# ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ



## ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ : «ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΧΗΜΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ»

## ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ

AMENTA MAPIA

Επιβλέπουσα : Επίκ.Καθηγήτρια Μαραβελάκη Παγώνα

XANIA , 2012

## Πρόλογος :

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Κεραμικών και Σύνθετων Υλικών του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος σε συνεργασία με την Επιβλέπουσα Καθηγήτρια κα Μαραβελάκη Παγώνα, Καθηγήτρια του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης, στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών: «Εφαρμοσμένες Επιστήμες και Τεχνολογία», του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης για την ανάληψη Διπλώματος Ειδίκευσης με κατεύθυνση στις Ενεργειακές και Περιβαλλοντικές Χημικές Τεχνολογίες.

Η μέτρηση των μηχανικών αντοχών των σκληρυμένων κονιαμάτων πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Προηγμένων Κεραμικών του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος. Η παρατήρηση δειγμάτων στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος. Τέλος, η ορυκτολογική ανάλυση πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Κρυσταλλογραφίας Ακτίνων Χ του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος.

Στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή συμμετέχουν οι καθηγητές του Τομέα Χημείας του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Καλλίθρακας Νικόλαος και κ. Γεντεκάκης Ιωάννης.

Με την ολοκλήρωση της παρούσης εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν με κάθε τρόπο στην πραγματοποίηση της:

- τον Δρ. Κυλίκογλου Βασίλειο, Διευθυντή Ερευνών του Εργαστηρίου Κεραμικών
   και Σύνθετων Υλικών το ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος για την μακρόχρονη εμπιστοσύνη
   και το ειλικρινές του ενδιαφέρον καθώς και την πολύτιμη καθοδήγηση του,
- τον Δρ. Καρατάσιο Ιωάννη, Ερευνητή του Εργαστηρίου Κεραμικών και Σύνθετων Υλικών στο ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος για την ακούραστη βοήθεια και καθοδήγηση σε όλα τα στάδια της εργασίας και την διαρκή στήριξη και κατανόηση που μου έδειξε,
- την κα Καλαγρή Άννα MSc Χημικό Μηχανικό, για τις πολύτιμες συμβουλές και παρατηρήσεις και το ευχάριστο κλίμα της συνεργασίας μας,

- τους Δρ. Γεώργιο Βεκίνη, Διευθυντή Ερευνών του Εργαστηρίου Προηγμένων Κεραμικών, Δρ. Βασίλειο Ψυχάρη ερευνητή του εργαστηρίου Κρυσταλλογραφίας Ακτίνων Χ, Δρ. Αναστάσιο Τραυλό Διευθυντή Ερευνών και Δρ. Νίκο Μπούκο ερευνητή, του Εργαστηρίου Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας, για την υποστήριξη τους κατά την διεξαγωγή των αναλύσεων και των δοκιμών,
- τους Δρ. Anno Hein και Δρ. Noemi Mueller ερευνητικό προσωπικό του Εργαστηρίου Κεραμικών και Σύνθετων Υλικών στο ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος καθώς και τις Υ. Δ. κα Τζιότζιου Μαρία και κα Φαρμακαλίδου Λένια για την συμπαράσταση τους και τις εποικοδομητικές συζητήσεις.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους του προσωπικού μου κύκλου για την διαρκή υποστήριξη και συμπαράσταση.

1. Eu	σαγωγή	3		
1.1	Εργασιμότητα του νωπού μίγματος	4		
1.2	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αδρανών	5		
1.3	Κοκκοδιαβάθμιση αδρανών	6		
1.4	Πυκνότητα στοίβαξης (packing density) αδρανών	8		
1.5	Μέτρο λεπτότητας (FM), συντελεστής ομοιομορφίας (Cu), ποσοστό			
παιπά	ίλης (% fines)	10		
1.6	Μηχανικές ιδιότητες σκληρυμένου κονιάματος	10		
1.7	Αντικείμενο και στόχοι της εργασίας	10		
<ol> <li>Πε</li> </ol>	ιραματικό Μέρος	17		
2.1.	Χαρακτηρισμός Άμμων	17		
2.1	.1 Επιλογή πρώτων υλών:	17		
2.1	.2 Μορφολογικά Χαρακτηριστικά-Μελέτη κοκκοδιαβάθμισης	17		
2.1	.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά	20		
2.1	.4 Χημική και Ορυκτολογική ανάλυση	23		
2.1	.5 Μελέτη φυσικών ιδιοτήτων -Μετρήσεις Πυκνότητας- Φαινόμενου			
βάι	ρους και ποσοστού όγκου κενών	25		
2.2.	Σχεδιασμός συνθέσεων κονιαμάτων	28		
2.3.	Μελέτη συνθέσεων κονιαμάτων	31		
2.3	.1 Μελέτη Μηχανικών ιδιοτήτων	31		
2.3	.2 Μέτρηση μέτρου ελαστικότητας με υπερήχους	33		
2.3	.3 Συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης	34		
2.3	.4 Μέτρηση φαινόμενης πυκνότητας και πορώδους	34		
2.3	.5 Έλεγχος βάθους ενανθράκωσης (τεστ φαινολοφθαλεϊνης)	35		
2.3	.6 Μελέτη μικροδομής (SEM)	36		
2.3	.7 Ορυκτολογική ανάλυση	36		
3. Aπ	οτελέσματα – Συζήτηση	37		
3.1	Ρεολογικές ιδιότητες	37		
3.1	.1 Ο ρόλος της κονίας	37		
3.1	.2 Η μεταβολή του πορώδους	40		
3.2	Μηχανικές ιδιότητες	47		
3.2	.1 Επίδραση του ποσοστού της κονίας	50		
3.2	.2 Επίδραση του νερού ανάμιξης	52		
3.2.3 Επίδραση του πορώδους56				

	3.2.4 Επίδραση των ιδιοτήτων των αδρανών	57
4.	Συμπεράσματα	60
5.	Βιβλιογραφικές Παραπομπές	62
Пα	ιράρτημα 1	66

### 1. Εισαγωγή

Τα κονιάματα είναι σύνθετα υλικά που αποτελούνται από ένα συνδετικό υλικό - την κονία, τα αδρανή<sup>1</sup> και νερό. Καθένα από τα παραπάνω συστατικά καθώς και οι μεταξύ τους αναλογίες επηρεάζουν τη μικροδομή, τις ρεολογικές και τις μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων. Η συστηματική μελέτη της τεχνολογίας παρασκευής των κονιαμάτων μπορεί να οδηγήσει σε μια πιο ολοκληρωμένη, ολιστική θεώρηση της αλληλεπίδρασης των επιμέρους συστατικών τους και συνεπώς, στην βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των νέων συνθέσεων, στην επίτευξη συγκεκριμένων ιδιοτήτων από τα σκληρυμένα μίγματα και τελικώς, στην μεγιστοποίηση της οικονομίας και της απόδοσής τους κατά τη χρήση τους. Οι παραπάνω παράμετροι έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον τόσο στη δόμηση και τις κατασκευές, όσο και στα έργα αποκατάστασης των αρχιτεκτονικών μνημείων, όπου τα νέα κονιάματα καλούνται να ικανοποιήσουν συγκεκριμένες απαιτήσεις συμβατότητας και επιτελεστικότητας. Είναι απαραίτητο, λοιπόν, πέρα από την μελέτη των ιδιοτήτων των επιμέρους συστατικών, να μελετηθεί ο συσχετισμός αυτών, καθώς και η επίδραση τους στις ιδιότητες των τελικών κονιαμάτων.

Τα αδρανή αποτελούν τον δομικό σκελετό των σκληρυμένων κονιαμάτων και αλληλεπιδρούν με τη συνδετική κονία τόσο στο στάδιο της ανάμιξης (ιδιότητες νωπού μίγματος), όσο και αργότερα κατά την σκλήρυνση και ωρίμανση των μιγμάτων (ιδιότητες σκληρυμένου κονιάματος). Οι ιδιότητες τους αποτελούν το συνδετικό κρίκο ανάμεσα στον σχεδιασμό και την πρόθεση της αρχικής σύνθεσης του κονιάματος (αναλογίες συστατικών) και στην εκπλήρωση της πρόθεσης αυτής στη σκληρυμένη φάση του υλικού. Τα αδρανή χαρακτηρίζονται συνήθως από μια σειρά δοκιμών που περιγράφονται στα αντίστοιχα εθνικά και ευρωπαϊκά πρότυπα [Παράρτημα 1]. Τα πρότυπα αυτά έχουν σαν στόχο να θέσουν μια σειρά γενικών προδιαγραφών για τα αδρανή των κονιαμάτων και αποτελούν μια χρήσιμη βάση για τη σύγκριση διαφορετικών αδρανών. Δεν προσφέρουν, όμως, ευθέως την δυνατότητα συσχέτισης των ιδιοτήτων των αδρανών με τις μεταβολές που επιφέρουν στις ιδιότητες του νωπού μίγματος, ούτε στις επιδόσεις του σκληρυμένου κονιάματος.

Ο ρόλος των αδρανών στη διαμόρφωση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των κονιαμάτων είναι ουσιαστικός και αφορά τόσο στις ιδιότητες των νωπών μιγμάτων όσο και στις ιδιότητες των σκληρυμένων κονιαμάτων. Κατά το στάδιο της ανάμιξης, το νωπό μίγμα θα πρέπει να χειρίζεται με ευκολία χωρίς να παρατηρείται απόμιξη (διαχωρισμός στερεών και νερού στο μίγμα) ή έντονη εξίδρωση, έτσι ώστε να παραχθεί ένα ομογενές, συνεκτικό, πλαστικό μίγμα. Στη συνέχεια, η επίδραση των

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Στην παρούσα εργασία τα αδρανή που μελετώνται ανήκουν στην υποκατηγορία της άμμου και διέρχονται πλήρως από το κόσκινο με άνοιγμα βρόγχου 2 mm.

αδρανών στις ιδιότητες του τελικού κονιάματος εξαρτάται από την φύση και τα μηχανικά χαρακτηριστικά της κονίας. Έτσι, όταν οι αντοχές της κονίας είναι πολύ μεγάλες (π.χ. τσιμέντο) οι ιδιότητες των αδρανών έχουν μικρότερη επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες του κονιάματος. Στην αντίθετη περίπτωση (π.χ. ασβέστης) η επιλογή ή η τροποποίηση των επιμέρους ιδιοτήτων των αδρανών έχει καθοριστικό ρόλο στις επιδόσεις του τελικού προϊόντος [1].

Οι ιδιότητες αυτές και οι μεταξύ τους συσχετισμοί παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στο σχεδιασμό νέων συνθέσεων και ειδικότερα στο σχεδιασμό κονιαμάτων αποκατάστασης, όπου η επιλογή των πρώτων υλών μπορεί να ικανοποιεί εν μέρει τις απαιτήσεις συμβατότητας ως προς τη σύσταση, ενώ οι επιμέρους ιδιότητες τους συμβάλουν στην επίτευξη των απαιτήσεων επιτελεστικότητας των κονιαμάτων [2].

#### 1.1 Εργασιμότητα του νωπού μίγματος

Το κονίαμα, κατά την πλαστική του φάση, χαρακτηρίζεται πρωτίστως από την εργασιμότητα του (workability). Η ιδιότητα αυτή αποτελεί το κυρίαρχο κριτήριο κατά τη μίξη των υλικών, είτε αυτή πραγματοποιείται στο εργαστήριο μέσα από αυστηρά ελεγχόμενες διαδικασίες, είτε στο εργοτάξιο με πιο εμπειρικό/ πρακτικό τρόπο. Εμπειρικά, το εργάσιμο ενός κονιάματος θεωρείται ικανοποιητικό, όταν το νωπό μίγμα μπορεί και σχηματίζει μια μαλακή σφαίρα, που να μπορεί να κρατηθεί χωρίς να βουλιάζει ανάμεσα στα μισάνοιχτα δάχτυλα.

Η έννοια του εργάσιμου δεν έχει αποσαφηνιστεί πλήρως από την άποψη των μεθόδων και των μονάδων μέτρησης. Το εργάσιμο ενός κονιάματος περιγράφεται από την εξάπλωση του, την πλαστικότητα του (plasticity), από την συνεκτικότητα του (consistency) καθώς και από την πιθανή απόμιξη ή εξίδρωση (bleeding). Οι παραπάνω ιδιότητες, σε ένα δεδομένο μίγμα - κονίας αδρανών, ελέγχονται αποκλειστικά από την ποσότητα του νερού ανάμιξης.

Οι ρεολογικές ιδιότητες μπορεί να αναλυθούν σε τρεις "μερικές " ιδιότητες, οι οποίες συνθέτουν το εργάσιμο [3]:

- Τη ρευστότητα (εσωτερική), δηλαδή την εσωτερική ευκινησία του μίγματος και την ευκολία με την οποία οι κόκκοι κινούνται μεταξύ τους ώστε να γεμίσουν τα κενά.
- Την πλαστικότητα, δηλαδή την ευκολία που παρουσιάζει το μίγμα στη ροή και το γέμισμα ενός καλουπιού, χωρίς κενά, σπηλαιώσεις κ.λ.π.

 Το αναπόμικτο, δηλαδή την ικανότητα που έχει το νωπό κονίαμα να διατηρεί την ομοιογένειά του και να μην ξεπλένεται, ούτε να διαχωρίζει τα υλικά του όταν μεταφέρεται, υποβάλλεται σε κρούση κ.λ.π.

Γενικά ισχύει ότι η αύξηση της ποσότητας του νερού αυξάνει την ρευστότητα του μίγματος, ενώ ταυτόχρονα εξασθενεί το αναπόμικτο και τις αντοχές. Η απαίτηση του νωπού κονιάματος σε νερό για την επίτευξη της κατάλληλης εργασιμότητας συνδέεται άμεσα με ιδιότητες των αδρανών, όπως η κοκκοδιαβάθμιση, το σχήμα και το μέγιστο μέγεθος κόκκων των αδρανών. Η πλαστικότητα ευνοείται από τη σφαιρικότητα των κόκκων των αδρανών και από την αύξηση της περιεκτικότητας σε συνδετική ύλη. Η απόμιξη ευνοείται από την αύξηση του νερού, ενώ αντίθετα οι λεπτοί κόκκοι κονίας και αδρανών εμποδίζουν την απόμιξη.

#### 1.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αδρανών

Τα αδρανή μπορεί να είναι σφαιρικά, επιμήκη, κυλινδρικά, πεπλατυσμένα, με αδρό γωνιώδες ή αμβλυμμένο περίγραμμα, ή να χαρακτηρίζονται από συνδυασμό των παραπάνω χαρακτηριστικών. Για την περιγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αδρανών συνήθως αναφερόμαστε στις παραμέτρους της σφαιρικότητας και της αδρότητας της επιφάνειας τους [4]. Στην Εικόνα 1.1 παρουσιάζεται μία μέθοδος οπτικής αξιολόγησης του σχήματος των αδρανών. Το σχήμα των αδρανών έχει έντονη επίδραση στην εργασιμότητα του κονιάματος. Πιο στρογγυλεμένοι κόκκοι και λιγότερο γωνιώδεις μπορούν να κυλούν και να ολισθαίνουν μεταξύ τους χωρίς να παρουσιάζουν μεγάλη αντίσταση σε αντίθεση με τους πιο γωνιώδεις κόκκους η κίνηση των οποίων δυσχεραίνεται έντονα λόγω αυξημένων τριβών. Στην πρώτη περίπτωση, το μίγμα εμφανίζει μεγαλύτερη πλαστικότητα και εργασιμότητα ενώ στη δεύτερη το μίγμα είναι πιο δύσκολο στο χειρισμό, και παρουσιάζει αυξημένη απαίτηση σε νερό για την επίτευξη της ίδιας εργασιμότητας [3].

