε θλίψη του δοκιμίου για τον προσδιορισμό της μέγιστης τάσης του σκυροδέματος σε θλίψη.



Εικόνα 3. Εξοπλισμός δοκιμής Στατικού Μέτρου Ελαστικότητας σε Θλίψη.

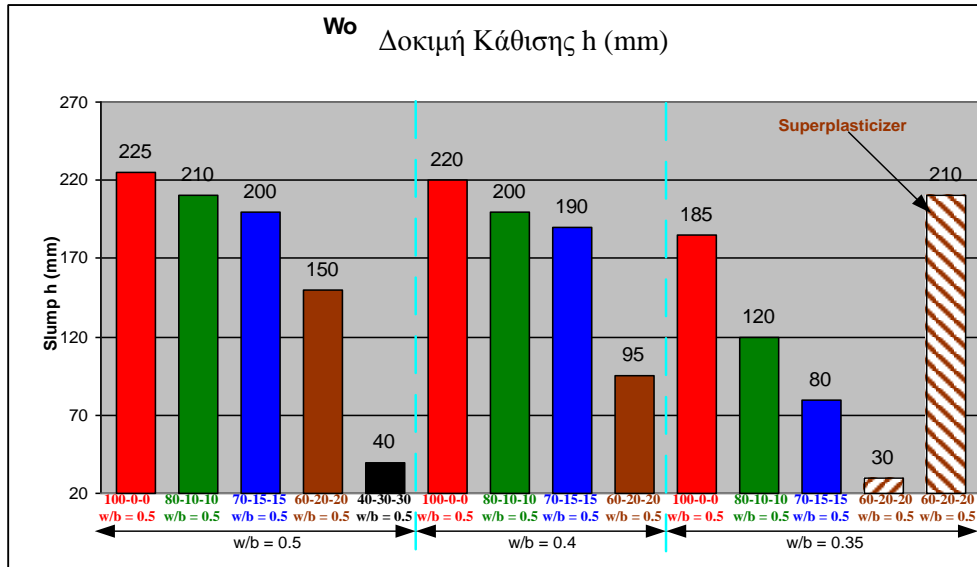
#### 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάζονται αναλυτικά στο παρόν κεφάλαιο με την σειρά εφαρμογή τους:

1. Δοκιμή Κάθισης.
2. Κορεσμένη Πυκνότητα
3. Δοκιμή Αντοχής σε Θλίψη Δοκιμίων
4. Δοκιμή Εφελκυστικής Αντοχής σε Διάρρηξη δοκιμίων
5. Δοκιμή Εύρεσης Στατικού Μέτρου Ελαστικότητα σε Θλίψη Δοκιμίων

##### 4.1 Δοκιμή Κάθισης

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της Δοκιμής Κάθισης έγινε σύμφωνα με τον κανονισμό BS EN 12350-2:2000 (Slump Test). Τα αποτελέσματα εκθέτονται στην (Εικόνα 4).



