



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Παραγωγή και έλεγχος ποιότητας αναβαθμισμένων αδρανών υλικών από
απόβλητα εκσκαφών και κατεδαφίσεων»

Θεόδωρος Δασκαλάκης

Εξεταστική Επιτροπή

Μιχαήλ Γαλετάκης, Καθηγητής (Επιβλέπων)

Γεώργιος Αλεβίζος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Δρ. Ευάγγελος Πετράκης, ΕΔΙΠ

Χανιά, 2019

*Αφιερωμένη
στην οικογένειά μου!*

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με τον κατασκευαστικό τομέα να παράγει περίπου 820 εκατομμύρια τόνους αποβλήτων εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων μόνο στην Ευρώπη (Eurostat, 2017), γίνεται πλέον κάτι παραπάνω από επιτακτική η ανάγκη εύρεσης λύσεων ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησής τους, με σκοπό την προστασία τόσο του περιβάλλοντος όσο και της οικονομίας.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας παραγωγής αναβαθμισμένων αδρανών υλικών από απόβλητα εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων για την παραγωγή προϊόντων σκυροδέματος.

Για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω πρωτίστως τον Καθηγητή κ. Γαλετάκη Μιχάλη για την ανάθεση του θέματος και την καθοδήγησή του. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Αλεβίζο Γεώργιο και το Δρ. Πετράκη Ευάγγελο για το χρόνο που αφιέρωσαν για τη διόρθωση της εργασίας.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω την Εταιρεία «ANYK AEBE» για την παροχή του υλικού που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς την υποψήφια διδάκτορα κ. Σουλτανά Αθανασία για τη βοήθεια της στην εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τη βαθιά ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου για όλα τα χρόνια που με στήριζαν στη σχολική αλλά και στη φοιτητική μου πορεία και στους φίλους μου για την ηθική τους υποστήριξη.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η παραγωγή και ο έλεγχος της ποιότητας αναβαθμισμένων αδρανών υλικών από απόβλητα εκσκαφών και κατεδαφίσεων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ανακυκλωμένο σκυρόδεμα από τη μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων εκσκαφών και κατεδαφίσεων «ANYK A.B.E.E.» που βρίσκεται στο Ηράκλειο, Κρήτης.

Το αρχικό υλικό που ελήφθη από την ANYK A.B.E.E. αποτελούνταν από τεμάχια ανακυκλωμένου σκυροδέματος με μέγεθος μεγαλύτερο των 32 mm. Το υλικό αυτό υποβλήθηκε αρχικά σε θραύση με χρήση σιαγωνοτού θραυστήρα σε μέγεθος κόκκων μικρότερο των 16 mm. Στη συνέχεια χαρακτηρίστηκε ως προς την κοκκομετρική του διαβάθμιση μέσω συμβατικής κοσκίνισης σύμφωνα με το πρότυπο EN 933-1 και την ορυκτολογική του σύσταση με χρήση περιθλασίμετρου ακτίνων-X.

Από το υλικό που προέκυψε κατά την αρχική θραύση, ένα μέρος υποβλήθηκε ξανά σε θραύση με χρήση σιαγωνοτού θραυστήρα σε μέγεθος κόκκων μικρότερο των 4 mm, ενώ το υπόλοιπο υποβλήθηκε σε μηχανική κοσκίνιση και απομακρύνθηκε το κλάσμα -0.125 mm. Το υλικό με κοκκομετρία -4 mm χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή άμμου από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα, ενώ το υλικό με κοκκομετρία -16 +0.125 mm υποβλήθηκε σε αυτογενή λειοτρίβηση για διαφορετικά χρονικά διαστήματα (2, 4, 8, 16, 32 και 64 min).

Στόχος της διαδικασίας που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο προσδιορισμός του βέλτιστου χρόνου αυτογενούς λειοτρίβησης και η επίτευξη του κατά το δυνατόν μεγαλύτερου βαθμού αποδέσμευσης των κόκκων των αδρανών από τη συνδετική κονία για την παραγωγή αναβαθμισμένων αδρανών από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα.

Για τον έλεγχο της ποιότητας των αναβαθμισμένων αδρανών που προέκυψαν παρασκευάστηκαν δοκίμια τσιμεντοκονιαμάτων σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1. Παρασκευάστηκαν πέντε διαφορετικές σειρές δοκιμίων χρησιμοποιώντας α) άμμο ανακυκλωμένου σκυροδέματος (χωρίς αναβάθμιση), β) άμμο ανακυκλωμένου σκυροδέματος που προέκυψε μετά την απομάκρυνση του κλάσματος -0.125 mm (πρώτο στάδιο αναβάθμισης), γ) άμμο ανακυκλωμένου σκυροδέματος που προέκυψε μετά την αυτογενή λειοτρίβηση (δεύτερο στάδιο αναβάθμισης), καθώς και ε) χαλαζιακή άμμο και δ) ασβεστολιθική άμμο, για λόγους σύγκρισης. Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν

ελέγχθηκαν ως προς την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, την αντοχή σε κάμψη, την υδατοαπορρόφηση και την πυκνότητα τους.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, φάνηκε ότι τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με θραυστή ασβεστολιθική άμμο έχουν την υψηλότερη αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και κάμψη σε σχέση με τα δοκίμια των υπόλοιπων συνθέσεων (64.93 MPa και 6.56 MPa, αντίστοιχα). Τη μικρότερη αντοχή σε μονοαξονική θλίψη έχουν τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με χαλαζιακή άμμο (48.14 MPa). Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με άμμο ανακυκλωμένων αδρανών χωρίς αναβάθμιση, με αναβάθμιση ενός σταδίου και δύο σταδίων είχαν αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 49.19, 52.36 και 51.77 MPa, αντίστοιχα.

Τα δοκίμια με θραυστή ασβεστολιθική άμμο είχαν την υψηλότερη πυκνότητα και τη χαμηλότερη τιμή υδατοαπορρόφησης. Η πυκνότητα των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με τα ανακυκλωμένα αδρανή κυμάνθηκε από 2135 έως 2168 kg/m³ και είναι μικρότερη από την πυκνότητα των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με πρότυπη χαλαζιακή άμμο και θραυστή ασβεστολιθική άμμο (2372 και 2540 kg/m³, αντίστοιχα). Η υδατοαπορρόφηση των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με τα ανακυκλωμένα αδρανή κυμάνθηκε από 10.6 έως 11.3 % και είναι μεγαλύτερη από την υδατοαπορρόφηση των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με πρότυπη χαλαζιακή άμμο και θραυστή ασβεστολιθική άμμο (7.8 και 7.5 %, αντίστοιχα).

Συγκρίνοντας συνολικά τα αποτελέσματα μηχανικών αντοχών παρατηρείται ότι οι τιμές των αντοχών των δοκιμίων με μη αναβαθμισμένη άμμο είναι χαμηλότερες από αυτές των δοκιμίων με αναβαθμισμένη. Επιπλέον, παρατηρείται ότι οι τιμές αντοχών μεταξύ των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με αναβαθμισμένη άμμο ενός και δύο σταδίων δε διαφοροποιούνται σημαντικά. Συνεπώς, το πρώτο στάδιο αναβάθμισης των ανακυκλωμένων αδρανών επαρκεί για τη βελτίωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων, ενώ η εφαρμογή δεύτερου σταδίου αναβάθμισης δε βελτιώνει περαιτέρω την ποιότητά τους.

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
1.1. Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις των ΑΕΚΚ.....	11
1.2. Διαχείριση ΑΕΚΚ.....	12
1.3. Επαναχρησιμοποίηση ΑΕΚΚ	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ – ΑΔΡΑΝΗ ΑΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	14
2.1. Εμπόδια στη χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών	14
2.2. Προϋποθέσεις των ανακυκλωμένων αδρανών για τη δημιουργία νέου σκυροδέματος.....	14
2.3. Φυσικομηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή.....	16
2.3.1. Αντοχή σε θλίψη	16
2.3.2. Αντοχή σε κάμψη	16
2.3.3. Υδατοαπορροφητικότητα.....	17
2.3.4. Μέτρο ελαστικότητας	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	19
3.1. Κοκκομετρική ανάλυση	20
3.2. Ορυκτολογική ανάλυση	22
3.3. Υδατοαπορρόφηση αδρανών από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα.	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΜΕΝΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ - ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	24
4.1. Αυτογενής λειοτρίβηση	24
4.2. Παρασκευή δοκιμίων	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	40
5.1. Έλεγχος σκληρυμένων δοκιμίων	40
5.2. Αποτελέσματα δοκιμών	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	46
6.1 Συμπεράσματα	46

6.2 Προτάσεις	47
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	48

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 3.1	Χώρος αποθήκευσης ανακυκλωμένων αδρανών από ΑΕΚΚ της εταιρείας ANYK ABEE.....	19
Σχήμα 3.2	Τυπική εικόνα τεμαχίου ανακυκλωμένου σκυροδέματος που υποβλήθηκε σε θραύση.....	20
Σχήμα 3.3	Μηχανή κοσκίνισης και κόσκινα της εταιρείας Retsch	21
Σχήμα 3.4	Κοκκομετρική καμπύλη ανακυκλωμένου σκυροδέματος.....	21
Σχήμα 3.5	Ακτινοδιάγραμμα περίθλασης ακτίνων-Χ δείγματος ανακυκλωμένου σκυροδέματος.....	22
Σχήμα 4.1	Περιστρεφόμενος εργαστηριακός μύλος που χρησιμοποιήθηκε για την αυτογενή λειοτρίβηση.....	25
Σχήμα 4.2	Διάγραμμα ροής της διαδικασίας παραγωγής αναβαθμισμένων αδρανών από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα	26
Σχήμα 4.3	Κλάσματα ανακυκλωμένου σκυροδέματος μεγέθους κόκκων (α) +4 mm, (β) -4 mm +0.125 mm και (γ) -0.125 mm μετά από αυτογενή λειοτρίβηση 2 min.....	28
Σχήμα 4.4	Κλάσματα ανακυκλωμένου σκυροδέματος μεγέθους κόκκων (α) +4 mm, (β) -4 mm +0.125 mm και (γ) -0.125 mm μετά από αυτογενή λειοτρίβηση 32 min.....	28
Σχήμα 4.5	Βαθμός αποδέσμευσης f_a (%) των μικτών κόκκων και των κόκκων των αδρανών σε σχέση με το χρόνο λειοτρίβησης (min).....	29
Σχήμα 4.6	Διαγράμματα μεταβολής βάρους σε σχέση με το χρόνο λειοτρίβησης για τα κλάσματα (α) +4 mm και (β) - 4 mm +0.125 mm και -0.125 mm.....	30
Σχήμα 4.7	Κοκκομετρική καμπύλη άμμων α) χωρίς αναβάθμιση, β) με αναβάθμιση ενός σταδίου, γ) με αναβάθμιση δύο σταδίων, δ) χαλαζιακής σύστασης και ε) θραυστής άμμου ασβεστολιθικής σύστασης.....	31
Σχήμα 4.8	Εργαστηριακή συσκευή προσδιορισμού συντελεστή ροής αδρανών.....	32
Σχήμα 4.9	Μήτρα χύτευσης δοκιμίων τριών θέσεων. Αριστερή θέση: μίγμα με χαλαζιακή άμμο, κεντρική θέση: μίγμα με άμμο από αναβαθμισμένα αδρανή και δεξιά θέση: μίγμα με άμμο ενός σταδίου αναβάθμισης.....	34

Σχήμα 4.10	Κοκκομετρική καμπύλη άμμων α) χωρίς αναβάθμιση με χρήση ραβδόμυλου 60 sec, β) με αναβάθμιση ενός σταδίου με χρήση ραβδόμυλου 180 sec, γ) με αναβάθμιση δύο σταδίων με χρήση ραβδόμυλου 180 sec, δ) χαλαζιακής σύστασης και ε) θραυστής άμμου ασβεστολιθικής σύστασης.....	35
Σχήμα 4.11	Κόκκοι άμμου μετά από αυτογενή λειοτρίβηση (RCA2) και τη χρήση ραβδόμυλου για 180 sec.....	36
Σχήμα 4.12	Κόκκοι άμμου μετά από αυτογενή λειοτρίβηση (RCA2) χωρίς τη χρήση ραβδόμυλου.....	36
Σχήμα 4.13	Κόκκοι άμμου με αναβάθμιση ενός σταδίου (RCA1) με τη χρήση ραβδόμυλου για 180s.....	37
Σχήμα 4.14	Κόκκοι άμμου με αναβάθμιση ενός σταδίου (RCA1) χωρίς τη χρήση ραβδόμυλου.....	37
Σχήμα 4.15	Κόκκοι άμμου χωρίς καμία αναβάθμιση (RCA) με χρήση ραβδόμυλου 60s.....	38
Σχήμα 4.16	Κόκκοι θραυστής άμμου ασβεστολιθικής σύστασης.....	38
Σχήμα 4.17	Κόκκοι άμμου χαλαζιακής σύστασης.....	39
Σχήμα 5.1	Μηχανή μέτρησης αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και κάμψη.....	41
Σχήμα 5.2	Διαγράμματα αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (πάνω) και κάμψη (κάτω) των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με τα διαφορετικά είδη άμμου (QS, LS, RCA, RCA1, RCA2) (Πίνακας 5.1).....	44
Σχήμα 5.3	Διαγράμματα υδατοαπορρόφησης (πάνω) και πυκνότητας (κάτω) των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με τα διαφορετικά είδη άμμου (QS, LS, RCA, RCA1, RCA2) (Πίνακας 5.1).....	45