Παρόλο που η εξάρτηση της εργασιμότητας, και συνεπώς του ποσοστού του νερού ανάμιξης, από το σχήμα των αδρανών δεν είναι εύκολο να ποσοτικοποιηθεί, έχει συσχετιστεί με την πυκνότητα στοίβαξης των αδρανών. Σε αυτή την περίπτωση, το σχήμα των κόκκων επιδρά στην εργασιμότητα μέσω της επίδρασης που έχει στον τρόπο στοίβαξης και στον τρόπο με τον οποίο οι κόκκοι των αδρανών αλληλοσυνδέονται ή οργανώνονται στο χώρο. Οι πλέον στρογγυλεμένοι κόκκοι έχουν τη δυνατότητα να παρουσιάζουν πιο πυκνή στοίβαξη σε αντίθεση με τους κόκκους που έχουν πιο ακανόνιστο ή γωνιώδες σχήμα και έχουν την τάση να αλληλοσυνδέονται (interlock) πιο έντονα μεταξύ τους αυξάνοντας τις εσωτερικές τριβές και οδηγώντας σε λιγότερο πυκνή στοίβαξη με αυξημένο ποσοστό κενών [5].



Εικόνα 1.1 : Σχηματικό διάγραμμα για την οπτική αξιολόγηση του σχήματος των αδρανών.[6]

#### 1.3 Κοκκοδιαβάθμιση αδρανών

Η κοκκοδιαβάθμιση αποτελεί ίσως το πιο αντιπροσωπευτικό χαρακτηριστικό των αδρανών καθώς ορίζει το εύρος του μεγέθους των αδρανών και εκφράζει την κατανομή του μεγέθους των κόκκων τους, στο συγκεκριμένο εύρος. Η κοκκομετρική διαβάθμιση υπολογίζεται μέσω κοσκίνισης αντιπροσωπευτικής ποσότητας αδρανών με πρότυπα κόσκινα και εκφράζεται γραφικά με την κοκκομετρική καμπύλη (Εικόνα 1.2).

Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών επηρεάζει την εργασιμότητα του νωπού μίγματος καθώς σχετίζεται άμεσα με την συνολική επιφάνεια των κόκκων αλλά και με το ποσοστό των κενών που σχηματίζεται ανάμεσα στους κόκκους των αδρανών (Εικόνα 1.3).



Εικόνα 1.2 : Καμπύλες κοκκοδιαβάθμισης χονδρόκοκκης και λεπτόκοκκης άμμου. Ο κατακόρυφος άξονας αντιπροσωπεύει το αθροιστικό επί τοις εκατό ποσοστό των κόκκων που έχει διάμετρο μικρότερη από αυτή που αντιστοιχεί στον οριζόντιο λογαριθμικό άξονα. [7]



Εικόνα 1.3 : Σχηματική αναπαράσταση διαφορετικών κοκκοδιαβαθμίσεων αδρανών (a) ένα μέγεθος κόκκων (b) συνεχής κοκκοδιαβάθμιση (c) αντικατάσταση λεπτών κλασμάτων από χονδρόκοκκα κλάσματα (d) ασυνεχής κοκκοδιαβάθμιση (e) κοκκοδιαβάθμιση χωρίς το κλάσμα της παιπάλης. [3]

Η συνολική επιφάνεια των αδρανών θεωρητικά, υποδεικνύει το ποσό της κονίας που απαιτείται για να διαβρέξει περιμετρικά όλους τους κόκκους. Έτσι, τα μικρότερα κλάσματα έχουν την μεγαλύτερη επίδραση στην συνολική επιφάνεια, αφού για δεδομένη μάζα αδρανών η συνολική επιφάνεια αυξάνεται με τη ελάττωση του μεγέθους των κόκκων. Συχνά εκφράζεται και με τον όρο «ειδική επιφάνεια» που αντιστοιχεί στον λόγο της συνολικής επιφάνειας προς τον όγκο των αδρανών, δεδομένου ότι η πυκνότητα όλων των κόκκων είναι η ίδια. Αν οι κόκκοι των αδρανών ήταν σφαιρικοί, η ολική επιφάνεια θα μπορούσε να υπολογιστεί απευθείας από την κοκκοδιαβάθμιση, όμως οι κόκκοι των αδρανών ακόμα και μέσα στο ίδιο δείγμα παρουσιάζουν μεγάλη διαφορετικότητα και ανομοιομορφία. Όσο διαφοροποιείται ένας κόκκος από τη σφαίρα τόσο αυξάνεται και η επιφάνεια του. Τα παραπάνω καθιστούν πολύ δύσκολο να μετρηθεί με κάποια ακρίβεια, η συνολική επιφάνεια των αδρανών.

Παράλληλα, δεδομένου ότι η προσθήκη κονίας προσδίδει πλαστικότητα στο νωπό μίγμα, ο υπολογισμός του ποσοστού της κονίας στο μίγμα με βάση την ειδική επιφάνεια των αδρανών δεν έχει αποβεί αποτελεσματικός [8]. Αυτό συμβαίνει αφενός, λόγω της αντικειμενικής δυσκολίας μέτρησης της επιφάνειας και αφετέρου, λόγω του ότι τα μικρότερα κλάσματα μπορεί να έχουν την αντίθετη επίδραση, αντί να αυξάνουν την απαίτηση σε κονία λόγω αυξημένης επιφάνειας, λειτουργούν σαν «σφαιρίδια μετάδοσης κίνησης» αυξάνοντας μηχανικά την πλαστικότητα του νωπού μίγματος, μειώνοντας έτσι την απαίτηση σε κονία για την επίτευξη ικανοποιητικού εργάσιμου.

#### 1.4 Πυκνότητα στοίβαξης (packing density) αδρανών

Η πυκνότητα στοίβαξης ορίζεται ως το ποσοστό του χώρου που καταλαμβάνουν οι κόκκοι των αδρανών σε δεδομένο όγκο, εκφράζει τον τρόπο με τον οποίο στοιβάζονται οι κόκκοι των αδρανών, και επομένως το ποσοστό των κενών που δημιουργείται ανάμεσα τους. Η πυκνότητα στοίβαξης μπορεί να διαφοροποιείται από πολύ χαμηλή, με μεγάλο ποσοστό κενών, μέχρι αρκετά υψηλή, με το ελάχιστο δυνατό ποσοστό κενών (Εικόνα 1.4). Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών έχει συσχετιστεί με τη πυκνότητα της στοίβαξης μέσω υπολογιστικών μοντέλων [9, 10]. Σύμφωνα με τα θεωρητικά αυτά μοντέλα είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι αναλογίες μεγέθους κόκκων (κοκκοδιαβάθμιση) έτσι ώστε η πυκνότητα στοίβαξης να μεγιστοποιηθεί.



Εικόνα 1.4 : Σχηματική απεικόνιση της μεταβολής του ποσοστού των κενών ή της πυκνότητας στοίβαξης μετά από συνδυασμό αδρανών διαφορετικών μεγεθών. Η στάθμη του υγρού στο κάτω μέρος της εικόνας αντιστοιχεί στον όγκο των κενών που σχηματίζεται ανάμεσα στους κόκκους των αντίστοιχων αδρανών.[11]

Τα μοντέλα που αναπτύσσονται για την στοίβαξη των αδρανών βασίζονται στους δύο διαφορετικούς τύπους κοκκοδιαβάθμισης. Πυκνή στοίβαξη μπορεί να επιτευχθεί τόσο σε αδρανή ασυνεχούς κοκκοδιαβάθμισης όσο και συνεχούς. Στη πρώτη περίπτωση, η μέγιστη δυνατή στοίβαξη των κόκκων μεγαλύτερης διαμέτρου και την πλήρωση των κενών ανάμεσα στους κόκκους με μικρότερα μεγέθη κόκκων. Με αυτόν τον τρόπο η κοκκοδιαβάθμιση αυτή θα είναι ασυνεχής (gap-graded), αφού το μέγεθος των μικρότερων κόκκων που απαιτείται για να καλύψει τα κενά που δημιουργούνται ανάμεσα σε κόκκους ίδιου μεγέθους δεν αντιστοιχεί στο επόμενο κλάσμα. Στη δεύτερη περίπτωση, η μέγιστη στοίβαξη επιτυγχάνεται όταν ο κενός όγκος που δημιουργείται ανάμεσα στους κόκκους μιας διαμέτρου, καλύπτεται από κόκκους αμέσως μικρότερης διαμέτρου. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μια πιο πυκνή δομή και ταυτόχρονα ελαχιστοποιούνται οι τριβές και αυξάνεται η κινητικότητα των κόκκων προσδίδοντας καλύτερη πλαστικότητα και μεγαλύτερη συνοχή [3].

# 1.5 Μέτρο λεπτότητας (FM), συντελεστής ομοιομορφίας (Cu), ποσοστό παιπάλης (%fines)

Προκειμένου να συγκριθούν διαφορετικά αδρανή ως προς την κοκκοδιαβάθμισή τους, συνηθίζεται να απεικονίζονται οι κοκκομετρικές τους καμπύλες στο ίδιο σύστημα αξόνων. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να εξαχθούν, με μεγάλη ευκολία, χρήσιμα συμπεράσματα που αφορούν στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των αδρανών. Οι ποιοτικές διαφορές στην κοκκοδιαβάθμιση ποσοτικοποιούνται μέσω υπολογιστικών μεγεθών, όπως το μέτρο λεπτότητας (Fineness Modulus-FM), ο συντελεστής ομοιομορφίας (Coefficient of uniformity-Cu) και το ποσοστό παιπάλης (fines %). Το μέτρο λεπτότητας χρησιμοποιείται προκειμένου να χαρακτηριστούν τα αδρανή ως προς το μέγεθος κόκκου που εκφράζει τον (λογαριθμικό) μέσο όρο του μεγέθους ή της διαμέτρου των κόκκων τους. Ο συντελεστής ομοιομορφίας αποτελεί το αριθμητικό μέτρο της ομοιομορφίας της κατανομής του μεγέθους των κόκκων των αδρανών. Το ποσοστό παιπάλης εκφράζει το ποσοστό του υλικού που διέρχεται από το κόσκινο με άνοιγμα βρόγχου 63 μm. Το κλάσμα αυτό της παιπάλης συνδέεται άμεσα με την αύξηση της επιφάνειας των αδρανών και επομένως με την αύξηση της απαίτησης σε νερό κατά την μίξη, που συχνά επιδεινώνεται λόγω της αυξημένης περιεκτικότητας σε αργιλικά ορυκτά που περιέχονται στο κλάσμα αυτό.

Τα χαρακτηριστικά αυτά της κοκκοδιαβάθμισης αποτελούν χρήσιμα εργαλεία για κατηγοριοποίηση των αδρανών. Αρκετές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί που συνδέουν τις τιμές αυτές με την απαίτηση σε νερό και τις ρεολογικές ιδιότητες των νωπών μιγμάτων, καθώς και την πυκνότητα στοίβαξης των αδρανών. Παράλληλα γίνεται σαφές ότι δεν υπάρχει μία ιδανική τιμή μέτρου λεπτότητας ή συντελεστή ομοιομορφίας, αφού μία ίδια τιμή αυτών των μεγεθών μπορεί να αντιστοιχεί σε έναν απεριόριστο αριθμό διαφορετικών καμπυλών. Συνεπώς, οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται σαν μέτρο σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών κοκκοδιαβαθμίσεων των αδρανών και όχι σαν απόλυτα μεγέθη.[12, 13]

#### 1.6 Μηχανικές ιδιότητες σκληρυμένου κονιάματος

Οι μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων είναι αποτέλεσμα των χαρακτηριστικών της μικροδομής τους, δηλαδή της φύσης των στερεών φάσεων, του δικτύου των πόρων και της αλληλεπίδρασης αυτών, μέσω σύνθετων μηχανισμών. Σε αυτό το πλαίσιο, οι πλαστικές και ρεολογικές ιδιότητες του νωπού μίγματος έχουν άμεσο αντίκτυπο στις μηχανικές ιδιότητες του σκληρυμένου κονιάματος. Έτσι, η επίδραση των αδρανών στις ιδιότητες του αρχικού νωπού μίγματος, όπως συζητήθηκε στα παραπάνω υποκεφάλαια, επηρεάζει με έμμεσο τρόπο τις επιδόσεις του τελικού προϊόντος. Η έμμεση αυτή επίδραση κυριαρχείται από το ποσοστό του νερού που απαιτήθηκε κατά τη μίξη, καθώς το ποσοστό αυτό καθορίζει το ποσοστό και την μορφολογία των

πόρων, δηλαδή την πορώδη δομή του κονιάματος. Το πορώδες με τη σειρά του, συσχετίζεται άμεσα με τις μηχανικές ιδιότητες, με την κίνηση της υγρασίας μέσα στο υλικό και με την εκδήλωση των διαφόρων μηχανισμών φθοράς, εξαιτίας της κίνησης υδατικών διαλυμάτων.

Οι μηχανικές αντοχές των κονιαμάτων καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από την συνοχή που παρατηρείται στην διεπιφάνεια ανάμεσα στη κονία και τα αδρανή. Η ζώνη αυτή ονομάζεται Interfacial Transition Zone (ITZ) και διαφοροποιείται ως προς τη μικροδομή από την περιοχές καθαρής κονίας (bulk). [5]

Οι βασικοί λόγοι που οδηγούν στην εμφάνιση της ζώνης αυτής είναι δύο: ο τρόπος με τον οποίο οργανώνονται οι κόκκοι/ σωματίδια της κονίας πάνω στην επιφάνεια των αδρανών και οδηγεί, εξαιτίας των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των σωματιδίων, στην μικρή κάλυψη της επιφάνειας των αδρανών από την κονία (wall effect)[14]. Στην περίπτωση των υδραυλικών κονιών (τσιμέντο, υδραυλικός ασβέστης), η εξίδρωση που λαμβάνει χώρα κατά την ενυδάτωση τείνει να επιδεινώνει αυτό το φαινόμενο, με τη δημιουργία ενός λεπτού υμένιου νερού (film) πάνω στην επιφάνεια των αδρανών. Αυτό οδηγεί σε μία τοπική αύξηση του λόγου νερού/ κονίας που επιδρά τοπικά στη μικροδομή της κονίας. Ο δεύτερος μηχανισμός περιγράφεται από την μονομερή ανάπτυξη των προϊόντων πήξης, μόνο προς την κατεύθυνση της κονίας που έχει ως αποτέλεσμα την άσκηση, σε τοπική κλίμακα, απωστικών δυνάμεων, έως και αποκόλληση από τα αδρανή (Εικόνα1.5), σε αντίθεση με τις περιοχές καθαρής κονίας όπου η ανάπτυξη των προϊόντων αυτών πραγματοποιείται προς όλες τις κατευθύνσεις και ουσιαστικά ελαττώνουν/ καλύπτουν τον κενό χώρο. Οι παραπάνω μηχανισμοί οδηγούν στην αύξηση του πορώδους στη φάση αυτή [15].



Εικόνα 1.5 : Απώλεια της πρόσφυσης μεταξύ της κονίας και των αδρανών στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης SEM.[16]

Η εμφάνιση το μέγεθος και ο σχηματισμός, της διαφασικής περιοχής επηρεάζεται έντονα αφενός από τη φύση των αδρανών και αφετέρου από τη χημική σύσταση και τη μικρό-μορφολογία της συνδετικής κονίας. Η υφή της επιφάνειας των κόκκων καθώς και η χημική και ορυκτολογική τους σύσταση μπορεί να επιδράσει καταλυτικά στην πρόσφυση της κονίας με τα αδρανή.