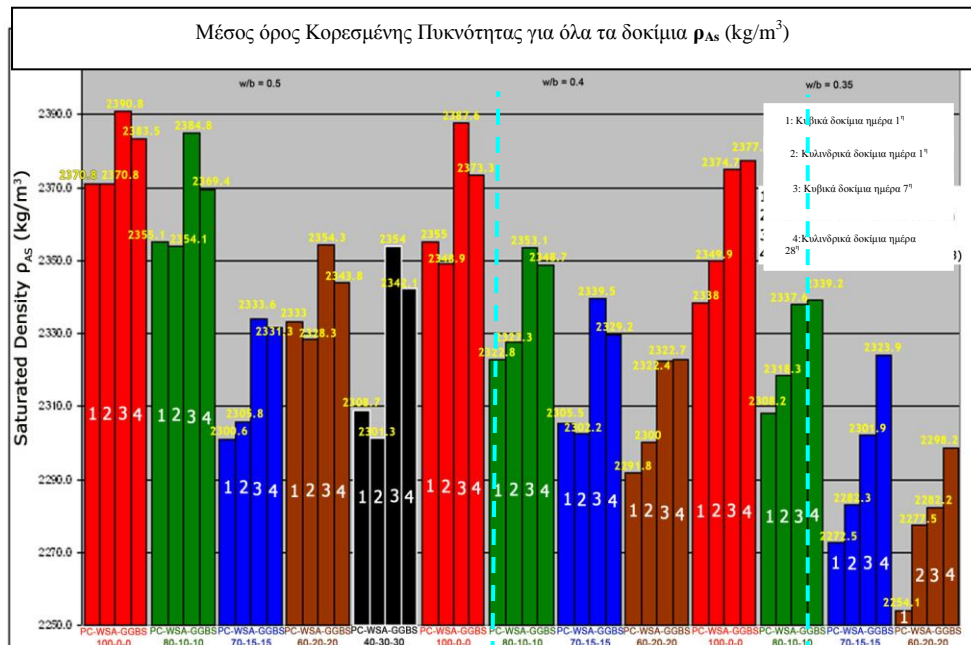
Εικόνα 4. Αποτελέσματα Δοκιμής Κάθισης (Slump: Κάθιση, w/b: λόγος νερού/συνδετικού υλικού και Superplasticizer: Υπερρευστοποιητής).

#### 4.2 Κορεσμένη Πυκνότητα

Οι υπολογισμοί και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της Κορεσμένης Πυκνότητας των δοκιμών έγιναν σύμφωνα με τον κανονισμό BS EN 12390: Part 7 (Density of hardened concrete). Στους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω τύποι:

$$\rho_s = \frac{m}{V}, \quad V = \frac{m_A - m_w}{\rho_w} \quad \text{Όπου:}$$

- $\rho_s$  = Κορεσμένη Πυκνότητα ( $\text{kg/m}^3$ ) και  $\rho_{As}$  = Μέσος όρος Κορεσμένης Πυκνότητας για τρία δοκίμια, ( $\text{kg/m}^3$ ).
- $m$  = Μάζα του δοκιμίου στον αέρα, (kg).
- $V$  = Όγκος του δοκιμίου παρατηρούμενος από την μετατόπιση του νερού, ( $\text{m}^3$ ).
- $m_A$  = Μάζα του δοκιμίου στον αέρα, (kg).
- $m_w$  = Μάζα του δοκιμίου στο νερό, (kg).
- $\rho_w$  = Πυκνότητα του νερού ίση με  $998 \text{ kg/m}^3$  στους  $20^\circ\text{C}$ .



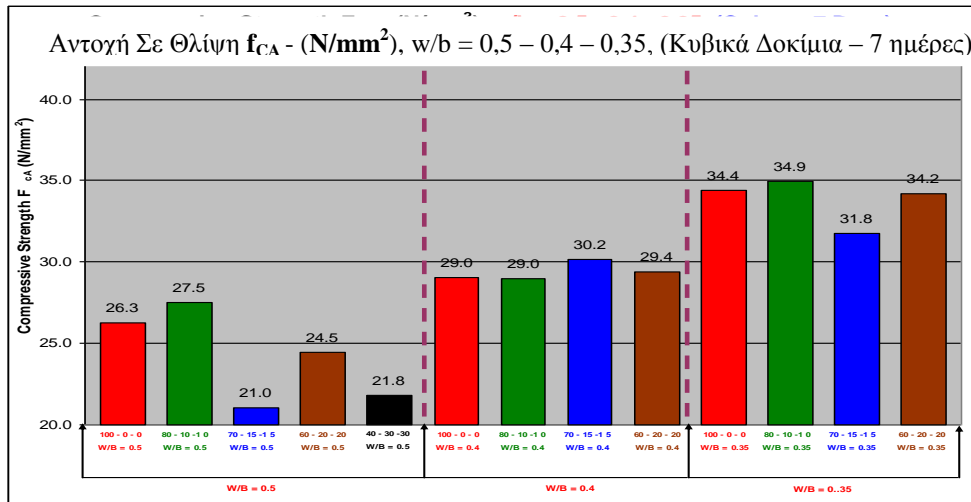
Εικόνα 5. Μέσος όρος Κορεσμένης Πυκνότητας των δοκιμών  $\rho_{As}$  (kg/m<sup>3</sup>).