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1	Χαρακτηρισμός αδρανών σε σχέση με το μέγεθος του κόκκου.....	15
Πίνακας 3.1	Ορυκτολογική σύσταση (%) του ανακυκλωμένου σκυροδέματος.....	23
Πίνακας 4.1	Χρόνος ροής των διαφορετικών δειγμάτων άμμου.....	32
Πίνακας 4.2	Λόγος Νερό/Τσιμέντο των συνθέσεων που παρασκευάστηκαν.....	39
Πίνακας 5.1	Αποτελέσματα δοκιμών.....	43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα απόβλητα εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ) παράγονται κατά τη δόμηση νέων κατασκευών και κατά την ανακαίνιση και κατεδάφιση των υπαρχουσών κατασκευών. Αποτελούν ένα από τα μεγαλύτερα ρεύματα αποβλήτων που παράγονται στην Ευρωπαϊκή Ένωση και απαρτίζονται από υλικά όπως σκυρόδεμα, υλικά τοιχοποιίας, κεραμικά πλακίδια, ασφαλτο, ξύλο, μέταλλα, γυψοσανίδες, και άλλα υλικά σε μικρότερες ποσότητες (Γαλετάκης κ.ά., 2015). Παρόλο που οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ΑΕΚΚ είναι μικρότερες σε σχέση με άλλα είδη αποβλήτων, ο μεγάλος όγκος αποβλήτων που παράγεται αναπόφευκτα οδηγεί στην ανάγκη εξεύρεσης λύσεων σχετικά με τη διαχείρισή τους (Galvez-Martos et al., 2018).

Σύμφωνα με στοιχεία της Eurostat ο κατασκευαστικός τομέας στην Ευρώπη παράγει περίπου 820 εκατομμύρια τόνους αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων κάθε χρόνο. Η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί στο 46% του συνολικού όγκου αποβλήτων που παράγονται (Eurostat, 2017).

Αν και πολλοί ερευνητές έχουν προσπαθήσει να ελαχιστοποιήσουν τις διαδικασίες και να βελτιώσουν τη διαχείριση των αποβλήτων εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων, υπάρχουν ακόμα πολλοί περιορισμοί στον τομέα αυτό (Jongsung et al., 2017).

1.1. Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις των ΑΕΚΚ

Η κατασκευαστική βιομηχανία θεωρείται ένας από τους μεγαλύτερους παραγωγούς στερεών αποβλήτων παγκοσμίως. Το μεγαλύτερο ποσοστό των ΑΕΚΚ δημιουργείται από τις ανακαινίσεις, ανακατασκευές και κατεδαφίσεις κτιρίων και υποδομών. Οι μεγάλες ποσότητες αυτών των αποβλήτων προκαλούν σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον όσο δε διαχειρίζονται με τον σωστό τρόπο (Liyin et al., 2006).

Μεγάλα ποσά χρημάτων ξοδεύονται για την απόθεση των αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής, ενώ δημιουργούνται περιβαλλοντικά προβλήματα όπως (Roussat et al., 2009):

- Η μείωση του χώρου υγειονομικής ταφής εξαιτίας των αυξανόμενων ποσοτήτων των απορριφθέντων αποβλήτων.
- Η αύξηση της ρύπανσης στους χώρους υγειονομικής ταφής που οδηγούν σε σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία.

- Η αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας για τη μεταφορά και παραγωγή νέων υλικών σε σχέση με τα υλικά που απορρίπτονται, ενώ μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν.

1.2. Διαχείριση ΑΕΚΚ

Ο όγκος των ΑΕΚΚ είναι αρκετά μεγάλος και επομένως είναι δύσκολα διαχειρίσιμος. Η κύριες διαδικασίες διαχείρισης των αποβλήτων κατά σειρά σπουδαιότητας είναι οι εξής:

1. Μείωση (μείωση της πηγής, χρήση ανακυκλωμένων προϊόντων και έλεγχος του υλικού για τη μείωση των τελικών αποβλήτων)
2. Επαναχρησιμοποίηση
3. Ανακύκλωση
4. Αποτέφρωση (ανάκτηση ενέργειας) και
5. Ασφαλής διάθεση

Οι βασικές αρχές για τη σωστή διαχείριση των αποβλήτων είναι οι εξής (Kartam et al.,2004):

- Η μείωση και η ανάκτηση των αποβλήτων πρέπει να γίνεται κυρίως μέσω της βελτιστοποίησης των διαδικασιών, του επανασχεδιασμού και της διαχείρισης των υλικών.
- Η διαχείριση των αποβλήτων πρέπει να συμμορφώνεται με τους σχετικούς κανονισμούς.
- Πριν από τη λήψη απόφασης σχετικά με μια κατάλληλη μέθοδο διάθεσης, είναι σημαντικό να είναι γνωστή η σύνθεση και τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων.
- Πρέπει να υπάρχει μια καλά καθορισμένη διαδικασία για τη διαχείριση συγκεκριμένων ροών αποβλήτων.

Το θέμα της διαχείρισης των ΑΕΚΚ έχει απασχολήσει τόσο την Ελλάδα, όσο και την Ε.Ε. γενικότερα. Κατά συνέπεια σχεδιάστηκαν μέθοδοι διαχείρισής τους οι οποίες ακολουθούν την περιβαλλοντική πολιτική της Ε.Ε. και την υπάρχουσα ελληνική νομοθεσία.

Στην Ελλάδα έχουν εγκριθεί 9 Ιδιωτικά Συστήματα Εναλλακτικής Διαχείρισης των ΑΕΚΚ, από τον Εθνικό Οργανισμό Ανακύκλωσης (ΕΟΑΝ), ενώ λειτουργούν ήδη συστήματα διαχείρισης για άλλα είδη αποβλήτων (οχήματα μετά το τέλος της ζωής τους, λιπαντικά έλαια, απόβλητα ηλεκτρικών στηλών και συσσωρευτών κ.α.).

Σε αυτά συλλέγονται τα ΑΕΚΚ από τα έργα του οικοδομικού τομέα και επεξεργάζονται, με σκοπό την αξιοποίησή τους. Για τη διαχείριση των ΑΕΚΚ λειτουργούν μονάδες οι οποίες ξεχωρίζουν τα ανακυκλώσιμα υλικά (π.χ. μέταλλα, πλαστικό κ.λπ.), τα οποία στη συνέχεια πωλούνται, επεξεργάζονται και παράγουν δευτερογενή οικοδομικά προϊόντα (όπως χαλίκι) και παραλαμβάνουν υλικά εκσκαφών τα οποία χωρίς επεξεργασία, χρησιμοποιούνται ως υλικά επικάλυψης/επιχώσεων, με σκοπό την αποκατάσταση των χώρων τελικής διάθεσης (ανενεργά λατομεία) (ΦΕΚ 1312Β').

1.3. Επαναχρησιμοποίηση ΑΕΚΚ

Για να μειωθεί το φορτίο σε χώρους υγειονομικής ταφής, τα ΑΕΚΚ θα πρέπει να περιοριστούν μέσω της επαναχρησιμοποίησης και της ανακύκλωσης τους. Προκειμένου να μεγιστοποιηθούν οι ρυθμοί επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης των δραστηριοτήτων παραγωγής ΑΕΚΚ, πρέπει να εντοπιστούν και να χρησιμοποιηθούν συστήματα που να επιτρέπουν την αποδοχή επαναχρησιμοποιούμενων ή ανακυκλώσιμων υλικών σε έργα της κατασκευαστικής βιομηχανίας (Jongsung et al., 2017).

Οι δραστηριότητες κατασκευής και κατεδάφισης καταλήγουν σε ένα ευρύ φάσμα υλικών όπως γυαλί, σκυρόδεμα, ξύλο, μέταλλα, καθώς και ορισμένα επικίνδυνα στοιχεία. Ο διαχωρισμός των ΑΕΚΚ γίνεται ένα δύσκολο έργο δεδομένης της πολυπλοκότητας και της σύνθεσης αυτών των υλικών. Το ξύλο, το γυαλί και το μέταλλο μπορούν να ανακυκλωθούν απευθείας ή σε λίγες περιπτώσεις μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν χωρίς περαιτέρω επεξεργασία, ενώ το σκυρόδεμα έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά που το καθιστούν πιο δύσκολα διαχειρίσιμο. Η αξιοποίησή του όμως επιβάλλεται λόγω της χρήσης τεράστιων φυσικών πόρων κατά την παραγωγή του. Αυτό θα οδηγήσει σε σημαντική μείωση των υλικών που αποτίθενται σε χώρους υγειονομικής ταφής και στη διατήρηση των φυσικών πόρων (Martín-Morales et al., 2011).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ – ΑΔΡΑΝΗ ΑΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Το σκυρόδεμα που παρασκευάζεται με ανακυκλωμένα αδρανή δεν είναι πλέον πεδίο έρευνας αλλά μια πραγματικότητα σε διάφορες χώρες (Evangelista et al., 2010). Είναι χαρακτηριστικό ότι τα αδρανή αποτελούν το 60 - 70 % του σκυροδέματος, συνεπώς η χρήση αδρανών από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα στη βιομηχανία τσιμέντου και σκυροδέματος μπορούν να συμβάλλουν τόσο στην προστασία του περιβάλλοντος, όσο και στη διατήρηση των φυσικών πόρων (Caijun et al, 2016).

2.1. Εμπόδια στη χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών

Η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών για την παραγωγή σκυροδέματος δεν εφαρμόζεται σε μεγάλο ποσοστό λόγω μιας σειράς αιτιών (Silva et al, 2014):

- Η έλλειψη προτίμησής τους από τους κατασκευαστές
- Η αβεβαιότητα σχετικά με τα περιβαλλοντικά οφέλη τους
- Η έλλειψη προτύπων και προδιαγραφών στα οποία να μπορούν να βασιστούν οι παραγωγοί σκυροδέματος
- Η χαμηλή ποιότητα των παραγόμενων αδρανών λόγω της έλλειψης γνώσεων ή και ενδιαφέροντος από τους ιδιοκτήτες των κέντρων ανακύκλωσης
- Η απόσταση μεταξύ των χώρων κατασκευών και κατεδαφίσεων και της τοποθεσίας του κέντρου ανακύκλωσης
- Η έλλειψη διαρκούς διαθεσιμότητας αποθεμάτων ανακυκλωμένων αδρανών καλής ποιότητας ώστε να ικανοποιείται η υπάρχουσα ζήτηση

2.2. Προϋποθέσεις των ανακυκλωμένων αδρανών για τη δημιουργία νέου σκυροδέματος.

Τα δεδομένα ποιότητας του παλαιού σκυροδέματος είναι συχνά άγνωστα (αναλογία νερού/τσιμέντο, είδος και ποσότητα προσμίξεων, προέλευση και κοκκομετρία αδρανών κ.α.),

καθώς επίσης και η μεταβολή των ιδιοτήτων του κατά την διάρκεια του χρόνου εφαρμογής του. Επομένως, τα δεδομένα ποιότητας και τα χαρακτηριστικά των ανακυκλωμένων αδρανών διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες (Οικονομου, 2005):

- Ιστορικά δεδομένα των ανακυκλωμένων αδρανών σχετικά με τη σύνθεση του παλαιού σκυροδέματος, τοιχοποιίας κ.λπ.
- Τα φυσικά χαρακτηριστικά, ιδιαίτερα η υδατοαπορρόφηση, το ειδικό βάρος, η ποσότητα των χλωριούχων και θεικών αλάτων και η ποσότητα των ξένων συστατικών που περιέχονται.
- Μηχανικά χαρακτηριστικά όπως είναι η δοκιμή αντοχής στην τριβή.
- Περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά.

Τα αδρανή κατηγοριοποιούνται σε πέντε κατηγορίες σύμφωνα με τον Πίνακα 2.1 (Wendehorst, 2009).

Πίνακας 2.1. Χαρακτηρισμός αδρανών σε σχέση με το μέγεθος του κόκκου.

