

**ΑΕΙ Πειραιά Τ.Τ.  
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε.**

**ΚΟΝΤΑΚΙΝΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕΡΟΥΣ ΤΟΥ  
ΤΣΙΜΕΝΟΥ ΜΕ ΣΚΩΡΙΑ ΚΑΙ ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ  
ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ  
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΉ ΕΡΓΑΣΊΑ**

**ΑΘΉΝΑ 2020**

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της πτυχιακής, Καθηγητή Κωνσταντίνο Δημάκο Διευθυντή του Ερευνητικού Εργαστηρίου ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ, καθώς επίσης και το σύνολο του Εργαστηρίου της Sika Hellas και κυρίως τον επιβλέπων του Τμήματος της, προϊστάμενο Κύριο Μανώλη Μαυρατζώτη, για την καθοδήγηση, τις υποδείξεις και το χρόνο που αφιέρωσαν. Ειδικότερα, οφείλω να ευχαριστήσω τα μέλη του Εργαστηρίου της Sika Hellas, Βένια Πουλοπούλου, για τη βοήθεια τόσο στο θεωρητικό, όσο και το πρακτικό μέρος της εργασίας και για τη βοήθεια στη διεξαγωγή των πειραματικών συνθέσεων. Τον Ιωάννη Πολίτη για τη βοήθειά του στη διεξαγωγή των μετρήσεων και την Αρετή Κοντακινού για τις υποδείξεις ως προς τη συγγραφή.

Σημαντική συμβολή στη διεξαγωγή της πτυχιακής είχε η ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε. η ΤΕΡΝΑ και η ΔΕΗ με την παροχή πρώτων υλών και δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην πτυχιακή. Τέλος, θεωρώ ότι οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην Βασιλική Μπαμνιούδη για την υπομονή και τη συμπαράστασή της, καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας πτυχιακής και στην πολυμελή οικογένεια μου για την υποστήριξή της, χάρη στην οποία έγινε δυνατή η ολοκλήρωση της εργασίας .

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο έρευνας της πτυχιακής αυτής, είναι η χρήση βιομηχανικών παραπροϊόντων στην παραγωγή εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Τα βιομηχανικά παραπροϊόντα που εξετάζονται είναι σκωρία χαλυβουργίας (σκωρία ηλεκτροκλιβάνου και σκωρία κάδου), που προκύπτουν από τη διαδικασία παραγωγής χάλυβα, καθώς και ιπτάμενη τέφρα (παραπροϊόν της καύσης λιγνίτη). Το θέμα της πτυχιακής εντάσσεται στο ερευνητικό πεδίο που αποτελεί έναν από τους κύριους άξονες στην προώθηση των βιομηχανικών παραπροϊόντων. Εξετάζεται επίσης, το γενικότερο κοινωνικο και οικονομικό πλαίσιο, μέσα από το οποίο βιομηχανικά παραπροϊόντα μπορούν να απορροφηθούν από τον κατασκευαστικό τομέα.

Από τα βιομηχανικά αυτά παραπροϊόντα που εξετάζονται στη πτυχιακή, η σκωρία ελέγχεται προς τη δυνατότητα χρήσης της ως εναλλακτικής (συμπληρωματικής, αντικατάσταση μέρους) του τσιμέντου, καθώς και η ιπτάμενη τέφρα. Η έρευνα περιλαμβάνει τη μελέτη των ιδιοτήτων των υλικών και την παραγωγή δοκιμαστικών συνθέσεων εκτοξευόμενου σκυροδέματος στο εργαστήριο της Sika Hellas με τύπο τσιμέντου I42.5 LAFARGE και αντικατάσταση αυτού, τάξης 10%, 15% και 20%.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### ΠΡΩΤΟ ΜΕΡΟΣ : ΑΝΑΦΟΡΑ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....

#### Κεφάλαιο 1 Το αντικείμενο της έρευνας.....

1.1 Εισαγωγή .....

1.2 Σκωρία χαλυβουργίας .....

1.3 Ιπτάμενη τέφρα .....

1.4 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.....

#### Κεφάλαιο 2 Υπάρχουσας γνώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....

2.1 Βιομηχανικά παραπροϊόντα σε συνθήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....

### ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΕΡΟΣ : ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....

#### Κεφάλαιο 3 Χαρακτηριστικά των αδρανών υλικών .....

3.1 Επιλογή των αδρανών υλικών.....

3.2 Ειδικό βάρος, πυκνότητα και υδαταπορροφητικότητα.....

3.3 Κοκκομετρία.....

3.4 Κοκκομετρική σύνθεση αδρανών.....

#### Κεφάλαιο 4 Συνθέσεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....

4.1 Εισαγωγή.....

4.2 Μελέτη συνθέσεων εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....

4.3 Έλεγχοι εργαστηριακών συνθέσεων εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....

### ΤΡΙΤΟ ΜΕΡΟΣ : ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΤΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

### 1.1 Εισαγωγή

Η βιομηχανική παραγωγή ορισμένων προϊόντων, συχνά συνεπάγεται τη δημιουργία μεγάλων όγκων ανεπιθύμητων δευτερογενών υλικών, που συσσωρεύονται τοπικά με την πάροδο του χρόνου και δημιουργούν ένα περιβαλλοντικό πρόβλημα. Το ενδιαφέρον για τη χρήση αυτών των υλικών χρονολογείται από την αρχή της βιομηχανικής παραγωγής και οδήγησε στον όρο «βιομηχανικό παραπροϊόν» ή «υποπροϊόν», σε αντίθεση με τον όρο «απόβλητα», που αναφέρεται στο υλικό που πρόκειται να απορριφθεί. Αυτά τα υλικά που παράγονται σε μεγάλες ποσότητες είναι στάχτες από σταθμούς παραγωγής ατμού, σκωρίες υψικαμίνων από σίδηρο και χάλυβα και βιομηχανίες παραγωγής αλουμίνας.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, η ίδια η βιομηχανία διαπίστωσε ότι μερικά από τα υλικά τους θα μπορούσαν να αποκομίσουν κέρδος. Έτσι χειριζόταν την εκμετάλλευσή τους, όχι μόνο το κύριο προϊόν της παραγωγής τους. Σε άλλες περιπτώσεις, η εφαρμοσμένη έρευνα έχει δείξει τεχνικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τη χρήση αυτών των υλικών. Ένας καλός παραλήπτης βιομηχανικών υποπροϊόντων είναι ο κατασκευαστικός τομέας, ο οποίος μπορεί να απορροφήσει μεγάλα ποσά υποπροϊόντων, κυρίως λόγω της μεγάλης ποσότητας υλικών που χρησιμοποιούνται στις υποδομές και στις συμβατικές κατασκευές τόσο σε υψηλές απαιτήσεις (χάλυβας) όσο και σε χαμηλές απαιτήσεις για ενεργειακά προφίλ (υλικά πλήρωσης). Ουσιαστικά, τα έργα ασφάλτου, τα έργα σκυροδέματος και η βιομηχανία τσιμέντου, είναι αυτά στον κατασκευαστικό κλάδο, που μπορούν να απορροφήσουν σε ετήσια βάση σημαντικό μέρος των παραγόμενων βιομηχανικών υποπροϊόντων.

Τα τελευταία χρόνια, οι αυξανόμενες ανάγκες του κατασκευαστικού κλάδου για πρώτες ύλες, σε συνδυασμό με την ένταση των περιβαλλοντικών προβλημάτων του πλανήτη που οδήγησαν σε κοινωνική και πολιτική πίεση για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και την καλύτερη χρήση των φυσικών πόρων του πλανήτη, έχουν οδηγήσει σε αύξηση του ενδιαφέροντος για τη χρήση βιομηχανικών παραπροϊόντων στον κατασκευαστικό τομέα διεθνώς. Έτσι, έχει σημειωθεί πολύ σημαντική πρόοδος όσον αφορά τη χρήση υλικών που έχουν ταξινομηθεί προηγουμένως ως "απόβλητα".