Από αυτήν την σκοπιά το σκληρυμένο κονίαμα αποτελεί ένα ανομοιογενές υλικό που απαρτίζεται από τρεις διακριτές φάσεις: των αδρανών, της συνδετικής κονίας και της διαφασικής τους ζώνης. Έτσι οι ιδιότητες του θα πρέπει να εξετάζονται σαν συνάρτηση των ιδιοτήτων των διαφορετικών φάσεων καθώς και των αλληλεπιδράσεων τους καθώς και από την σύσταση και τις επιμέρους αναλογίες των φάσεων αυτών.

Η κατάρρευση του υλικού είναι αποτέλεσμα ενός δικτύου μικρό-ρωγμών το οποίο αναπτύσσεται όσο αυξάνεται το φορτίου που δέχεται. Δεδομένου ότι η διαφασική περιοχή είναι συνήθως πιο ασθενής, αποτελεί το σημείο έναρξης της εξάπλωσης των μικρό-ρωγμών. Ο τρόπος που διαδίδεται το δίκτυο των μικρό-ρωγμών εξαρτάται κυρίως από τη φύση του συνδετικού υλικού. Όμως στις περισσότερες περιπτώσεις και ειδικά στα κονιάματα, η διάδοση των ρωγμών ακολουθεί τις διαφασικές περιοχές μεταξύ των αδρανών και του συνδετικού υλικού πριν διαδοθεί στην κυρίως μάζα της κονίας. Αυτό, όπως είναι αναμενόμενο, συνδέεται άμεσα με την φύση του δεσμού ανάμεσα στη κονία και τα αδρανή (χημική και μηχανική) όπως επίσης και με το σχήμα των αδρανών (**Εικόνα 1.6**).

Οι ιδιότητες των αδρανών παρουσιάζουν ιδιαίτερη επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων αν θεωρήσουμε τα κονιάματα ως μη ομοιογενή συστήματα που αποτελούνται από την ενυδατωμένη κονία και τα αδρανή. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αδρανών επηρεάζουν αφενός τις μηχανικές ιδιότητες των σκληρυμένων κονιαμάτων επηρεάζοντας αφετέρου το ποσοστό και τον ρυθμό δημιουργίας των μικρό-ρωγμών, καθώς και την πολυπλοκότητα της πορείας/ διαδρομής τους κατά τη την εξάπλωση τους δικτύου των μικρό-ρωγμών όταν το υλικό υποστεί μηχανική φόρτιση.



Εικόνα 1.6 : Η αλληλεπίδραση των μικρό-ρωγμών με τα αδρανή (a) Σφαιρικό αδρανές. Δεν παρατηρείται ενδυνάμωση (toughening) (b) Γωνιώδες αδρανές. Παρατηρείται ενδυνάμωση (toughening) λόγω αυξημένων τριβών. Σε κάθε περίπτωση δεν παρατηρείται καμία πρόσφυση της κονίας με τα αδρανή.[5]

Θεωρητικά μοντέλα δισδιάστατης προσομοίωσης της εξάπλωσης των μικρό-ρωγμών, έχουν δείξει ότι το σχήμα των αδρανών (Εικόνα1.7) επηρεάζει καταλυτικά την διαδρομή που ακολουθεί το δίκτυο των μικρό-ρωγμών. Πιο γωνιώδη αδρανή δεν επιτρέπουν την ομαλή εξάπλωση της ρωγμής, αναγκάζοντας την σε πιο πολύπλοκη διαδρομή σε σύγκριση με τα πιο σφαιρικά αδρανή, με αποτέλεσμα να απορροφάται περισσότερη ενέργεια και το υλικό να παρουσιάζει μεγαλύτερες αντοχές κατά την μηχανική του φόρτιση.



Εικόνα 1.7 : Δυσδιάστατο μοντέλο της εξάπλωσης του δικτύου των ρωγμών σε συνάρτηση με το σχήμα των αδρανών. (a)κυκλικά (b)εξάγωνα (c)πεντάγωνα (d)τετράγωνα (e)πολύγωνα [17]

Το σχήμα των αδρανών επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων με δύο τρόπους :

- Τα πιο γωνιώδη αδρανή, σε αντίθεση με τα σφαιρικά, προκαλούν αύξηση των τριβών στη διεπιφάνεια κονίας- αδρανών κατά την μηχανική φόρτιση του υλικού με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι μηχανικές του αντοχές.
- Τα γωνιώδη αδρανή εξαναγκάζουν την εξάπλωση των ρωγμών σε πιο πολύπλοκή διαδρομή, δεδομένου ότι οι ρωγμές ακολουθούν την επιφάνεια των αδρανών, αυξάνοντας έτσι την ενέργεια που απαιτείται για την κατάρρευση του υλικού.

Τέλος, η χημική και ορυκτολογική σύσταση των αδρανών μπορεί να επηρεάσει την πρόσφυση με διαφορετικούς τρόπους. Τα αδρανή μπορεί να δράσουν σαν σημεία έναρξης (nucleation points) της αντίδρασης ενυδάτωσης της κονίας. Έχει παρατηρηθεί η εμφάνιση προϊόντων ενυδάτωσης ανάμεσα σε χαλαζιακές άμμους και διάλυμα υδροξειδίου του ασβεστίου [18]. Σε κάποιες περιπτώσεις τα ασβεστιτικά αδρανή έχει παρατηρηθεί να παρουσιάζουν αυξημένες αντοχές, γεγονός, που έχει εξηγηθεί από τη χημική συνάφεια ανάμεσα στα αδρανή αυτά και στη κονία (**Εικόνα 1.8**) [19].



Εικόνα 1.8 : Παρατήρηση της πρόσφυσης μεταξύ κονίας και ασβεστιτικών αδρανών στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM)[19]

#### 1.7 Αντικείμενο και στόχοι της εργασίας

Είναι σαφές ότι οι φυσικές και γεωμετρικές ιδιότητες των αδρανών μπορούν να επιδράσουν καταλυτικά στις ρεολογικές και μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων. Οι ρεολογικές ιδιότητες ενός κονιάματος αφορούν στην ευκολία με την οποία το μίγμα αναμιγνύεται, ομογενοποιείται, μεταφέρεται και εφαρμόζεται στις αρχιτεκτονικές κατασκευές. Στην πράξη, οι ρεολογικές ιδιότητες και οι παραπάνω παράμετροι ρυθμίζονται από την ποσότητα της κονίας σε σχέση με τα αδρανή, η οποία εκφράζεται από τον λόγο της συνδετικής κονίας ως προς τα αδρανή (c/a) και από την περιεκτικότητα του μίγματος σε νερό, που εκφράζεται αντίστοιχα από τον λόγο νερού προς συνδετική κονία (w/c). Η επίδραση της μεταβολής των λόγων c/a και w/c στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων είναι σε γενικές γραμμές γνωστή καθώς έχει απασχολήσει αρκετούς ερευνητές [20].

Στόχος της παρούσας εργασίας αποτελεί η μελέτη της επίδρασης των γεωμετρικών και φυσικών χαρακτηριστικών των αδρανών στις ρεολογικές ιδιότητες των νωπών μιγμάτων και κατ' επέκταση, στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των σκληρυμένων κονιαμάτων. Η παρούσα εργασία έρχεται να καλύψει λοιπόν το αμέσως προηγούμενο στάδιο – και πρωταρχικό – της παρασκευής των κονιαμάτων, που

αφορά στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των αδρανών προκειμένου να βελτιστοποιηθούν οι ρεολογικές ιδιότητες των κονιαμάτων.

Πιο συγκεκριμένα, τα κονιάματα εξετάζονται σαν ένα σύστημα που αποτελείται από κονία και αδρανή, στο οποίο ο κενός όγκος μεταξύ των αδρανών μπορεί να υπολογιστεί πειραματικά για κάθε διαφορετική κοκκοδιαβάθμιση και με βάση αυτόν να υπολογιστεί η ποσότητα της κονίας που απαιτείται για να συνδέσει τα αδρανή. Ιδανικά, η ποσότητα της κονίας θα πρέπει να είναι τόση, ώστε να καλύπτει επιτυχώς όλο τον κενό χώρο που σχηματίζεται ανάμεσα στους κόκκους των αδρανών. Για κάθε άμμο λοιπόν, με δεδομένη κοκκοδιαβάθμιση, υπάρχει μία βέλτιστη αναλογία κονίας προς αδρανή. Όταν η ποσότητα της κονίας είναι λιγότερη, το συνδετικό υλικό δεν επαρκεί για να καλύψει ολόκληρο τον κενό όγκο και έτσι αναμένεται να προκύψει ένα κονίαμα με μειωμένες μηχανικές αντοχές. Στην αντίθετη περίπτωση, η περίσσεια της κονίας απομακρύνει τους κόκκους των αδρανών μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να αποδυναμώνεται το πλέγμα των αδρανών και οι μηχανικές αντοχές του κονιάματος να εξαρτώνται, σε μεγαλύτερο βαθμό, από την αντοχή του συνδετικού υλικού.

Ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τα παραπάνω φαινόμενα είναι η περιεκτικότητα του κονιάματος σε νερό. Η ποσότητα του νερού συνδέεται άμεσα με τις ρεολογικές ιδιότητες του νωπού κονιάματος καθώς επηρεάζει το εργάσιμο. Παράλληλα η ποσότητα του νερού έχει πολύ μεγάλη επίδραση στο πορώδες και στις μηχανικές ιδιότητες του σκληρυμένου κονιάματος.

Στο πλαίσιο αυτό, μελετήθηκαν και συγκρίθηκαν τα φυσικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά τεσσάρων διαφορετικών άμμων μέγιστης διαμέτρου κόκκου 2 mm. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκαν η πυκνότητα στοίβαξης (packing density) και ο όγκος των κενών σε τρεις φυσικές άμμους (A1, A2, A3) διαφορετικής κοκκοδιαβάθμισης (σφαιρικοί κόκκοι) και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά σε δύο άμμους (A1, A4) με την ίδια κοκκοδιαβάθμιση αλλά διαφορετική γεωμετρίας κόκκων (σφαιρικοί και γωνιώδεις κόκκοι αντίστοιχα).

Με βάση τα παραπάνω σχεδιάστηκαν ισάριθμες συνθέσεις, στις οποίες το ποσοστό της κονίας ανταποκρίνεται στον όγκο των κενών που έχει μετρηθεί, ενώ το ποσοστό του νερού υπολογίστηκε έτσι ώστε όλες οι συνθέσεις να έχουν το ίδιο εργάσιμο. Με αυτό το τρόπο γίνεται η σύγκριση της βέλτιστης ποσότητας κονίας και της απαίτησης σε νερό, βάσει των φυσικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αδρανών, καθώς και οι μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων που προέκυψαν χρησιμοποιώντας τις άμμους αυτές για την παρασκευή της ίδιας σύνθεσης κονιάματος.

## 2. Πειραματικό Μέρος

#### 2.1. Χαρακτηρισμός Άμμων

#### 2.1.1 Επιλογή πρώτων υλών:

Επιλέχθηκαν και μελετήθηκαν τέσσερις διαφορετικές άμμοι. Η κατά ΕΝ 196-1 πρότυπη άμμος (A1), δύο άμμοι φυσικής προέλευσης (A2, A3) και μία θραυστή ασβεστολιθική λατομείου (A4) της οποίας η κοκκομετρία τροποποιήθηκε ώστε να είναι ίδια με τη πρότυπη.

Κάθε άμμος αναλύθηκε ως προς τη χημική και ορυκτολογική της σύσταση και στη συνέχεια μετρήθηκαν και υπολογίστηκαν η κοκκομετρική διαβάθμιση, το μέτρο λεπτότητας (FM), ο συντελεστής ομοιομορφίας (Cu), η σφαιρικότητα των κόκκων και καθώς επίσης η πυκνότητα, το φαινόμενο βάρος και το ποσοστό του όγκου των κενών ή πυκνότητα στοίβαξης.

#### 2.1.2 Μορφολογικά Χαρακτηριστικά-Μελέτη κοκκοδιαβάθμισης

Όλα τα αδρανή κοσκινίστηκαν με το κόσκινο βρόγχου 2 mm ώστε η κοκκομετρία τους να κυμαίνεται από 0-2 mm. Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό της κοκκομετρικής διαβάθμισης των άμμων χρησιμοποιήθηκαν 250 g δείγματος από την κάθε άμμο, τα οποία ελήφθησαν με τη διαδικασία του τετραμερισμού από 1 kg υλικού [21, 22]. Το κάθε δείγμα ζυγίστηκε με ακρίβεια 0,01 g κατόπιν ξήρανσης. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε σε συστοιχία πρότυπων κόσκινων με ανοίγματα βρόγχου 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2 και 4 mm και κοσκινίστηκε σε συσκευή δόνησης για 40 min. Το κάθε κόσκινο ζυγίστηκε και υπολογίζεται το συγκρατούμενο και το διερχόμενο βάρος για το κάθε κόσκινο καθώς και η αθροιστική κατανομή. Τα διαγράμματα κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών παρουσιάζονται στην **Εικόνα 2.1**.



Εικόνα 2.1 : Διαγράμματα κοκκοδιαβάθμισης των αδρανών

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της κοκκομετρικής διαβάθμισης (Εικόνα 1) υπολογίστηκαν για κάθε άμμο μια σειρά από γεωμετρικά χαρακτηριστικά: ο συντελεστής ομοιομορφίας (Cu), το μέτρο λεπτότητας (FM) και το ποσοστό παιπάλης (fines%) των διαφορετικών αδρανών.

Ο συντελεστής ομοιομορφίας Cu εκφράζει την ομοιομορφία της κοκκοδιαβάθμισης και υπολογίζεται από την σχέση :

$$C_{u} = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Οι όροι  $D_{10}$  και  $D_{60}$  αναφέρονται στη μέγιστη διάμετρο κόσκινου από την οποία διέρχεται το 10 και 60% του υλικού αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον **Πίνακα 2.1**.

Το μέτρο λεπτότητας (FM) αντιπροσωπεύει τον μέσο όρο του μεγέθους των κόκκων και υπολογίζεται από τη σχέση :

$$FM = \frac{1}{100} \sum_{j=1}^{10} (100 - y_j)$$

Όπου y<sub>j</sub> το ποσοστό του υλικού που διέρχεται από κόσκινο ανοίγματος βρόγχου d<sub>j</sub>. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον **Πίνακα 2.1** 

Τέλος, το ποσοστό παιπάλης μιας άμμου αντιστοιχεί στο ποσοστό του υλικού που διέρχεται από το κόσκινο ανοίγματος βρόγχου 63μm.