Ελάχιστο μέγεθος κόκκου (mm)	Μέγιστο μέγεθος κόκκου (mm)	Χαρακτηρισμός
-	0.063	Παιπάλη
-	1	Λεπτόκοκκη άμμος
1	4	Χονδρόκοκκη άμμος
4	32	Χάλικες
32	63	Χονδροί χάλικες

Για την παραγωγή καλής ποιότητας σκυροδέματος με χρήση ανακυκλωμένων αδρανών είναι απαραίτητο να τηρηθούν οι ελάχιστες απαιτήσεις που καθορίζονται από διάφορα πρότυπα. Οι ιδιότητες των αδρανών, καθώς επίσης και οι αναλογίες του μίγματος και η μέθοδος παραγωγής του σκυροδέματος είναι εξαιρετικά σημαντικές για την ποιότητά του. Η ποιότητα των αδρανών από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα είναι συνήθως χαμηλότερη από αυτή των φυσικών αδρανών, λόγω της παρουσίας προσκολλημένης συνδετικής κονιάς. Συνεπώς, οι ιδιότητες των αδρανών αυτών εξαρτώνται τόσο από την ποιότητα του προσκολλημένου κονιάματος, όσο και την ποσότητά του (Etxeberria et al, 2007).

2.3. Φυσικομηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή

2.3.1. Αντοχή σε θλίψη

Η αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την αντοχή των αδρανών, την αντοχή της τσιμεντόπαστας και από την διεπιφάνεια αδρανών – τσιμεντόπαστας. Στα συμβατικά σκυροδέματα, η εμφάνιση ρηγματώσεων και επομένως η αστοχία ξεκινά από την διεπιφάνεια μεταξύ αδρανών και τσιμεντόπαστας.

Ωστόσο, η δομή του σκυροδέματος είναι πιο σύνθετη όταν στην παραγωγή του έχουν χρησιμοποιηθεί αδρανή από ανακύκλωση. Ένας λόγος στον οποίο οφείλεται αυτό είναι η ύπαρξη δύο διεπιφανειών και συγκεκριμένα των εξής :

- Μεταξύ των ανακυκλωμένων αδρανών και της νέας τσιμεντόπαστας
- Μεταξύ των ανακυκλωμένων αδρανών και της προυπάρχουσας προσκολλημένης τσιμεντόπαστας

Η αντοχή των ανωτέρω διεπιφανειών καθορίζει και την αντοχή του σκυροδέματος. Επιπλέον, τα αδρανή που προέρχονται από ανακύκλωση μπορεί να αποτελούν ασθενή σημεία εντός του σκυροδέματος, λόγω του υψηλού πορώδους τους και των ρηγματώσεων που αποκτούν κατά την διαδικασία της θραύσης τους. Ως εκ τούτου η αντοχή του σκυροδέματος μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού των ανακυκλωμένων αδρανών στο μίγμα (Σάββα, 2015). Η αντοχή σε θλίψη μειώνεται από 1.5 – 5% με την αντικατάσταση των φυσικών αδρανών από ανακυκλωμένα κατά 25%. Αντικατάσταση των φυσικών αδρανών κατά 100% από ανακυκλωμένα προκαλεί μείωση κατά 11 – 19% στην αντοχή σε θλίψη. Η αντοχή του μίγματος του σκυροδέματος εξαρτάται από την φάση των αδρανών, την φάση του κονιάματος και την διεπιφάνεια μεταξύ αυτών (Thomas et al., 2018).

2.3.2. Αντοχή σε κάμψη

Η αντοχή σε κάμψη του σκυροδέματος μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού των ανακυκλωμένων αδρανών στο μίγμα. Η αντικατάσταση κατά 25% των φυσικών αδρανών από ανακυκλωμένα αδρανή οδηγεί σε μείωση της αντοχής σε κάμψη κατά 2-5%. Στην περίπτωση που

το σύνολο των φυσικών αδρανών αντικατασταθεί από ανακυκλωμένα τότε η μείωση της αντοχής σε κάμψη είναι της τάξης του 7-17% (Thomas et al., 2018).

Το σχήμα, η υφή και το μέτρο ελαστικότητας των αδρανών είναι οι τρεις κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την αντοχή σε κάμψη του σκυροδέματος. Χαμηλό μέτρο ελαστικότητας των ανακυκλωμένων αδρανών συνεπάγεται μειωμένη αντοχή σε κάμψη του σκυροδέματος.

Τα ανακυκλωμένα αδρανή παρουσιάζουν πιο τραχιά υφή σε σχέση με τα φυσικά που οφείλεται στην παρουσία της προϋπάρχουσας τσιμεντόπαστας στην επιφάνειά τους. Το γεγονός αυτό επίσης συμβάλλει στη μείωση της αντοχής σε κάμψη του σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή (Thomas et al., 2018).

Η αντοχή σε κάμψη μειώνεται επίσης με την αύξηση του λόγου νερό/τσιμέντο, συνεπώς αυξάνεται με την αύξηση του περιεχόμενου τσιμέντου στο μίγμα. Παρατηρήθηκε μείωση της αντοχής σε κάμψη 2-14% όταν το ποσοστό των ανακυκλωμένων αδρανών στο μείγμα του σκυροδέματος αυξήθηκε από 25% σε 100% με σταθερό λόγο Νερό/Τσιμέντο 0.4.

Επιπλέον, παρατηρήθηκε μείωση 2-19% της αντοχής σε κάμψη με την αύξηση του λόγου Νερό/Τσιμέντο από 0.4 σε 0.5 για μίγματα με την ίδια περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Από την αύξηση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο στο μίγμα για τον ίδιο λόγο νερό/τσιμέντο προκύπτει ένα πιο πυκνό μίγμα που συμβάλλει στην αύξηση της αντοχής σε κάμψη του σκυροδέματος (Thomas et al., 2018).

2.3.3. Υδατοαπορροφητικότητα

Η υδατοαπορροφητικότητα του σκυροδέματος αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης φυσικών αδρανών από ανακυκλωμένα. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη της παλαιάς τσιμεντοκονίας στην επιφάνειά τους. Έχει παρατηρηθεί αύξηση 5-10% της υδατοαπορροφητικότητας του σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή σε σχέση με τα συμβατικά μίγματα σκυροδέματος.

Σε περίπτωση αντικατάστασης του συνόλου των φυσικών αδρανών από ανακυκλωμένα η υδατοαπορροφητικότητα αυξάνεται έως και 40%. Για αναλογία νερού/τσιμέντο ίση με 0.4 η υδατοαπορροφητικότητα αυξάνεται από 13-19% με την αντικατάσταση του συνόλου των φυσικών αδρανών από ανακυκλωμένα (Thomas et al., 2018).

2.3.4. Μέτρο ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας επίσης μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού των περιεχόμενων ανακυκλωμένων αδρανών στο μίγμα. Οι μικρορωγμές που έχουν σχηματιστεί στα ανακυκλωμένα αδρανή από την διαδικασία της θραύσης τους και η διεπιφάνεια μεταξύ του αδρανούς και της παλαιάς τσιμεντοκονίας έχουν σαν αποτέλεσμα τη μείωση του μέτρου ελαστικότητάς του σε σχέση με το σκυρόδεμα που περιέχει αποκλειστικά φυσικά αδρανή. Η μέγιστη μείωση που έχει παρατηρηθεί στο μέτρο ελαστικότητας είναι 31-39% όταν το μείγμα περιέχει 100% ανακυκλωμένα αδρανή. Επίσης, μία μέση μείωση 5% στο μέτρο ελαστικότητας παρατηρήθηκε με την αντικατάσταση του 25% των φυσικών αδρανών από ανακυκλωμένα αδρανή. Ακόμη έχει βρεθεί πως το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται με την αύξηση του λόγου Νερό/Τσιμέντο στο μίγμα του σκυροδέματος (Thomas et al., 2018).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία προήλθε από την εταιρεία ANYK A.B.E.E., η οποία δραστηριοποιείται στον τομέα της διαχείρισης και της επεξεργασίας αποβλήτων εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ) και βρίσκεται στο Μεταξοχώρι του Ηρακλείου Κρήτης. Πρόκειται για εγκεκριμένη μονάδα συλλογής και διαχείρισης αποβλήτων που προέρχονται από κατασκευαστικές δραστηριότητες με σκοπό την ανακύκλωσή τους.

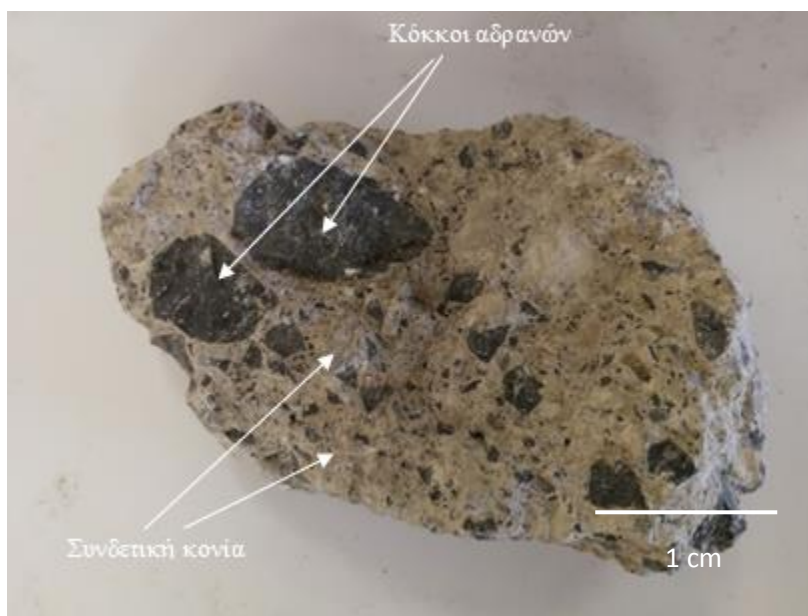
Η μονάδα διαθέτει χώρους αποθήκευσης των ΑΕΚΚ από τους οποίους και λήφθηκε η απαραίτητη ποσότητα υλικού για την εκπόνηση της εργασίας. Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται ο χώρος αποθήκευσης των ανακυκλωμένων αδρανών που παράγονται από ΑΕΚΚ.



Σχήμα 3.1. Χώρος αποθήκευσης ανακυκλωμένων αδρανών από ΑΕΚΚ της εταιρείας ANYK ABEE.

3.1. Κοκκομετρική ανάλυση

Το αρχικό υλικό που ελήφθη από την ANYK A.B.E.E. αποτελούνταν από τεμάχια ανακυκλωμένου σκυροδέματος με μέγεθος μεγαλύτερο των 32 mm (Σχήμα 3.2).

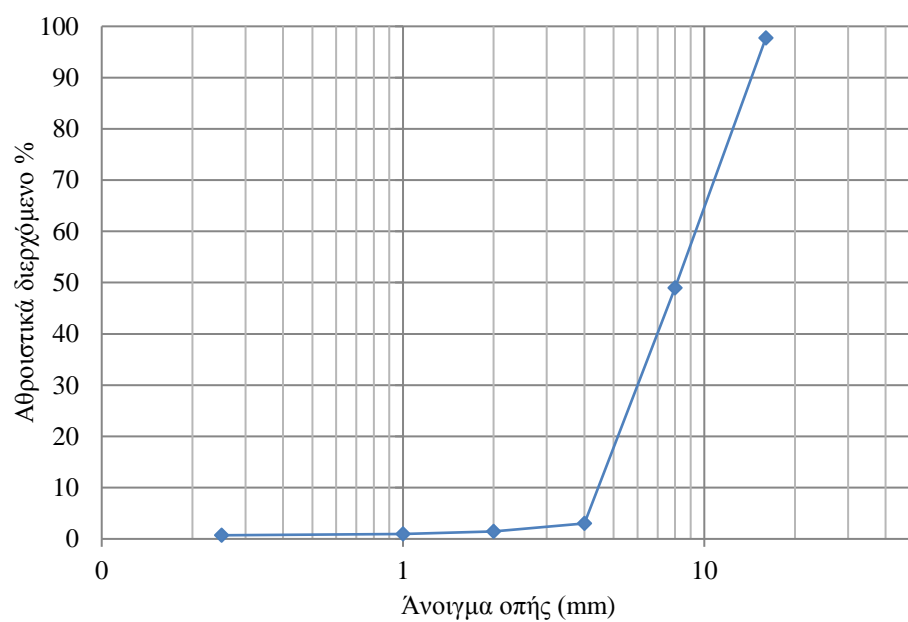


Σχήμα 3.2. Τυπική εικόνα τεμαχίου ανακυκλωμένου σκυροδέματος που υποβλήθηκε σε θραύση.

Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι για το ανακυκλωμένο σκυροδέμα που μελετήθηκε, το μέγιστο μέγεθος κόκκου του αδρανούς είναι 16 mm, το υλικό υποβλήθηκε σε θραύση με χρήση σιαγωνοτού θραυστήρα σε μέγεθος κόκκων μικρότερο των 16 mm. Η κοκκομετρική του ανάλυση έγινε σύμφωνα με το πρότυπο EN 933-1 με χρήση της μηχανής κοσκίνισης της εταιρείας Retsch - VE 1000 και σειράς κοσκίνων της ίδιας εταιρείας (Σχήμα 3.3). Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η κοκκομετρική καμπύλη του ανακυκλωμένου σκυροδέματος που προέκυψε μετά την αρχική θραύση. Παρατηρείται ότι το υλικό είναι χονδρόκοκκο, καθώς το 50% του υλικού έχει διάμετρο κόκκων μικρότερο από 8 mm, ενώ μόλις το 10% είναι μικρότερο από 4 mm. Οι χαρακτηριστικές διαμέτροι των κόκκων είναι $d_{90\%}=15\text{mm}$, $d_{50\%}=8\text{mm}$ και $d_{10\%}=4\text{mm}$.