## 1.2 Σκωρία χαλυβουργίας

Ως σκωρίες ορίζονται τα παραπροϊόντα βιομηχανικών διεργασιών, μεταλλουργικών ή μη. Η σκωρία χαλυβουργίας που παράγεται σε διαφορετικά μέρη του κόσμου δεν έχει παρόμοιες φυσικές και χημικές ιδιότητες <<δεν πρόκειται δηλαδή για το ίδιο προϊόν>> και η βασική διαφοροποίηση των ιδιοτήτων των σκωριών οφείλεται στη διαδικασία παραγωγής.

Οι χαλύβδινες σκωρίες είναι παραπροϊόντα της παραγωγής χάλυβα και παράγονται κατά τη διάρκεια του διαχωρισμού και απομάκρυνσης ακαθαρσιών από τον τετηγμένο χάλυβα. Έρχονται σε υγρή κατάσταση και είναι ένα πολύπλοκο διάλυμα οξειδίου που στερεοποιείται όταν ψύχεται.

Η παραγωγή χάλυβα με την εισαγωγή σιδηρούχων ορυκτών είναι μια συνεχής διαδικασία που οδηγεί σε μια σχετικά ομοιογενή σκωρία στην οποία τα οξείδια μαγνησίου και ασβέστου συνδέονται πάντοτε με πυριτικά και αλουμινο-πυριτικά. Απο αυτό προκύπτει παραπροϊόν με ονομασία σκωρία υψικαμίνου (blast furnace slag).

Μια άλλη μέθοδος παραγωγής χάλυβα είναι με την τήξη παλαιοσιδήρου (scrap). Τα παραπροϊόντα που προκύπτουν από την μέθοδο αυτή ονομάζονται σκωρίες χαλυβουργίας (steel slag), στην οποία η παραγωγή του χάλυβα γίνεται σχεδόν αποκλειστικά σε ολοκληρωμένες μονάδες παραγωγής. Τη μέθοδο του βασικού κλίβανου οξυγόνου (basic oxygen furnace) και τη μέθοδο του κλίβανου φωτοβολταϊκού τόξου (electric arc furnace). Ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής έχουν αντιστίχα την ονομασία BOFslag ή EAFslag.

Από το Ινστιτούτο Γεωλογικών Ερευνών των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (USGS), η αξιοποιήσιμη σκωρία υπολογίζεται στο 10 - 15% της συνολικής παραγωγής χάλυβα [1]. Στον αντίποδα, η ετήσια παραγωγή σκωρίας εξαρτάται από την παγκόσμια παραγωγή χάλυβα, η οποία έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια, κυρίως λόγω της αύξησης της παραγωγικής δραστηριότητας στις αναπτυσσόμενες χώρες (Κίνα, Ινδία) [2].

Η ετήσια παγκόσμια παραγωγή σκωριών του 2017, υπολογίζεται περίπου σε 1.690.000 χιλιάδες τόνους και για το ίδιο έτος η ετήσια παραγωγή σκωριών χαλυβουργίας στον Ελληνικό χώρο, υπολογίζεται σε 1.359 χιλιάδες τόνους. [3]

### 1.3 Ιπτάμενη τέφρα

Η ιπτάμενη τέφρα (fly ash) είναι υποπροϊόν της βιομηχανίας ηλεκτρικής ενέργειας, που προκύπτει από την καύση λιγνίτη ή άνθρακα και συλλέγεται από τα αέρια καύσης με ηλεκτροστατικά ή μηχανικά φίλτρα αέρα. Η ίδια καύση έχει ως αποτέλεσμα ένα άλλο παραπροϊόν, τέφρα πυθμένα (bottom ash). Αναφέρεται συνήθως με τον όρο ανθρακική τέφρα (coal ash ή pulverized fuel ash). Όλες αυτές παράγονται από την καύση άνθρακα, ενώ με τον όρο λιγνιτική τέφρα (lignite ash) οι αντίστοιχες, από την καύση του λιγνίτη.

Η ιπτάμενη τέφρα έχει λεπτό μέγεθος σωματιδίων αν και η χημική της σύνθεση ποικίλει ανάλογα με την ποιότητα του άνθρακα ή του λιγνίτη και τον τρόπο παραγωγής, ενώ περιέχει σημαντικές ποσότητες οξειδίων του πυριτίου και του ασβεστίου. Η ιπτάμενη τέφρα που παράγεται από την καύση του άνθρακα, έχει κυρίως ποζολανικές ιδιότητες λόγω της παρουσίας αντιδραστικού άμορφου  $\text{SiO}_2$  (διοξείδιο του πυριτίου), ενώ οι λιγνίτες έχουν υψηλότερο ποσοστό ελεύθερου  $\text{CaO}$  (Οξείδιο του ασβεστίου) και συνήθως εμφανίζουν τόσο ποζολάνες, όσο και υδραυλικές ιδιότητες[4].

Οι ιπτάμενες τέφρες χωρίζονται σε πυριτικές, με περιεκτικότητα σε  $\text{CaO}$  <10%, και σε ασβεστιτικές, με περιεκτικότητα σε  $\text{CaO}$  από 10% έως 35%. Αντίστοιχα ταξινομούνται ως Class F τις πυριτικές ιπτάμενες τέφρες και ως Class C τις ασβεστιτικές. Οι ελληνικές ιπτάμενες τέφρες προέρχονται από την καύση λιγνίτη και ανήκουν στις ασβεστιτικές (Class C) τέφρες. Η ετήσια παραγωγή ιπτάμενης τέφρας στην ελληνική περιοχή είναι της τάξεως των 12 εκατομμυρίων τόνων για το έτος 2005, [5] ενώ η ετήσια παγκόσμια παραγωγή εκτιμάται σε 985 εκατομμύρια τόνους το 2002[6].

#### 1.4 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete, sprayed concrete, guniting), αναφέρεται σε σκυρόδεμα πλούσιο σε τσιμέντο, με λεπτά αδρανή υλικά, που εφαρμόζεται με την τεχνική της εκτόξευσης υπό πίεση. Στα έργα χρησιμοποιείται πλέον κατά κόρον σε σταθεροποιήσεις σηράγγων και επισκευές κατασκευών. Κύρια χαρακτηριστικά του είναι η υψηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο, η χρήση λεπτών αδρανών και οι υψηλές απαιτήσεις πρώιμης αντοχής, κυρίως στην κατασκευή σηράγγων και επισκευαστικού υλικού.

Εμφανίστηκε ως τεχνική στις αρχές του αιώνα από τον Carl Akeley [7] και αναπτύχθηκε γρήγορα τόσο στην τεχνική (dry - mix και wet - mix shotcrete), όσο και στα υλικά πρόσθετων που ενσωματώθηκαν για να βελτιώσουν την απόδοσή τους. Ήδη από τη δεκαετία του 1980 ενσωματώθηκαν στο σκυρόδεμα, από ίνες χάλυβα ή τις ίνες πολυπροπυλενίου, ποζολανικά υλικά όπως τέφρες, πυριτική παιπάλη και τσιμέντα υψηλής αντοχής, ανάλογα με τις ειδικές απαιτήσεις του έργου [8].

Η αυξημένη χρήση του ψεκασμένου σκυροδέματος απαίτησε τη δημιουργία κανονισμών. Οι κανονισμοί αυτοί είναι της επιτροπής EFNARC του 1996, του ελληνικού Σχεδίου Προδιαγραφής για Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα και της τεχνικής οδηγίας 506R - 90 του ACI. Σε αυτό το πλαίσιο, δόθηκε η δυνατότητα χρήσης εναλλακτικών κονιών, με αντικατάσταση του τσιμέντου για την παραγωγή εκτοξευόμενου σκυροδέματος.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΥΠΆΡΧΟΥΣΑ ΓΝΩΣΗ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

### 2.1 Βιομηχανικά παραπροϊόντα σε συνθήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Η χρήση των βιομηχανικών παραπροϊόντων ως μέρος σύνθεσης σκυροδέματος παρουσιάζει μεγαλύτερα πλεονεκτήματα, λόγω της σχετικά υψηλής τιμής του τσιμέντου, αλλά και λόγω μεγαλύτερων τεχνικών και περιβαλλοντικών οφελών. Τα σημαντικότερα βιομηχανικά παραπροϊόντα με τέτοια χρήση είναι η σκωρία υψικαμίνων, η ιπτάμενη τέφρα και η πυριτική παιπάλη.

