



**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΧΡΗΣΗ
ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΑΠΟ
ΚΤΙΡΙΑ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ
ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΤΗΝ ΑΕΙΦΟΡΙΑ**

ANNA A. ΤΣΟΥΜΑΝΗ
ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π. MSc

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2017



**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΧΡΗΣΗ
ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΑΠΟ
ΚΤΙΡΙΑ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ
ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΤΗΝ ΑΕΙΦΟΡΙΑ**

ANNA A. ΤΣΟΥΜΑΝΗ
ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π. MSc

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2017

«Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από το Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Σχολής Θετικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα Ν. 5343/32, άρθρο 202, παράγραφος 2».

Ημερομηνία αίτησης της κα. Τσουμάνη Άνας: 13.05.2011

Ημερομηνία ορισμού Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής: 31.05.2011

Μέλη Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής:

Επιβλέπων

Θεόδωρος Ματίκας, Καθηγητής του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

Μέλη

Αλκιβιάδης Παϊπέτης, Καθηγητής του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων,
Νεκταρία-Μαριάνθη Μπάρκουλα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Ημερομηνία ορισμού θέματος: 31.05.2011

«Μεθοδολογία για Βέλτιστη Χρήση Ανακυκλωμένου Σκυροδέματος από Κτίρια στον Ελλαδικό Χώρο με στόχο την Αειφορία».

ΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΠΤΑΜΕΛΟΥΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ : 24.11.2015

- 1.Θεόδωρος Ματίκας**, Καθηγητής του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων,
- 2. Αλκιβιάδης Παϊπέτης**, Καθηγητής του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων,
- 3.Νεκταρία-Μαριάνθη Μπάρκουλα**, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων,
- 4.Αντωνία Μοροπούλου**, Καθηγήτρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π.,
- 5.Κων/νος Μπέλτσιος**, Καθηγητής του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων,
- 6.Συμεών Αγαθόπουλος**, Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων,
- 7.Κων/νος Δάσιος**, Επίκουρος Καθηγητής του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Έγκριση Διδακτορικής Διατριβής με βαθμό «ΑΡΙΣΤΑ» στις 27.09.2017.

Ο Πρόεδρος του Τμήματος

Η Γραμματέας του Τμήματος

Καρακασίδης Μιχαήλ
Καθηγητής

Ξανθή Τουτουτζόγλου

Αφιερωμένο στην οικογένεια μου...

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια, έχει γίνει αντιληπτό ότι η φύση και οι φυσικοί πόροι, δεν αποτελούν ανεξάντλητα στοιχεία του περιβάλλοντος, για το λόγο αυτό, ο άνθρωπος θα πρέπει να τα διαχειρίζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε η άσκηση κάθε παραγωγικής δραστηριότητας να αφήνει την ουσία τους ακέραια και για τις μελλοντικές γενεές. Ειδικότερα, στον τομέα των κατασκευών, τόσο στην Ελλάδα όσο και στο εξωτερικό, το σκυρόδεμα συνεχίζει να είναι σήμερα το κυρίαρχο υλικό. Έχει δε το μεγάλο πλεονέκτημα να χρησιμοποιεί εγχώριες πρώτες ύλες (τσιμέντο και αδρανή) με αποτέλεσμα να είναι οικονομικό ενώ παράλληλα είναι ανθεκτικό, αποτελεσματικό και αξιόπιστο.

Εντούτοις, συχνά παρουσιάζεται σαν ένα ξεπερασμένο υλικό με μεγάλο περιβαλλοντικό φορτίο που δεν συνάδει με τις σύγχρονες απαιτήσεις του σχεδιασμού. Η πραγματικότητα όμως είναι ότι η κατασκευαστική βιομηχανία του σκυροδέματος είναι απαιτητική τόσο σε ότι αφορά τις πηγές πρώτων υλών, όσο και στην κατανάλωση ενέργειας και την παραγωγή ρύπων, αλλά ταυτόχρονα έχει πολλά περιθώρια βελτίωσης.

Μια εναλλακτική λύση τόσο για τους φυσικούς πόρους, όσο και για τους χώρους εναπόθεσης των δομικών απορριμμάτων είναι η επαναχρησιμοποίηση των προϊόντων, που προκύπτουν από οικοδομικά απορρίμματα και κατεδαφίσεις. Αυτό το «απόβλητο» ενδέχεται να μπορεί να χρησιμοποιηθεί μετά από κατάλληλη επεξεργασία ως αδρανές και να παράγεται σκυρόδεμα που να αποτελεί υλικό φιλικό προς το περιβάλλον. Ωστόσο, για την πιστοποίηση της εναλλακτικής αξιοποίησης στερεών αποβλήτων ως ανακυκλωμένα αδρανή σε έργα πολιτικού μηχανικού, απαιτείται η πραγματοποίηση ερευνητικών προγραμμάτων αναφορικά με τη χρήση τους σε μίγματα σκυροδέματος.

Στην κατεύθυνση κινήθηκε η παρούσα έρευνα, στοχεύοντας στην ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης και πολύπλευρης μεθοδολογίας για την αξιολόγηση της χρήσης ανακυκλωμένου σκυροδέματος στη χώρα μας με απώτερο στόχο την προστασία του περιβάλλοντος και τη βιωσιμότητα των κατασκευών. Για την επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου χρησιμοποιήθηκαν απόβλητα εκσκαφών κατασκευών και κατεδαφίσεων ως ανακυκλωμένα αδρανή για τη σύνθεση σκυροδέματος.

Προσδιορίστηκαν καταρχήν οι ιδιότητες των ανακυκλωμένων αδρανών και συγκεκριμένα οι γεωμετρικές, φυσικές και χημικές τους ιδιότητες. Επιπλέον, λόγω της άγνωστης προέλευσης και της μεγάλης ανομοιομορφίας που παρουσιάζουν τα αδρανή αυτά ως υλικά, πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση του ποσοστού εμφάνισης κάθε διαφορετικού υλικού.

Σε επόμενη φάση, μελετήθηκε η σύνθεση σκυροδέματος με τη χρήση ανακυκλωμένων αδρανών. Αρχικά, προσδιορίστηκε η αναγκαιότητα ή μη της επεξεργασίας των ανακυκλωμένων αδρανών με σκοπό την απομάκρυνση ξένων υλών τα οποία βρίσκονται προσκολλημένα σε αυτά. Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε έλεγχος των ιδιοτήτων νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος σε διαφορετικά ποσοστά αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίστηκε η επίδραση που έχει η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών στις

ιδιότητες του σκυροδέματος ενώ παράλληλα προσδιορίστηκε το βέλτιστο ποσοστό αντικατάστασης, δηλαδή το ποσοστό εκείνο, στο οποίο η τυχούσα αρνητική επίδραση των ανακυκλωμένων αδρανών στις ιδιότητες του σκυροδέματος αντισταθμίζονται από τα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη της χρήσης τους. Τέλος, αναπτύχθηκε μία μεθοδολογία τροποποίησης των ανακυκλωμένων αδρανών για την βελτίωση των ιδιοτήτων τους και προσδιορίστηκε η επίδραση αυτής της τροποποίησης στις ιδιότητες νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος.