### 4.3 Δοκιμή Αντοχής σε Θλίψη Δοκιμίων

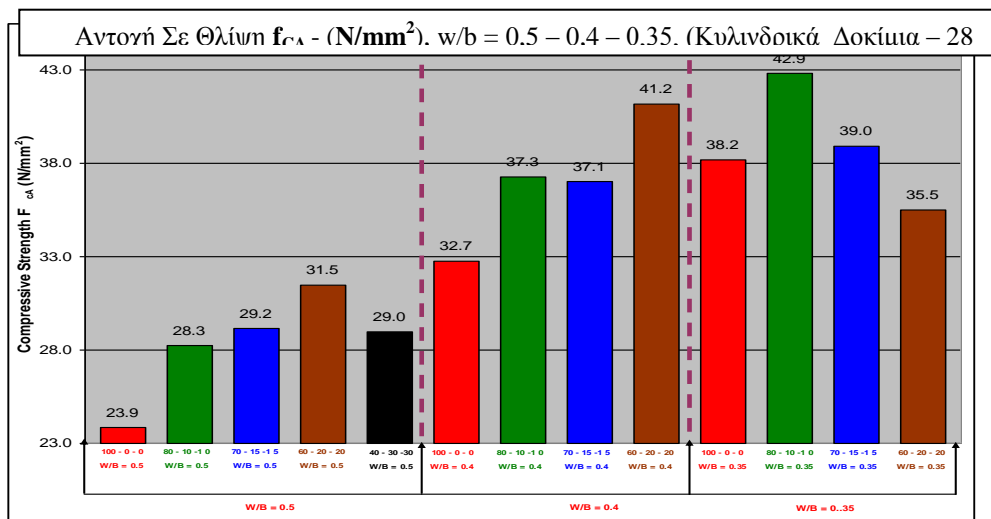
Οι υπολογισμοί και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της δοκιμής Αντοχής σε Θλίψη των δοκιμίων έγιναν σύμφωνα με τον κανονισμό BS EN 12390: Part 3 (Compressive strength of test specimens). Στους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε ο

$$\text{παρακάτω τύπος: } f_c = \frac{F}{A_c}, \text{ όπου}$$

$f_c$  = Αντοχή σε θλίψη των δοκιμίων (N/mm<sup>2</sup>) και  $f_{CA}$  = Μέσος όρος της Αντοχής σε θλίψη για τρία δοκίμια,  $F$  = Μέγιστο φορτίο Αντοχής (N),  $A_c$  = Εμβαδόν της περιοχής όπου εφαρμόζονται οι θλιπτικές δυνάμεις (mm), για κυβικά δοκίμια ( $A_c = 10000 \text{ mm}^2$ ) και για κυλινδρικά δοκίμια ( $A_c = 17671.46 \text{ mm}^2$ ).



Εικόνα 6. Αποτελέσματα Αντοχής σε Θλίψη  $f_{CA}$  - ( $N/mm^2$ ), Κυβικά Δοκίμια.