Η σκωρία υψικαμίνων, ως μέρος σύνθεσης μαζί με τσιμέντο, ερευνήθηκε από τον Mather το 1957, ενώ σε κοκκοποιημένη μορφή χρησιμοποιήθηκε από τους Hogan & Meusel το 1981 και τα τελευταία τριάντα χρόνια τυποποιήθηκε ως λειοτριβημένη-κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνων (ground granulated blastfurnace slag – GGBS). Η σκωρία αυτή, λόγω του τρόπου παραγωγής της ( ταχεία ψύξη με νερό ) σχηματίζει μεγάλο ποσοστό άμορφου πυριτίου και αποκτά ισχυρή ποζολανική δράση. Οι Malhotra & Mehta αναφέρουν ως σημαντικότερα πλεονεκτήματα από τη χρήση της ως μέρος σύνθεσης τη μείωση της απαίτησης νερού, την αύξηση της τελικής αντοχής και τη μείωση της ρηγμάτωσης λόγω θερμότητας ενυδάτωσης. [9].

Το πυρίτιο (πυριτική παιπάλη) είναι ένα άλλο ισχυρό ποζολανικό, ένα υποπροϊόν της βιομηχανικής κατασκευής μεταλλικού πυριτίου ή σιδηροπυριτίου, η χρήση του οποίου έχει υιοθετηθεί ευρέως από τη δεκαετία του 1980. Η μεγάλη λεπτότητα του υλικού και η ισχυρή ποζολανική του δράση, το καθιστούν ένα ιδιαίτερα δημοφιλές εργαλείο για τη βελτίωση της επεξεργασιμότητας, της αντοχής και της ανθεκτικότητας των παραγόμενων μιγμάτων [10].

Η χρήση ιπτάμενης τέφρας, ως μέρος σύνθεσης τσιμέντου σε σκυρόδεμα, βασίστηκε στις ποζολανικές ιδιότητές του, λόγω της παρουσίας αντιδραστικού SiO<sub>2</sub> (Διοξείδιο του πυριτίου) και της ικανότητας του να αντιδράσει με ασβέστη και να δώσει σκληρυμένα προϊόντα με τσιμεντοειδείς ιδιότητες. Βασικός παράγοντας που επηρεάζει τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά της ιπτάμενης τέφρας είναι ο τύπος του καυσίμου από τον οποίο παράγεται (άνθρακας ή λιγνίτης) [11]. Η ποζολανική αντίδραση αναπτύσσεται με βραδύτερο ρυθμό από την υδραυλική αντίδραση του τσιμέντου και εξαρτάται τόσο από την περιεκτικότητα της τέφρας σε πυρίτιο, όσο και από το λεπτότητά της. Έτσι πρέπει να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα κατά το σχεδιασμό των μειγμάτων. [12]. Στον ελληνικό χώρο η Παπαγιάννη μελέτησε τις αντίστοιχες ιδιότητες των ελληνικών ιπτάμενων τεφρών [13].

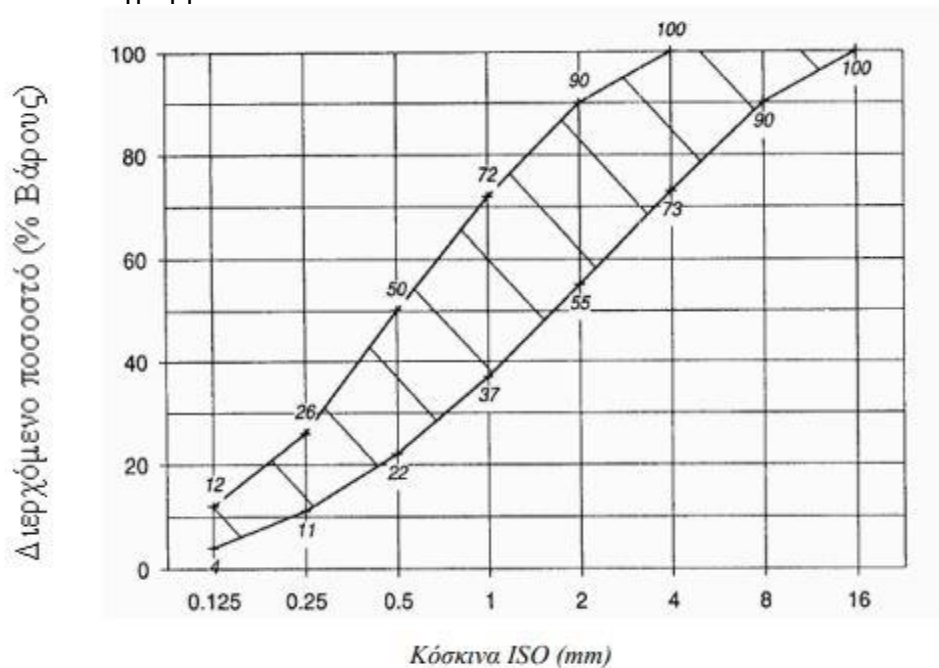
## ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΕΡΟΣ : ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

### Κεφάλαιο 3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

#### 3.1 Επιλογή των αδρανών υλικών

Βάσει ΠΕΤΕΠ 2008 πρέπει

- 1) Η σύνθεση να περιέχει απο 8mm εως 12mm <10%
- 2) πάντα <12mm
- 3) Περιεκτικότητα των αδρανών (φυσική υγρασία) πρέπει να είναι μικρότερη από 6% του βάρους των αδρανών.
- 4) Το μίγμα των αδρανών πρέπει να βρίσκεται εντός της σκιασμένης περιοχής που δίνεται στοδιάγραμμα



### 3.2 Ειδικό βάρος, πυκνότητα και υδαταπορροφητικότητα

Είδος αδρανών: Θραυστά Ασβεστολιθικά (Χαλυψ)

#### ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΙΔΙΚΩΝ ΒΑΡΩΝ ΚΑΙ ΥΔΡΟΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΑΔΡΑΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Φαινόμενο ειδικό βάρος (apparent specific gravity): είναι ο λόγος του βάρους του αδρανούς, προς τον όγκο συμπαγούς υλικού και των αδιαπέρατων κενών (κλειστών πόρων).

Μεικτό φαινόμενο ειδικό βάρος (bulk specific gravity): είναι ο λόγος του βάρους του αδρανούς, προς τον συνολικό φαινόμενο όγκο (όγκο συμπαγούς υλικού, διαπερατών και αδιαπέρατων πόρων, όχι όμως και των κενών μεταξύ των πόρων).

Μεικτό φαινόμενο ειδικό βάρος κορεσμένου υλικού επιφανειακά ξηρού (bulk specific gravity / Saturated - Surface - Dry): είναι ο λόγος του συνολικού βάρους του αδρανούς και του νερού που προσροφήθηκε προς το συνολικό φαινόμενο όγκο .

Υδροαπορροφητικότητα % (absorption) : είναι η ποσότητα του νερού που απορροφάται από 100 gr του υλικού σε ορισμένο χρόνο και θερμοκρασία.

#### Συσκευή

– Ζυγός ακριβείας 0,05% του βάρους του, προς εξέταση δείγματος και ικανότητας 5 kg τουλάχιστον. Ο ζυγός πρέπει να φέρει διάταξη ανάρτησης καλαθιού στο κάτω μέρος του.

– Συρμάτινο καλάθι κυλινδρικού σχήματος κατασκευασμένο από ανοξείδωτο πλέγμα Νο 6 διαμέτρου 20 cm και ύψους 20cm. – Δοχείο νερού που να επιτρέπει ανεμπόδιστα την βύθιση του καλαθιού σ' αυτό.