Ιδιότητα	Κωδικός άμμου				
	Al	A2	A3	A4	
Cu	6,00	3,75	2,5	6	
FM	2,71	2,33	2,83	2,71	
fines%	0,05	1,64	0,05	0,05	

Πίνακας2.1: Μορφολογικά χαρακτηριστικά των αδρανών

Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζουν σαφείς διαφορές όσον αφορά την κοκκοδιαβάθμιση τους όπως φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 1.1. Η καμπύλη κοκκοδιαβάθμισης της άμμου A1 παρουσιάζει δύο σημεία καμπής που αναλογούν σε διαμέτρους κόκκων 0,25 και 0,5 mm. Αυτό δηλώνει ασυνεχή κοκκοδιαβάθμιση, δηλαδή μικρότερη περιεκτικότητα στο κλάσμα της άμμου που συγκρατείται στο κόσκινο διαμέτρου 0,25 mm. Η άμμος A3 είναι πιο πλούσια στα πιο χονδρόκοκκα κλάσματα, δηλαδή μεγαλύτερης διαμέτρου από 0,5 mm, σε αντίθεση με την άμμο A2 που υπερέχει στα πιο λεπτόκοκκα κλάσματα, δηλαδή μικρότερα από 0,25 mm. Όπως γίνεται λοιπόν φανερό από το διάγραμμα η άμμος A2 προσομοιάζει τη κοκκομετρία της πρότυπης άμμου A1 στα πιο λεπτόκοκκα κλάσματα ενώ η άμμος A3 στα πιο χονδρόκοκκα.

Η διαφορές αυτές αντικατοπτρίζονται ποιοτικά και ποσοτικά από τον συντελεστή ομοιομορφίας Cu και από το μέτρο λεπτότητας (FM). Η άμμος A1 έχει την μεγαλύτερη τιμή συντελεστή ομοιομορφίας, ενώ οι άμμοι A2 και A3 που υστερούν στα πιο χονδρόκοκκα ή στα πιο λεπτόκοκκα κλάσματα αντίστοιχα, παρουσιάζουν μικρότερους συντελεστές ομοιομορφίας. Το μέτρο λεπτότητας της άμμου A2 είναι το μικρότερο δηλώνοντας μια πιο λεπτόκοκκη άμμο, ενώ η άμμος A3, που παρουσιάζει αυξημένη περιεκτικότητα στα πιο χονδρόκοκκα κλάσματα, παρουσιάζει την μεγαλύτερη τιμή μέτρου λεπτότητας.

#### 2.1.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Η μορφολογική ανάλυση των αδρανών πραγματοποιήθηκε αρχικά μακροσκοπικά, με βάση το διάγραμμα σφαιρικότητας (Εικόνα 2.2) και στη συνέχεια μετά από παρατήρηση στο στερεομικροσκόπιο Leica S6D με ενσωματωμένη φωτογραφική μηχανή DFC295 (Εικόνα 2.3).

Τα αδρανή μελετήθηκαν παράλληλα στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης FEI Quanta-Inspect (SEM/EDX), σε στιλπνές τομές εγκιβωτισμένων δειγμάτων και οι φωτογραφίες τους επεξεργάστηκαν με ψηφιακή ανάλυση εικόνας στο πρόγραμμα Image - Pro (Media Cybernetics). Με αυτόν τον τρόπο μετρήθηκε η τιμή κυκλικότητας (Circularity) [23] σύμφωνα με τη σχέση :

$$Circularity(C) = \frac{4\pi A}{P^2}$$

Όπου : Α = προβεβλημένη επιφάνεια κόκκου και

*P* = περίμετρος του κόκκου

Τα αποτελέσματα μετά από στατιστική επεξεργασία παρουσιάζονται σαν ιστογράμματα κατανομών τιμών κυκλικότητας για τα αδρανή A1 και A4.(Εικόνα 2.4)



Εικόνα 2.2 : Διάγραμμα οπτικής εκτίμησης σχήματος κόκκου. [24]



Εικόνα 2.3 : Παρατήρηση μορφολογικών χαρακτηριστικών των αδρανών στο στερεο-μικροσκόπιο. (α) Α1,πρότυπη άμμος πολύ στρογγυλεμένη, υψηλής σφαιρικότητας (β) Α2 αρκετά στρογγυλεμένη, χαμηλής σφαιρικότητας (γ) Α3 αρκετά στρογγυλεμένη μέτριας σφαιρικότητας (δ) Α4 καθόλου στρογγυλεμένη, μικρής σφαιρικότητας

Τα τέσσερα αδρανή παρουσιάζουν αρκετές διαφορές ως προς το σχήμα των κόκκων τους. Οι άμμοι A1, A2 και A3 είναι οι πιο στρογγυλεμένες, λόγω της φυσικής προέλευσης τους, από κοίτες ποταμών. Οι άμμοι φυσικής προέλευσης τείνουν να έχουν λιγότερο γωνιώδεις κόκκους σαν αποτέλεσμα της μακροχρόνιων τριβών που έχουν υποστεί σε αντίθεση με τις θραυστές άμμους λατομείων όπως η A4, που παρουσιάζουν έντονα γωνιώδης κόκκους. Παράλληλα παρατηρούνται και διαφορές στη σφαιρικότητα των κόκκων. Η άμμος A1 παρουσιάζει την μεγαλύτερη σφαιρικότητα, οι άμμοι A2 και A3 μέτρια σφαιρικότητα και η A4 την μικρότερη με έντονα επιμήκεις και γωνιώδεις κόκκους (Εικόνες 2.3 και 2.4).



Εικόνα 2.4: Παράδειγμα επεξεργασίας και ψηφιακής ανάλυσης εικόνας και Ιστογράμματα κατανομής τιμών κυκλικότητας κόκκων των άμμων A1 και A4.

#### 2.1.4 Χημική και Ορυκτολογική ανάλυση

Η χημική και ορυκτολογική σύσταση των άμμων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2 και στις Εικόνες 2.5 και 2.6 αντίστοιχα. Η στοιχειακή ανάλυση των αδρανών πραγματοποιήθηκε με φασματοσκοπία ακτίνων X (EDX), ταυτόχρονα με την εξέταση των δειγμάτων στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης FEI Quanta-Inspect (SEM/EDX), σε στιλπνές τομές εγκιβωτισμένων δειγμάτων. Τα αποτελέσματα αφορούν τον μέσο όρο των αναλύσεων σε τρεις περιοχές επιφάνειας 4 x 4 mm ώστε να εξασφαλιστεί αντιπροσωπευτικότητα των μετρήσεων. Η ορυκτολογική σύσταση προσδιορίστηκε με περίθλαση ακτίνων X, σε περιθλασίμετρο Siemens D500, με βήμα γωνιομέτρου 0.03 °/ 5 s. σε λειοτριβημένα δείγματα (d<sub>max</sub>< 63 μm).



Εικόνα 2.5 : Φάσματα στοιχειακής ανάλυσης ακτίνων X (EDX) των διαφορετικών αδρανών

Οζείδια (%κ.β.)	A1	A2	A3	A4
Na <sub>2</sub> O	1.0	1.7	2.4	0.3
MgO	0.8	0.8	1.2	0.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.6	9.0	11.8	0.6
SiO <sub>2</sub>	91.0	79.7	74.0	1.1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.0	0.3	0	0.7
SO <sub>3</sub>	0.6	0.2	0.1	0.8
Cl <sub>2</sub> O	1.1	1.3	0.9	1.8
K <sub>2</sub> O	0.7	1.7	3.2	0.6
CaO	0.3	1.4	2.1	90.3
TiO <sub>2</sub>	0.1	0.5	0.6	0.5
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1	0.2	0.2	0.6
MnO	0.2	0.2	0.3	0.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.3	3.1	2.2	0.8
CuO	0.3	0.3	0.3	0.9

Πίνακας 2.2 : Στοιχειακή ανάλυση των αδρανών, εκφρασμένη σε % κ.β. των αντίστοιχων οξειδίων τους.

Οι άμμοι A1, A2 και A3 (αδρανή φυσικής προέλευσης) αποτελούνται κυρίως από οξείδια του πυριτίου σε αντίθεση με την άμμο A4 (θραυστή άμμος λατομείου) που αποτελείται κυρίως από ασβεστίτη. Η άμμος A1 (πρότυπη άμμος) περιέχει μικρές ποσότητες οξειδίων του αργιλίου (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) και του σιδήρου (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) και διαφοροποιείται από τις άμμους A2 και A3 στις οποίες παρατηρείται αυξημένη συγκέντρωση των προσμίξεων αυτών.

Η ορυκτολογική ανάλυση έδειξε ότι οι άμμος A1 είναι χαλαζιακή, οι άμμοι A2 και A3 είναι αργιλοπυριτικές και η άμμος A4 ασβεστολιθική. Τα περιθλασιγραφήματα των άμμων A2 και A3 παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες στην ορυκτολογική τους σύσταση (Εικόνα 2.6). Αποτελούνται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό από χαλαζία, , όπως και η άμμος A1, και από επιπλέον αργιλοπυριτικές φάσεις ιλλίτη, αλβίτη, ορθόκλαστου, μικροκλινή και μικρές ποσότητες ασβεστίτη.



Εικόνα 2.6: Διαγράμματα περίθλασης των διαφορετικών αδρανών.

#### 2.1.5 Μελέτη φυσικών ιδιοτήτων -Μετρήσεις Πυκνότητας-Φαινόμενου βάρους και ποσοστού όγκου κενών

Σε όλες τις άμμους πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πυκνότητας. [25]. Από τις μετρήσεις φαινόμενης πυκνότητας (Bulk Density) και ειδικού βάρους (Particle Density) είναι δυνατό να υπολογιστεί η πυκνότητα στοίβαξης (Packing Density) και το % ποσοστό κενού όγκου που υπάρχει ανάμεσα στους κόκκους των αδρανών.

Αντιπροσωπευτικό δείγμα από την κάθε άμμο μετρήθηκε υδατοκορεσμένο (m<sub>2-</sub>wet), επιφανειακά ξηρό (m<sub>1</sub>-saturated surface dry) και μετά από πλήρη ξήρανση (m<sub>4-</sub>oven dry) σε δοχείο γνωστού όγκου (m<sub>3</sub>). (Εικόνα 2.7)



Εικόνα 2.7 : Σχεδιάγραμμα των διαφορετικών καταστάσεων υγρασίας σε έναν κόκκο άμμου. Από αριστερά : μετά από πλήρη ξήρανση, ξήρανση στον αέρα, επιφανειακά ξηρό και υδατοκορεσμένο [26].

Η πραγματική πυκνότητα (Particle Density) υπολογίστηκε από τη σχέση :

Particle Density =  $\frac{m_4}{m_1 - (m_2 - m_3)}$ 

Για τον προσδιορισμό της φαινόμενης πυκνότητας υπό συμπύκνωση, μετρήθηκε το βάρος του κάθε δείγματος σε δοχείο γνωστού όγκου (μετά από συμπίεση).

Η φαινόμενη πυκνότητα (Bulk Density) υπολογίστηκε από τη σχέση :

Bulk Density =  $\frac{m}{V_{bulk}}$ 

Όπου:

m : το βάρος του δείγματος

 $V_{bulk}$ : ο όγκος του δοχείου

Το ποσοστό των κενών (Voids %) υπολογίστηκε από τη σχέση :

$$Voids\% = 100 * \frac{(a-b)}{a}$$

όπου

a: η πραγματική πυκνότητα του ξηρού αδρανούς και

b: η φαινόμενη πυκνότητα πρότυπα συμπυκνωμένη<sup>2</sup>

Η πυκνότητα στοίβαξης (Packing Density) υπολογίζεται από τη σχέση

Packing Density = 1 - Voids%

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3.

	Al	A2	A3	A4
Particle Density (g/mL)	2,62	2,41	2,63	2,62
Bulk Density (g/mL)	1,71	1,41	1,58	1,81
%Voids	35	41	40	31
Packing Density %	65	59	60	69

Πίνακας 2.3: Φυσικά χαρακτηριστικά των αδρανών

Τα αδρανή διαφοροποιούνται ως προς την πυκνότητα στοίβαξης ενώ οι τιμές της πραγματικής τους πυκνότητας (ή πυκνότητας κόκκου) δεν διαφέρουν αισθητά. Εξετάζοντας τις άμμους A1, A2 και A3 την μεγαλύτερη πυκνότητα στοίβαξης παρουσιάζει η άμμος A1. Το γεγονός αυτό έρχεται σε συμφωνία με τις μετρήσεις κοκκοδιαβάθμισης όπου η άμμος A1 παρουσιάζει τον μεγαλύτερο συντελεστή ομοιομορφίας Cu. Οι άμμοι A2 και A3 έχουν μικρότερη πυκνότητα στοίβαξης που οφείλεται αφενός στην κοκκοδιαβάθμιση τους και αφετέρου στο σχήμα των κόκκων τους. Η κοκκοδιαβάθμιση της άμμου A4 έχει τροποποιηθεί σύμφωνα με την κοκκοδιαβάθμιση της άμμου A1. Έτσι, η αυξημένη πυκνότητα στοίβαξης που παρουσιάζει θα πρέπει να αποδοθεί στην διαφορά που παρουσιάζει ως προς το σχήμα των κόκκων.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Όταν η μέτρηση της φαινόμενης πυκνότητας γίνεται μετά από συμπίεση των κόκκων του υλικού με πρότυπο τρόπο. Η συμπίεση πραγματοποιείται εφαρμόζοντας δέκα χτυπήματα με ειδική ράβδο (tamping rod) ομοιόμορφα κατανεμημένα στην επιφάνεια του δείγματος.

#### 2.2. Σχεδιασμός συνθέσεων κονιαμάτων

Η πρώτη σειρά συνθέσεων κονιαμάτων πραγματοποιήθηκε με τις άμμους A1, A2 και A3 και σχεδιάστηκε βάσει της βέλτιστης αναλογίας κονίας/ αδρανών, στις οποίες το ποσοστό της κονίας ανταποκρίνεται στον όγκο των κενών που έχει μετρηθεί για την κάθε άμμο. Η μελέτη της επίδρασης του πλεονάσματος της κονίας ή της περίσσειας των αδρανών αντίστροφα πραγματοποιήθηκε σε δύο συμπληρωματικές σειρές συνθέσεων, οι οποίες σχεδιάστηκαν με τις άμμους A1 και A3 έτσι ώστε να διαφοροποιείται ο λόγος κονίας/ αδρανών. Με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση της γεωμετρίας των αδρανών, σχεδιάσθηκε μια τέταρτη σειρά συνθέσεων η οποία αποτελεί επανάληψη των συνθέσεων που πραγματοποιήθηκαν με την πρότυπη άμμο A1, αντικαθιστώντας την με την θραυστή άμμο A4. Για τη παρασκευή των κονιαμάτων χρησιμοποιήθηκε υδραυλικός ασβέστης NHL5 της (St.Astier), τα επιλεγμένα αδρανή και το νερό.

Για τον σχεδιασμό των συνθέσεων υπολογίστηκε αρχικά η αναλογία των συστατικών κατ' όγκο, ώστε να είναι σε συμφωνία με τις μετρήσεις πυκνότητας στοίβαξης των αδρανών. Για την πραγματοποίηση όμως των συνθέσεων στο εργαστήριο με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια, θα πρέπει να είναι γνωστές οι αναλογίες των υλικών κατά βάρος. Έτσι, κρίθηκε απαραίτητος ο υπολογισμός των πυκνοτήτων των επιμέρους συστατικών.

Η πυκνότητα των αδρανών μετρήθηκε με την μέθοδο που περιγράφεται παραπάνω στην παράγραφο 2.1.5. Ο υπολογισμός της πυκνότητας του συνδετικού υλικού βασίστηκε στην παραδοχή ότι για μια δεδομένη ποσότητα κονίας υπάρχει μία ελάχιστη ποσότητα νερού με την οποία μπορεί να αναμιχθεί για να δημιουργηθεί μια ομοιογενής πάστα, ώστε να παρατηρείται η μεγαλύτερη δυνατή στοίβαξη των κόκκων. Η προσθήκη μικρότερης ποσότητας νερού δεν αρκεί για τη δημιουργία ομογενούς υλικού, ενώ η μεγαλύτερη ποσότητα έχει σαν αποτέλεσμα αύξηση του όγκου του μίγματος με αποτέλεσμα την ελάττωση της πυκνότητας του υλικού [27]. Έτσι, παρασκευάστηκαν διμερή μίγματα υδραυλικού ασβέστη NHL5 και νερού σε διαδοχικές αναλογίες νερού/ κονίας και υπολογίστηκε η πυκνότητα τους. Η μεγαλύτερη τιμή πυκνότητας αντιστοιχεί στο μίγμα με αναλογία νερού/ κονίας ίση με 0,5 και η τιμή της υπολογίστηκε 1,7 g/ml.