Η ολοκλήρωση της παρούσας έρευνας οδήγησε σε σημαντικά συμπεράσματα αναφορικά με τη δυνατότητα χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών για τη δημιουργία βιώσιμων και ανθεκτικών κατασκευών. Παράλληλα, συνιστά μια ολιστική προσέγγιση στο θέμα της εναλλακτικής διαχείρισης των στερεών αποβλήτων στη χώρα μας, που αποτελεί αντικείμενο μελέτης παγκοσμίως για την εισαγωγή μεθόδων βελτιστοποίησης των κατασκευαστικών διαδικασιών.

ABSTRACT

METHODOLOGY FOR USING RECYCLED CONCRETE FROM BUILDINGS IN GREECE WITH THE GOAL OF SUSTAINABILITY

Ph.D. Thesis

Nowadays, it is obvious that natural resources are not inexhaustible elements of the environment, so their use should be managed in such a way that all productive activities leave them intact for future generations. Particularly, in both Greece and abroad, concrete continues to be the dominant material in constructions. Concrete has the great advantage of using domestic raw materials (cement and aggregates) and as a result it is economical while being durable, efficient and reliable.

However, it is often presented as an outdated material with a huge environmental impact that is not consistent to modern design requirements. Yet, the reality is that the concrete production industry is very demanding in terms of raw material sources, energy consumption and pollutants' production, but at the same time there are ways of improvement.

An alternative solution for reserving the natural resources and diminishing the waste disposal sites, is the reuse of construction and demolition waste. This "waste" may be used after suitable treatment as recycled aggregate for environmentally friendly concrete production. Although, in order to certify the alternative utilization of waste as recycled aggregate in civil engineering, research programs regarding their use in concrete mixtures need to be carried out.

Towards this purpose the present research was directed, aiming to develop an integrated and multifaceted methodology for evaluating the use of recycled concrete in Greece in order to protect the environment and the sustainability of constructions. To achieve this goal, construction and demolition waste was used as recycled aggregates for concrete composition.

Firstly, the properties of recycled aggregates were determined; their geometrical, physical and chemical properties in particular. Furthermore, due to their unknown origin and great disparity that these aggregates present, a statistical analysis was performed, determining the percentage rate of each different material.

In a following phase, concrete composition using recycled aggregates was studied. Initially, it was determined whether a treatment of recycled aggregates is required in order to remove impurities that are attached to them. Then, the properties of fresh and hardened concrete were calculated for different replacement rates of recycled aggregates. In this way, the effect of recycled aggregates' use on concrete properties was determined, while the optimal replacement rate, which is the percentage whose negative effects on concrete properties are offset by economic and environmental benefits. Finally, a methodology for modifying recycled aggregates was developed so as to improve their properties and the effect of this modification on the properties of fresh and hardened concrete was determined.

Completing this research has led to significant conclusions regarding the possibility of recycled aggregates use for creating sustainable and durable structures. At the same time, it recommends a holistic approach to alternative waste management in Greece, which is studied worldwide in order to introduce methods for optimizing manufacturing processes.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω ιδιαίτερος όσους πίστεψαν σε εμένα και συντέλεσαν με τη στήριξή τους στην πραγματοποίηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Θα ήθελα, λοιπόν, να ευχαριστήσω αρχικά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Ματίκα Θεόδωρο, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Παν/μίου Ιωαννίνων, για τη πολύτιμη βοήθειά του, την αγάπη με την οποία στήριξε την εργασία αυτή από την πρώτη στιγμή και τη συνεχή ενθάρρυνση του. Η συνεισφορά του ήταν καθοριστική, καθώς με τις γνώσεις του και την ανεκτίμητη καθοδήγηση του συντέλεσε στην ολοκλήρωση της συγκεκριμένης έρευνας.

Θα ήταν μεγάλη παράλειψη μου να μην ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον κ. Παϊπέτη Αλκιβιάδη, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Παν/μίου Ιωαννίνων για το αμέριστο ενδιαφέρον που έδειξε και την υποστήριξή του σε όλα τα στάδια της παρούσας διατριβής, καθώς και την τιμή που μου έκανε να είναι μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής μου.

Νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω εξαιρετικά την κ. Μπάρκουλα Νεκταρία-Μαριάνθη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Παν/μίου Ιωαννίνων για τη σημαντικότερη συνεισφορά της και την άριστη συνεργασία μας όλα αυτά τα χρόνια. Οι γνώσεις της και η εμπειρία της αποτέλεσαν σημαντική βοήθεια για την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής. Με τιμά ιδιαίτερα το γεγονός ότι αποτελεί μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής μου.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κ. Μοροπούλου Αντωνία, Καθηγήτρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., τον κ. Αγαθόπουλο Συμεών Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Παν/μίου Ιωαννίνων, τον κ. Μπέλτσιο Κωνσταντίνο Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Παν/μίου Ιωαννίνων καθώς και τον κ. Δάσιο Κωνσταντίνο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Παν/μίου Ιωαννίνων για την υποστήριξή τους και τη συμβολή τους στην παρούσα διδακτορική διατριβή.

Ευχαριστώ πολύ την εταιρεία GEOTEST και ιδιαίτερα τον κ. Ζωΐδη Νικόλαο, τόσο για τις πολύτιμες πρακτικές συμβουλές όσο και για τη βοήθεια όποτε τη χρειάστηκα, καθώς ένα μέρος των πειραμάτων έχει πραγματοποιηθεί στο εργαστήριό του.

Επίσης, ευχαριστώ πολύ τις εταιρείες ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΑΔΡΑΝΩΝ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ Α.Ε. για την προσφορά των ανακυκλωμένων αδρανών, TITAN Α.Ε. για τη διάθεση του τσιμέντου και των θραυστών αδρανών και ιδιαίτερα τους κ. Λεπτοκαρύδη Χρήστο και κ. Παπαγεωργίου Χρήστο για τη σημαντική βοήθειά τους κατά τη διεξαγωγή της έρευνας και τις BASF ΕΛΛΑΣ Α.Β.Ε.Ε και DOMYLCO Α.Ε. για τον υπερρευστοποιητή που μας διέθεσαν.

Ευχαριστώ θερμά την κ. Σουλιώτη Δήμητρα, Διδάκτορα του ΤΜΕΥ για τη βοήθειά της στην έναρξη της παρούσας διδακτορικής διατριβής ιδίως στην πρώτη

μου επαφή με το εργαστήριο σκυροδέματος καθώς και τις πολύτιμες υποδείξεις της. Ευχαριστώ, επίσης τον κ. Μπαλάσκα Αναστάσιο, Διδάκτορα του ΤΜΕΥ, για τη συμβολή του και τη συνεργασία που είχαμε σχετικά με τα πειράματα της μεθόδου της Ακουστικής Εκπομπής, τον κ. Έξαρχο Δημήτριο, Υποψήφιο Διδάκτορα του ΤΜΕΥ για τη βοήθειά του σχετικά με τα πειράματα της μεθόδου της Θερμογραφίας και την κ. Δάλλα Παναγιώτα, Υποψήφια Διδάκτορα του ΤΜΕΥ για τη συνεργασία που είχαμε σχετικά με τα πειράματα της μεθόδου της Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας.