#### Εκτέλεση

1. Βάζουμε το δείγμα σε δοχείο με νερό για 24 ώρες και σε θερμοκρασία περίπου 20 °C.

2. Βγάζουμε το δείγμα από το νερό, το σκουπίζουμε προσεκτικά με απορροφητικό χαρτί για να διώξουμε την επιφανειακή υγρασία και το ζυγίζουμε ( Β ). Το δείγμα, σ' αυτή την κατάσταση είναι κορεσμένο και επιφανειακά ξηρό.

3. Στην συνέχεια τοποθετούμε το δείγμα σε συρμάτινο καλάθι που είναι συνδεδεμένο με το ζυγό και αφού βυθίσουμε το καλάθι μέσα στον κύλινδρο με το νερό ξαναζυγίζουμε.( Γ ). Λόγω της άνωσης το δείγμα μέσα στο νερό ζυγίζει λιγότερο, τόσο όσο και η άνωση.

4. Ξηραίνουμε το δείγμα στο φούρνο στους 105 °C περίπου και το ζυγίζουμε.(Δ)

## Υπολογισμοί

- μεικτό φαινόμενο ειδικό βάρος =  $\Delta/(B-\Gamma)$
- μεικτό φαινόμενο ειδικό βάρος (κορεσμένο, επιφ. ξηρό) =  $B/(B-\Gamma)$
- φαινόμενο ειδικό βάρος =  $\Delta/(\Delta-\Gamma)$
- υδροαπορροφητικότητα % =  $100*(B-\Delta)$

Medium Aggregate	
Ξηρό δείγμα στο φούρνο (Δ)	1611.5
Κορεσμένο επιφανιακά ξηρό (B)	1629.25
Κορεσμένο μέσα στο Νερό (Γ)	1003.8
Μεικτό φαινόμενο ειδικό βάρος = $\Delta/(B-\Gamma)$	2.58
Μεικτό φαινόμενο ειδικό βάρος (κορεσμένο, επιφ. ξηρό) = $B/(B-\Gamma)$	2.60
Φαινόμενο ειδικό βάρος = $\Delta/(\Delta-\Gamma)$	2.65
Υδροαπορροφητικότητα % = $100*(B-\Delta)/\Delta$	1.10

Sand Aggregate	
Ξηρό δείγμα στο φούρνο (Δ)	489.7
Κορεσμένο επιφανιακά ξηρό (B)	500.82
Κορεσμένο μέσα στο Νερό (Γ)	308.46
Μεικτό φαινόμενο ειδικό βάρος = $\Delta/(B-\Gamma)$	2.55
Μεικτό φαινόμενο ειδικό βάρος (κορεσμένο, επιφ. ξηρό) = $B/(B-\Gamma)$	2.60
Φαινόμενο ειδικό βάρος = $\Delta/(\Delta-\Gamma)$	2.70
Υδροαπορροφητικότητα % = $100*(B-\Delta)/\Delta$	2.27

α/α	Mix%	Κορεσμένο, επιφ. ξηρό	υδρο/κότητα %
Medium	10	2.60	1.1
Sand	90	2.55	2.3

### 3.3 Κοκκομετρία

Κοκκομετρική Ανάλυση απο πιστοποιημένα Κόσκινα με Βάση  
B.S./ISO.3310-1:2000  
B.S.410-1:2000 και A.S.T.M E11

Πίνακας 3.1. Κοκκομετρική Ανάλυση σε χαλίκι

MEDIUM			
Αρχικό Βάρος Δοκιμής (gr.)=			<b>1000</b>
Κόσκινα	Συγκρατούμενο (gr.)	Συνολικό Βάρος (gr.)	Ποσοστό Διερχόμενου
25.4	0	0.00	100.00
16	0	0.00	100.00
12.7	0	0.00	100.00
8	111.2	111.20	88.88
4	328.6	439.80	56.02
2	422	861.80	13.82
1	83.4	945.20	5.48
0.5	13.28	958.48	4.15
0.25	7.41	965.89	3.41
0.125	7.94	973.83	2.62
0.063	16.09	989.92	1.01
-	8.89	998.81	0.12

Πίνακας 3.2. Κοκκομετρική Ανάλυση σε άμμο

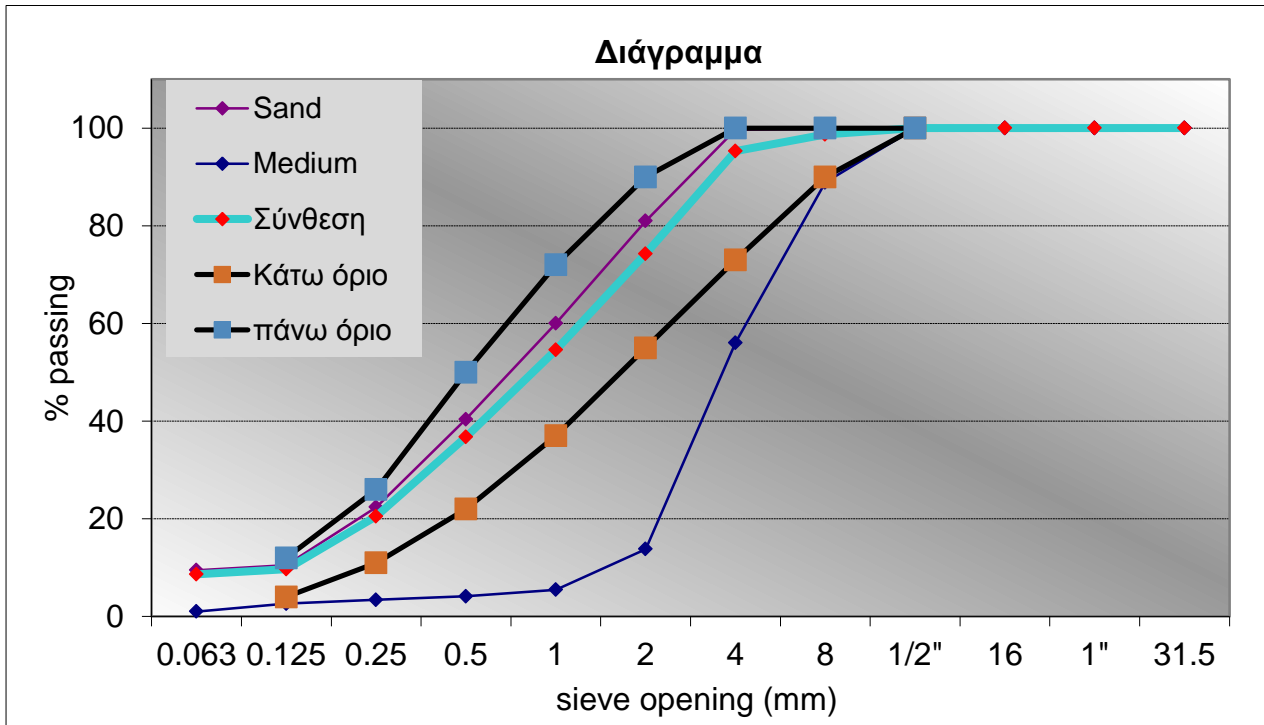
SAND			
Αρχικό Βάρος Δοκιμής (gr.)=			<b>1000</b>
Κόσκινα	Συγκρατούμενο (gr.)	Συνολικό Βάρος (gr.)	Ποσοστό Διερχόμενου
25.4	0	0.00	100.00
16	0	0.00	100.00
12.7	0	0.00	100.00
8	1.7	1.70	99.83
4	1.9	3.60	99.64
2	186.5	190.10	80.99
1	209.7	399.80	60.02
0.5	196.5	596.30	40.37
0.25	179.7	776.00	22.40
0.125	119.2	895.20	10.48
0.063	10	905.20	9.48
-	93.7	998.90	0.11