Στον Πίνακα 2.4 παρουσιάζονται οι αναλογίες των συστατικών (c/a) όπως υπολογίστηκαν κατά βάρος (w/w) και κατ' όγκο (v/v).

		c/a		т	water	V	c/a
		w/w		(g)	(g)	( <i>ml</i> )	<i>v/v</i>
	\$1-25	1/30	ag	1350		515.2	1/13
	01 20	17 5.0	cem	450	225	397.05	171.5
	<b>S1-20</b>	1/43	ag	1350		515.2	1/19
	51-20	17 1.5	cem	311	155.5	274.4	1/1.9
	<b>S1-16</b>	1/50	ag	1350		515.2	1/22
	51-10	17 5.0	cem	270	135	238.2	1/2.2
A2	\$2-25	1/30	ag	1350		560.1	1/14
AZ 52-25	17 5.0	cem	450	225	397.05	1/1.7	
\$3-25	1 / 3.0	ag	1350		513.3	1/13	
		cem	450	225	397.05	171.5	
43	\$3-22	1/35	ag	1350		513.3	1/15
A5 55-22	00-22	1, 5.5	cem	386	193	340.5	171.5
	\$3-16	1/50	ag	1350		513.3	1/22
	55-10	175.0	cem	270	135	238.2	1/2.2
	\$4-25	1/30	ag	1350		515.2	1/13
54-23	1/3.0	cem	450	225	397.05	171.5	
A4	S4-20	1/40	ag	1350		515.2	1/17
	57-20	1/4.0	cem	338	169	298.2	1/1./
	\$4-16	1/50	ag	1350		515.2	1/22
	54-10	17.5.0	cem	270	135	238.2	1/2.2

**Πίνακας 2.4 :** Αναλογίες συστατικών (c/a) όλων των συνθέσεων κατά βάρος (w/w) και κατ' όγκο (v/v).

Σε όλες τις συνθέσεις (Πίνακας 2.5) προστέθηκε η κατάλληλη ποσότητα νερού ανάμιξης, ώστε να επιτευχθεί η εξάπλωση γύρω στα 16 cm. Η επιλογή του κριτηρίου της εξάπλωσης ως μέτρο σύγκρισης για την επιλογή του νερού στηρίχθηκε στο γεγονός ότι στην πράξη, ανεξαρτήτως ποιοτικών χαρακτηριστικών των πρώτων υλών, για την εφαρμογή του κονιάματος στο πεδίο ενδιαφέρει αρχικά το εργάσιμο και η πλαστικότητα του νωπού μίγματος, ενώ τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του κονιάματος αποτελούν τελικά συνάρτηση της ποσότητας του νερού που περιείχε το μίγμα.

	Κονία	Αδρανή	NHL5	Νερό Πολτού (A)	Νερό Ανάμιζης (B)	Συνολικό Νερό (A+B)	Εξάπλωση	Νερό /Kovía
	%	g	g	g	g	g	ст	-
S1_25	25	1350	450	225	35.5	260,5	15,5	0,58
S1_20	20	1350	311	155,5	83.7	239,2	16,1	0,77
S1_16	16	1350	270	135	91.7	226,7	16	0,84
S2_25	25	1350	450	225	131	355	15	0,79
S3_25	25	1350	450	225	85.5	310,5	15,5	0,69
S3_22	22	1350	386	193	98	291,0	15	0,75
S3_16	16	1350	270	135	173.2	308,2	15,5	1,14
S4_25	25	1350	450	225	70.5	295,5	15,7	0,66
S4_20	20	1350	311	169	89.2	258,0	15,5	0,76
S4_16	16	1350	270	135	115	250,0	15	0,93

**Πίνακας 2.5** : Οι ποσότητες των συστατικών που χρησιμοποιήθηκαν για όλες τις συνθέσεις και η εξάπλωση που μετρήθηκε.

Αμέσως μετά την ανάμιξη, και προκειμένου να χαρακτηριστεί το νωπό κονίαμα ως προς το εργάσιμο του, μετρήθηκε η σταθερότητα του σε τράπεζα εξάπλωσης. (Εικόνα 2.8) [28]. Για όλες τις συνθέσεις το νερό ανάμιξης υπολογίστηκε ώστε η εξάπλωση του νωπού κονιάματος να είναι 150-160 mm (Πίνακας 2.5).

Από την κάθε σύνθεση παρασκευάστηκαν τρία πρισματικά δοκίμια (160x40x40mm) τα οποία συντηρήθηκαν σε θάλαμο ελεγχόμενων συνθηκών (20±1 °C και 90±1% σχετική υγρασία) για 30 ημέρες [29].



**Εικόνα 2.8** : Μέτρηση της εξάπλωσης του νωπού κονιάματος σε τράπεζα εξάπλωσης.

Παράλληλα, παρασκευάστηκαν έξι συνθέσεις μόνο με υδραυλικό ασβέστη (NHL 5) με διαφορετικές αναλογίες νερού (w/c = 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 και 1), με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση της περιεκτικότητας του μίγματος σε νερό στις ιδιότητες της συνδετικής κονίας. Εξετάστηκαν δύο κυλινδρικά δοκίμια από κάθε σύνθεση, διαστάσεων 60 x 28 mm. τα οποία επίσης συντηρήθηκαν σε θάλαμο ελεγχόμενων συνθηκών ( $20 \pm 1$  °C και  $90 \pm 1$  % σχετική υγρασία) για 30 ημέρες [28].

#### 2.3. Μελέτη συνθέσεων κονιαμάτων

#### 2.3.1 Μελέτη Μηχανικών ιδιοτήτων

Η μέτρηση των μηχανικών αντοχών πραγματοποιήθηκε σε μηχανή θραύσεως τύπου INSTRON -100kN. Για την δοκιμή αντοχής σε κάμψη τριών σημείων (**Εικόνα 2.9**) χρησιμοποιήθηκαν τρία πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 160x40x40mm ενώ τα δύο τμήματα των πρισμάτων που προκύπτουν μετά τη δοκιμή κάμψεως, κόβονται σε κυβικά δοκίμια διαστάσεων 40x40x40 mm και χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της αντοχής σε θλίψη (**Εικόνα 2.10**). Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με σταθερή ταχύτητα παραμόρφωσης 0.1 mm/min για την κάμψη και 0.15 mm/min για τη θλίψη. Τα δεδομένα καταγράφονται από ηλεκτρονικό υπολογιστή καθ' όλη την διάρκεία της δοκιμής.

#### Αντοχή σε κάμψη τριών σημείων:

Η μέγιστη τάση (MPa) υπολογίζεται από την διαιρώντας την τιμή του μέγιστου φορτίου (N) με τις διαστάσεις του δοκιμίου σύμφωνα με το πρότυπο [29]



**Εικόνα 2.9** : Διάταξη μέτρησης αντοχής σε κάμψη τριών σημείων, σε πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 4 x 4 x 16 cm.

#### Αντοχή σε θλίψη

Η μέγιστη τάση σ<sub>max</sub> (MPa) υπολογίζεται από τη τιμή του μέγιστου φορτίου  $P_{max}$  (N) προς την επιφάνεια της βάσης του δοκιμίου A (mm<sup>2</sup>). Από την καμπύλη τάσης/ παραμόρφωσης που λαμβάνεται από την δοκιμή αυτή υπολογίστηκε το στατικό μέτρο ελαστικότητας των δοκιμίων.



**Εικόνα 2.10 :** Διάταξη μέτρησης αντοχής σε θλίψη, σε κυβικά δοκίμια διαστάσεων 4 x 4 x 4cm.

Το στατικό μέτρο ελαστικότητας εκφράζεται από την κλίση του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης τάσης/ παραμόρφωσης και πιο συγκεκριμένα από την κλίση του τμήματος ανάμεσα στα σημεία που αντιστοιχούν στο 10 και στο 40 % του μέγιστου φορτίου (της μέγιστης τάσης). [30]

#### 2.3.2 Μέτρηση μέτρου ελαστικότητας με υπερήχους

Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας των δοκιμίων μετρήθηκε με την μέθοδο των υπερήχων, πριν υποβληθούν στις υπόλοιπες δοκιμές μηχανικών αντοχών (Εικόνα 2.11). Η μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας με υπερήχους αποτελεί μία μη καταστρεπτική μέθοδο χαρακτηρισμού των υλικών ως προς τις ελαστικές τους ιδιότητες. Η μέθοδος βασίζεται στην αρχή ότι η ταχύτητα με την οποία ένα θλιπτικό κύμα διέρχεται μέσα από ένα ελαστικό σώμα είναι ανάλογη με τη τετραγωνική ρίζα του μέτρου ελαστικότητας [31].



Εικόνα 2.11 : Διάταξη μέτρησης δυναμικού μέτρου ελαστικότητας με υπερήχους

Η ταχύτητα διάδοσης του κύματος σε ένα πρισματικό δοκίμιο εκφράζεται από τη σχέση :

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Όπου :

υ : η ταχύτητα (m/s)

Ε : το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (Pa)

ρ : η φαινόμενη πυκνότητα του υλικού (kg/m<sup>3</sup>)

Η ταχύτητα των υπερήχων προσδιορίζεται πειραματικά από τη σχέση :

$$v = \frac{L}{T}$$

Όπου :

L : η διαδρομή του κύματος μεσα στο υλικό ή διαφορετικά. το μήκος του δοκιμίου (m)

T : ο μετρούμενος χρόνος (s)

#### 2.3.3 Συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης

Η δοκιμή αυτή προσομοιάζει την αναρρίχηση της υγρασίας και χρησιμοποιείται για να καταγράψει την ευκολία κίνησης του νερού μέσα στο υλικό [32].

Η απορρόφηση του νερού μέσω τριχοειδών δηλαδή η ποσότητα νερού που απορροφάται από το δείγμα ανά μονάδα επιφάνειας σε δεδομένο χρόνο, υπολογίζεται από τη σχέση

$$M_i = \frac{m_i - m_0}{S}$$

Όπου:

 $m_i$  =το βάρος του δείγματος σε χρόνο  $t_i$  (g)

 $m_0 = το$  βάρος του ξηρού δείγματος (g)

S = επιφάνεια του δείγματος που βρίσκεται σε επαφή με το νερό (cm<sup>2</sup>)

Οι παραπάνω τιμές απεικονίζονται σε γράφημα σαν συνάρτηση της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου (s<sup>-1/2</sup>). Ο συντελεστής επιφανειακής απορροφητικότητας υπολογίζεται από τη κλίση του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης.

#### 2.3.4 Μέτρηση φαινόμενης πυκνότητας και πορώδους

Ο προσδιορισμός του πορώδους των σκληρυμένων κονιαμάτων καθώς και των μιγμάτων καθαρής κονίας, πραγματοποιήθηκε προσδιορίζοντας τον φαινόμενο και πραγματικό όγκο των δοκιμίων μέσω υδροστατικής ζύγισης [33].

Το κάθε δείγμα ζυγίστηκε μετά από ξήρανση  $(m_1)$ , υδατοκορεσμένο  $(m_2)$  και υπό άνωση  $(m_3)$ .

Η φαινόμενη πυκνότητα υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\rho_{bulk} = \frac{m_1}{m_3 - m_2}$$

Το πορώδες υπολογίζεται από τη σχέση :

$$Porosity = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2}$$

#### 2.3.5 Έλεγχος βάθους ενανθράκωσης (τεστ φαινολοφθαλεϊνης)

Η μέτρηση του βάθους της ενανθράκωσης αποτελεί μία ημικαταστροφική μέθοδο η οποία βασίζεται στην χρώση ενός δείκτη σε ουδέτερο προς ελαφρά αλκαλικό περιβάλλον. Το υδροξείδιο του ασβεστίου (Ca(OH)<sub>2</sub>) αντιδρά με το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) της ατμόσφαιρας και ενανθρακώνεται παράγοντας ανθρακικό ασβέστιο (CaCO<sub>3</sub>).

 $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$ 

Το υδροξείδιο του ασβεστίου είναι έντονα αλκαλικό (pH >12), ενώ το ανθρακικό ασβέστιο έχει ουδέτερο pH. Η αντίδραση ενανθράκωσης που λαμβάνει χώρα είναι αντίδραση εξουδετέρωσης. Έτσι είναι δυνατό να εξαχθούν ποιοτικά συμπεράσματα για την εξέλιξη της ενανθράκωσης μεσώ οπτικής παρατήρησης με τη χρήση ενός δείκτη. Ο καταλληλότερος δείκτης για αυτή τη δοκιμή είναι η φαινολοφθαλεΐνη με περιοχή pH αλλαγής χρώματος είναι 8,2-12. Η φαινολοφθαλεΐνη αντιδρά σε αλκαλικό περιβάλλον δίνοντας ένα έντονο σκούρο ρόδινο χρώμα, ενώ σε ουδέτερο pH είναι άχρωμη. Το διάλυμα φαινολοφθαλεΐνης που χρησιμοποιήθηκε είναι συγκέντρωσης 1% σε διαλύτη αιθανόλη. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στις επιφάνειες θραύσης (freshly broken surfaces) των δοκιμίων αμέσως μετά την δοκιμή σε κάμψη τριών σημείων. Οι τομές των δοκιμίων ψεκάστηκαν με διάλυμα δείκτη φαινολοφθαλεΐνης 1% κ.β. σε αιθανόλη και φωτογραφήθηκαν (Εικόνες 2.12 και 2.13). Το πάχος του δακτυλίου που σχηματίζεται στην εξωτερική επιφάνεια των δειγμάτων ,αντιπροσωπεύει το βάθος της ενανθράκωσης που έχει υποστεί το υλικό[34].



**Εικόνα 2.12 :** Έλεγχος βάθους ενανθράκωσης με χρήση δείκτη φαινολοφθαλεΐνης σε πρισματικά δοκίμια



Εικόνα 2.13 : Μέτρηση του βάθους ενανθράκωσης με δείκτη φαινολοφθαλεΐνης σε τομές κυλινδρικών δοκιμίων μετά από επεξεργασία με πρόγραμμα ψηφιακής ανάλυσης εικόνας. Από αριστερά προς τα δεξιά παρατηρείται η μείωση του βάθους της ενανθράκωσης με την μείωση της περιεκτικότητας σε νερό.

#### 2.3.6 Μελέτη μικροδομής (SEM)

Όλες οι συνθέσεις εξετάστηκαν στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης FEI Quanta-Inspect (SEM/EDX), σε στιλπνές τομές εγκιβωτισμένων δειγμάτων καθώς και σε επιφάνειες θραύσης, με σκοπό να μελετηθεί η μικροδομή του συνδετικού υλικού ως προς τα προϊόντα της ενυδάτωσης καθώς και η φύση της διαφασικής περιοχής ανάμεσα στην συνδετική κονία και τα αδρανή.