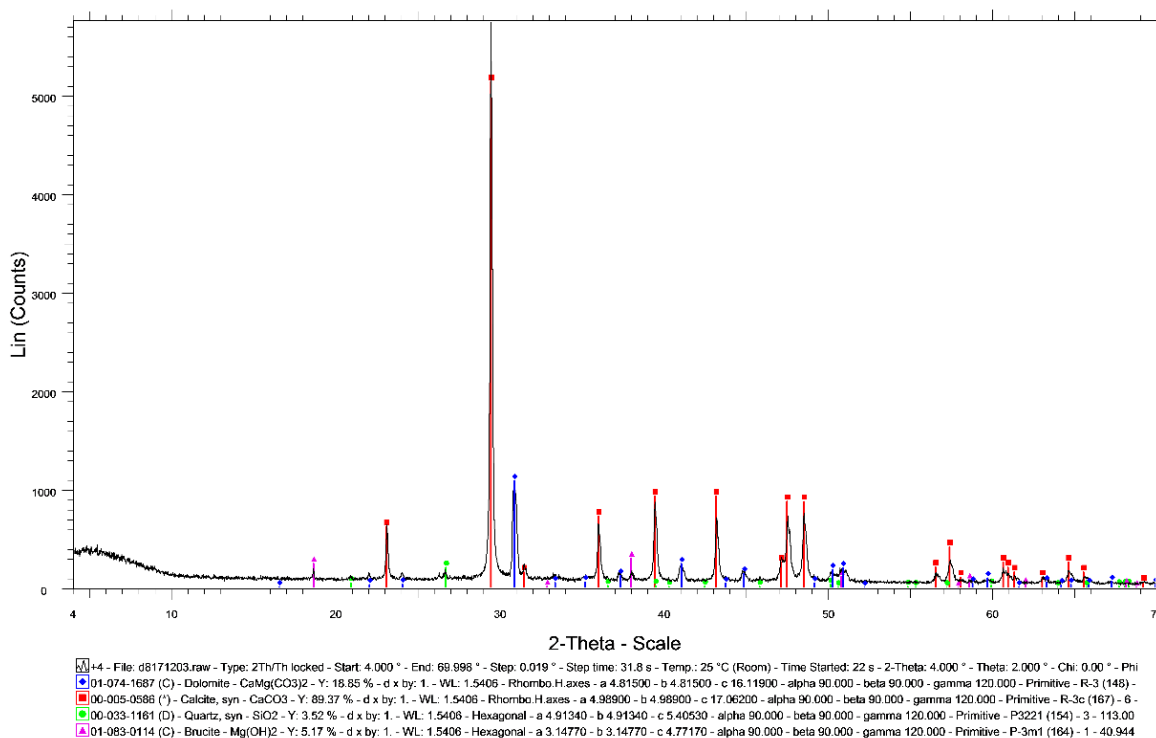
Σχήμα 3.3. Μηχανή κοσκίνισης και κόσκινα της εταιρείας Retsch.



Σχήμα 3.4. Κοκκομετρική καμπύλη ανακυκλωμένου σκυροδέματος.

3.2. Ορυκτολογική ανάλυση

Η ορυκτολογική ανάλυση του ανακυκλωμένου σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτίνων-X. Αναλυτικότερα, για την ορυκτολογική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε περιθλασίμετρο ακτίνων-X τύπου Bruker D8 Advance (λυχνία Cu, φάσμα σάρωσης από 4° έως $70^\circ 2\theta$, βήμα 0.02° , χρόνος μέτρησης $0.2\text{s}/\beta\eta\mu\alpha$) και λογισμικό DIFFRACplus EVA v. 2006. Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζεται το ακτινοδιάγραμμα περίθλασης ακτίνων-X του δείγματος ανακυκλωμένου σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.1.



Σχήμα 3.5. Ακτινοδιάγραμμα περίθλασης ακτίνων-X δείγματος ανακυκλωμένου σκυροδέματος.

Πίνακας 3.1. Ορυκτολογική σύσταση (%) του ανακυκλωμένου σκυροδέματος.

Ορυκτολογική σύσταση	Ανακυκλωμένο σκυρόδεμα
Ασβεστίτης	84.5
Δολομίτης	13.0
Χαλαζίας	1.5
Μπρουσίτης	1.0

Τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης έδειξαν ότι το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα περιέχει υψηλές ποσότητες ασβεστίτη. Το αποτέλεσμα αυτό συνδέεται στενά με τη σύνθεση των αδρανών, καθώς στην Ελλάδα, η πλειονότητα των παραγωγών έτοιμου σκυροδέματος χρησιμοποιούν θραυστά αδρανή που εξάγονται από ασβεστολιθικά πετρώματα (Galetakis and Soutana 2016, Galetakis et al., 2016).

3.3. Υδατοαπορρόφηση αδρανών από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα.

Για τον προσδιορισμό της υδατοαπορρόφησης των αδρανών μετράται το βάρος τους σε ξηρή κατάσταση (σε φούρνο με θερμοκρασία 70 °C για 24 ώρες) και μετά από 24 ώρες σε απιονισμένο νερό.

Η υδατοαπορρόφηση των αδρανών υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$(B_v - B_\xi) / B_\xi * 100 \quad (3.1)$$

Όπου B_v το βάρος των αδρανών μετά από 24 ώρες σε απιονισμένο νερό και B_ξ το βάρος των αδρανών σε ξηρή κατάσταση.

Από τις δοκιμές η υδατοαπορρόφηση των αδρανών υπολογίστηκε σε 5.6%. Η υδατοαπορρόφηση των φυσικών πρωτογενών αδρανών που προορίζονται για σκυρόδεμα είναι περίπου 1-2% (Λίτινας, 2008). Η υψηλότερη τιμή υδατοαπορρόφησης των ανακυκλωμένων αδρανών σε σχέση με τα φυσικά πρωτογενή αδρανή αποδίδεται στην προσκολλημένη τσιμεντόπαστα στους κόκκους των ανακυκλωμένων αδρανών και στις μικρορωγμές που πιθανόν να έχουν σχηματιστεί στα ανακυκλωμένα αδρανή κατά τη διαδικασία της θραύσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΜΕΝΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ - ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Για την αποδέσμευση των κόκκων του αδρανούς από τη συνδετική κονία και την παραγωγή των αναβαθμισμένων αδρανών χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της αυτογενούς λειοτρίβησης. Η μέθοδος αυτή είναι η πλέον κατάλληλη, αφού τα αδρανή υλικά και η συνδετική κονία εμφανίζουν μεταξύ τους σημαντικές διαφορές όσον αφορά τις μηχανικές τους ιδιότητες και οι διεπιφάνειες επαφής τους αποτελούν επιφάνειες αστοχίας-διαχωρισμού κατά την αυτογενή λειοτρίβηση.

4.1. Αυτογενής λειοτρίβηση

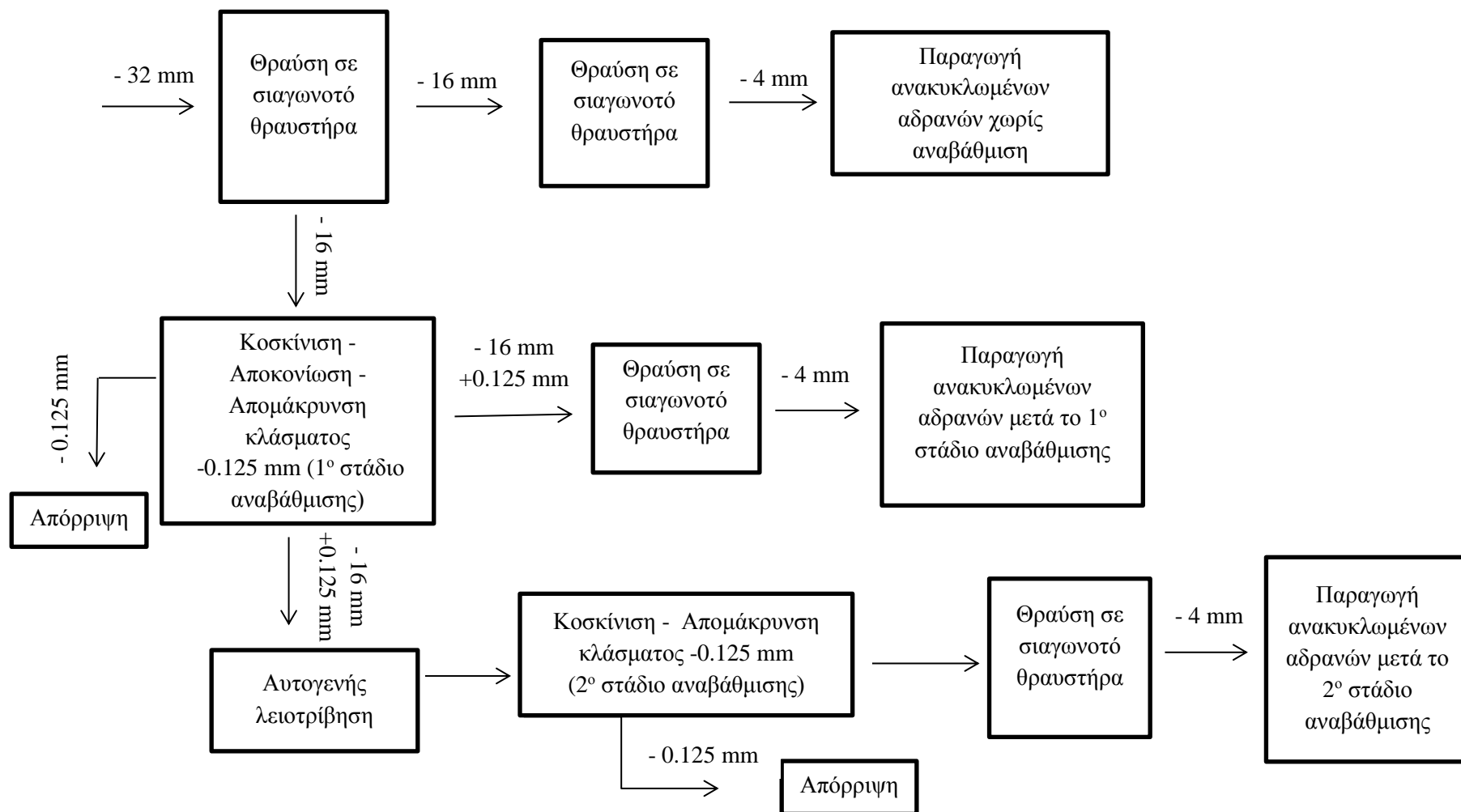
Η κατάτμηση των σωματιδίων σε μύλους αυτογενούς λειοτρίβησης βασίζεται στις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την κίνηση του υλικού. Οι δυνάμεις αυτές προέρχονται από την κρούση, τη συμπίεση και την τριβή-απόξεση των τεμαχιδίων του υλικού. Ειδικότερα, στο μύλο αυτογενούς λειοτρίβησης τα μεγάλα τεμάχια του υλικού λειτουργούν σαν σφαίρες που πέφτουν και θραύουν τα μικρότερα τεμάχια ενώ ταυτόχρονα θρυμματίζονται και τα ίδια. Το πλεονέκτημα αυτών των μύλων είναι ότι με τη χρήση ενός μόνο μηχανήματος είναι δυνατόν να θραυστεί και να λειοτριβηθεί ένα υλικό από αρχικό μέγεθος 200 mm σε 0.1 mm με μικρότερο κόστος. Ωστόσο, οι συγκεκριμένοι μύλοι έχουν αυξημένο κόστος ενέργειας έναντι του συνδυασμού συμβατικού σπαστήρα και μύλου (Σταμπολιάδης, 2008). Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται ο εργαστηριακός μύλος ασυνεχούς λειτουργίας της εταιρείας Seror με διαστάσεις 0.204x0.235 m και ταχύτητα περιστροφής 67 στροφές ανά λεπτό, ο οποίος περιστρέφεται πάνω σε ράουλα και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για την αυτογενή λειοτρίβηση.

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.1 το δείγμα ανακυκλωμένου σκυροδέματος αρχικά υποβλήθηκε σε θραύση (-16 mm) με χρήση εργαστηριακού σιαγωνοτού θραυστήρα. Από το υλικό που προέκυψε κατά την αρχική θραύση, ένα μέρος υποβλήθηκε ξανά σε θραύση σε μέγεθος κόκκων μικρότερο από 4 mm, ενώ το υπόλοιπο υποβλήθηκε σε μηχανική κοσκίνιση και απομακρύνθηκε το κλάσμα -0.125 mm (αποκονίωση - πρώτο στάδιο αναβάθμισης). Στη συνέχεια το υλικό με κοκκομετρία -4mm χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή άμμου από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα, ενώ το υλικό με κοκκομετρία -16 +0.125 mm υποβλήθηκε σε αυτογενή λειοτρίβηση

(δεύτερο στάδιο αναβάθμισης) για διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε.