### 3.4 Κοκκομετρική σύνθεση αδρανών

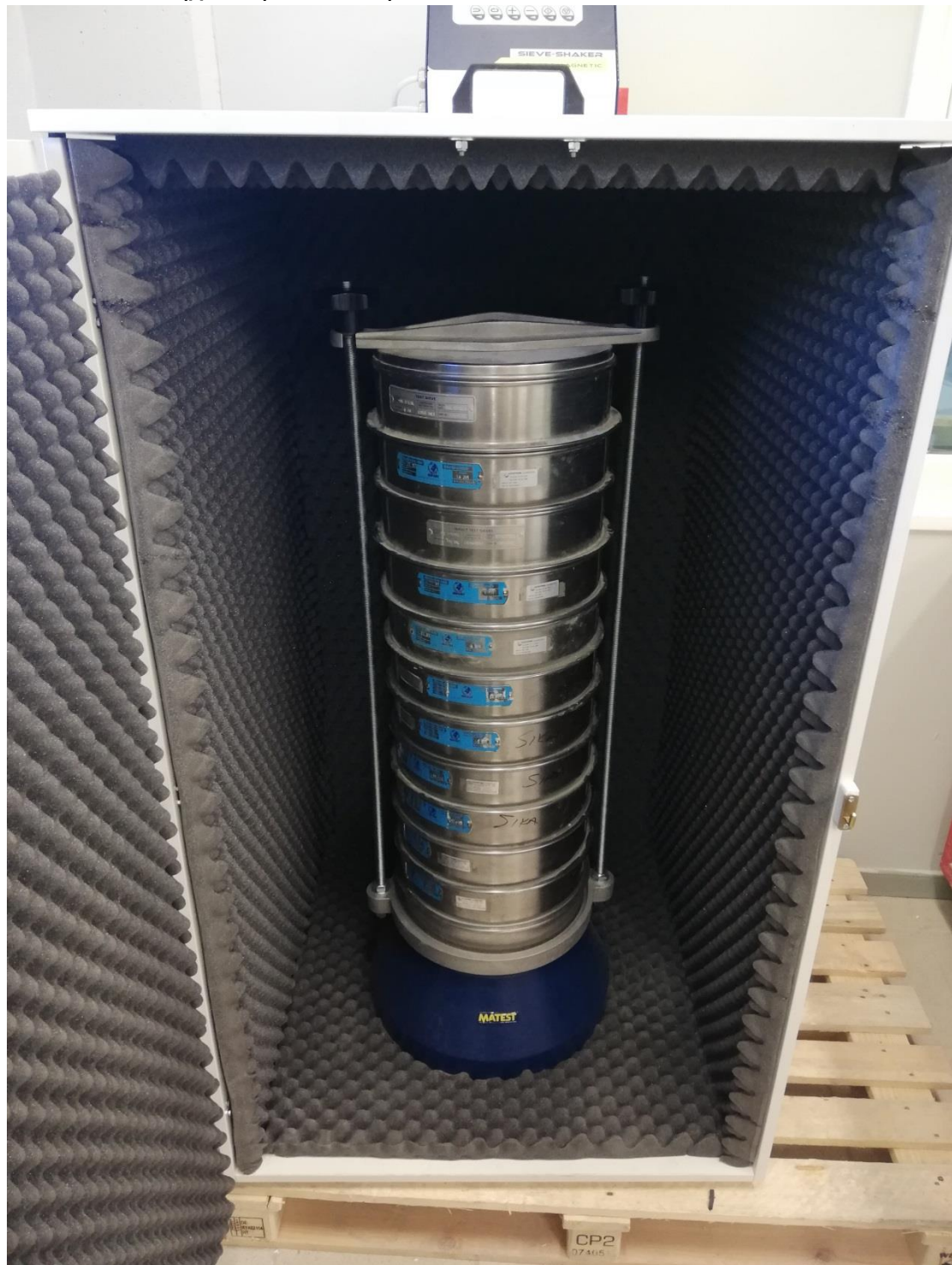
Πίνακας 3.3. Κοκκομετρική Ανάλυση σύνθεσης αδρανών

SIEVES	sieve opening (mm)	lower limit	upper limit	medium	sand	SYNTHESIS
0.063	0.063			1.01	9.48	8.63
0.125	0.125	4	12	2.62	10.48	9.69
0.25	0.25	11	26	3.41	22.4	20.50
0.5	0.5	22	50	4.15	40.37	36.75
1	1	37	72	5.48	60.02	54.57
2	2	55	90	13.82	80.99	74.27
4	4	73	100	56.02	99.64	95.28
8	8	90	100	88.88	99.83	98.74
1/2"	12.7	100	100	100.00	100	100.00
16	16			100.00	100	100.00
1"	25.4			100.00	100	100.00
31.5	31.5			100	100	100.00
<b>% of the total aggregate weight</b>				<b>10</b>	<b>90</b>	<b>100.0</b>

Διάγραμμα 1. Όρια βάσει ΠΕΤΕΠ 2008, Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών και σύνθεσης .



Εικόνα 3.1. Μηχανική κοσκίνιση





## Κεφάλαιο 4 ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

### 4.1 Εισαγωγή

Η σειρά συνθέσεων εκτοξευόμενου σκυροδέματος σχεδιάστηκε με τις πιο κάτω επιλογές.

-Τύπος τσιμέντου: LAFARGE - CEM II 42,5 R

	w/c	Εξάπλωση (mm)	Πυκνότητα (g/mL)	Αέρας (%)	1d (Mpa)	7d (Mpa)	28d (Mpa)
Lab Test	0.5	175	2167	6	19.3	38.8	50.1

-Είδος αδρανών: Άμμος , Γαρμπίλι Χάλυψ

-Μέγιστος κόκκος αδρανών: 11,5mm

-Λόγος νερού προς κονία (N/K): 0,47

-Χρήση ρευστοποιητή για την επίτευξη της εργασιμότητας **SIKA Ultra-500**

Οι παράμετροι ελέγχου για τις συνθέσεις ήταν οι παρακάτω:

-Περιεκτικότητα σε τσιμέντο:440/m<sup>3</sup>

-Σχεδιασμός μίας συμβατικής σύνθεσης αναφοράς μόνο με τσιμέντο ως συνδετική κονία

-Τριών εναλλακτικών με 10%, 15%, 20% αντικατάσταση του τσιμέντου με σκωρία κάδου,

-Τριών εναλλακτικών με 10%, 15%, 20% αντικατάσταση του τσιμέντου με Ιπτάμενη τέφρα, Περιεκτικότητας 10% ελεύθερου Ασβεστίου

-Τριών εναλλακτικών με 10%, 15%, 20% αντικατάσταση του τσιμέντου με Ιπτάμενη τέφρα, Περιεκτικότητας 13% ελεύθερου Ασβεστίου

Τελικά παρασκευάστηκαν δέκα διαφορετικές συνθέσεις, τα χαρακτηριστικά των οποίων δίνονται στον Πίνακα 4.1 και 4.2

## 4.2 Μελέτη συνθέσεων εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Πίνακα 4.1. Χαρακτηριστικά συνθέσεων

Σύνθεση		1	2	3	4	
Τσιμέντο (kg/m <sup>3</sup> )		440	440	440	440	
Σκωρία κάδου (%)		-	10	15	20	
Ιπτάμενη τέφρα 10% ελεύθ. Ασβεστίου (%)		-	-	-	-	
Ιπτάμενη τέφρα 13% ελεύθ. Ασβεστίου (%)		-	-	-	-	
Medium (mm)		0 - 11.5	0 - 11.5	0 - 11.5	0 - 11.5	
Sand (mm)		0 - 8	0 - 8	0 - 8	0 - 8	
Λογος N/K (w/b)		0.47	0.47	0.47	0.47	
Ρευστ/της Ultra-500 (%)		1.2	1.2	1.2	1.2	
Εργασιμότητα εξάπλωσης (cm)		<b>EN12350.05</b>				
		to +7 min	61	64.5	61.5	68
		to +30 min	56	57.5	58	59.5
Κάθηση (cm)		<b>EN12350.02</b>				
		to +7 min	26	26	25.5	26
		to +30 min	24	24	24	25
Εξάπλωση Κάθησης (cm)						
		to +7 min	54	53	50	58
		to +30 min	43	43.5	40	46
Φαινόμενη Πυκνότητα νωπού (kg/m <sup>3</sup> )		<b>EN12350.06</b>	2.261	2.286	2.257	2.263
Αέρας (%)		<b>EN12350.07</b>	6.2	6.4	7.2	6.4