#### 2.3.7 Ορυκτολογική ανάλυση

Τα σκληρυμένα μίγματα καθαρής κονίας εξετάστηκαν με περίθλαση ακτίνων X (XRD), σε περιθλασίμετρο Siemens D500, με βήμα γωνιομέτρου 0.03 °/ 5 s σε λειοτριβημένα δείγματα (d<sub>max</sub>< 63 μm) σε πέντε διαφορετικές ημερομηνίες μέσα στη διάρκεια ενός μήνα (3, 7, 14, 21 και 28 ημέρες) με σκοπό την παρακολούθηση της ενυδάτωσης. Από το κάθε δοκίμιο η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε κάθε φορά με εγκάρσια τομή πάχους λίγων χιλιοστών έτσι ώστε το δείγμα να είναι αντιπροσωπευτικό όλης της μάζας του υλικού.

## 3. Αποτελέσματα – Συζήτηση

#### 3.1 Ρεολογικές ιδιότητες

#### 3.1.1 Ο ρόλος της κονίας

Όλες οι συνθέσεις σχεδιάστηκαν με κοινό χαρακτηριστικό την εξάπλωσή τους (15 – 16 cm) μεταβάλλοντας την ποσότητα του νερού ανάμιξης. Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.1) παρουσιάζεται - για κάθε διαφορετική άμμο - το απαιτούμενο ποσοστό νερού, σε συνάρτηση με το ποσοστό της κονίας που χρησιμοποιήθηκε.



Εικόνα 3.1: Εξάρτηση του απαιτούμενου νερού από το ποσοστό της συνδετικής κονίας και από τη φύση των αδρανών. Δίπλα σε κάθε σημείο, αναγράφεται η εξάπλωση του μίγματος.

Η επίδραση των χαρακτηριστικών των αδρανών εκδηλώνεται μέσω της αλληλεπίδρασης των κόκκων τους με την κονία, καθώς και τον τρόπο που οργανώνονται στο χώρο. Στην Εικόνα 3.1 φαίνεται ότι η απαίτηση σε νερό είναι μεγαλύτερη για τις συνθέσεις με μικρότερο ποσοστό κονίας. Αντίθετα η αύξηση του ποσοστού της κονίας μειώνει την απαίτηση σε νερό για την επίτευξη του ίδιου εργάσιμου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κονία λειτουργεί σαν λιπαντής των κόκκων των αδρανών, αυξάνοντας την πλαστικότητα του μίγματος. Όταν το σύστημα υστερεί σε κονία, η πλαστικότητα του μειώνεται με αποτέλεσμα να απαιτείται επιπλέον νερό για να επιτευχθεί ικανοποιητικό εργάσιμο [26]. Αντίθετα, μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε κονία οδηγεί στην αύξηση της μεταξύ τους απόστασης και επομένως σε μειωμένη αλληλεπίδραση, συγκαλύπτοντας έτσι την επίδραση των αδρανών στην πλαστικότητα του μίγματος.

Στο ίδιο διάγραμμα (Εικόνα 3.1) φαίνεται ότι η απαίτηση του νωπού κονιάματος σε νερό, διαφοροποιείται για τα διαφορετικά αδρανή. Από τα τέσσερα αδρανή που επιλέχθηκαν την μικρότερη απαίτηση σε νερό παρουσιάζει η πρότυπη άμμος A1. Για την άμμο A2 παρατηρείται η μεγαλύτερη απαίτηση σε νερό λόγω αυξημένου ποσοστού παιπάλης (fines % = 1,64) σε σχέση με τις υπόλοιπες άμμους. Η άμμος A3 που περιέχει το ίδιο ποσοστό παιπάλης με την πρότυπη (fines % = 0,05), παρουσιάζει όμως αυξημένη απαίτηση σε νερό λόγω του μειωμένου συντελεστή ομοιομορφίας σε σχέση με τη πρότυπη άμμο A1 (Cu = 2.5 και 6 αντίστοιχα). Τα τρία αυτά αδρανή είναι αδρανή φυσικής προέλευσης, παρουσιάζουν παρόμοιο γεωμετρία (σφαιρικά ως επί το πλείστον) και χημική σύσταση, διαφοροποιούνται όμως ως προς την κοκκομετρία είναι ίδια με αυτή της A1, η αυξημένη απαίτηση σε νερό φαίνεται να οφείλεται στη μειωμένη σφαιρικότητα των κόκκων (Εικόνες 2.3 και 2.4).

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά των άμμων A1, A2 και A3, εκφράζουν την διαφορετική κοκκοδιαβάθμιση των άμμων αυτών, και καθορίζουν συνδυαστικά την πυκνότητα στοίβαξής τους. Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.2**, η αύξηση των τιμών της πυκνότητα στοίβαξης των αδρανών μειώνει την απαίτηση του νωπού κονιάματος σε νερό. Η καλύτερη στοίβαξη (και επομένως η δημιουργία λιγότερου κενού χώρου ανάμεσα στους κόκκους των αδρανών) έχει σαν αποτέλεσμα να γίνεται πιο αποδοτική χρήση της κονίας για την ίδια μάζα αδρανών και συνεπώς, να απαιτείται μικρότερη ποσότητα νερού για να επιτευχθεί ικανοποιητικό εργάσιμο. Δηλαδή, η ίδια ποσότητα κονίας θα «λιπάνει» πιο αποτελεσματικά ένα μίγμα όταν τα αδρανή που περιέχει παρουσιάζουν μεγαλύτερη πυκνότητα στοίβαξης. Η επίδραση αυτή, της πυκνότητας στοίβαξης των αδρανών στην απαίτηση σε νερό έρχεται σε συμφωνία με παρόμοιες μελέτες [35].

Έτσι, προκύπτει ότι η πυκνότητα στοίβαξης των αδρανών αποτελεί μια αξιόπιστη παράμετρο που διαφοροποιεί την απαίτηση του νωπού κονιάματος σε νερό. Σε αυτή τη βάση, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση των ρεολογικών ιδιοτήτων των συνθέσεων που παρασκευάστηκαν με ποσοστό κονίας ανάλογο της πυκνότητας στοίβαξης των αδρανών. Οι συνθέσεις αυτές, παρουσιάζουν την ίδια απαίτηση σε νερό ανάμιξης (w/c) για να επιτευχθεί η ίδια εξάπλωση (Εικόνα 3.2), γεγονός που υποδηλώνει ότι τα μίγματα που δημιουργήθηκαν με αυτό τον τρόπο παρουσιάζουν κοινή ρεολογική συμπεριφορά. Με τον τρόπο αυτό αποδεικνύεται ότι η πυκνότητα στοίβαξης των αδρανών μπορεί να αποτελέσει ρυθμιστικό παράγοντα για τις ρεολογικές ιδιότητες του νωπού κονιάματος.

Όπως προκύπτει από την Εικόνα 3.2, η πυκνότητα στοίβαξης μπορεί να αντικατασταθεί από την φαινόμενη πυκνότητα των αδρανών, προκειμένου να συγκριθούν διαφορετικά αδρανή ως προς την θεωρητική απαίτησή τους σε νερό ανάμιξης, δεδομένου ότι στην πράξη τα αδρανή παρόμοιας προέλευσης δεν διαφοροποιούνται ως προς την πραγματική τους πυκνότητα.



Εικόνα 3.2: Η απαίτηση σε νερό ανάμιξης των συνθέσεων, συναρτήσει της πυκνότητας στοίβαξης και της φαινόμενη πυκνότητας των αδρανών φυσικής προέλευσης. Τα σημεία μέσα σε κύκλο αντιπροσωπεύουν τις συνθέσεις που σχεδιάστηκαν με βάση την πυκνότητα στοίβαξης των αδρανών.

Η άμμος Α4, παρόλο που παρουσιάζει την μεγαλύτερη πυκνότητα στοίβαξης, δεν ακολουθεί την ίδια τάση. Το ποσοστό του νερού είναι μεγαλύτερο από το αναμενόμενο. Οι γωνιώδεις κόκκοι της, οδηγούν σε αυξημένες τριβές κατά την ανάμιξη του κονιάματος, μειώνοντας την πλαστικότητα του μίγματος και αυξάνοντας την απαίτηση σε νερό.

Τέλος, στην Εικόνα 3.1 είναι φανερό πως, μεταβάλλοντας το ποσοστό της κονίας η σχετική επίδραση των διαφορετικών αδρανών παραμένει η ίδια. Πιο συγκεκριμένα, σε όλες τις περιπτώσεις η πρότυπη άμμος A1 έχει την μικρότερη απαίτηση σε νερό, και η άμμος A3 παρουσιάζει σταθερά υψηλότερη απαίτηση σε νερό. Παρόλα αυτά, στις συνθέσεις με το μικρότερο ποσοστό κονίας (16 %) η επίδραση των χαρακτηριστικών των αδρανών είναι πιο έντονη (μεγάλες διαφοροποιήσεις) και μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού της κονίας στο 25 % [36].

#### 3.1.2 Η μεταβολή του πορώδους

Η ποσότητα του νερού που προστίθεται κατά την ανάμιξη του νωπού κονιάματος είναι καθοριστική για την ανάπτυξη του πορώδους στα σκληρυμένα κονιάματα. Αυξημένο ποσοστό νερού ανάμιξης οδηγεί κατά βάση σε αύξηση του πορώδους. Η εξάρτηση αυτή φαίνεται στην Εικόνα 3.3, όπου συγκρίνεται το πορώδες συναρτήσει του ποσοστού του νερού στις συνθέσεις που πραγματοποιήθηκαν χωρίς αδρανή. Στο ίδιο διάγραμμα παρατηρείται ένα σημείο καμπής που αντιστοιχεί στις συνθέσεις αυτές που παρασκευάστηκαν με αναλογία νερού κονίας (w/c) 0,7. Για τις συνθέσεις με μεγαλύτερη αναλογία νερού, φαίνεται πως διαφοροποιείται αυτή η συσχέτιση και το επιπλέον νερό που προστίθεται δεν συμμετέχει στον μηχανισμό της ενυδάτωσης αφού δεν είναι δυνατόν να συγκρατηθεί στη μάζα της κονίας, αλλά σταδιακά διαχωρίζεται από την κονία (απόμιξη) και εξατμίζεται.



**Εικόνα 3.3:** Επίδραση του ποσοστού του νερού στο πορώδες των συνθέσεων καθαρής κονίας.

Η ίδια συσχέτιση παρατηρείται και στην Εικόνα 3.4 όπου για όλες τις συνθέσεις με δύο διαφορετικά ποσοστά κονίας (16 και 25 %) παρατηρείται αύξηση του πορώδους με την αύξηση του ποσοστού του νερού. Παράλληλα στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται ότι το πορώδες εξαρτάται και από το ποσοστό της κονίας [37]. Δεδομένου ότι τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν έχουν αμελητέο πορώδες θεωρείται ότι η αύξηση του πορώδους των συγκεκριμένων κονιαμάτων οφείλεται κυρίως στη συνδετική κονία. Επομένως, είναι αναμενόμενο να παρατηρείται αύξηση του πορώδους στις συνθέσεις με μεγαλύτερο ποσοστό κονίας. Όταν όμως το ποσοστό του πορώδους των κονιαμάτων, αντικατασταθεί από τον λόγο του πορώδους προς το ποσοστό της κονίας, το ποσοστό του πορώδους κανονικοποιείται ως προς το ποσοστό της κονίας και μπορεί να αποτελέσει κριτήριο για τον χαρακτηρισμό της επίδοσης των κονιαμάτων στη σκληρυμένη φάση. Στην Εικόνα 3.5 φαίνεται η μεταβολή του πορώδους που παρατηρείται όσο αυξάνεται το ποσοστό του νερού ανάμιξης των κονιαμάτων (w/c).

Προκείμένου να μελετηθεί περαιτέρω η πορώδης δομή των κονιαμάτων μελετήθηκε η τριχοειδής αναρρίχηση και προσδιορίστηκε ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης *A* (Πίνακας 3.1). Στην Εικόνα 3.6. φαίνεται η εξάρτηση του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης A από το ποσοστό του νερού και από το πορώδες αντίστοιχα. Το ποσοστό του νερού ανάμιξης παρουσιάζει σχεδόν γραμμική συσχέτιση με τον συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης ανεξάρτητα από το ποσοστό της κονίας.

Το πορώδες, για το ίδιο ποσοστό συνδετικής κονίας συσχετίζεται γραμμικά με τον συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης, καθώς στις συνθέσεις με διαφορετικά αδρανή η αύξηση του πορώδους συνεπάγεται αύξηση του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης. Από το γεγονός αυτό συμπεραίνεται ότι οι επιπλέον πόροι που δημιουργούνται κατά την αύξηση του ολικού πορώδους (Εικόνα 3.4) είναι ανοιχτοί τριχοειδείς πόροι.



**Εικόνα 3.4:** Εξάρτηση του πορώδους από το ποσοστό του νερού ανάμιξης σε συνθέσεις με δύο διαφορετικά ποσοστά συνδετικής κονίας.



Εικόνα 3.5: Συσχέτιση του ποσοστού του νερού ανάμιξης όλων των συνθέσεων από το πορώδες, αφού έχει κανονικοποιηθεί ως προς το ποσοστό της κονίας.



**Εικόνα 3.6:** Μεταβολή του συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης συναρτήσει του ποσοστού του νερού και του πορώδους.

	0/ monte		Domositu	Capillary
	%ο ΚΟΝΙά	water /NHL	Porosity	Coefficient
		-	%	kg m <sup>-2</sup> min <sup>0,5</sup>
S1_25	25	0.58	22.2	0.018
S1_20	20	0.77	20.4	0.029
S1_16	16	0.84	19.1	0.028
S2_25	25	0.79	26.4	0.029
S3_25	25	0.69	24.7	0.027
S3_22	22	0.75	23.5	0.029
S3_16	16	1.14	26.0	0.045
S4_25	25	0.66	24.4	0.031
S4_20	20	0.76	22.5	0.029
S4_16	16	0.93	21.5	0.034

**Πίνακας 3.1:** Ποσοστό νερού, πορώδες και συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης όλων των συνθέσεων

Στην Εικόνα 3.7 φαίνεται η συσχέτιση που εμφανίζεται ανάμεσα στο ποσοστό της κονίας και το πορώδες. Η επίδραση της κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών είναι σαφής και εκφράζεται μέσω της διαφορετικής απαίτησης των νωπών μιγμάτων σε νερό. Παράλληλα στο ίδιο διάγραμμα παρατηρείται η απόκλιση που παρουσιάζει το δείγμα που παρασκευάστηκε με την άμμο A3 και ποσοστό κονίας 16%. Η σύνθεση αυτή εμφανίζει πολύ μεγαλύτερο πορώδες από το αναμενόμενο, ενώ η ίδια απόκλιση είναι λιγότερο φανερή στο διάγραμμα της Εικόνας 3.4. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι το πορώδες που εμφανίζεται στο δείγμα αυτό, αποδίδεται στην πολύ μεγάλη προσθήκη νερού που απαιτήθηκε κατά την παρασκευή του (w/c= 1,14), με αποτέλεσμα η περίσσια του νερού να δημιουργεί φαινόμενα διαχωρισμού και χαμηλής πρόσφυσης μεταξύ κονίας – αδρανών.