Επίσης, μεγάλη παράλειψη θα ήταν να μην ευχαριστήσω τον κ. Τάση Ευθύμιο, Υποψήφιο Διδάκτορα του ΤΜΕΥ για τη βοήθειά του κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής της παρούσας έρευνας καθώς επίσης τους Υποψήφιους Διδάκτορες ΤΜΕΥ Αλαφογιάννη Παναγιώτα, Κορδάτου Θεοδότη, Τραγαζίκη Ηλία καθώς και όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Μηχανικής, Ευφυών Αισθητήρων και Μη Καταστροφικής Αξιολόγησης Υλικών για τη βοήθειά τους.

Δεν βρίσκω τα κατάλληλα λόγια να ευχαριστήσω τους Γεωργοπούλου Μαριλένα, Μουσαφείρη Βασίλη, Μέτσιου Καλλιόπη, Καράλη Σταυρούλα, Γκόγκου Ευφροσύνη, Γιαμαλίδη Δημήτριο, Παππά Παναγιώτα και Ευαγγελίδα Ευάγγελο – Αντίοχο, οι οποίοι, ως τελειόφοιτοι σπουδαστές, συμμετείχαν στην διεξαγωγή των εργαστηριακών δοκιμών, στο πλαίσιο των διπλωματικών τους εργασιών. Χωρίς την πολύτιμη χειρωνακτική βοήθειά τους η παρούσα διδακτορική διατριβή δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί.

Τις θερμότερες ευχαριστίες οφείλω στην οικογένειά μου (εξ αίματος και εξ αγχιστείας), τα μέλη της οποίας με στήριζαν και με βοήθησαν ο καθένας με όποιο τρόπο μπορούσε. Ιδιαίτερος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Άρη και Αθανασία, οι οποίοι πάντα πιστεύουν στις δυνατότητές μου, για τη συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια, καθώς και τη βοήθειά τους η οποία ήταν ακόμα και χειρωνακτική. Τέλος, δεν μπορώ να μην ευχαριστήσω το σύζυγό μου Λαζάνη Χάρη, που με την κατανόηση, την υποστήριξη και την αδιάλειπτη συμπαράσταση του με βοήθησε να ολοκληρώσω τη διδακτορική μου διατριβή.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	11
Abstract	13
Ευχαριστίες	15
Περιεχόμενα	17
Κατάλογος εικόνων	19
Κατάλογος διαγραμμάτων	21
Κατάλογος πινάκων	25
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	27
1.1 Γενική ανασκόπηση	29
1.2 Σκοπός της διδακτορικής διατριβής	30
1.3 Ανάπτυξη της εργασίας	31
Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	33
2.1 Εισαγωγικά στοιχεία	35
2.1.1 Σκυρόδεμα	35
2.1.2 Αειφορία και κατασκευές	37
2.2 Απόβλητα εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων	40
2.2.1 Νομοθετικό πλαίσιο στην Ευρωπαϊκή Ένωση	47
2.2.2 Νομοθετικό πλαίσιο στην Ελλάδα	48
2.2.3 Διαχείριση αποβλήτων εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων	50
2.2.4 Μονάδες διαχείρισης ΑΕΚΚ – Μεθοδολογία διαχωρισμού	52
2.2.5 Επαναχρησιμοποίηση – Ανακύκλωση ΑΕΚΚ	57
2.3 Ανασκόπηση υπάρχουσας έρευνας	59
2.3.1 Ανακυκλωμένα αδρανή	59
2.3.2 Ανακυκλωμένο σκυρόδεμα	63
2.4 Καινοτομία της παρούσας έρευνας	73
Κεφάλαιο 3. Θεωρητικό υπόβαθρο	75
3.1 Σκυρόδεμα	77
3.1.1 Τσιμέντο	77
3.1.2 Αδρανή	78
3.1.3 Νερό	79
3.1.4 Πρόσμικτα σκυροδέματος	79
3.1.5 Πρόσθετα σκυροδέματος	79
3.1.6 Μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος	80
3.1.7 Τύποι σκυροδέματος	80
3.2 Ιδιότητες αδρανών υλικών	81
3.2.1 Γεωμετρικές ιδιότητες	84
3.2.2 Φυσικές Ιδιότητες	90
3.2.3 Χημικές Ιδιότητες	97
3.2.4 Φασματοσκοπία ακτίνων Χ φθορισμού	98
3.2.5 Γενικές απαιτήσεις αδρανών	101
3.3 Ιδιότητες σκυροδέματος	101
3.3.1 Ιδιότητες νωπο σκυροδέματος	102
3.3.2 Ιδιότητες σκληρυμένου σκυροδέματος	108
Κεφάλαιο 4. Πειραματική διαδικασία, αποτελέσματα και ανάλυση αποτελεσμάτων.....	137
4.1 Ανακυκλωμένα αδρανή	140
4.1.1 Στατιστική ανάλυση περιεκτικότητας κάθε υλικού στα ανακυκλωμένα αδρανή	142
4.1.2 Ιδιότητες ανακυκλωμένων αδρανών	147

4.2 Ανακυκλωμένο σκυρόδεμα	164
4.2.1 Διερεύνηση αναγκαιότητας επεξεργασίας των ανακυκλωμένων αδρανών	167
4.2.2 Διατήρηση εργασιμότητας	173
4.2.3 Διαπερατότητα χλωριόντων – Δοκιμή PROOVE'it©	177
4.2.4 Επίδραση της χρήσης ανακυκλωμένων αδρανών στις ιδιότητες του νοπού και σκληρυμένου σκυροδέματος.....	182
4.2.5 Επιλογή μεθοδολογίας για τον προσδιορισμό της μελέτης σύνθεσης σκυροδέματος με τη χρήση ανακυκλωμένων αδρανών.....	194
4.2.6 Επίδραση της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.....	201
4.2.7 Προσδιορισμός του βέλτιστου ποσοστού αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή για την παρασκευή σκυροδέματος.....	205
4.2.8 Διερεύνηση της επίδρασης των ανακυκλωμένων αδρανών στην ανθεκτικότητα και την αγωγιμότητα του σκυροδέματος.....	218
4.3 Τροποποίηση των ανακυκλωμένων αδρανών για τη βελτίωση των ιδιοτήτων αυτών και του ανακυκλωμένου σκυροδέματος.....	234
4.3.1 Μεθοδολογία τροποποίησης των ανακυκλωμένων αδρανών και επίδραση στις ιδιότητές τους.....	235
4.3.2 Ιδιότητες ανακυκλωμένου σκυροδέματος με τροποποιημένα ανακυκλωμένα αδρανή.....	241
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα.....	247
5.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων	249
5.2 Συμπεράσματα	258
5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	259
Κεφάλαιο 6. Βιβλιογραφικές αναφορές	261