Σχήμα 4.1. Περιστρεφόμενος εργαστηριακός μύλος που χρησιμοποιήθηκε για την αυτογενή λειοτρίβηση.

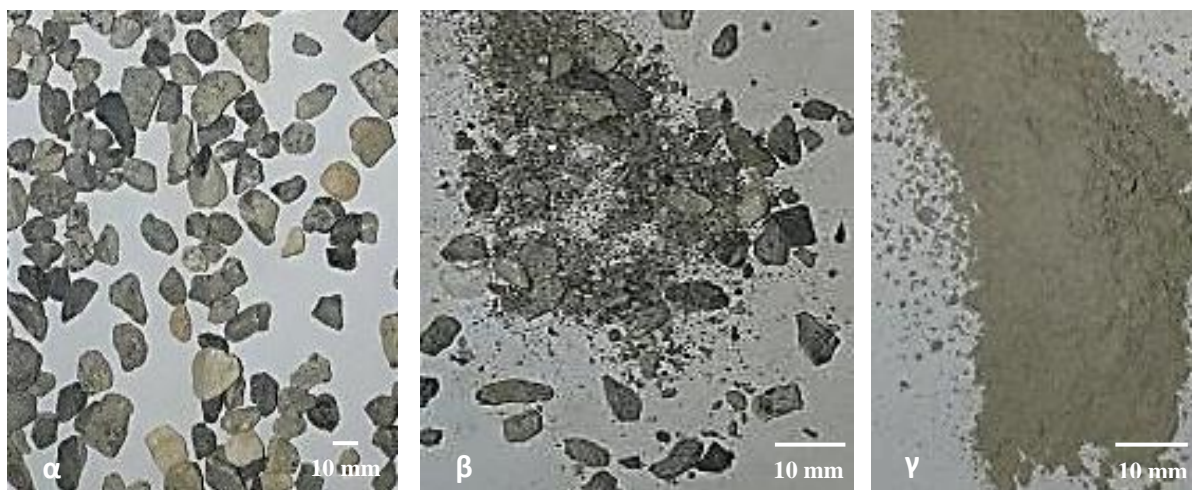


Σχήμα 4.2. Διάγραμμα ροής της διαδικασίας παραγωγής αναβαθμισμένων αδρανών (άμμος) από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα.

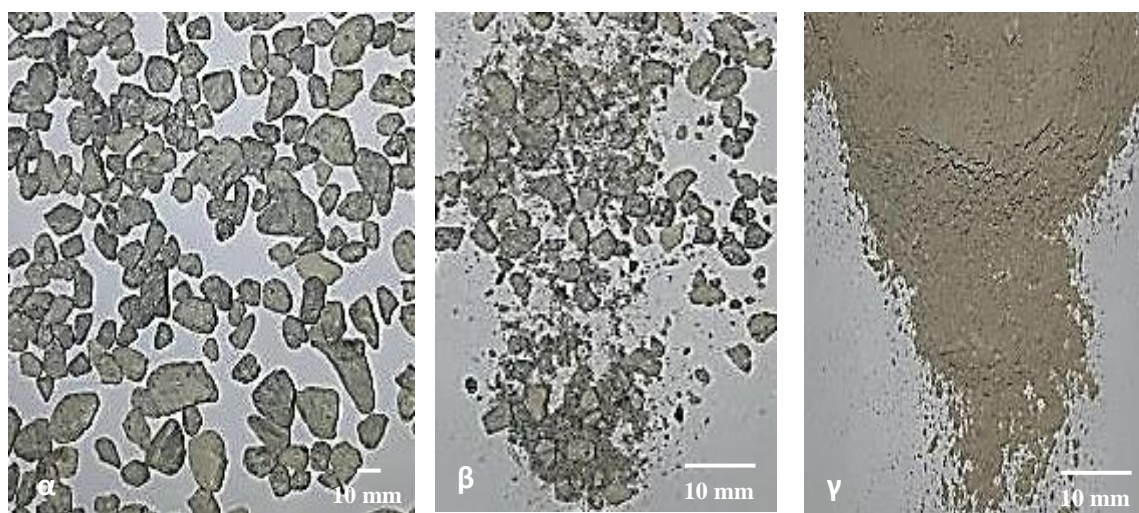
Η διαδικασία της αυτογενούς λειοτρίβησης του ανακυκλωμένου σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε για διαφορετικά χρονικά διαστήματα (2, 4, 8, 16, 32 και 64 min). Στόχος ήταν ο προσδιορισμός του βέλτιστου χρόνου αυτογενούς λειοτρίβησης για την επίτευξη του κατά το δυνατόν μεγαλύτερου βαθμού αποδέσμευσης των κόκκων των αδρανών από τη συνδετική κονία. Για τον υπολογισμό του βέλτιστου χρόνου λειοτρίβησης, μετά από κάθε στάδιο λειοτρίβησης, το υλικό που προκύπτει διαχωρίζεται σε τρία κοκκομετρικά κλάσματα (+4 mm, -4 mm +0.125 mm και -0.125 mm). Με οπτική παρατήρηση τα κλάσματα αυτά ταξινομούνται σε μικτούς κόκκους, κόκκους αδρανών και συνδετική κονία και υπολογίζεται ο βαθμός αποδέσμευσης των κόκκων και το βάρος, για τους διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης.

Ως βαθμός αποδέσμευσης f_a , της φάσης a ενός κοκκώδους υλικού ορίζεται η σχέση της μάζας της φάσης a που ευρίσκεται υπό μορφή ελεύθερων κόκκων προς τη συνολική μάζα της ίδιας φάσης που περιέχεται στο υλικό υπό μορφή ελεύθερων αλλά και σύμμεικτων τεμαχιδίων. Πρόκειται για καθαρό αριθμό που μπορεί επίσης να εκφρασθεί και σαν ποσοστό επί τοις εκατό (Σταμπολιάδης, 2008).

Στα Σχήματα 4.3 και 4.4 παρουσιάζονται τα διαφορετικά κλάσματα ανακυκλωμένου σκυροδέματος μεγέθους κόκκων +4 mm, -4 mm +0.125 mm και -0.125 mm μετά από αυτογενή λειοτρίβηση για 2 και 32 min. Παρατηρούμε ότι με την πάροδο των λεπτών λειοτρίβησης η μορφολογία των κόκκων μεταβλήθηκε και η ποσότητα του λεπτομερούς κλάσματος (-0.125 mm) αυξήθηκε. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η συνδετική κονία που ήταν προσκολλημένη πάνω στους κόκκους των αδρανών αποδεσμεύεται σταδιακά προκαλώντας έτσι την αύξηση του ποσοστού του λεπτομερούς κλάσματος.



Σχήμα 4.3. Κλάσματα ανακυκλωμένου σκυροδέματος μεγέθους κόκκων (α) -16 mm+4 mm, (β) -4 mm +0.125 mm και (γ) -0.125 mm μετά από αυτογενή λειοτρίβηση 2 min.

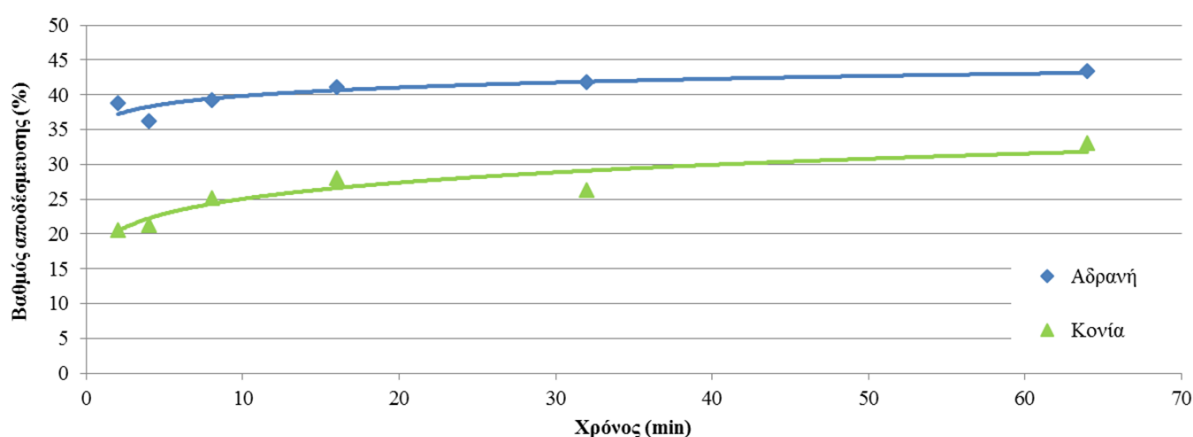


Σχήμα 4.4. Κλάσματα ανακυκλωμένου σκυροδέματος μεγέθους κόκκων (α) -16 mm+4 mm, (β) -4 mm +0.125 mm και (γ) -0.125 mm μετά από αυτογενή λειοτρίβηση 32 min.

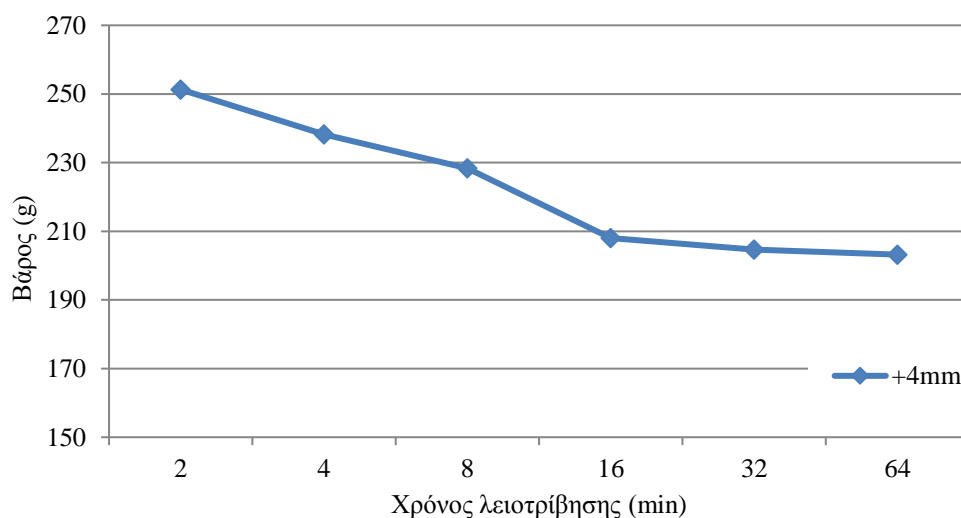
Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα βαθμού αποδέσμευσης f_a (%) - χρόνου λειοτρίβησης (min) των κόκκων των αδρανών και της συνδετικής κονιάς. Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η μεταβολή του βάρους των τριών κοκκομετρικών κλασμάτων για τους διαφορετικούς χρόνους λειοτρίβησης και φαίνεται πως το βάρος του κλάσματος +4 mm συνεχώς μειώνεται, ενώ των

υπολοίπων δύο κλασμάτων αυξάνεται. Επομένως, συμπεραίνεται πως με την αύξηση του χρόνου λειοτρίβησης επιτυγχάνεται καλύτερος διαχωρισμός μεταξύ της συνδετικής κονιάς και των αδρανών υλικών. Σε αυτό συμβάλει η τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ των κόκκων και η μειωμένη αντοχή της συνδετικής κονιάς σε σχέση με το αδρανές υλικό.

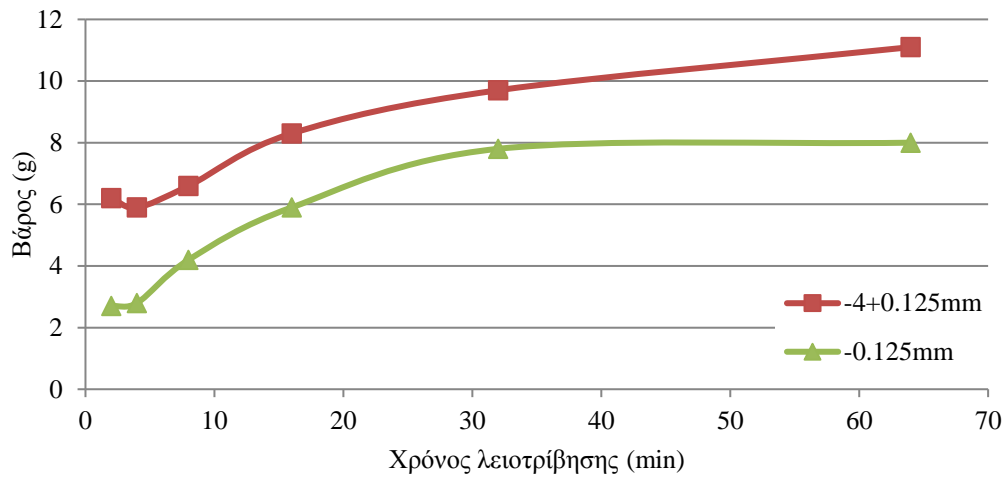
Παρόλα αυτά, από τα Σχήματα 4.5 και 4.6 παρατηρείται επίσης ότι για χρόνο λειοτρίβησης μεγαλύτερο των 32 min δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στο βαθμό αποδέσμευσης των κόκκων και η μεταβολή του βάρους είναι επίσης μικρή. Γι' αυτό το λόγο ως βέλτιστος χρόνος αυτογενούς λειοτρίβησης επιλέχθηκαν τα 32 min.