**Εικόνα 3.7:** Εξάρτηση του πορώδους από το ποσοστό της συνδετικής κονίας και από τη φύση των αδρανών.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.8 η πρόσφυση των αδρανών με την συνδετική κονία διαφασική περιοχή (ITZ- Interfacial Transition Zone) - διαφέρει ανάλογα με την φύση των αδρανών και την ποσότητα του νερού ανάμιξης. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.9 (σύνθεση S3-16), το αυξημένο ποσοστό του νερού δημιούργησε πιθανώς κατά την ενυδάτωση ένα στρώμα νερού γύρω από τους κόκκους των αδρανών μειώνοντας αισθητά την πυκνότητα της κονίας στη περιοχή γύρω από τους κόκκους των αδρανών με αποτέλεσμα την χαλαρή πρόσφυση των αδρανών με τη κονία. Το γεγονός αυτό εξηγεί την μεγάλη αύξηση του πορώδους στο κονίαμα που πραγματοποιήθηκε με την άμμο A3 και ποσοστό κονίας 16%.



Εικόνα 3.8: Παρατήρηση της πρόσφυσης των αδρανών με τη συνδετική κονία σε στιλβωμένες επιφάνειες δειγμάτων στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Απεικονίζονται τα κονιάματα που πραγματοποιήθηκαν με ποσοστό κονίας 25% : (α)S1 (β)S2 (γ) S3 (δ) S4



Εικόνα 3.9: Παρατήρηση της πρόσφυσης των αδρανών με τη συνδετική κονία σε στιλβωμένη επιφάνεια δείγματος της σύνθεσης S3\_16 στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Οι περιοχές μειωμένης πρόσφυσης κονίας –αδρανών υποδεικνύονται με κόκκινο χρώμα

Η εξάρτηση του πορώδους από το ποσοστό της συνδετικής κονίας επιβεβαιώνεται και από τη μελέτη της σειράς συνθέσεων, στην οποία το ποσοστό της κονίας ισοδυναμεί με το ποσοστό των κενών που μετρήθηκε για τα αντίστοιχα αδρανή. Για τη σειρά αυτή το ποσοστό του νερού ανάμιξης δεν διαφοροποιείται παρά ελάχιστα (Εικόνα 3.10) και οι διαφορές στο πορώδες φαίνεται να οφείλονται αποκλειστικά στις διαφορές στο ποσοστό του συνδετικού υλικού.



Εικόνα 3.10: Εξάρτηση του πορώδους από το ποσοστό της συνδετικής κονίας σε συνθέσεις με το ίδιο ποσοστό νερού ανάμιξης.

#### 3.2 Μηχανικές ιδιότητες

Τα πειραματικά αποτελέσματα που αφορούν στο σύνολο των μηχανικών ιδιοτήτων των κονιαμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της αντοχής σε θλίψη παρουσιάζουν την ίδια τάση με τα αποτελέσματα των μετρήσεων του στατικού και του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.11. Οι αντοχές σε κάμψη παρουσιάζουν τιμές που αναλογούν περίπου στο 10% των αντοχών σε θλίψη, υποδηλώνοντας ότι οι συνθέσεις των κονιαμάτων έχουν μειωμένη πλαστικότητα και αυξημένη ευθραυστότητα (brittleness) [38]. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η δοκιμή σε κάμψη τριών σημείων επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό απ' ότι η θλίψη από τις ατέλειες στη δομή του κονιάματος (μικρορωγμές, πορώδες, διαφασική περιοχή) που δημιουργούνται κατά την σκλήρυνση [39]. Παράλληλα, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ηλικία 30 ημερών. Σε αυτήν την ηλικία η κονία (NHL 5) δεν έχει αποκτήσει τις μέγιστες αντοχές της, καθώς η διαδικασία της ενυδάτωσης δεν έχει ολοκληρωθεί. Έτσι, η μερική ενυδάτωση οδηγεί σε μειωμένη πρόσφυση μεταξύ των συστατικών του κονιάματος ενώ, περαιτέρω ενυδάτωση μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της αντοχής σε κάμψη. Βάσει βιβλιογραφίας, οι υδραυλικές κονίες αποκτούν τις μέγιστες αντοχές τους μετά τις 90 ημέρες, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις οι αντοχές τους συνεχίζουν να αυξάνονται και μετά τις 360 ημέρες.[36].

Κωδικός ἀμμου	Κωδικός κονιάματος	% коvíа	Compressive	Flexural	Static Modulus of Elasticity	Dynamic Modulus of Elasticity
			МРа	МРа	MPa	МРа
	S1_25	25	3.53	0.35	393.7	5625
A1	S1_20	20	2.06	0.17	307.4	4193
	S1_16	16	1.77	0.16	198.1	4022
A2	S2_25	25	1.73	0.27	297.7	3380
	S3_25	25	2.06	0.22	265.6	4216
A3	S3_22	22	1.41	0.14	137.7	3415
	S3_16	16	0.67	0.08	94.2	2174
	S4_25	25	2.09	0.19	355.8	4222
A4	S4_20	20	1.35	0.22	177.0	3968
	S4_16	16	1.20	0.17	104.0	3256

Πίνακας 3.2 : Μηχανικές ιδιότητες όλων των συνθέσεων.



Εικόνα 3.11: Συσχετισμός των αντοχών σε θλίψη με το στατικό (επάνω διάγραμμα) και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (κάτω διάγραμμα) των κονιαμάτων.

#### 3.2.1 Επίδραση του ποσοστού της κονίας στις μηχανικές ιδιότητες

Η αύξηση του ποσοστού της κονίας οδηγεί, σαν γενική τάση, στην αύξηση των μηγανικών αντοχών (Εικόνα 3.12), συμβαδίζοντας με τα αποτελέσματα αντίστοιχων μελετών [36]. Μελετώντας τα αποτελέσματα με βάση την αρχική υπόθεση ότι η κονία γεμίζει τον κενό χώρο μεταξύ των αδρανών προκύπτει πως οι συνθέσεις με το χαμηλότερο ποσοστό κονίας (16%) παρουσιάζουν μικρότερες αντοχές, καθώς η ποσότητα της κονίας είναι μικρότερη από αυτή που απαιτείται για να καλύψει τον κενό όγκο που σχηματίζεται ανάμεσα στα συγκεκριμένα αδρανή και επομένως, το κονίαμα αποκτά μια πιο χαλαρή δομή με μικρότερες αντοχές. Στις συνθέσεις με ποσοστό κονίας 25 %, η κονία είναι σε περίσσεια, δηλαδή υπερκαλύπτει τον κενό χώρο ανάμεσα στους κόκκους των αδρανών με αποτέλεσμα οι μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων να εξαρτώνται περισσότερο από τις αντοχές της κονίας, με παράλληλη μείωση της επίδρασης των αδρανών. Για το εκάστοτε ποσοστό κονίας, τα χαρακτηριστικά των αδρανών διαφοροποιούν τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής αναλόγως του τύπου των αδρανών, δίνοντας σε όλες τις περιπτώσεις καλύτερα αποτελέσματα από την άμμο Α1. Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν και από τη μελέτη του στατικού και δυναμικού μέτρου ελαστικότητας σε συνάρτηση με το ποσοστό της κονίας.

Το μοτίβο αυτό διαφοροποιείται στην περίπτωση της καμπτικής αντοχής των κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν με την άμμο A4 (Εικόνα 3.12). Η άμμος A4, όπως έχει αναφερθεί στο πειραματικό μέρος, διακρίνεται για τους έντονα γωνιώδης κόκκους της. Η μεταβολή της αντοχής σε κάμψη στην σύνθεση S4 θα μπορούσε να αποδοθεί στην αλληλεπίδραση μεταξύ των κόκκων των αδρανών. Έτσι, η αύξηση του ποσοστού της κονίας έχει σαν συνέπεια την μείωση της αλληλεπίδρασης αυτής και επομένως της αντοχής, ενώ η ελάττωση του ποσοστού της κονίας αυξάνει τις τριβές μεταξύ των κόκκων και συνεπώς την αντοχή σε κάμψη, καθώς αυξάνεται η ενέργεια που απαιτείται για την απομάκρυνση των κόκκων και τη θραύση του κονιάματος [5].



**Εικόνα 3.12 :** Εξάρτηση των μηχανικών ιδιοτήτων από το ποσοστό της συνδετικής κονίας και από τη φύση των αδρανών.

#### 3.2.2 Επίδραση του νερού ανάμιξης

Το ποσοστού του νερού (w/c) ανάμιξης παρουσιάζει μια γραμμική, κατά βάση, συσχέτιση με τις μηχανικές αντοχές των κονιαμάτων (Εικόνα 3.13) η αύξηση του οποίου έχει σαν συνέπεια την ελάττωση των μηχανικών αντοχών των κονιαμάτων. Το ποσοστό του νερού ανάμιξης (w/c), όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, είναι έντονα εξαρτημένο από την φύση των αδρανών (πυκνότητα στοίβαξης, σχήμα) και όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.13 το αυξημένο ποσοστό του νερού μειώνει την πυκνότητα της κονίας, με αποτέλεσμα την χαλαρή πρόσφυση των αδρανών με τη κονία.



**Εικόνα 3.13** Εξάρτηση των μηχανικών ιδιοτήτων από το ποσοστό του νερού ανάμιξης.

Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του νερού ανάμιξης οδηγεί σε αύξηση της ενανθράκωσης της κονίας εις βάρος της ενυδάτωσης. Στην Εικόνα 3.14 φαίνεται η εξάρτηση του βαθμού ενανθράκωσης από το ποσοστό του νερού ανάμιξης (w/c). Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των συνθέσεων με αδρανή με αυτά των συνθέσεων χωρίς αδρανή, παρατηρείται συμφωνία στην εξάρτηση της ενανθράκωσης από το νερό ανάμιξης (w/c). Δηλαδή το βάθος της ενανθράκωσης επηρεάζεται από το ποσοστό του νερού ανάμιξης. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.15 η αύξηση της ενανθράκωσης έχει σαν συνέπεια την μείωση των μηχανικών αντοχών των κονιαμάτων, δρώντας σαν μηχανισμός ανταγωνιστικός προς την ενυδάτωση.

Τα αποτελέσματα της μελέτης της ενανθράκωσης των συνθέσεων χωρίς αδρανή, με την μέθοδο του δείκτη φαινολοφθαλεΐνης, παρουσιάζονται στον Πίνακας 3.3 ενώ της ανάλυσης των ίδιων συνθέσεων με περίθλαση ακτίνων X (XRD) στην Εικόνα 3.16. Τα αποτελέσματα των παραπάνω μετρήσεων βρίσκονται σε συμφωνία.



**Εικόνα 3.14:** Μεταβολή του βάθους ενανθράκωσης συναρτήσει του νερού ανάμιξης στις συνθέσεις με και χωρίς αδρανή.



**Εικόνα 3.15:** Μεταβολή των μηχανικών αντοχών των κονιαμάτων συναρτήσει του βάθους ενανθράκωσης.

Water /Cement	Porosity	Carbonation Depth
-	%	ст
0.4	39.9	0.10
0.5	44.9	0.16
0.6	49.7	0.26
0.7	52.7	0.26
0.8	53.0	0.28
1	55.6	0.47

Πίνακας 3.3 : Ποσοστό νερού (w/c), πορώδες και βάθος ενανθράκωσης των συνθέσεων χωρίς αδρανή



Εικόνα 3.16: Παρακολούθηση της εξέλιξης της ενανθράκωσης των συνθέσεων χωρίς αδρανή με διαφορετικά ποσοστά νερού (w/c) στη διάρκεια ενός μήνα με περιθλασιμετρία ακτίνων X (XRD). Φαίνεται η κατανάλωση του πορτλανδίτη **P** (Ca(OH)<sub>2</sub>) και η αύξηση του ασβεστίτη **C** (CaCO<sub>3</sub>).

#### 3.2.3 Επίδραση του πορώδους

Το μετρούμενο πορώδες, όπως έχει συζητηθεί παραπάνω (Παράγραφος 3.1.2 και Εικόνα 3.5), είναι αποτέλεσμα της ποσότητας του νερού που απαιτήθηκε κατά την παρασκευή των κονιαμάτων. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αντοχής σε θλίψη που πραγματοποιήθηκαν στο σύνολο των δοκιμίων, συναρτήσει του πορώδους των αντίστοιχων δοκιμίων, φαίνονται στην Εικόνα 3.17. Η αύξηση του πορώδους έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση των αντοχών, σε συνδυασμό με την επίδραση του νερού στην πυκνότητα της κονίας, όπως περιγράφηκε παραπάνω.



Εικόνα 3.17 : Εξάρτηση μηχανικών ιδιοτήτων από το ποσοστό του πορώδους.

#### 3.2.4 Επίδραση των ιδιοτήτων των αδρανών

Συγκρίνοντας τα κονιάματα που παρασκευάστηκαν με τα διαφορετικά αδρανή φυσικής προέλευσης, φαίνεται ότι οι μηχανικές αντοχές των κονιαμάτων βελτιώνονται με την αύξηση της πυκνότητας στοίβαξης των αδρανών, για το ίδιο το ποσοστό κονίας (Εικόνα 3.18). Η πιο πυκνή στοίβαξη των αδρανών επιτρέπει την πιο αποδοτική κατανομή της κονίας ανάμεσα στους κόκκους της άμμου, με αποτέλεσμα το κονίαμα να παρουσιάζει μεγαλύτερη συνεκτικότητα και κατά συνέπεια, μεγαλύτερες αντοχές. Στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται η αύξηση των αντοχών που παρατηρείται με την αύξηση του ποσοστού της κονίας στις συνθέσεις που παρασκευάστηκαν με τα ίδια αδρανή.



**Εικόνα 3.18 :** Επίδραση της πυκνότητας στοίβαξης των αδρανών στην απαίτηση νερού του νωπού μίγματος και στις μηχανικές αντοχές του σκληρυμένου κονιάματος.

	S1_25
	Πυκνότητα στοίβαξης =
	05%
NAME IN	Ποσοστό κονίας(κ.β.) =
	20%
	Πορώδες = 20,4%
2/9/2012 HV mag WD HFW tilt1 mm	Cu = 6
3:38:47 PM 25:00 kV 100 x 9.8 mm 2:70 mm 1 1 Panta Inspect D8334 - Demokritos Athe	S2_20
Ask STAT	
	Πυκνότητα στοίβαξης =
	59%
	Ποσοστό κονίας(κ.β.) =
	25%
	Πορώδες = 26,41%
	Cu = 3,75
29/2012 HV mag WD HFW tilt <u>1 mm 1 mm 1</u> 3.19.16 PM 25.00 kV 100 v 9.9 mm 2.70 mm 1.° tanta Inspect DR334 - Demokritos Athe	S3_16
and A	_
	П / /0 %
	πυκνοτητα στοιραζης = 60%
YEO COM	$1060600$ kovia $\zeta(k.p.) = 22\%$
1 Stand	Πορώδες - 23 5%
	110pw0c5 - 23,5 /0
2/9/2012 HV mag WD HFW tilt - 1 mm	Cu = 2,5
3:13:36 PM 25.00 kV 100 x 10.0 mm 2.70 mm 1 ° anta Inspect D8334 - Demokritos Athe	

Εικόνα 3.19: Παρατήρηση στιλπνών επιφανειών στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) των συνθέσεων με ποσοστό κονίας υπολογισμένο βάσει της πυκνότητας στοίβαξης.