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1 Ποσοστιαία παραγωγή αδρανών ανά περιφέρεια στην Ελλάδα [11]	36
Εικόνα 2.2 Απόβλητα εκσκαφών κατασκευών και κατεδαφίσεων [14]	39
Εικόνα 2.3 Συνολική παραγωγή αποβλήτων EU-27 κατά οικονομική δραστηριότητα το 2008 [14 – τροποποίηση ίδια].....	41
Εικόνα 2.4 Αρχές διαχείρισης στερεών αποβλήτων [18]	47
Εικόνα 2.5 Αυτοφερόμενη μονάδα διαχείρισης ΑΕΚΚ (τμήματα που την απαρτίζουν) [31].....	54
Εικόνα 2.6 Αυτοφερόμενη μονάδα διαχείρισης ΑΕΚΚ [31]	54
Εικόνα 2.7 Θραυστήρας κρούσης (Α) και θραυστήρας με σιαγόνες (Β) [33].	56
Εικόνα 2.8 Μόνιμο συγκρότημα διαχείρισης ΑΕΚΚ [27].	56
Εικόνα 2.9 Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας ανάμιξης των δύο σταδίων [83].....	65
Εικόνα 3.1 Τετραμερισμός [150].	82
Εικόνα 3.2 Εργαστηριακός εξοπλισμός για την κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών: (Α) κλίβανος [155], (Β) ζυγοί [155] και (Γ) κόσκινα [156].....	85
Εικόνα 3.3 Κόσκινα με παράλληλες μπάρες (κόσκινα bar) [165].	86
Εικόνα 3.4 Δοκιμή μπλε του μεθυλενίου [164].	89
Εικόνα 3.5 Συσκευή Los Angeles [165].	91
Εικόνα 3.6 Καταστάσεις απορρόφησης υγρασίας αδρανών [148].	92
Εικόνα 3.7 Εργαστηριακός εξοπλισμός μέτρησης ειδικού βάρους και υδροαπορροφητικότητας χονδρόκοκκων αδρανών [155].....	93
Εικόνα 3.8 Εργαστηριακός εξοπλισμός μέτρησης ειδικού βάρους και υδροαπορροφητικότητας χονδρόκοκκων αδρανών [165].....	94
Εικόνα 3.9 Οργανολογία μεθόδου XRF [169].	99
Εικόνα 3.10 Ακτινοβολία ακτίνων Χ [169].	100
Εικόνα 3.11 Διαδικασία παρασκευής δίσκου [170].	100
Εικόνα 3.12 Σειρά χαρακτηριστικών ενεργειακών κορυφών [170].....	101
Εικόνα 3.13 Εργαστηριακός εξοπλισμός για τη μέτρηση της κάθισης.....	104
Εικόνα 3.14 Μορφές κάθισης [145].	104
Εικόνα 3.15 Διάταξη δοκιμής εξάπλωσης [145].	105
Εικόνα 3.16 Συσκευή μέτρησης περιεχόμενου αέρα.	107
Εικόνα 3.17 Διάγραμμα συσκευής μέτρησης περιεκτικότητας αέρα για τη μέθοδο εξισορρόπησης πίεσης [145].....	108
Εικόνα 3.18 Συνήθης μορφές αστοχίας θλιπτικής αντοχής [145].....	110
Εικόνα 3.19 Ασυνήθιστες μορφές αστοχίας θλιπτικής αντοχής [145].	111
Εικόνα 3.20 Δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων [145].	112
Εικόνα 3.21 Βασικές μορφές κυματομορφών: (α) συνεχής και (β) εκρηκτική [148].....	113
Εικόνα 3.22 (Α) Σχηματική απεικόνιση δοκιμής κάμψης τεσσάρων σημείων με την παρακολούθηση ΑΕ (Β) Λεπτομέρεια της θέσης των αισθητήρων ΑΕ κατά τη διάρκεια του πειράματος [180].....	115
Εικόνα 3.23 Κυματομορφή ΑΕ με τα βασικά της χαρακτηριστικά [181].	115
Εικόνα 3.24 Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης δοκιμής υπερήχων [183-επεξεργασία ίδια].....	117
Εικόνα 3.25 Τρόποι εφαρμογής μεθόδου υπερήχων [185- επεξεργασία ίδια].....	118
Εικόνα 3.26 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. 1: Ακτίνες Χ. 2: Υπεριώδεις (UV). 3: Ορατό.	121

4: Υπέρυθρες (IR). 5: Μικροκύματα. 6: Ραδιοκύματα [178].....	
Εικόνα 3.27 Υπέρυθρες θερμικές κάμερες [178].	122
Εικόνα 3.28 Λειτουργία αντικειμενικού και προσοφθάλμιου φακού [190].	124
Εικόνα 3.29 Σύνθετο μικροσκόπιο [190].	125
Εικόνα 3.30 Σύστημα PROOVE'it©.	129
Εικόνα 3.31 Αρχή λειτουργίας κελιού	129
Εικόνα 3.32 Καροτέζα – κόφτης για της διαμόρφωση των δοκιμίων.	130
Εικόνα 3.33 Τελική μορφή δοκιμίων.	130
Εικόνα 3.34 Κελιά PROOVE'it©.	131
Εικόνα 3.35 Τοποθέτηση δοκιμίων στον υποδοχέα.	132
Εικόνα 4.1 Ανακύκλωση Αδρανών Μακεδονίας [27]	141
Εικόνα 4.2 Ανακυκλωμένα αδρανή και περιεχόμενα σε αυτά υλικά.	143
Εικόνα 4.3 Διαγραμματική απεικόνιση της παρουσίας κάθε υλικού στα ανακυκλωμένα αδρανή.....	145
Εικόνα 4.4 Αναμικτήρας σκυροδέματος χωρητικότητας 100lt.	165
Εικόνα 4.5 Τράπεζα δόνησης και καλούπια σκυροδέματος.	166
Εικόνα 4.6 Υδραυλική μηχανή Toni Technik για τον έλεγχο της θλιπτικής αντοχής.....	170
Εικόνα 4.7 Δοκίμιο μετά τη δοκιμή θλιπτικής αντοχής (δύο όψεις).	170
Εικόνα 4.8 Κυβικό δοκίμιο προ της δοκιμή θλιπτικής αντοχής.	178
Εικόνα 4.9 Τελική μορφή δοκιμίων για τη διεξαγωγή της δοκιμής PROOVE'it©.....	179
Εικόνα 4.10 Ένα πλήρες κελί έτοιμο προς μέτρηση.	179
Εικόνα 4.11 Σερβο-υδραυλική μηχανή INSTRON.	185
Εικόνα 4.12 Διάταξη δοκιμής κάμψης και θέσης αισθητήρων ακουστικής εκπομπής....	186
Εικόνα 4.13 Σχηματική απεικόνιση δοκιμής κάμψης τεσσάρων σημείων με την παρακολούθηση ΑΕ.....	186
Εικόνα 4.14 Πειραματική διάταξη δοκιμής υπερήχων.	209
Εικόνα 4.15 Διάταξη δοκιμής κάμψης και θέσης αισθητήρων ακουστικής εκπομπής – δοκίμιο κάμψης μετά τη θραύση.....	210
Εικόνα 4.16 (Α) Φούρνος ξήρανσης δοκιμίων (Β) ανιχνευτής ηλεκτρικής αντίστασης....	226
Εικόνα 4.17 Στάδια θερμογραφήματος δοκιμίου καθώς αυτό ψύχεται.....	229
Εικόνα 4.18 Στερεοσκόπιο Leica DM-4000M.	231
Εικόνα 4.19 Δοκίμια σκυροδέματος με ποσοστά αντικατάστασης: 0%, 25% και 100% (Α, Β, Γ αντίστοιχα).....	233
Εικόνα 4.20 Λεπτομέρεια δοκιμίων ανακυκλωμένου σκυροδέματος: άσφαλτος, κομμάτι παλαιού σκυροδέματος και κομμάτι από τούβλο.....	233
Εικόνα 4.21 Προϊόντα που επιλέχθηκαν για την εμφάνιση των ανακυκλωμένων αδρανών (υδρόφοβα διαλύματα).....	236
Εικόνα 4.22 Ανακυκλωμένα αδρανή κατόπιν (Α) εμφάνισης σε υδρόφοβο προϊόν, (Β) επικάλυψης με τσιμεντόπαστα λόγου νερού προς τσιμέντο ίση με 1 και (Γ) επικάλυψης με τσιμεντόπαστα λόγου νερού προς τσιμέντο ίση με 0,5.....	237