Πίνακα 4.2. Χαρακτηριστικά συνθέσεων

Σύνθεση		5	6	7	8	9	10	
Τσιμέντο (kg/m <sup>3</sup> )		440	440	440	440	440	440	
Σκωρία κάδου (%)		-	-	-	-	-	-	
Ιπτάμενη τέφρα 10% ελεύθ. Ασβεστίου (%)		10	15	20	-	-	-	
Ιπτάμενη τέφρα 13% ελεύθ. Ασβεστίου (%)		-	-	-	10	15	20	
Medium (mm)		0 - 11.5	0 - 11.5	0 - 11.5	0 - 11.5	0 - 11.5	0 - 11.5	
Sand (mm)		0 - 8	0 - 8	0 - 8	0 - 8	0 - 8	0 - 8	
Λογος N/K (w/b)		0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	
Ρευστ/της Ultra-500 (%)		1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	
Εργασιμότητα εξάπλωσης (cm)		<b>EN12350.05</b>						
		to +7 min	57.5	59	49	57	53	49
		to +30 min	46	40.5	32	45	40	32
Κάθηση (cm)		<b>EN12350.02</b>						
		to +7 min	24.5	25.5	22	23	23	22.5
		to +30 min	19	15	7	19	14.5	9.5
Εξάπλωση Κάθησης (cm)								
		to +7 min	46	46	35	45	40	30
		to +30 min	29	-	-	-	-	-
Φαινόμενη Πυκνότητα νωπού (kg/m <sup>3</sup> )		<b>EN12350.06</b>	2.288	2.278	2.288	2.301	2.295	2.303
Αέρας (%)		<b>EN12350.07</b>	5.8	6	5.4	5.4	5.4	5



Εικόνα 4.1 Μίξερ σκυροδέματος



Εικόνα 4.2 Τράπεζα εξάπλωσης κάθισης



Εικόνα 4.3 Τράπεζα κάθισης



Εικόνα 4.4 Τράπεζα εξάπλωσης



Εικόνα 4.(5,6,7) Αερόμετρο σκυροδέματος



Για κάθε μία από τις συνθέσεις παρασκευάστηκαν 10 κυβικά δοκίμια διαστάσεων 15x15x15cm τα οποία συμπυκνώθηκαν με δονητή και συντηρήθηκαν σε σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας 20°C και υγρασίας 100% RH μέχρι την ημερομηνία διεξαγωγής των ελέγχων.

Εικόνα 4.(8,9,10) Μήτρα σκυροδέματος 15\* 15\*15 με πιστοποίηση



#### 4.3 Έλεγχοι εργαστηριακών συνθέσεων εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Στα δοκίμια των εργαστηριακών συνθέσεων μετρήθηκε η αντοχή σε θλίψη. Οι αντοχές προέκυψαν από τον έλεγχο δύο δοκιμίων 15\*15\*15 για κάθε έλεγχο ανά σύνθεση, προκειμένου να ελεγχθεί ο ρυθμός ανάπτυξης αντοχών, αναγράφονται στον Πίνακα 5, 6 και 7.

Πίνακα 5. Μηχανικές ιδιότητες δοκιμαστικών συνθέσεων

Σύνθεση		1	2	3	4
Compressive Strength:	EN 12390.03	Reference	Slag 10%	Slag 15%	Slag 20%
1 d (x2)	MPa	35.9	32.8	27.5	24.7
8 d (x2)		54.4	51.9	46.3	44.8
28 d (x2)		60.5	58.9	53.4	49.4
56 d (x2)		66.1	61.3	57.7	53.6
140 d (x2)		71.4	67.3	65.0	58.1

Πίνακα 6. Μηχανικές ιδιότητες δοκιμαστικών συνθέσεων

Σύνθεση		5	6	7
Compressive Strength:	EN 12390.03	Ιπ.Τέφρα 10%	Ιπ.Τέφρα 15%	Ιπ.Τέφρα 20%
1 d (x2)	MPa	32.5	32.4	35.5
8 d (x2)		49.9	50.3	49.8
28 d (x2)		63.2	63.5	64.1
56 d (x2)		64.5	64.8	69.1
140 d (x2)		71.5	73.0	74.0

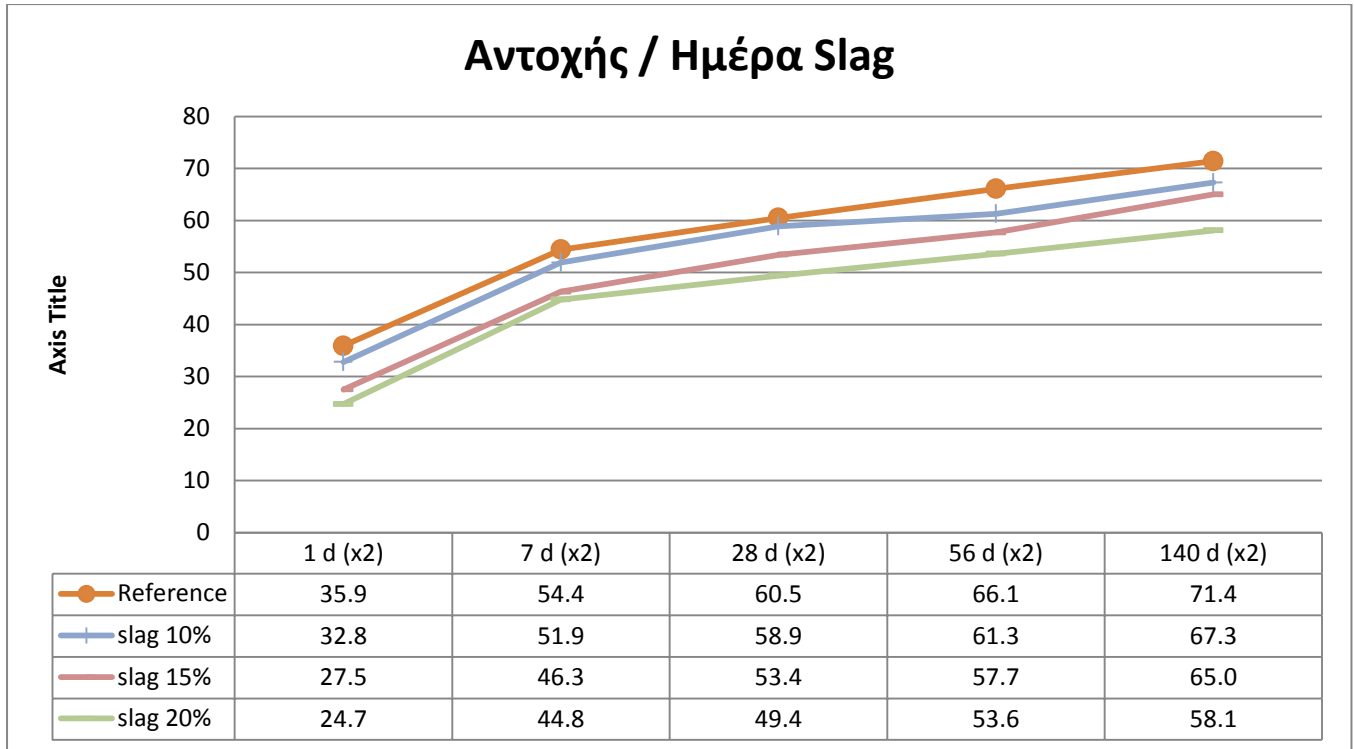
Πίνακα 7. Μηχανικές ιδιότητες δοκιμαστικών συνθέσεων