Τα κονιάματα που πραγματοποιήθηκαν με ποσοστό κονίας που αντιστοιχεί στο ποσοστό των κενών των αδρανών, εμφανίζουν την ίδια απαίτηση σε νερό ανάμιξης όπως έχει παρουσιαστεί παραπάνω (Παράγραφος 3.1.1, Εικόνα 3.2). Η βαρύτητα της επίδρασης της πυκνότητας στοίβαξης στις μηχανικές αντοχές των κονιαμάτων φαίνεται στο διάγραμμα μηχανικών αντοχών προς πυκνότητα στοίβαξης, όπου για τις συνθέσεις με βέλτιστη αναλογία κονίας προς αδρανή (c/a), παρατηρείται ότι η αντοχή σε θλίψη παραμένει σχεδόν αμετάβλητη (στην τάξη των 2 MPa) ενώ το ποσοστό της κονίας μειώνεται από 25 σε 20 %. Η απώλεια σε συνδετικό υλικό ισοσταθμίζεται από την αύξηση της πυκνότητας στοίβαξης των αδρανών.

Τέλος, από την σύγκριση των τριών αυτών κονιαμάτων στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) (Εικόνα 3.19) φαίνεται ότι η μεταβολή των αντοχών τους είναι αποτέλεσμα της από κοινού επίδρασης διαφορετικών παραγόντων που επιδρούν αθροιστικά στην ανάπτυξη των αντοχών.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα αποδεικνύεται ότι:

α) τα κονιάματα που σχεδιάστηκαν με αναλογίες συστατικών σύμφωνα με τη πυκνότητα στοίβαξης διαφορετικών αδρανών, παρουσίασαν ίδιες ρεολογικές και μηχανικές ιδιότητες, παρόλο που το ποσοστό της κονίας στη σύνθεση τους διαφέρει αισθητά.

β) για το ίδιο ποσοστό κονίας, η χρήση αδρανών με μεγαλύτερη πυκνότητα στοίβαξης οδηγεί σε μικρότερη απαίτηση του νωπού μίγματος σε νερό και σε υψηλότερες μηχανικές αντοχές.

γ) τα γωνιώδη αδρανή μειώνουν την εργασιμότητα του νωπού μίγματος και αυξάνουν την απαίτηση του σε νερό.

δ) η αύξηση του ποσοστού του νερού για να επιτευχθεί το ίδιο εργάσιμο οδηγεί σε αύξηση του πορώδους και μείωση των μηχανικών αντοχών του σκληρυμένου κονιάματος.

ε) τέλος, η αύξηση του ποσοστού της κονίας - για τα ίδια αδρανή - αυξάνει την πλαστικότητα του νωπού μίγματος και τις αντοχές του σκληρυμένου κονιάματος. Παρ' όλα ταύτα, η αύξηση των μηχανικών αντοχών μέσω της αύξησης του ποσοστού της κονίας αυξάνει το κόστος των κονιαμάτων και μειώνει το προσδόκιμο της επιτελεστικότητας τους καθώς η περίσσεια της κονίας έχει την τάση να ρηγματώνεται λόγω συρρίκνωσης

Από τα παραπάνω, διαπιστώνεται η σημαντική επίδραση της πυκνότητας στοίβαξης και του σχήματος των αδρανών στις ιδιότητες των κονιαμάτων.

## 4. Συμπεράσματα

Η μελέτη της επίδρασης των ιδιοτήτων των αδρανών στις ρεολογικές ιδιότητες των νωπών μιγμάτων και κατ' επέκταση, στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των σκληρυμένων κονιαμάτων αποτελεί ένα χρήσιμο βοήθημα στον σχεδιασμό των νέων συνθέσεων, ώστε να ικανοποιούνται συγκεκριμένες απαιτήσεις επιτελεστικότητας. Στη συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκαν και συγκρίθηκαν τα φυσικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά τεσσάρων διαφορετικών άμμων μέγιστης διαμέτρου κόκκου 2 mm, καθώς και οι μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων που προέκυψαν χρησιμοποιώντας τις άμμους αυτές για την παρασκευή της ίδιας σύνθεσης κονιάματος.

Μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους σχεδιασμού των νέων κονιαμάτων είναι η οικονομία ή διαφορετικά, η αποδοτικότερη χρήση των πρώτων υλών. Στο πλαίσιο αυτό, τα αποτελέσματα της εργασίας αποδεικνύουν πως επιλέγοντας αδρανή με μεγάλη πυκνότητα στοίβαξης επιτυγχάνεται μείωση της απαιτούμενης ποσότητας κονίας για το ίδιο επίπεδο αντοχών.

Στα αδρανή φυσικής προέλευσης, η πυκνότητα στοίβαξης των διαφορετικών αδρανών συσχετίζεται με την απαίτηση που παρουσιάζουν σε νερό ανάμιξης και επομένως με τις ρεολογικές ιδιότητες του νωπού μίγματος. Η πυκνότητα στοίβαξης των αδρανών προσομοιάζει τον τρόπο που οι κόκκοι των αδρανών οργανώνονται στον χώρο μετά την ανάμιξη των συστατικών του κονιάματος και στην σκληρυμένη φάση. Επομένως, «περιέχει περισσότερη πληροφορία» αφού ενσωματώνει τις διαφορετικές ιδιότητες των αδρανών που σχετίζονται με την κοκκοδιαβάθμιση (συντελεστής ομοιομορφίας, μέτρο λεπτότητας, ποσοστό παιπάλης) και επηρεάζουν συνδυαστικά τον τρόπο στοίβαξης. Η πυκνότερη στοίβαξη των αδρανών και επομένως το μικρότερο ποσοστό κενών ανάμεσα στους κόκκους των αδρανών έχει σαν αποτέλεσμα να απαιτείται μικρότερη ποσότητα κονίας για να «λιπάνει» το μίγμα ή λιγότερη ποσότητα νερού. Όταν η σύνθεση των κονιαμάτων πραγματοποιήθηκε με το ποσοστό της κονίας να είναι υπολογισμένο σύμφωνα με το ποσοστό των κενών των αδρανών, η εργασιμότητα των μιγμάτων ήταν ίδια σε όλες τις συνθέσεις ανεξάρτητα από το είδος των αδρανών και από το ποσοστό της κονίας που χρησιμοποιήθηκε.

Συγκρίνοντας τις συνθέσεις που παρασκευάστηκαν με διαφορετικά ποσοστά κονίας, διαφαίνεται ότι η αύξηση του ποσοστού της κονίας πέραν της βέλτιστης μειώνει την επίδραση των χαρακτηριστικών των αδρανών στις ρεολογικές ιδιότητες του κονιάματος και οδηγεί σε ελάττωση της απαίτησης του μίγματος σε νερό.

Στα θραυστά αδρανή, οι γωνιώδεις κόκκοι οδηγούν σε αύξηση των τριβών στη πλαστική φάση του κονιάματος αυξάνοντας έτσι την απαίτηση σε νερό σε σχέση με σφαιρικά αδρανή, για την επίτευξη του ίδιου εργάσιμου.

Δεδομένου ότι η απαίτηση του νωπού μίγματος σε νερό είναι καθοριστική για την επίδοση του κονιάματος στη σκληρυμένη φάση, η αύξηση του ποσοστού του νερού ανάμιξης στις συνθέσεις που μελετήθηκαν οδηγεί σε :

- αύξηση του πορώδους
- μείωση της πρόσφυσης κονίας –αδρανών και αποδυνάμωση της διαφασικής περιοχής
- εξασθένιση των μηχανικών αντοχών (θλιπτική και εφελκυστική αντοχή)
- αύξηση της υδατοαπορρόφησης
- αύξηση του βάθους ενανθράκωσης

Το ποσοστό του πορώδους επηρεάζεται συνδυαστικά από το ποσοστό της συνδετικής κονίας και την ποσότητα του νερού ανάμιξης. Η αύξηση του πορώδους έχει σαν αποτέλεσμα τον σχηματισμό περισσότερων τριχοειδών πόρων και την ελάττωση των αντοχών των κονιαμάτων.

Συμπερασματικά προκύπτει ότι οι ρεολογικές και οι μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων μπορούν να βελτιστοποιηθούν προσαρμόζοντας τις αναλογίες των επιμέρους συστατικών με βάση κυρίως την πυκνότητα στοίβαξης και τις γεωμετρικές ιδιότητες (σφαιρικότητα) των αδρανών.

#### 5. Βιβλιογραφικές Παραπομπές

- Lea, F M & Desch, C H, *The Chemistry of Cement and Concrete*, First published, Edward Arnold Ltd., London, 1956. 4th Ed, Hewlett, P (Ed.), Edward Arnold, London, 1998.
- Hughes, J. J., and Jan Válek. Mortars in Historic Buildings: A Review of the Conservation, Technical and Scientific Literature. Edinburgh: Historic Scotland, 2003.
- Aggregates in Concrete.-Young, J.F., Mindess, S., Gray, R.J. and Bentur, A. (1998) The Science and Technology of Civil Engineering Materials, NJ: Prentice Hall.
- Galloway, J.E., 1994. Grading, shape, and surface properties, in Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Making Materials, ASTM STP 169C: 401–410, West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials
- Merchant, I. et al., 2001. Toughening cement-based materials through the control of interfacial bonding. *Cement and Concrete Research*, 31(12), pp.1873–1880
- 6. Lees, G., 1964. A new method for determining the angularity of particles. *Sedimentology*, 3(1), p.2–21
- Haach, V.G., Vasconcelos, G. & Lourenço, P.B., 2011. Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 25(6), pp.2980– 2987
- Edwards, L.N. (1918) 'Proportioning the materials of mortars and concretes by surface area of aggregates', Proceedings ASTM, 18, Part II, 235–302, όπως αναφέρεται στο: Alexander, Mark G., and Sidney Mindess. Aggregates in Concrete. London: Taylor & Francis, 2008

- De Larrard, F. & Sedran, T., 1994. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. *Cement and Concrete Research*, 24(6), pp.997–1009.
- Stovall, T., de Larrard, F. & Buil, M., 1986. Linear packing density model of grain mixtures. *Powder Technology*, 48(1), pp.1–12.
- Kosmatka, S.H., Kerchoff, B., Panarese, W.C., Macleod, N.F. and McGrath, R.J. (2002) Design and Control of Concrete Mixtures, Engineering Bulletin 101, 7<sup>th</sup> Canadian edn, Ottawa, ON: Cement Association of Canada. Alexander, Mark G., and Sidney Mindess. *Aggregates in Concrete*. London: Taylor & Francis, 2008.
- 12. L. K. Crouch, Nathan Smith, Adam Walker, Tim Dunn (2004) "Effect of Aggregate Type and Gradation on Pervious PCC," Proceedings of the 13th Annual Symposium Aggregates: Asphalt Concrete, Portland Cement Concrete, Bases & Fines; International Center for Aggregate Research, April 10-13, 2005, Austin, Texas [http://aftre.nssga.org/Symposium/2005-02.pdf]
- Hu, Jiong. "Effects of Aggregate on Flow Properties of Mortar." Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium. Ames, IA: Center for Transportation Research and Education, 2005. Web. http://www.ctre.iastate.edu/pubs/midcon2005/HuMortar.pdf
- Xie Ping, Beaudoin, J.J. & Brousseau, R., 1991. Effect of aggregate size on transition zone properties at the portland cement paste interface. *Cement and Concrete Research*, 21(6), pp.999–1005
- Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M., 1993. Concrete: Structure, Properties, and Materials, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Stefanidou, M. & Papayianni, I., 2005. The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars. *Cement and Concrete Composites*, 27(9–10), pp.914–919.
- Kim, S.-M. & Abu Al-Rub, R.K., 2011. Meso-scale computational modeling of the plastic-damage response of cementitious composites. *Cement and Concrete Research*, 41(3), pp.339–358

- Struble, L., Skalny, J. & Mindess, S., 1980. A review of the cement-aggregate bond. *Cement and Concrete Research*, 10(2), pp.277–286
- 19. Lanas, J. et al., 2004. Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars. *Cement and Concrete Research*, 34(12), pp.2191–2201.
- Allen, G. (2003) Hydraulic Lime Mortar for Stone, Brick and Block Masonry. Shaftesbury: Donhead
- 21. EN 932-1:1997 Tests for general properties of aggregates. Methods for sampling
- 22. EN 933-1:2012 Tests for geometrical properties of aggregates. Determination of particle size distribution. Sieving method
- 23. Prakongkep, N. et al., 2010. SEM image analysis for characterization of sand grains in Thai paddy soils. *Geoderma*, 156(1–2), pp.20–31
- 24. Sims, I. and Brown, B. (1998) 'Concrete aggregates', in P.C. Hewlett (ed.) *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 4th edn, London: Arnold
- 25. EN 1097-3 : 1998 : Tests for mechanical and physical properties of aggregates : Part 3 : Determination of loose bulk density and voids
- Neville, A.M.. Properties of Concrete, Fourth edition, John Wiley & Sons Inc., New York, 1996
- 27. Wong, H.H.C. & Kwan, A.K.H., 2007. Packing density of cementitious materials: part 1—measurement using a wet packing method. *Materials and Structures*, 41(4), pp.689–701
- 28. EN 1015-3:1999 Methods of test for mortar for masonry. Determination of consistence of fresh mortar (by flow table).
- 29. EN 196-1:1995 Methods of testing cement. Determination of strength
- 30. BS 1881-121:1983 Testing concrete. Method for determination of static modulus of elasticity in compression

- RILEM, 1980. Recommended tests to measure the deterioration of stone and assess the effectiveness of treatment methods, Mater. Struct. 13, pp. 175– 253.
- 32. EN 1015-18: 2002, Methods of test for mortar for masonry. Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar
- 33. EN 993-1:1995, Methods of test for dense shaped refractory products, part 1: determination of bulk density, apparent porosity and true porosity.
- 34. Teutonico, Jeanne Marie. *A Laboratory Manual for Architectural Conservators*. Rome, Italy: ICCROM, 1988.
- 35. De Schutter, G. & Poppe, A.-M., 2004. Quantification of the water demand of sand in mortar. *Construction and Building Materials*, 18(7), pp.517–521
- Westerholm, M., Lagerblad, B., Silfwerbrand, J., Forssberg, E., 2008. Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. Cement and Concrete Composites, V. 30 (4), p.274-282

# Παράρτημα 1

Δοκιμή	Περιγραφή	Πρότυπο
Μέθοδοι Δειγματοληψίας	Λήψη αντιπροσωπευτικών εργαστηριακών δειγμάτων για την διεξαγωγή δοκιμών	EN 932-1
Κοκκομετρική ανάλυση	Ποσοτική κατάταξη των κόκκων με βάση το μέγεθος των κόκκων	EN 933-1
Ποσοστό παιπάλης (fines)	Προσδιορισμός ποσοστού κόκκων με μέση διάσταση μικρότερη από όριο προδιαγραφής (0,075 ή 0,063 mm)	EN 933-1
Καθαρότητα	Προσδιορίζεται με υγρή κοσκίνιση, το ποσοστό κόκκων που διέρχεται από το κόσκινο 0,5 mm ή στο κόσκινο 1,6 mm	EN 933-1
Περιεκτικότητα σε κελύφη	Προσδιορισμός μέγιστου ποσοστού κατά βάρος προσμίξεων σε κελύφη.	EN 933-7
Μπλε του Μεθυλενίου	Έμμεσος προσδιορισμός των κόκκων, όχι κατ' ανάγκη αργιλικών, που έχουν την ικανότητα απορρόφησης διαλύματος μπλε του μεθυλενίου.	EN 933-9
Φαινόμενο βάρος και ποσοστό όγκου κενών	Προσδιορισμός μάζας αδρανών ανά μονάδα όγκου πρότυπα συμπυκνωμένη ή μη.	EN 1097-3
Πορώδες ξηρού και συμπυκνωμένου filler (Rigden)	Προσδιορισμός του όγκου των κενών ανάμεσα στους κόκκους πρότυπα συμπυκνωμένου και ξηρού filler, με χρήση ειδικής συσκευής.	EN 1097-4