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 2.1 Μέση σύσταση ΑΕΚΚ [18]	44
Διάγραμμα 2.2 Παραγωγή ΑΕΚΚ κατά κεφαλήν στην Ευρωπαϊκή Ένωση [19].....	46
Διάγραμμα 2.3 Διάγραμμα ροής διαχείρισης ΑΕΚΚ [32].....	55
Διάγραμμα 2.4 Ετήσια παραγωγή ΑΕΚΚ στην Ευρώπη και βαθμός επαναχρησιμοποίησης ανά χώρα το 2011[31- επεξεργασία ίδια].....	59
Διάγραμμα 2.5 Διακύμανση της θλιπτικής αντοχής βάσει του ποσοστού αντικατάστασης των χονδρόκοκκων αδρανών από διάφορους μελετητές [143- επεξεργασία ίδια].....	72
Διάγραμμα 2.6 Διακύμανση της καμπτικής αντοχής βάσει του ποσοστού αντικατάστασης των χονδρόκοκκων αδρανών από διάφορους μελετητές [143 – επεξεργασία ίδια].....	72
Διάγραμμα 4.1 Κοκκομετρική ανάλυση ανακυκλωμένων αδρανών (κατά ASTM).....	149
Διάγραμμα 4.2 Κοκκομετρική ανάλυση θραυστών αδρανών (κατά ASTM).....	150
Διάγραμμα 4.3 Κοκκομετρική ανάλυση ανακυκλωμένων αδρανών κατόπιν επεξεργασίας (κατά ASTM).....	152
Διάγραμμα 4.4 Κοκκομετρική καμπύλη θεωρητικού μείγματος ανακυκλωμένων αδρανών κατά ASTM.....	153
Διάγραμμα 4.5 Κοκκομετρική καμπύλη θεωρητικού μείγματος ανακυκλωμένων αδρανών κατά EN.....	154
Διάγραμμα 4.6 Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής 7 και 28 ημερών.....	171
Διάγραμμα 4.7 Ποσοστό μείωσης της θλιπτικής αντοχής συγκριτικά με το σκυρόδεμα αναφοράς για δοκίμια ηλικίας 7 και 28 ημερών.....	172
Διάγραμμα 4.8 Αποτελέσματα εργασιμότητας για τις χρονικές στιγμές t=5min και t=45 min.....	175
Διάγραμμα 4.9 Ποσοστό μείωσης της εργασιμότητας συγκριτικά με το σκυρόδεμα αναφοράς για τις χρονικές στιγμές t=5min και t=45 min.....	175
Διάγραμμα 4.10 Ποσοστό μείωσης της εργασιμότητας μετά από 45 min συγκριτικά με την εργασιμότητα κάθε ποσοστού αντικατάστασης για t=5min.....	176
Διάγραμμα 4.11 Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής.	181
Διάγραμμα 4.12 Αποτελέσματα δοκιμής PROOVE'it©.	181
Διάγραμμα 4.13 Αποτελέσματα εργασιμότητας νωπού σκυροδέματος δοκιμών κάθισης και εξάπλωσης.....	187
Διάγραμμα 4.14 Ποσοστό μείωσης της εργασιμότητα συγκριτικά με το σκυρόδεμα αναφοράς.....	188
Διάγραμμα 4.15 Αποτελέσματα πυκνότητας νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος.....	188
Διάγραμμα 4.16 Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος.	189
Διάγραμμα 4.17 Αποτελέσματα καμπτικής αντοχής σκυροδέματος.	189
Διάγραμμα 4.18 Αποτελέσματα εργασιμότητας (κάθιση) σκυροδέματος.	190
Διάγραμμα 4.19 Συνολική δραστηριότητα ακουστικής εκπομπής (σήματα) για ποσοστά αντικατάστασης 0% και 100%.....	191
Διάγραμμα 4.20 Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος.	193
Διάγραμμα 4.21 Αποτελέσματα εργασιμότητας (κάθιση) σκυροδέματος.	193
Διάγραμμα 4.22 Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής.	197