Σύνθεση		8	9	10
Compressive Strength:	EN 12390.03	Ιπ.Τέφρα 10%	Ιπ.Τέφρα 15%	Ιπ.Τέφρα 20%
1 d (x2)	MPa	36.2	34.8	36.9
8 d (x2)		54	55.1	55.1
28 d (x2)		64.5	65.5	66.7
56 d (x2)		72.1	68.1	67.6
140 d (x2)		73.8	72.6	68.2

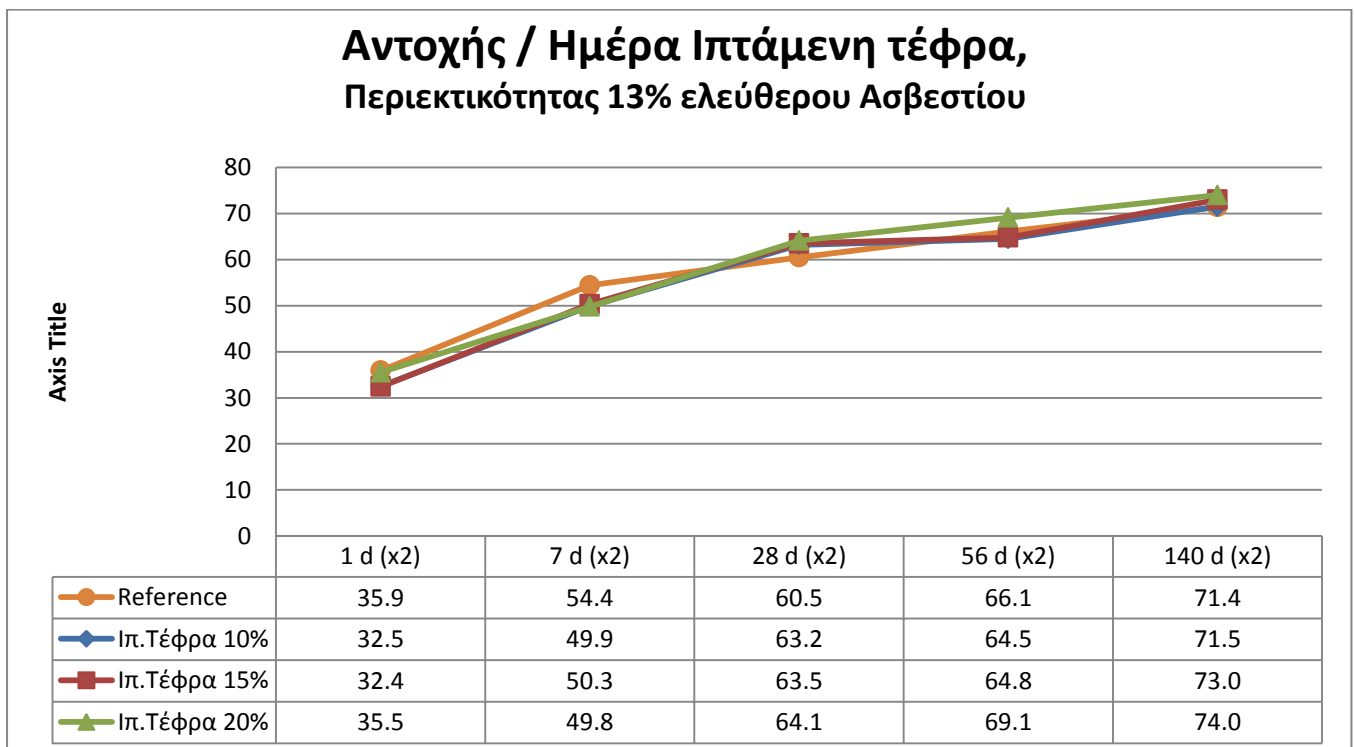


## ΤΡΙΤΟ ΜΕΡΟΣ : ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

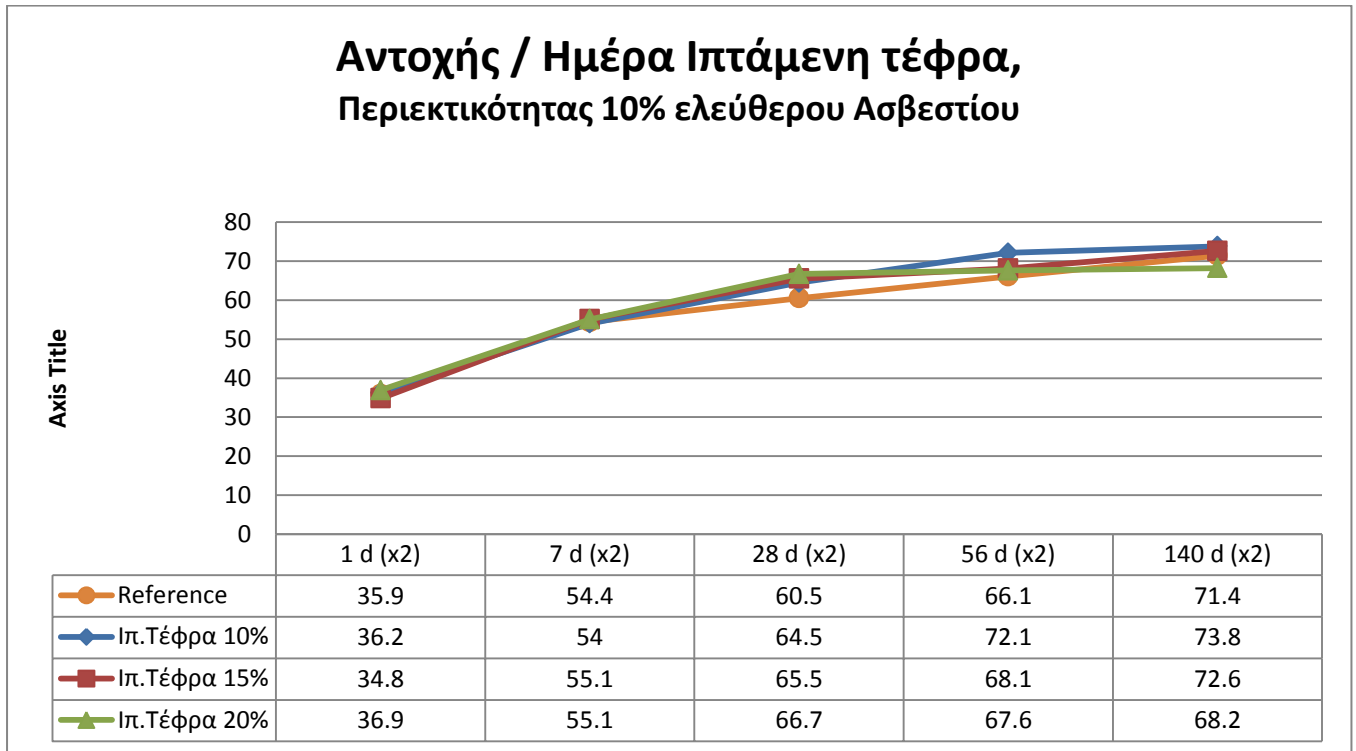
Διάγραμμα 1. Αποτελέσματα αντοχών Slag.