Εικόνα 7. Αποτελέσματα Αντοχής σε Θλίψη  $f_{CA}$  - ( $N/mm^2$ ), Κυλινδρικά Δοκίμια

#### 4.4 Δοκιμή Αντοχής σε Διάρρηξη Δοκιμίων

Οι υπολογισμοί και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της δοκιμής Εφελκυστικής Αντοχής σε Διάρρηξη Δοκιμίων έγιναν σύμφωνα με τον κανονισμό BS EN 12390:

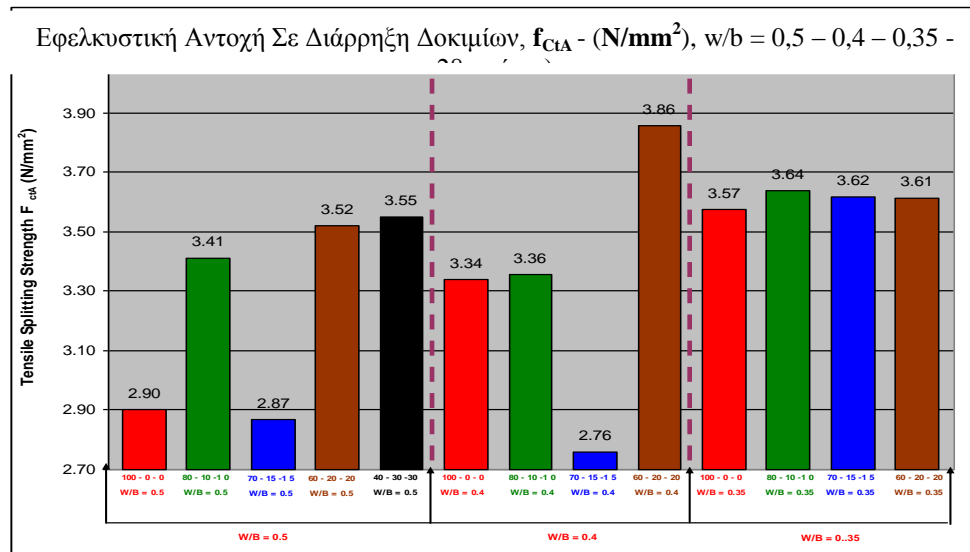
Part 6 (Tensile splitting strength of test specimens). Στους υπολογισμούς

χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τύπος:  $f_{ct} = \frac{2xF}{\pi xLxd}$ , όπου

$f_{ct}$  = Εφελκυστική Αντοχή σε Διάρρηξη Δοκιμίων, ( $N/mm^2$ ),  $f_{ctA}$  = Μέσος όρος Εφελκυστική Αντοχή σε Διάρρηξη Δοκιμίων για τρία δοκίμια, ( $N/mm^2$ ) και  $F$  = Μέγιστο Φορτίο, ( $N$ ).

$L$  = Το μήκος της γραμμής επαφής του δοκιμίου ( $mm$ ), (Για το δοκίμιο το  $L = 300 mm$ )

$d$  = Σχεδιασμένη διατομή διάστασης ( $mm$ ), (Για το δοκίμιο το  $d = 150 mm$ )



Εικόνα 8. Αποτελέσματα Εφελκυστικής Αντοχής σε Διάρρηξη Δοκιμίων,  $f_{ctA}$  - ( $N/mm^2$ )

#### 4.5 Δοκιμή Εύρεσης του Στατικού Μέτρου Ελαστικότητας σε Θλίψη Δοκιμίων

Οι υπολογισμοί και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της δοκιμής Εύρεσης του Στατικού Μέτρου Ελαστικότητας σε Θλίψη δοκιμίων έγιναν σύμφωνα με τον Βρετανικό κανονισμό BS 1881-121: 1983 (Method for determination of static modulus of elasticity in compression). Στους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε ο

παρακάτω τύπος:  $E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{(\varepsilon_a - \varepsilon_b) \times 300 \times 0.002}$ , όπου