Σχήμα 4.5. Βαθμός αποδέσμευσης f_a (%) των κόκκων των αδρανών και της συνδετικής κονιάς σε σχέση με το χρόνο λειοτρίβησης (min).



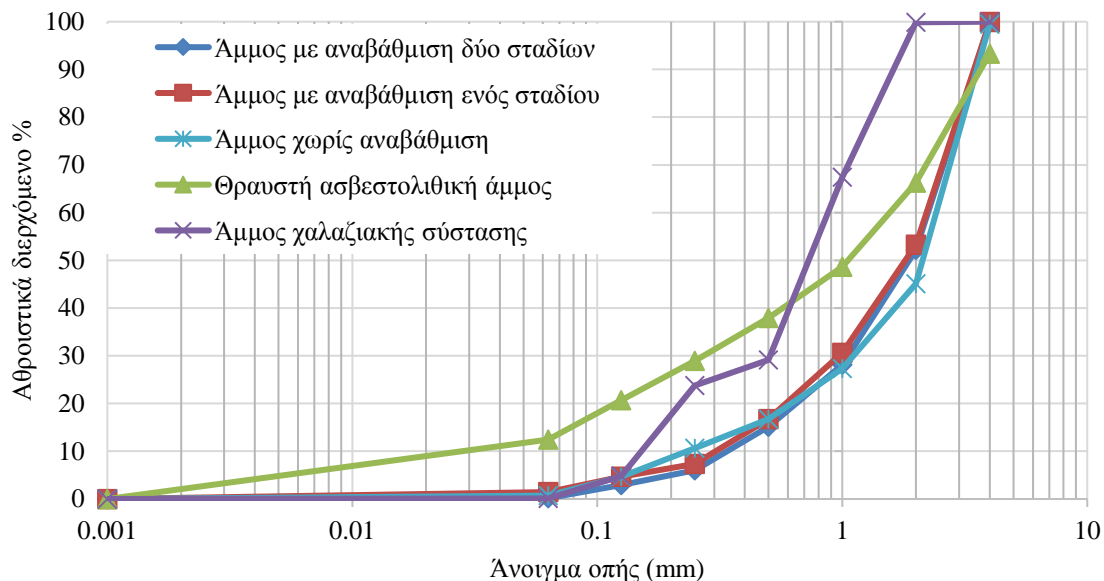
(α)



(β)

Σχήμα 4.6. Διαγράμματα μεταβολής βάρους σε σχέση με το χρόνο λειοτριβήσης για τα κλάσματα (α) +4 mm και (β) - 4 mm +0.125 mm και -0.125 mm.

Όπως φάνηκε και από το Σχήμα 4.2, από τη συνολική ποσότητα του υλικού που παράγεται με κοκκομετρία -16 mm, ένα μέρος του θραύτηκε σε κλάσμα μικρότερο των 4 mm για την παραγωγή άμμου από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα χωρίς αναβάθμιση. Το υπόλοιπο υλικό κοσκινίστηκε και απομακρύνθηκε το κλάσμα -0.125 mm. Από αυτό το υλικό ένα μέρος του αποτέλεσε την τροφοδοσία του μύλου αυτογενούς λειοτριβήσης και το υπόλοιπο θραύστηκε σε κοκκομετρία μικρότερη από 4 mm για την παραγωγή άμμου ενός σταδίου αναβάθμισης (μετά από αποκονίωση). Μετά την ολοκλήρωση της λειοτριβήσης (32 min) το προκύπτον υλικό κοσκινίστηκε για την απομάκρυνση του κλάσματος -0.125 mm και στη συνέχεια θραύτηκε σε κλάσμα μικρότερο των 4 mm για την παραγωγή της άμμου δύο σταδίων αναβάθμισης. Οι κοκκομετρικές καμπύλες των τριών αυτών άμμων (ανακυκλωμένων αδρανών χωρίς αναβάθμιση, με αναβάθμιση ενός σταδίου και με αναβάθμιση δύο σταδίων) φαίνονται στο Σχήμα 4.7. Για λόγους σύγκρισης στο Σχήμα 4.7 απεικονίζονται επίσης οι κοκκομετρικές καμπύλες των άμμων χαλαζιακής σύστασης και της θραυστής άμμου ασβεστολιθικής σύστασης.



Σχήμα 4.7. Κοκκομετρική καμπύλη άμμων α) χωρίς αναβάθμιση, β) με αναβάθμιση ενός σταδίου, γ) με αναβάθμιση δύο σταδίων, δ) πρότυπης άμμου χαλαζιακής σύστασης και ε) θραυστής άμμου ασβεστολιθικής σύστασης.

Προσδιορισμός του συντελεστή ροής αδρανών

Ο προσδιορισμός του συντελεστή ροής αδρανών γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο EN 933-6 και αφορά τον καθορισμό του γωνιώδους των κόκκων. Περιλαμβάνει τον προσδιορισμό του χρόνου ροής (σε δευτερόλεπτα) συγκεκριμένου όγκου αδρανούς υλικού δια μέσου δεδομένου ανοίγματος ειδικής πρότυπης συσκευής. Το άνοιγμα της συσκευής καθορίζεται με βάση την κοκκομετρία του υλικού που μελετάται. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε άνοιγμα οπής με διάμετρο 16 mm. Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται η συσκευή προσδιορισμού του συντελεστή ροής αδρανών. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της δοκιμής. Παρατηρείται ότι η τιμή του χρόνου ροής για την πρότυπη χαλαζιακή άμμο είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με την τιμή που υπολογίστηκε για τα υπόλοιπα δείγματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι κόκκοι της πρότυπης χαλαζιακής άμμου είναι πιο στρογγυλεμένοι σε σχέση με τους κόκκους της θραυστής ασβεστολιθικής άμμου και του κόκκους των τριών άμμων ανακυκλωμένων αδρανών που παρήχθησαν (Σχήματα 4.11-4.17).



Σχήμα 4.8. Εργαστηριακή συσκευή προσδιορισμού του συντελεστή ροής αδρανών.

Πίνακας 4.1. Χρόνος ροής των διαφορετικών δειγμάτων άμμου.

	Πρότυπη χαλαζιακή άμμος	Θραυστή ασβεστολιθική άμμος	Άμμος 1 ^{ου} σταδίου αναβάθμισης	Άμμος 2 ^{ου} σταδίου αναβάθμισης	Άμμος χωρίς αναβάθμιση
Χρόνος ροής (s)	13	18	19	20	20

4.2. Παρασκευή δοκιμίων

Για τον έλεγχο της ποιότητας των αναβαθμισμένων αδρανών που παρήχθησαν, παρασκευάστηκαν δοκίμια τσιμεντοκονιαμάτων σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1. Για κάθε σύνθεση, χρησιμοποιήθηκαν 1350g άμμος, 450g τσιμέντο τύπου CEM I 42.5N, ενώ ο λόγος νερό/τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στον Πίνακα 4.2. Τα μίγματα παρασκευάστηκαν σε εργαστηριακό αναμικτήρα τσιμεντοκονιαμάτων της εταιρείας Matest. Το νωπό μίγμα τοποθετήθηκε σε πρισματικά καλούπια (40x40x160 mm³), ενώ τα παραχθέντα δοκίμια παρέμειναν για 28 ημέρες σε θάλαμο ωρίμανσης (στους 20 ± 2 °C και σχετική υγρασία τουλάχιστον 95%).

Για λόγους σύγκρισης, παρασκευάστηκαν πέντε διαφορετικές σειρές δοκιμίων με χρήση:

- α) πρότυπης άμμου χαλαζιακής σύστασης (QS-Quartz sand),
- β) θραυστής ασβεστολιθικής άμμου (LS-Limestone sand),
- γ) άμμου ανακυκλωμένων αδρανών (RCA-Recycled Concrete Aggregates),
- δ) άμμου ανακυκλωμένων αδρανών ενός σταδίου αναβάθμισης (RCA1-Recycled Concrete Aggregates 1), και
- ε) άμμου ανακυκλωμένων αδρανών δύο σταδίων αναβάθμισης (RCA2-Recycled Concrete Aggregates 2).

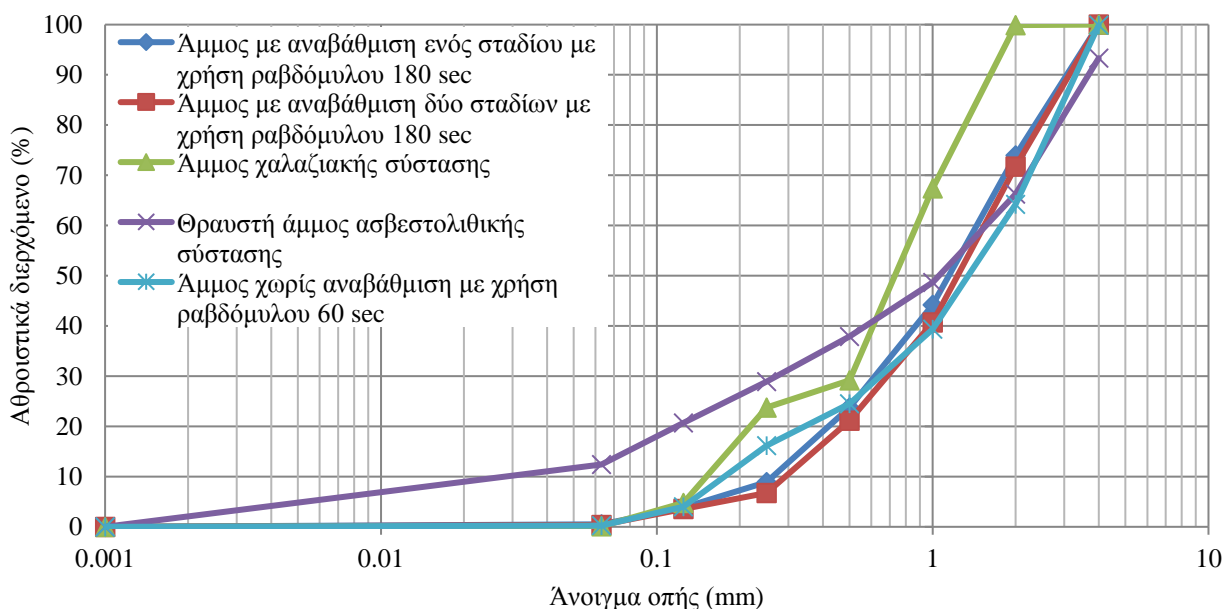
Όπως προαναφέρθηκε, στα ανακυκλωμένα αδρανή RCA1 και RCA2 το κλάσμα -0.125 mm απομακρύνθηκε. Αυτό έγινε για τον περιορισμό της συγκέντρωσης του λεπτόκοκκου υλικού, καθώς αυτό αυξάνει τις απαιτήσεις του μίγματος σε νερό κατά την παρασκευή των δοκιμίων.

Κατά την παρασκευή των δοκιμίων παρατηρήθηκε ότι τα μίγματα που παρασκευάστηκαν με τη χρήση άμμου από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα είχαν μειωμένη εργασιμότητα σε σχέση με αυτά που περιείχαν χαλαζιακή ή ασβεστολιθική άμμο (Σχήμα 4.9). Αυτό αποδόθηκε στο γωνιώδες σχήμα των κόκκων των τριών ειδών άμμου και στην κοκκομετρική τους διαβάθμιση (Σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.9. Μήτρα χύτευσης δοκιμίων τριών θέσεων. Αριστερή θέση: μίγμα με πρότυπη χαλαζιακή άμμο, κεντρική θέση: μίγμα με άμμο από αναβαθμισμένα αδρανή και δεξιά θέση: μίγμα με άμμο 1^{ου} σταδίου αναβάθμισης.

Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε η περαιτέρω θραύση των δύο άμμων με αναβάθμιση και της άμμου χωρίς αναβάθμιση σε ραβδόμυλο για 180 και 60 δευτερόλεπτα, αντίστοιχα. Στόχος αυτού του επιπλέον σταδίου θραύσης ήταν η μείωση του μεγέθους των κόκκων και η βελτίωση των ρεολογικών ιδιοτήτων των μιγμάτων. Η διαφορά στο χρόνο λειοτρίβησης των δύο άμμων με αναβάθμιση και της άμμου χωρίς αναβάθμιση οφείλεται στο γεγονός ότι για την άμμο χωρίς αναβάθμιση δεν είχε προηγηθεί η απομάκρυνση του λεπτομερούς κλάσματος (-0.125 mm) και έτσι η περαιτέρω θραύση του υλικού θα δημιουργούσε περισσότερο λεπτομερές υλικό που είναι ανεπιθύμητο. Η περίσσεια λεπτομερούς υλικού οδηγεί σε μειωμένη αντοχή των δοκιμίων λόγω της αυξημένης απαίτησης του μίγματος σε νερό. Οι νέες κοκκομετρικές καμπύλες των άμμων σε σύγκριση με αυτές της χαλαζιακής και της θραυστής ασβεστολιθικής άμμου φαίνονται στο Σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10. Κοκκομετρική καμπύλη άμμων α) χωρίς αναβάθμιση με χρήση ραβδόμυλου 60 s, β) με αναβάθμιση ενός σταδίου με χρήση ραβδόμυλου 180 s, γ) με αναβάθμιση δύο σταδίων με χρήση ραβδόμυλου 180 s, δ) χαλαζιακής σύστασης και ε) θραυστής άμμου ασβεστολιθικής σύστασης.