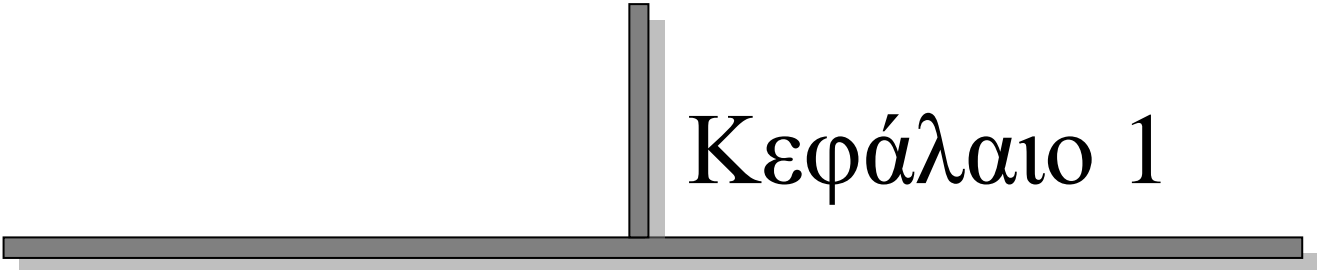
Διάγραμμα 4.23 Ποσοστό μεταβολής της θλιπτικής αντοχής συγκριτικά με το σκυρόδεμα αναφοράς.....	197
Διάγραμμα 4.24 Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής.	199
Διάγραμμα 4.25 Ποσοστό μεταβολής της θλιπτικής αντοχής συγκριτικά με το σκυρόδεμα αναφοράς.....	200
Διάγραμμα 4.26 Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής βάσει των μεθοδολογιών Α και Β.....	201
Διάγραμμα 4.27 Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής 7 και 28 ημερών.	204
Διάγραμμα 4.28 Ποσοστό μεταβολής της θλιπτικής αντοχής συγκριτικά με το σκυρόδεμα αναφοράς.....	204
Διάγραμμα 4.29 Κοκκομετρική καμπύλη μείγματος αδρανών για ποσοστό αντικατάστασης 0%.....	207
Διάγραμμα 4.30 Κοκκομετρική καμπύλη μείγματος αδρανών για ποσοστό αντικατάστασης 25%.....	207
Διάγραμμα 4.31 Κοκκομετρική καμπύλη μείγματος αδρανών για ποσοστό αντικατάστασης 100%.....	208
Διάγραμμα 4.32 Αποτελέσματα πυκνότητας νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος....	213
Διάγραμμα 4.33 Αποτελέσματα θλιπτικής και καμπτικής αντοχής σκυροδέματος.....	213
Διάγραμμα 4.34 Ποσοστό μείωσης της θλιπτικής και καμπτικής αντοχής συγκριτικά με το σκυρόδεμα αναφοράς.....	214
Διάγραμμα 4.35 Αποτελέσματα ταχύτητας υπερήχων για δοκίμια ηλικίας 7 και 28 ημερών.....	215
Διάγραμμα 4.36 Αποτελέσματα δυναμικού μέτρου ελαστικότητας για δοκίμια ηλικίας 7 και 28 ημερών.....	216
Διάγραμμα 4.37 Ποσοστό μείωσης του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας συγκριτικά με το σκυρόδεμα αναφοράς.....	216
Διάγραμμα 4.38 Διερχόμενο ηλεκτρικό φορτίο.....	222
Διάγραμμα 4.39 Συντελεστής διάχυσης χλωριόντων συναρτήσει του ποσοστού αντικατάστασης.....	223
Διάγραμμα 4.40 Απώλεια μάζας δοκιμίων για εμφύσηση δοκιμίων σε διάλυμα θεικού νατρίου (Na ₂ SO ₄ 5% κ.β.).....	224
Διάγραμμα 4.41 Απώλεια μάζας δοκιμίων για εμφύσηση δοκιμίων σε διάλυμα θεικού νατρίου και χλωριούχου νατρίου (Na ₂ SO ₄ 5% κ.β. και NaCl 5% κ.β.).....	224
Διάγραμμα 4.42 Ποσοστό απώλειας μάζας για δοκίμια ηλικίας 20 μηνών σε διάλυμα θεικού νατρίου και θεικού νατρίου - χλωριούχου νατρίου ανά ποσοστό αντικατάστασης.....	225
Διάγραμμα 4.43 Μορφή αποτελεσμάτων ηλεκτρικής αντίστασης.....	227
Διάγραμμα 4.44 Ειδική επιφανειακή ηλεκτρική αντίσταση για δοκίμια ξηραμένα στον αέρα.....	228
Διάγραμμα 4.45 Ειδική επιφανειακή ηλεκτρική αντίσταση για δοκίμια ξηραμένα σε φούρνο.....	228
Διάγραμμα 4.46 Καμπύλες αποθέρμανσης δοκιμίων.....	230
Διάγραμμα 4.47 Ρυθμός μεταβολής θερμοκρασίας δοκιμίων.....	230
Διάγραμμα 4.48 Κοκκομετρική ανάλυση ανακυκλωμένης ψηφίδας (6-11mm -κατά	

ASTM).....	239
Διάγραμμα 4.49 Κοκκομετρική ανάλυση ανακυκλωμένου χαλκίου (12-25mm -κατά ASTM).....	239
Διάγραμμα 4.50 Ποσοστό μείωσης της υδροαπορροφητικότητας των ανακυκλωμένων αδρανών ανά κλάσμα και μέθοδο τροποποίησής τους.....	241
Διάγραμμα 4.51 Κοκκομετρική καμπύλη μείγματος αδρανών για τροποποιημένα αδρανή με τσιμεντόπαστα, λόγου νερού προς τσιμέντο ίσο με ένα χωρίς τη χρήση ιπτάμενης τέφρας.....	242
Διάγραμμα 4.52 Αποτελέσματα θλιπτικής και καμπτικής αντοχής σκυροδέματος.....	244
Διάγραμμα 4.53 Ποσοστό μείωσης της θλιπτικής και καμπτικής αντοχής συγκριτικά με το σκυρόδεμα αναφοράς.....	245

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Παγκόσμια κατανάλωση αδρανών [12 – τροποποίηση ίδια]	37
Πίνακας 2.2 Ταξινόμηση ΑΕΚΚ βάσει Ευρωπαϊκού Κατάλογου Αποβλήτων[16]	42
Πίνακας 2.3 Κύρια παραγόμενα ΑΕΚΚ ανάλογα με την κατασκευή τους [17].	44
Πίνακας 2.4 Εκτιμήσεις για την παραγωγή ΑΕΚΚ στην Ελλάδα [21].	46
Πίνακας 2.5 Συλλογικά συστήματα εναλλακτικής διαχείρισης ΑΕΚΚ [22].	52
Πίνακας 2.6 Πίνακας σύγκρισης ιδιοτήτων φυσικών και ανακυκλωμένων αδρανών.....	63
Πίνακας 2.7 Επίδραση χρήσης ανακυκλωμένων αδρανών στις ιδιότητες του σκυροδέματος [77].	71
Πίνακας 2.8 Πίνακας προτεινόμενων λύσεων σε προβλήματα που προκύπτουν από τη χρήση ανακυκλωμένων αδρανών [77].	73
Πίνακας 3.1 Κατηγορίες θλιπτικής αντοχής για σκυρόδεμα.	81
Πίνακας 3.2 Δοκιμές αδρανών υλικών ανά ελεγχόμενη ιδιότητα [152 - επεξεργασία ίδια].	83
Πίνακας 3.3 Περιεκτικότητα σε κελύφη κατά EN12620 [161].	87
Πίνακας 3.4 Επιτρεπτές τιμές μπλε του μεθυλενίου [163].	90
Πίνακας 3.5 Απαιτούμενα όρια ιδιοτήτων αδρανών [171, 172].	101
Πίνακας 3.6 Ιδιότητες σκυροδέματος.	102
Πίνακας 3.7 Ανοχές δοκιμίων [145].	109
Πίνακας 3.8 Κατηγοριοποίηση του βαθμού διαπερατότητας βάσει των τιμών του ηλεκτρικού φορτίου [195].	128
Πίνακας 3.9 Κατηγορίες έκθεσης σε περιβάλλον θεικών και λοιπών ιόντων βάσει του EN 206-1 [200].	134
Πίνακας 4.1 Ποσότητα ανακυκλωμένων αδρανών ανά κλάσμα	142
Πίνακας 4.2 Περιεκτικότητα υλικών στη μάζα των ανακυκλωμένων αδρανών.....	144
Πίνακας 4.3 Χρησιμοποιηθέντα πρότυπα για τις ιδιότητες των αδρανών	147
Πίνακας 4.4 Κοκκομετρική ανάλυση ανακυκλωμένων αδρανών (κατά ASTM).....	149
Πίνακας 4.5 Κοκκομετρική ανάλυση θραυστών αδρανών (κατά ASTM)	150
Πίνακας 4.6 Κοκκομετρική ανάλυση ανακυκλωμένων αδρανών κατόπιν επεξεργασίας (κατά ASTM).	151
Πίνακας 4.7 Κοκκομετρική ανάλυση θεωρητικού μείγματος αδρανών	152
Πίνακας 4.8 Κοκκομετρική ανάλυση ανακυκλωμένων αδρανών, με επεξεργασία και χωρίς (κατά EN).	153
Πίνακας 4.9 Κοκκομετρική ανάλυση θραυστών αδρανών (κατά EN).	154
Πίνακας 4.10 Κοκκομετρική ανάλυση θεωρητικού μείγματος αδρανών κατά EN.....	155
Πίνακας 4.11 Δείκτης πλακοειδούς ανακυκλωμένων αδρανών.	156
Πίνακας 4.12 Επιτρεπτές τιμές μπλε του μεθυλενίου σύμφωνα με διεθνείς προδιαγραφές [211].	158
Πίνακας 4.13 Ειδικό βάρος και υδροαπορροφητικότητα ανακυκλωμένων αδρανών.....	159
Πίνακας 4.14 Ειδικό βάρος και υδροαπορροφητικότητα θραυστών αδρανών.....	160
Πίνακας 4.15 Ανθεκτικότητα σε αποσάθρωση ανακυκλωμένων αδρανών.	161
Πίνακας 4.16 Χημικές ιδιότητες ανακυκλωμένων αδρανών χωρίς επεξεργασία.....	161
Πίνακας 4.17 Στοιχειακή ανάλυση ανακυκλωμένων αδρανών χωρίς επεξεργασία.....	162
Πίνακας 4.18 Στοιχειακή ανάλυση ανακυκλωμένων αδρανών με επεξεργασία.....	163
Πίνακας 4.19 Ενεργός και ολικός λόγος νερού προς τσιμέντο ανά σύνθεση.....	168
Πίνακας 4.20 Ειδικό βάρος και υδροαπορροφητικότητα των ανακυκλωμένων αδρανών.	169