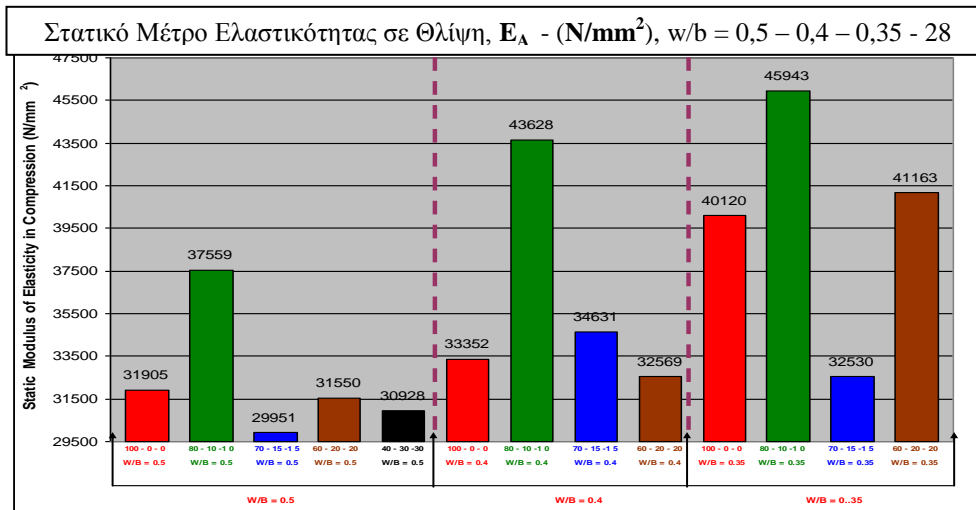
$E$  = Στατικό Μέτρο Ελαστικότητας, ( $N/mm^2$ ),  $E_A$  = Μέσος Όρος του Στατικού Μέτρου Ελαστικότητας για τρία δοκίμια, ( $N/mm^2$ ).

$\sigma_a$  = Ανώτερο φορτίο ίσο με  $f_c/3$ , ( $N/mm^2$ ) και  $\sigma_b$  = Βασικό φορτίο ίσο με  $0.50N/mm^2$ .

$\epsilon_a$  = Μέση Επιμήκυνση υπό το Ανώτερο φορτίο και  $\epsilon_b$  = Μέση Επιμήκυνση

**300** = Το μήκος της περιοχής που βρίσκονταν υπό παραμόρφωση επί δυο.

**0.002** = Η απόσταση μεταξύ των διαιρέσεων του επιμηκυνσιόμετρου.



Εικόνα 9. Στατικό Μέτρο Ελαστικότητας σε Θλίψη,  $E_A$  - ( $N/mm^2$ ),  $w/b = 0,5-0,4-0,35-28$  ημ.)

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα των αποτελεσμάτων της έρευνας και οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Εργασιμότητα - Δοκιμή Κάθισης:

- Το νωπό σκυρόδεμα που περιείχε ποσότητες ανακυκλωμένων υλικών (WSA-GGBS) έδειξε ότι είχε μικρότερη κάθιση από αυτήν του σκυροδέματος με τσιμέντο Πόρτλαντ 100%. Η χρήση του WSA στο σκυρόδεμα έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της εργασιμότητας του σκυροδέματος και την αύξηση της απαίτησης σε νερό.
- Η συμμετοχή του GGBS στο σκυρόδεμα (Το GGBS αυξάνει την κάθιση του σκυροδέματος) δεν επέφερε τα αναμενόμενα αποτελέσματα δηλαδή τη μείωση της επίδρασης του WSA στην εργασιμότητα. Μάλλον χρειαζόνταν μεγαλύτερες ποσότητες GGBS σε σύγκριση με το WSA κατά την αντικατάσταση του τσιμέντου Πόρτλαντ στο σκυρόδεμα.

- Το σκυρόδεμα με τη υψηλότερη κάθιση είναι το PC – 100%. Η απόδοση των σκυροδεμάτων PC-WSA-GGBS (80%-10%-10%) και (70%-15%-15%) ήταν πολύ καλή και χρήση τους με μικρότερο λόγο νερού/συνδετικού είναι εφικτή.