Στα Σχήματα 4.11 έως 4.17 φαίνεται η μορφολογία των κόκκων των διαφορετικών άμμων που χρησιμοποιήθηκαν. Προκειμένου να εξεταστεί η μορφολογία των κόκκων των άμμων που παρήχθησαν χρησιμοποιήθηκε εργαστηριακό στερεοσκόπιο SZM της εταιρείας Optika, κάμερα Optikam της ίδιας εταιρείας και λογισμικό Optika vision lite. Παρατηρείται ότι οι κόκκοι των αδρανών που έχουν υποβληθεί σε αυτογενή λειοτρίβηση παρουσιάζουν μεγαλύτερη αποδέσμευση από τη συνδετική κονία σε σχέση με τους κόκκους των αδρανών που δεν υποβλήθηκαν σε αυτογενή λειοτρίβηση. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι η περαιτέρω θραύση της άμμου με τη χρήση ραβδόμυλου οδήγησε στη μείωση του γωνιώδους των κόκκων.



Σχήμα 4.11. Κόκκοι άμμου μετά από αυτογενή λειοτρίβηση (RCA2) και τη χρήση ραβδόμυλου για 180s.



Σχήμα 4.12. Κόκκοι άμμου μετά από αυτογενή λειοτρίβηση (RCA2) χωρίς τη χρήση ραβδόμυλου.



Σχήμα 4.13. Κόκκοι άμμου με αναβάθμιση ενός σταδίου (RCA1) με τη χρήση ραβδόμυλου για 180s.



Σχήμα 4.14. Κόκκοι άμμου με αναβάθμιση ενός σταδίου (RCA1) χωρίς τη χρήση ραβδόμυλου.



Σχήμα 4.15. Κόκκοι άμμου χωρίς καμία αναβάθμιση (RCA) με χρήση ραβδόμυλου 60s.



Σχήμα 4.16. Κόκκοι θραυστής άμμου ασβεστολιθικής σύστασης.



Σχήμα 4.17. Κόκκοι πρότυπης άμμου χαλαζιακής σύστασης (-2mm).

Από τον Πίνακα 4.2 φαίνεται ότι η σύνθεση που παρασκευάστηκε με τη χρήση θραυστής ασβεστολιθικής άμμου είχε τη μικρότερη απαίτηση σε νερό. Αυτό οφείλεται στην ομοιόμορφη κοκκομετρική διαβάθμιση των κόκκων της άμμου (Σχήμα 4.10). Επίσης, παρατηρήθηκε ότι οι συνθέσεις που παρασκευάστηκαν με χρήση των άμμων ανακυκλωμένων αδρανών (αναβαθμισμένων ή μη) είχαν μεγαλύτερες απαιτήσεις σε νερό.

Πίνακας 4.2. Λόγος Νερό/Τσιμέντο των συνθέσεων που παρασκευάστηκαν.

Μίγμα	CEM I 42.5N - RCA	CEM I 42.5N - RCA1	CEM I 42.5N - RCA2	CEM I 42.5N - QS	CEM I 42.5N - LS
Λόγος Νερό/Τσιμέντο	0.63	0.64	0.63	0.50	0.49

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν ελέγχθηκαν ως προς την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, την αντοχή σε κάμψη, την υδατοαπορρόφηση και την πυκνότητα τους.

5.1. Έλεγχος σκληρυμένων δοκιμίων

Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

Μετά το πέρας των 28 ημερών, έγινε η μέτρηση των διαστάσεων (ύψος, μήκος, πλάτος) και του βάρους κάθε δοκιμίου και μετρήθηκε η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1. Για κάθε σύνθεση έγινε θραύση τριών δοκιμίων και υπολογίστηκε η μέση τιμή της αντοχής τους. Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης έγινε σε μηχανή τύπου C 123N της Matest (Σχήμα 5.1). Η συσκευή περιλαμβάνει παράλληλες πλάκες φόρτισης για τη μεταφορά του φορτίου στο δοκίμιο και σφαιρική κεφαλή έδρασης στο πάνω μέρος του δοκιμίου, ο άξονας της οποίας πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένος με τον άξονα του δοκιμίου και το κέντρο της πλάκας φόρτισης. Η επιβολή του φορτίου και η καταγραφή φορτίου και μετατόπισης γίνεται από ηλεκτρονικό σύστημα. Τα δεδομένα επεξεργάζονται και η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη C_s προκύπτει από τη σχέση:

$$C_s = F_{\max} / A \quad (5.1)$$

όπου C_s η αντοχή σε θλίψη σε MPa, F_{\max} το μέγιστο φορτίο (N) που δέχθηκε το δοκίμιο μέχρι να αστοχήσει και A η επιφάνεια της πλάκας φόρτισης (40x40 mm²).

Αντοχή σε κάμψη (κάμψη τριών σημείων)

Η συσκευή που χρησιμοποιείται εφαρμόζει φορτία 10kN με ακρίβεια $\pm 1\%$ του καταγραφόμενου φορτίου με ρυθμό φόρτισης 50 ± 10 N/s. Το κελί φόρτισης που χρησιμοποιείται έχει δύο χαλύβδινους κυλίνδρους διαμέτρου 10 ± 0.5 mm για την έδραση του πρισματικού δοκιμίου. Η μεταξύ τους απόσταση είναι 100 ± 0.5 mm ενώ ένας τρίτος χαλύβδινος κύλινδρος ίδιας διαμέτρου, που είναι τοποθετημένος στο μέσο της απόστασης των άλλων δύο, εφαρμόζει το φορτίο (δοκιμή κάμψης τριών σημείων). Τοποθετούμε το πρισματικό δοκίμιο στη συσκευή και εφαρμόζουμε κατακόρυφο φορτίο αυξάνοντάς το γραμμικά με ρυθμό 50 ± 10 N/s μέχρι τη θραύση (EN 196-1).

Η αντοχή σε κάμψη των δοκιμίων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_s = (1.5 \times F_f \times l) / b^3 \quad (5.2)$$

Όπου,

F_s : η αντοχή σε κάμψη, σε MPa

b : η πλευρά της τετραγωνικής διατομής του πρίσματος, σε mm

F_f : το φορτίο που εφαρμόζεται στο μέσο του πρίσματος κατά τη θραύση, N

l : η απόσταση μεταξύ των στηριγμάτων, σε mm

Για τον υπολογισμό της αντοχής σε κάμψη μια σύνθεσης χρησιμοποιούνται τρία δοκίμια και υπολογίζεται η μέση τιμή.



Σχήμα 5.1. Μηχανή μέτρησης αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και κάμψη.

Πυκνότητα

Η πυκνότητα του κάθε δοκιμίου υπολογίστηκε από τον τύπο $D=m/V$, όπου D είναι η πυκνότητα του κάθε δοκιμίου, m είναι η μάζα του και V ο όγκος του. Η μάζα του κάθε δοκιμίου μετρήθηκε σε ζυγαριά ακριβείας, ενώ ο όγκος του υπολογίστηκε από τις διαστάσεις του (μήκος, πλάτος, ύψος) που μετρήθηκαν με τη βοήθεια του παχύμετρου (EN 99).

Υδατοαπορρόφηση

Η υδατοαπορρόφηση είναι η ικανότητα που έχει ένα σώμα να απορροφά νερό και είναι σημαντική γιατί έχει ευρεία εφαρμογή κυρίως στον κατασκευαστικό τομέα. Στην προκειμένη περίπτωση, τεμάχια δοκιμίων από όλες τις συνθέσεις, τοποθετήθηκαν σε δοχείο με απεσταγμένο νερό για 24 ώρες. Στη συνέχεια, τα δοκίμια σκουπίστηκαν και ζυγίστηκαν. Έπειτα, τοποθετήθηκαν για 24 ώρες σε φούρνο στους 105°C και τέλος, τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρα για να κρυσώσουν και μετρήθηκε ξανά το βάρος τους (EN 99).

Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τύπος:

$$[(W_w - W_d)/W_d] * 100 \quad (5.3)$$

Όπου, W_w το βάρος των δοκιμίων μετά από 24 ώρες μέσα στο νερό και W_d το βάρος του δοκιμίου σε ξηρή κατάσταση.

5.2. Αποτελέσματα δοκιμών

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών. Στα Σχήματα 5.2 και 5.3 απεικονίζονται τα διαγράμματα αντοχών σε μονοαξονική θλίψη και κάμψη, καθώς και η υδατοαπορρόφηση και η πυκνότητα των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με τα διαφορετικά είδη άμμου (Πίνακας 5.1).

Παρατηρείται ότι τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με ασβεστολιθική άμμο έχουν την υψηλότερη αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και κάμψη. Τη χαμηλότερη αντοχή σε μονοαξονική θλίψη έχουν τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με πρότυπη χαλαζιακή άμμο.

Παρατηρείται επίσης ότι η αντοχή σε θλίψη και κάμψη των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με άμμο αδρανών χωρίς αναβάθμιση είναι χαμηλότερες σε σχέση με αυτή των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με την αναβαθμισμένη άμμο.

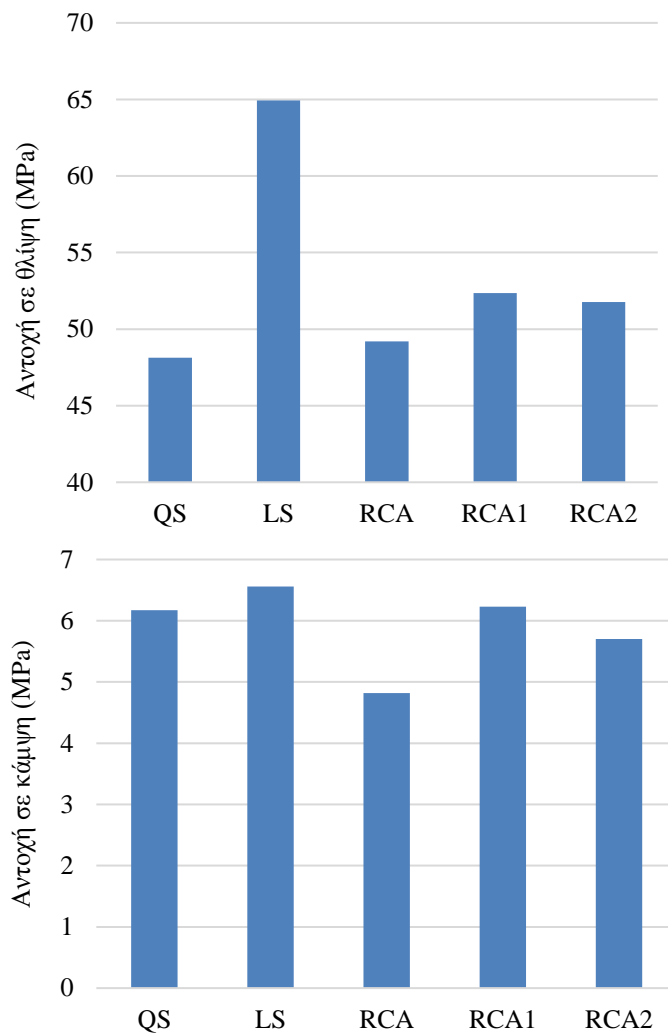
Σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των αντοχών σε μονοαξονική θλίψη και κάμψη, παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια με θραυστή ασβεστολιθική άμμο είχαν την υψηλότερη πυκνότητα και τη χαμηλότερη τιμή υδατοαπορρόφησης.

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με μη αναβαθμισμένα ανακυκλωμένα αδρανή είχαν τη χαμηλότερη πυκνότητα και την υψηλότερη τιμή υδατοαπορρόφησης (Πίνακας 5.1).