Πίνακας 4.21 Αναλογίες αναμιγμάτων.	169
Πίνακας 4.22 Αποτελέσματα δοκιμών.	171
Πίνακας 4.23 Αναλογίες αναμιγμάτων.	174
Πίνακας 4.24 Αποτελέσματα δοκιμών.	174
Πίνακας 4.25 Αναλογίες αναμιγμάτων.	177
Πίνακας 4.26 Κατηγοριοποίηση του βαθμού διαπερατότητας βάσει των τιμών του ηλεκτρικού φορτίου.	180
Πίνακας 4.27 Αποτελέσματα δοκιμών.	180
Πίνακας 4.28 Αναλογίες αναμιγμάτων.	183
Πίνακας 4.29 Αποτελέσματα δοκιμών.	187
Πίνακας 4.30 Αναλογίες αναμιγμάτων.	192
Πίνακας 4.31 Αποτελέσματα επαναληπτικών δοκιμών.	192
Πίνακας 4.33 Αναλογίες αναμιγμάτων.	195
Πίνακας 4.34 Αποτελέσματα δοκιμών εργασιμότητας – θλιπτικής αντοχής.	196
Πίνακας 4.35 Αναλογίες αναμιγμάτων.	198
Πίνακας 4.36 Αποτελέσματα δοκιμών εργασιμότητας – θλιπτικής αντοχής.	199
Πίνακας 4.37 Αναλογίες αναμιγμάτων.	202
Πίνακας 4.38 Αποτελέσματα δοκιμών.	203
Πίνακας 4.39 Αναλογίες αναμιγμάτων.	206
Πίνακας 4.40 Αποτελέσματα δοκιμών.	212
Πίνακας 4.41 Αποτελέσματα ταχύτητας υπερήχων και δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ανά ποσοστό.	213
Πίνακας 4.42 Αναλογίες αναμιγμάτων.	219
Πίνακας 4.43 Αποτελέσματα δοκιμών.	220
Πίνακας 4.44 Αποτελέσματα δοκιμών.	222
Πίνακας 4.45 Επιφανειακή ηλεκτρική αντίσταση ανά ποσοστό αντικατάστασης.....	227
Πίνακας 4.46 Χαρακτηριστικά υπέρυθρης κάμερας Flir T360.	229
Πίνακας 4.47 Χαρακτηριστικά σκυροδέματος.	232
Πίνακας 4.48 Κοκκομετρική ανάλυση ανακυκλωμένης ψηφίδας (κατά ASTM).....	237
Πίνακας 4.49 Κοκκομετρική ανάλυση ανακυκλωμένου χαλικιού (κατά ASTM).....	238
Πίνακας 4.50 Ειδικό βάρος και υδροαπορροφητικότητα ανακυκλωμένης ψηφίδας.....	240
Πίνακας 4.51 Ειδικό βάρος και υδροαπορροφητικότητα ανακυκλωμένου χαλικιού.....	240
Πίνακας 4.52 Αναλογίες αναμιγμάτων.	242
Πίνακας 4.53 Αποτελέσματα δοκιμών.	243



Κεφάλαιο 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενική ανασκόπηση

Ο ρόλος των κατασκευών στον πολιτισμό, είναι σημαντικός και περίπλοκος αφού αποτελούν την σύνδεση με το παρελθόν και αντιπροσωπεύουν την κληρονομιά για το μέλλον. Μία βασική επιδίωξη του σχεδιασμού, η οικονομία, επεκτείνεται σήμερα για να συμπεριλάβει την αειφόρο και βιώσιμη ανάπτυξη. Η έννοια της αειφόρου και βιώσιμης ανάπτυξης, όπως ο όρος ερμηνεύεται για να συμπεριλάβει ευρύτερα την ποιότητα ζωής και για τις επόμενες γενιές, έχει τρεις βασικές πτυχές: κοινωνικές, οικονομικές, περιβαλλοντικές. Από τις τρεις αυτές πτυχές η περιβαλλοντική μπορεί σε κάποιο βαθμό να ποσοτικοποιηθεί και να μετρηθεί ευκολότερα από τις άλλες δύο και αποτελεί σήμερα το βασικότερο κριτήριο μέτρησης της απόδοσης ενός αειφόρου σχεδιασμού [1].

Ο κύκλος της οικοδομικής δραστηριότητας, ο οποίος συνδέεται με περιβαλλοντικά προβλήματα περιλαμβάνει: την παραγωγή οικοδομικών υλικών, την κατασκευή του κτιρίου, τη χρήση του και την κατεδάφισή του.

Μεγαλύτερη βαρύτητα από περιβαλλοντικής άποψης, ιδίως μετά την πρώτη μεγάλη ενεργειακή κρίση της δεκαετίας του '80, είχε δοθεί στο στάδιο της χρήσης του κτιρίου το οποίο έχει τη μεγαλύτερη διάρκεια,. Ωστόσο, από τις αρχές της δεκαετίας του '90, που έγιναν εμφανείς οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των υπόλοιπων τριών σταδίων (π.χ. απόθεμα φυσικών πόρων, διαχείριση οικοδομικών αποβλήτων, δυσκολίες ασφαλούς απόθεσης οικοδομικών απορριμμάτων), ξεκίνησε μια ολιστική θεώρηση για την περιβαλλοντική συμπεριφορά των κτιρίων και των επιπτώσεων της οικοδομικής δραστηριότητας στο περιβάλλον.

Πραγματοποιήθηκαν προσπάθειες για την ενσωμάτωση της παραμέτρου της αειφορίας σε όλο τον κύκλο ζωής των κτιρίων ώστε το κτίριο να είναι φιλικό προς το περιβάλλον και να επιφέρει τη λιγότερη δυνατή επιβάρυνση στο περιβάλλον σε όλα τα στάδια ζωής του [2].