#### Κορεσμένη Πυκνότητα:

- Οι τιμές των Κορεσμένων Πυκνοτήτων που παρατηρήθηκαν για όλα τα σκυροδέματα και όλους τους λόγους νερού/συνδετικού ήταν μεταξύ του εύρους 2300-2400 kg/m<sup>3</sup>. Το σκυρόδεμα με τη μέγιστη πυκνότητα ίση με 2390.8 kg/m<sup>3</sup> ήταν το PC – 100%, για λόγο νερού/συνδετικού ίσο με 0,5 και χρόνο σκλήρυνσης 7 ημέρες. Η διαφορά στις πυκνότητες μεταξύ των κυβικών και των κυλινδρικών δοκιμίων οφείλεται στον διαφορετικό όγκο των δοκιμίων.
- Η χρήση του WSA-GGBS στο σκυρόδεμα έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της κορεσμένης πυκνότητας του σκυροδέματος. Τα σκυροδέματα που περιείχαν ανακυκλωμένα υλικά είχαν καλή απόδοση σε κορεσμένη πυκνότητα. Οι τιμές της κορεσμένης πυκνότητας πλησίασαν την τιμή του συνηθισμένου σκυροδέματος ίση με 2400 kg/m<sup>3</sup>. Η μείωση της τιμής της κορεσμένης πυκνότητας μάλλον οφείλεται στην χρήση του WSA.

#### Αντοχή σε Θλίψη:

- Σε ηλικία σκλήρυνσης 7 ημερών οι τιμές αντοχής σε θλίψη των PC-WSA-GGBS σκυροδεμάτων είναι σχετικά ίσες με την τιμή αντοχής σε θλίψη του PC-100% σκυροδέματος.
- Σε ηλικία σκλήρυνσης 28 ημερών οι τιμές αντοχής σε θλίψη των PC-WSA-GGBS σκυροδεμάτων είναι μεγαλύτερες από την τιμή αντοχής σε θλίψη του PC-100% σκυροδέματος εκτός από μια περίπτωση (PC-WSA-GGBS (60%-20%-20%), N/Σ 0,35). Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στις καθυστερημένες ποζολανικές αντιδράσεις που προέρχονται από το WSA-GGBS.
- Η αύξηση του περιεχομένου του WSA-GGBS στο σκυρόδεμα έως 40% έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση της αντοχής σε θλίψη του σκυροδέματος σε ηλικία σκλήρυνσης 28 ημερών. Το σκυρόδεμα με τη μέγιστη αντοχή σε θλίψη είναι το PC-WSA-GGBS (80%-10%-10%) σε ηλικία σκλήρυνσης 28 ημερών, λόγος νερού/συνδετικού ίσο με 0,35 και τιμή ίση με 42.9 N/mm<sup>2</sup>.

#### Εφελκυστική Αντοχή σε Διάρρηξη Δοκιμίων:

- Σε ηλικία σκλήρυνσης 28 ημερών οι τιμές εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη δοκιμίων των PC-WSA-GGBS σκυροδεμάτων είναι μεγαλύτερες από την τιμή αντοχής σε θλίψη του PC-100% σκυροδέματος εκτός από μια περίπτωση (PC-WSA-GGBS (70%-15%-15%), N/Σ 0,5 και 0,4).



- Η αύξηση του περιεχομένου του WSA-GGBS στο σκυρόδεμα έως 40% έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση της εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη δοκιμίων του σκυροδέματος σε ηλικία σκλήρυνσης 28 ημερών.
- Το σκυρόδεμα με τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη δοκιμίων είναι το PC-WSA-GGBS (60%-20%-20%) σε ηλικία σκλήρυνσης 28 ημερών, λόγος νερού/συνδετικού ίσο με 0,5 και τιμή ίση με 3.86 N/mm<sup>2</sup>.