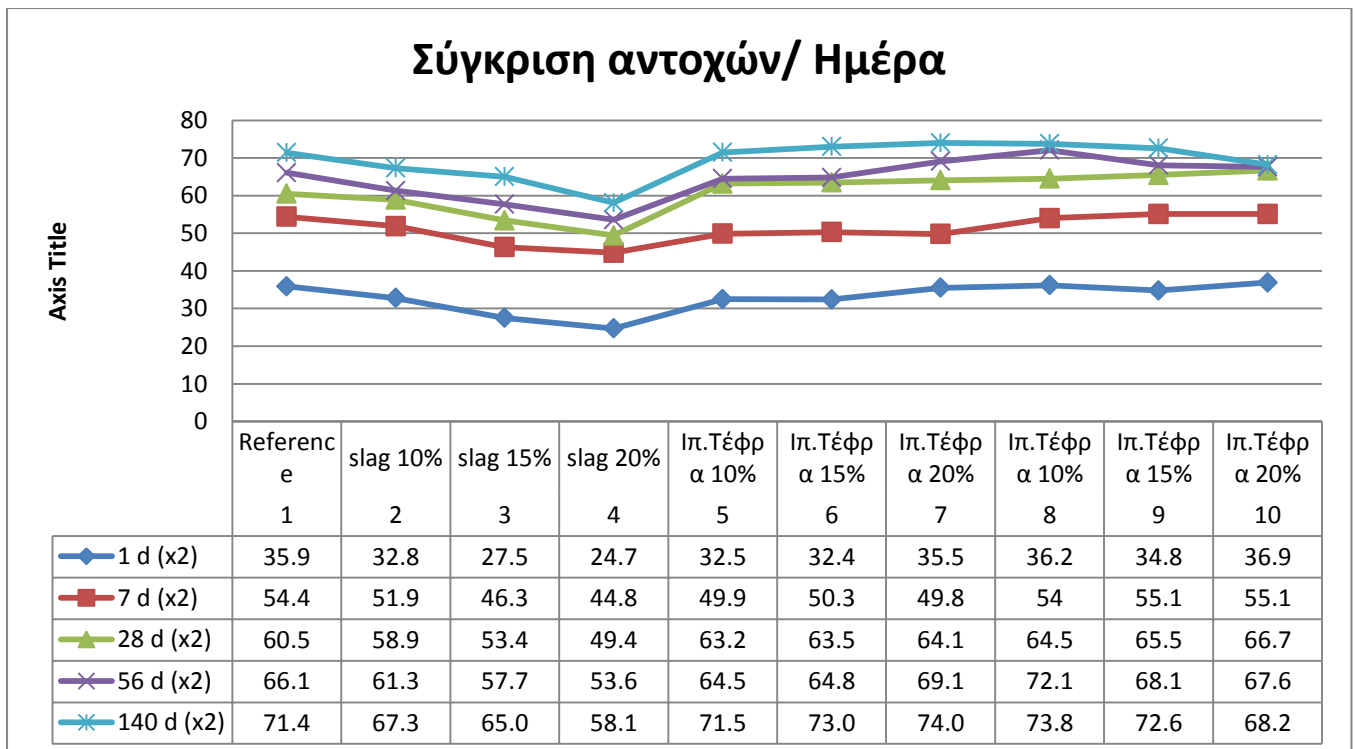
Διάγραμμα 2. Αποτελέσματα αντοχών Ιπτάμενης Τέφρας (13% ελεύθερου Ασβεστίου)



Διάγραμμα 3. Αποτελέσματα αντοχών Ιπτάμενης Τέφρας (10% ελεύθερου Ασβεστίου)



Διάγραμμα 4. Σύγκριση των συνθέσεων ανά ημέρα



## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην αντικατάσταση τσιμέντου με τη σκωρία υπάρχει μία σταδιακή πτώση αντοχών, ανάλογη με το ποσοστό αντικατάσταση του τσιμέντου. Επίσης, είναι σημαντικό να αναφερθεί, πως η ανάπτυξη αντοχών με την πάροδο του χρόνου ανά σύνθεση, ακολουθεί σχεδόν τον ίδιο ρυθμό. Αξίζει να σημειωθεί, πως τα μίγματα στα οποία έγινε αντικατάσταση, εμφανίστηκε μία ελαφρώς πιο κολλώδης συμπεριφορά, όχι τόσο αρνητική στα ποσοστά 10% και 15%. Το 20% δεν είναι αποδεκτό.

Στην αντικατάσταση τσιμέντου από την ιπτάμενη τέφρα περιεκτικότητας 13% ελεύθερου ασβεστίου στις πρώιμες αντοχές, παρατηρείται μία πτώση σε σχέση με το αναφοράς, ενώ μετά τις 28 ημέρες παρατηρείται μία άνοδος στο πέρασμα του χρόνου, η οποία πηγαιίνει και παράλληλα με την αντικατάσταση, κάτι το οποίο δεν ήταν αναμενόμενο. Αυτό οφείλεται στην περιεκτικότητα ελεύθερου ασβεστίου που είναι 13% και σε συνδυασμό με την αντικατάσταση 10 15 και 20 καταλήγουμε σε μεγαλύτερη περιεκτικότητα αυτού(ελεύθερου ασβεστίου), με αποτέλεσμα μακροπρόθεσμα να βλέπουμε υψηλότερες αντοχές. Αυτό βέβαια δεν σημαίνει ότι είναι αποδεκτό σαν σύνθεση, διότι κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας παρατηρήθηκε μία κακή διατήρηση εργασιμότητας και η υφή ήταν αποδεκτή μέχρι και αντικατάσταση 10%. Η περιεκτικότητας 13% ελεύθερου ασβεστίου είναι υψηλή μπορεί να υπάρχουν επιπτώσεις ενανθράκωση.

Στην αντικατάσταση τσιμέντου από την ιπτάμενη τέφρα περιεκτικότητας 10% ελεύθερου ασβεστίου, στις πρώιμες αντοχές παρατηρείται μία σταθερότητα σε σχέση με το αναφοράς, ενώ μετά από τις 28 ημέρες υπάρχει μία άνοδος με την πάροδο του χρόνου. Όμως μειώνεται η ανάπτυξη αντοχών όσο αυξάνεται η αντικατάσταση της εκάστοτε συνθέσεως. Αυτό οφείλεται στην περιεκτικότητα ελεύθερου ασβεστίου που είναι 10%, σε συνδυασμό με την αντικατάσταση 10 15 και 20 καταλήγουμε σε μικροτερη περιεκτικότητα ελεύθερου ασβεστίου από ότι στη προηγούμενη σειρά δοκιμών, σε σχέση με τις αντικαταστάσεις. Σαν μακροπρόθεσμο αποτέλεσμα βλέπουμε μειωμένη ανάπτυξη αντοχών. Η υφή ήταν αποδεκτή μέχρι και αντικατάσταση 10%.

Τέλος, σε όλες τις συνθέσεις, έχει γίνει αντικατάσταση τσιμέντου με τα αντίστοιχα υλικά, αλλά το ποσό νερού και ρευστοποιητή έχει παραμείνει ίδιο και δεν έχει αλλάξει σύμφωνα με τον λόγο τσιμέντου. Αυτό συνεπάγεται καθαρό κέρδος, αν οι αντοχές είναι αποδεκτές ή γίνει χρήση οικονομικού προσμίκτη.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Van Oss, H. G. (2003). Slag-iron and steel. *US geological survey minerals yearbook*.
- [2] Bilodeau, A., & Malhotra, V. M. (2000). High-volume fly ash system: concrete solution for sustainable development
- [3] Steel Statistical Yearbook. (χ.χ.). Ανακτήθηκε 11 Φεβρουάριος 2019, από <http://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook.html>
- [4] Mehta, P., & Monteiro, P. (2006). *M. Concrete: microstructure, properties, and materials*. 3rd. *New York*.
- [5] Tsimas, S. (2005). ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΔΕΗ
- [6] Barnes, I., & Sear, L. (2004). *Ash utilisation from coal-based power plants*. DTI.
- [7] Akeley, C. E. (1911). Process of producing and depositing plastic or adhesive mixtures.
- [8] Morgan, D. (1988). Use of supplementary cementing materials in shotcrete
- [9] Malhotra, V. M., & Mehta, P. K. (1996). *Pozzolanic and cementitious materials*. CRC Press.
- [10] Malhotra, V. M. (1987). *Condensed Silica Fume in Concrete: 0*. CRC Press.
- [11] Derucher, K. N., Korfiatis, G. P., & Ezeldin, A. S. (1998). *Materials for Highway and Civil*
- [12] Berry, E., & Malhotra, V. M. (1980). Fly ash for use in concrete-a critical review  
Engineers.
- [13] Papayianni, J. (1987). An investigation of the pozzolanicity and hydraulic reactivity of a high-lime fly ash. *Magazine of Concrete Research*