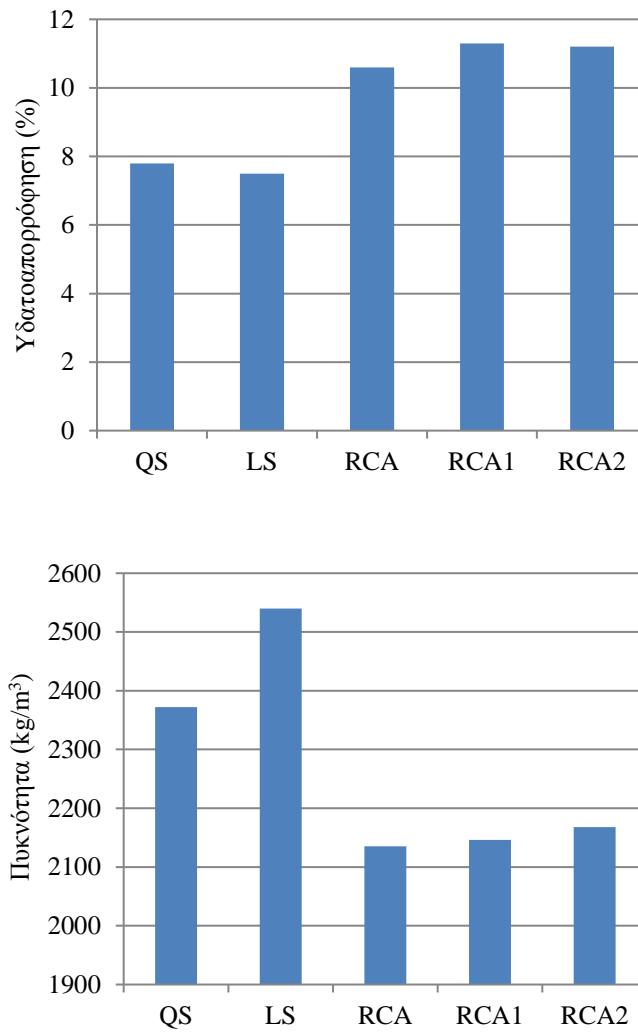
Οι παραπάνω παρατηρήσεις μπορούν να αποδοθούν στη μεγαλύτερη περιεκτικότητα της μη αναβαθμισμένης άμμου ανακυκλωμένων αδρανών σε συνδετική κονία σε σχέση με τα αναβαθμισμένα αδρανή, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένο λόγο νερό/τσιμέντο (Πίνακας 4.2) και μειωμένη αντοχή. Στα Σχήματα 5.2 και 5.3 απεικονίζονται τα διαγράμματα αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και κάμψη, καθώς και η υδατοαπορρόφηση και η πυκνότητα των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν.

Πίνακας 5.1. Αποτελέσματα δοκιμών.

	Αντοχή σε θλίψη (MPa)	Αντοχή σε κάμψη (MPa)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Υδατοαπορρόφηση (%)
Δοκίμια με άμμο ανακυκλωμένων αδρανών (RCA)	49.19	4.82	2135	10.6
Δοκίμια με άμμο 1 ^{ου} σταδίου αναβάθμισης (RCA1)	52.36	6.23	2146	11.3
Δοκίμια με άμμο 2 ^{ου} σταδίου αναβάθμισης (RCA2)	51.77	5.70	2168	11.2
Δοκίμια με χαλαζιακή άμμο (QS)	48.14	6.17	2372	7.8
Δοκίμια με ασβεστολιθική άμμο (LS)	64.93	6.56	2540	7.5



Σχήμα 5.2. Διαγράμματα αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (πάνω) και κάμψη (κάτω) των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με τα διαφορετικά είδη άμμου (QS, LS, RCA, RCA1, RCA2) (Πίνακας 5.1).



Σχήμα 5.3. Διαγράμματα υδατοαπορρόφησης (πάνω) και πυκνότητας (κάτω) των δοκιμών που παρασκευάστηκαν με τα διαφορετικά είδη άμμου (QS, LS, RCA, RCA1, RCA2) (Πίνακας 5.1).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Συμπεράσματα

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας ήταν η εργαστηριακή παραγωγή και ο έλεγχος της ποιότητας αναβαθμισμένων αδρανών υλικών (κοκκομετρίας άμμου) από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα μέσω κοσκίνισης για απομάκρυνση του λεπτομερούς κλάσματος και αυτογενούς λειοτρίβησης. Με βάση τη μελέτη της αποδέσμευσης των δυο φάσεων του ανακυκλωμένου σκυροδέματος (κόκκοι αδρανών και κόκκοι συνδετικής κονιάς) υπολογίστηκε ο βέλτιστος χρόνος αυτογενούς λειοτρίβησης. Στη συνέχεια παράχθηκαν δύο τύποι αναβαθμισμένης άμμου. Ο πρώτος τύπος περιελάμβανε αναβάθμιση ενός σταδίου και ο δεύτερος δύο στάδια επεξεργασίας.

Από τον έλεγχο των δοκιμών που παρασκευάστηκαν προέκυψε ότι τα δοκίμια που περιείχαν πρωτογενή θραυστή ασβεστολιθική άμμο έχουν τη μεγαλύτερη αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και κάμψη (64.93 MPa και 6.56 MPa, αντίστοιχα). Τη μικρότερη αντοχή σε μονοαξονική θλίψη έχουν τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με την πρότυπη χαλαζιακή άμμο (48.14 MPa). Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με άμμο ανακυκλωμένων αδρανών χωρίς αναβάθμιση, με αναβάθμιση ενός σταδίου και δύο σταδίων είχαν αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 49.19, 52.36 και 51.77 MPa, αντίστοιχα.

Οι μειωμένες τιμές των αντοχών των δοκιμών με ανακυκλωμένη άμμο χωρίς αναβάθμιση, σε σχέση με εκείνων που παρασκευάστηκαν με αναβαθμισμένη, οφείλεται στο αυξημένο ποσοστό συνδετικής κονιάς που περιείχαν. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε αυξημένο λόγο νερό/τσιμέντο για την επίτευξη της απαιτούμενης εργασιμότητας και κατά συνέπεια σε μειωμένη αντοχή.

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με τη χρήση πρωτογενούς θραυστής ασβεστολιθικής άμμου είχαν μικρότερη απαίτηση σε νερό από εκείνα που παρασκευάστηκαν με χρήση των ανακυκλωμένων άμμων και έδειξαν υψηλότερες τιμές αντοχής σε θλίψη και κάμψη.

Η πυκνότητα των δοκιμών που παρασκευάστηκαν με τα ανακυκλωμένα αδρανή κυμάνθηκε από 2135 έως 2168 kg/m³ σε σύγκριση με την πυκνότητα των δοκιμών που παρασκευάστηκαν με πρότυπη χαλαζιακή άμμο και θραυστή ασβεστολιθική άμμο (2372 και 2540 kg/m³, αντίστοιχα).

Η υδατοαπορρόφηση των δοκιμών που παρασκευάστηκαν με τα ανακυκλωμένα αδρανή κυμάνθηκε από 10.6 έως 11.3 % και είναι υψηλότερη σε σχέση με αυτή των δοκιμών που

παρασκευάστηκαν με πρότυπη χαλαζιακή άμμο και θραυστή ασβεστολιθική άμμο (7.8 και 7.5 %, αντίστοιχα).

Οι τιμές των αντοχών των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με αναβαθμισμένη άμμο ενός και δύο σταδίων δε διαφέρουν σημαντικά. Διαφαίνεται λοιπόν, ότι ήδη με το πρώτο στάδιο αναβάθμισης των ανακυκλωμένων αδρανών, επέρχεται μια βελτίωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων, ενώ η εφαρμογή δεύτερου σταδίου αναβάθμισης δεν τις βελτιώνει περαιτέρω.

6.2 Προτάσεις

Για την περαιτέρω διερεύνηση του θέματος προτείνεται:

- Η διεξαγωγή επιπλέον δοκιμών για τον πληρέστερο χαρακτηρισμό των ανακυκλωμένων αδρανών που παρήχθησαν όπως, η δοκιμή του μπλε του μεθυλενίου και η δοκιμή micro Deval.
- Η λεπτομερέστερη διερεύνηση της διαδικασίας της αυτογενούς λειοτρίβησης (π.χ. με μεταβολή της κοκκομετρίας του υλικού τροφοδοσίας).
- Η διερεύνηση της χρήσης άλλων τεχνικών εκλεκτικής αποδέσμευσης αδρανών-κονίας, όπως εκείνης της χρήσης ηλεκτρικού τόξου. Η τεχνολογία ευνοεί τη θραύση κατά μήκος των ορίων των κόκκων και έχει ως αποτέλεσμα το μεγαλύτερο βαθμό αποδέσμευσης των κόκκων των αδρανών από τη συνδετική κονία, ενώ ταυτόχρονα τα αδρανή του ανακυκλωμένου σκυροδέματος παραμένουν άθικτα.
- Η θερμική επεξεργασία του λεπτομερούς ανακυκλωμένου σκυροδέματος και συγκεκριμένα η πύρωση του σε υψηλές θερμοκρασίες με σκοπό την επανενεργοποίηση και επαναχρησιμοποίησή του.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αγιουτάντης Γ. Ζ. (2010). Στοιχεία Γεωμηχανικής - Μηχανική Πετρωμάτων, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.
- Γαλετάκης Μ., Βασιλείου Α., Πιπερίδη Χ., Σουλτανά Α., Κομνίτσας Κ., Στειακάκης Ε. και Γκίνος Μ. (2015). Διερεύνηση της δυνατότητας παραγωγής δομικών στοιχείων από λατομική παιπάλη και ανακυκλωμένα αδρανή προερχόμενα από απόβλητα εκσκαφών - κατεδαφίσεων - κατασκευών, 4^ο Πανελλήνιο Συνέδριο της ΕΒΙΠΑΡ, Θεσσαλονίκη (11 - 12 Ιουνίου), 304 - 317.
- Λίτινας Ν., (2008). Νέες απαιτήσεις για τα αδρανή υλικά στις κατασκευές, εμπειρία από την εφαρμογή της σήμανσης CE στην Ελλάδα, 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, ΤΕΕ, Αθήνα, (21-23 Μαΐου).
- Σάββα Α.Ε. (2015). Αντοχή και υδατοαπορροφητικότητα σκυροδεμάτων με ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή, Πρακτικά 4^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου για την Αξιοποίηση των Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στη Δόμηση, ΕΒΙΠΑΡ, Θεσσαλονίκη (11-12 Ιουνίου), 318-332.
- Σταμπολιάδης Η. (2008). Εμπλουτισμός των Μεταλλευμάτων, Χανιά.
- Σταμπολιάδης Η. (2008). Μηχανική των Τεμαχιδίων, Χανιά.
- ΦΕΚ, (2010). Αριθμός Φύλλου 1312, Τεύχος Δεύτερο, Ελληνική Δημοκρατία, Αύγουστος 2010.
- Caijn S., Yake L., Zhang J., Wengui L., Chong L. and Zhaobin X. (2016). Performance enhancement of recycled concrete aggregate – A review, Journal of Cleaner Production, 112:466-472.
- De Magalhaes R. F., Danilevich A. De M. F. and Saurin T. A. (2017). Reducing construction waste: A study of urban infrastructure projects, Waste management, 67:265-277.
- Etxeberria M., Vazque E., Mari A. and Barra M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, Cement and Concrete Research, 37:735-742.
- Eurostat, 2017. Generation of Waste by Waste Category, Hazardousness and NACE Rev 2 Activity.
- EU. DIRECTIVE 2008/98/EC of the European Parliament and the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. European Union. 28 p
- Evangelistas L. and De Brito J. (2010). Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Composites, 32:9-14.

- Galetakis M., Piperidi C., Vasiliou A., Alevizos G., Steiakakis E., Komnitsas K. and Soultana A. (2016). Experimental investigation of the utilization of quarry dust for the production of microcement-based building elements by self-flowing molding casting, *Construction and Building Materials*, 107:247-254.
- Galetakis M. and Soultana A. (2016). A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector, *Construction and Building Materials*, 102:769-781.
- Galvez-Martos J.L., Styles D., Schoenberger H and Zeschmar-Lahl B. (2018). Construction and demolition waste best management practice in Europe, *Resources, Conservation and Recycling*, 136:166-178.
- Kartam N., Al-Mutairi N., Al-Ghusain I. and Al-Humoud J. (2004). Environmental management of construction and demolition waste in Kuwait, *Waste management*, 24:1049-1059.
- Jaeger J. C., Cook NGW and Zimmerman R.W. (2007). *Fundamentals of Rock Mechanics*, 4th Ed., Blackwell.
- Jongsung W. and Cheng J. C.P. (2017). Identifying potential opportunities of building information modeling for construction and demolition waste management and minimization, *Automation in Construction*, 79:3-18.
- Liyin S, H. Y and Griffith A. (2006). Improving environmental performance by means of empowerment of contractors. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 17(3):242–57.
- Martín-Morales M., Zamorano M., Ruiz-Moyano A. and Valverde-Espinosa I. (2011). Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08, 25:742-748.
- Oikonomou Nik. D. (2005) Recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites* 27:315-318.
- Silva R.V., Brito J. and Dhir R.K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production, *Construction and Building Materials*, 65:201-217.
- Sri R. R., Loo Y.H. and Tam C.T. (1987). Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete, *Magazine of Concrete Research*, 39 No. 141.

Thomas J., Thaickavil N. N. and Wilson P.M. (2018). Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates, *Journal of Building Engineering*, 19:349-365.

Wendehorst R. (2009). *Δομικά Υλικά*, Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας, Αθήνα.