#### Στατικό Μέτρο Ελαστικότητας:

- Η αύξηση του περιεχομένου του WSA-GGBS στο σκυρόδεμα έως 20% έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση του στατικού μέτρου ελαστικότητας σε του σκυροδέματος σε ηλικία σκλήρυνσης 28 ημερών.
- Για μεγαλύτερη ποσότητα WSA-GGBS από 20% στο σκυρόδεμα είναι αναγκαία περισσότερη έρευνα. Φαίνεται ότι η χρήση μεγάλης ποσότητας WSA έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του στατικού μέτρου ελαστικότητας. Το σκυρόδεμα με τη μέγιστο στατικό μέτρο ελαστικότητας είναι το PC-WSA-GGBS (80%-20%-20%) σε ηλικία σκλήρυνσης 28 ημερών, λόγος νερού/συνδετικού ίσο με 0,35 και τιμή ίση με 45943 N/mm<sup>2</sup>.

#### Γενικά συμπεράσματα:

- Απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τον καθορισμό της ποζολανικότητας των δυο υλικών και τον προσδιορισμό του ενεργού πυριτίου, προκειμένου να καθοριστεί η επίδραση του GGBS και WSA στην αντοχή του σκυροδέματος.
- Με βάση την πειραματική εργασία, το καλύτερο ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου με GGBS-WSA είναι το 20%. Η περαιτέρω αντικατάσταση φαίνεται να δημιουργεί αστάθεια στο μίγμα με συνέπεια να μην είναι δυνατόν να λαμβάνονται οι αναμενόμενες ιδιότητες.

#### 6. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- BAI J, CHAIPANICH A, KINUTHIA JM, O'FARRELL M, SABIR MM, WILD S, LEWIS MH. , 2003 *Compressive strength and hydration of Wastepaper Sludge Ash - Ground Granulated Blastfurnace Slag (WSA - GGBS) blended pastes. Cement and Concrete Research*, 33 (2003), Issue 8, 1189–1202.
- BS 1881-121: 1983 «*Test on hardened concrete*». Method for determination of static modulus of elasticity in compression
- BS 6699:1992: «*Specification for ground granulated blastfurnace slag for use with Portland cement*»
- BS EN 12350: Part - 2:2000 «*Testing fresh concrete*». Slump Test
- BS EN 12390: Part – 2 «*Testing hardened concrete*». Making and curing specimens for strength tests.

- BS EN 12390: Part - 3 «*Testing hardened concrete*». Compressive strength of test specimens.
- BS EN 12390: Part - 4 «*Testing hardened concrete*». Specification for testing machines
- BS EN 12390: Part - 6 «*Testing hardened concrete*». Tensile splitting strength of test specimens.
- BS EN 12390: Part - 7 «*Testing hardened concrete*». Density of hardened concrete.
- BS EN 197-1: Cement Part-1: «*Composition, specifications and compliance criteria for common cement*»
- BS EN 197-2: Cement Part -2«*Compliance evaluation*»
- BUILDING MATERIALS RESEARCH UNIT, 1999, *Development of a low-cost low-energy cement from waste*. Division of the built Environment. University of Glamorgan.
- GAILIUS, A. & LAURIKIETYTĖ, Z. 2003, *Journal of Civil Engineering and Management*, ISSN 1392-3730, Wastepaper Sludge Ash and Ground Granulated concrete
- KINUTHIA J. M., O'FARRELL M., SABIR B. B. and WILD S. 2001. A preliminary study of the cementitious properties of wastepaper sludge ash (WSA) – ground granulated blast-furnace slag (GGBS) blends. Paper presented at an International symposium on Recovery and recycling of paper in March 2001 at the University of Dundee.
- MALHORTA, V. M. & MEHTA, P. K., 1996, *Pozzolanic and Cementitious Materials (Advances in Concrete Technology S.)*. Gordon & Breach Science Publishers Ltd\
- NEVILLE, A., 1997, *Properties of Concrete*. 4<sup>th</sup> ed., Prentice Hall.
- NEVILLE, A.M. & BROOKS, J.J., 1987. *Concrete Technology*. Prentice Hall.
- SYNGOUNAS, G. 2005. *Strength of PC-WSA-GGBS Concrete*. Master Science Dissertation, University of Glamorgan.