Στην Ελλάδα αλλά και παγκοσμίως, το κυρίαρχο υλικό στον τομέα των κατασκευών είναι το σκυρόδεμα και απασχολεί την συντριπτική πλειοψηφία των μηχανικών. Έχει δε το μεγάλο πλεονέκτημα σαν υλικό να χρησιμοποιεί εγχώριες πρώτες ύλες (τσιμέντο και αδρανή) με αποτέλεσμα να είναι οικονομικό ενώ παράλληλα είναι ανθεκτικό, αποτελεσματικό και αξιόπιστο [3].

Εντούτοις, συχνά παρουσιάζεται σαν ένα ξεπερασμένο υλικό με μεγάλο περιβαλλοντικό φορτίο που δεν συνάδει με τις σύγχρονες απαιτήσεις του σχεδιασμού. Η πραγματικότητα όμως είναι ότι έχει πολύ χαμηλότερο περιβαλλοντικό φορτίο από άλλα δομικά υλικά, αλλά ταυτόχρονα έχει πολλά περιθώρια βελτίωσης. Το περιβαλλοντικό αυτό φορτίο αφορά κυρίως στην παραγωγή του. Η κατασκευαστική βιομηχανία του σκυροδέματος είναι απαιτητική τόσο σε ότι αφορά τις πηγές πρώτων υλών, όσο και στην κατανάλωση ενέργειας και την παραγωγή ρύπων και δεν

μπορούμε να αγνοήσουμε την επίδρασή της στο περιβάλλον σε τοπικό, εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο.

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι το σκυρόδεμα σαν υλικό, έχει κάποια εγγενή σημεία θετικής συνεισφοράς στη αιεφόρο ανάπτυξη αλλά η βιομηχανία του σκυροδέματος διαθέτει περιθώρια και δυνατότητες βελτίωσης [1].

Μια εναλλακτική λύση τόσο για τους φυσικούς πόρους, όσο και για τους χώρους εναπόθεσης των δομικών απορριμμάτων είναι η επαναχρησιμοποίηση των προϊόντων, που προκύπτουν από οικοδομικά απορρίμματα και κατεδαφίσεις. Αυτό το «απόβλητο» ενδέχεται να μπορεί να χρησιμοποιηθεί μετά από κατάλληλη επεξεργασία ως αδρανές και να παράγεται σκυρόδεμα που να αποτελεί υλικό φιλικό προς το περιβάλλον [4].

Η ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση των δομικών υλικών ανταποκρίνεται στις σύγχρονες τάσεις της τεχνολογικής ανάπτυξης, που αποτελούν μέρος της σύγχρονης απαίτησης για τη βιώσιμη ανάπτυξη, τη διαφύλαξη του φυσικού πλούτου και την αποτελεσματική διαχείριση των απορριμμάτων [5].

Ωστόσο, για την πιστοποίηση της εναλλακτικής αξιοποίησης στερεών αποβλήτων ως ανακυκλωμένα αδρανή σε έργα πολιτικού μηχανικού, απαιτείται η πραγματοποίηση ερευνητικών προγραμμάτων αναφορικά με τη χρήση τους σε μίγματα σκυροδέματος, λαμβάνοντας υπόψη και επεκτείνοντας καλές πρακτικές από αντίστοιχες έρευνες σε παγκόσμιο επίπεδο. Η έρευνα αυτού του πεδίου, θα οδηγήσει εύκολα σε εναρμόνιση με τη σχετική νομοθεσία αξιοποίησης των στερεών αποβλήτων, η οποία έχει τεθεί σε ισχύ και στη χώρα μας από το 2010 και η οποία επιτάσσει την άμεση εναλλακτική διαχείριση αυτών των αποβλήτων σε διάφορα ποσοστά ανά χρονικό ορίζοντα (70% μέχρι Ιανουάριο 2020).

1.2 Σκοπός της διδακτορικής διατριβής

Η παρούσα διδακτορική διατριβή στοχεύει στην ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης και πολύπλευρης μεθοδολογίας για την αξιολόγηση της χρήσης ανακυκλωμένου σκυροδέματος στη χώρα μας με απώτερο στόχο την προστασία του περιβάλλοντος και τη βιωσιμότητα των κατασκευών. Για την επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου χρησιμοποιήθηκαν απόβλητα εκσκαφών κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ) ως αδρανή για τη σύνθεση σκυροδέματος. Η παρούσα έρευνα χωρίστηκε σε δύο βασικές κατευθύνσεις: (α) στη διερεύνηση της χρήσης των ΑΕΚΚ ως αδρανών σκυροδέματος – ανακυκλωμένα αδρανή και (β) στον προσδιορισμό των ιδιοτήτων σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή – ανακυκλωμένο σκυρόδεμα.

Στο πλαίσιο της έρευνας αυτής, προσδιορίστηκαν καταρχήν οι ιδιότητες των ανακυκλωμένων αδρανών και συγκεκριμένα οι γεωμετρικές, φυσικές και χημικές τους ιδιότητες. Επιπλέον, λόγω της άγνωστης προέλευσης και της μεγάλης ανομοιομορφίας που παρουσιάζουν τα ΑΕΚΚ, πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση του ποσοστού εμφάνισης κάθε διαφορετικού υλικού σε αυτά. Τα αποτελέσματα των ελέγχων αυτών συγκρίθηκαν με τις ιδιότητες θραυστών αδρανών καθώς και με τις απαιτήσεις που ορίζει η ισχύουσα νομοθεσία για την παραγωγή σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε έλεγχος βάσει του Κανονισμού

Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ'97) και του Ευρωπαϊκού Πρότυπου για τα αδρανή σκυροδέματος ΕΛΟΤ EN12620-2002.

Στην επόμενη φάση, μελετήθηκε η σύνθεση σκυροδέματος με τη χρήση ανακυκλωμένων αδρανών. Αρχικά, προσδιορίστηκε η αναγκαιότητα ή μη της επεξεργασίας των ανακυκλωμένων αδρανών με σκοπό την απομάκρυνση ακαθαρσιών (κυρίως χώμα) οι οποίες βρίσκονται προσκολλημένες σε αυτά. Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε έλεγχος των ιδιοτήτων νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος με διαφορετικά ποσοστά αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίστηκε η επίδραση που έχει η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών στις ιδιότητες του σκυροδέματος ενώ παράλληλα προσδιορίστηκε το βέλτιστο ποσοστό αντικατάστασης, δηλαδή το ποσοστό εκείνο, στο οποίο η τυχούσα αρνητική επίδραση των ανακυκλωμένων αδρανών στις ιδιότητες του σκυροδέματος αντισταθμίζεται από τα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη της χρήσης τους. Οι ιδιότητες του σκυροδέματος συγκρίθηκαν με τις απαιτήσεις του ΚΤΣ '97 και του Ευρωπαϊκού Πρότυπου για το σκυροδέμα ΕΛΟΤ EN 206-1.

Τέλος, αναπτύχθηκε μία μεθοδολογία τροποποίησης των ανακυκλωμένων αδρανών για την βελτίωση των ιδιοτήτων τους. Επιπλέον, προσδιορίστηκε η επίδραση αυτής της τροποποίησης στις ιδιότητες νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος. Η ολοκλήρωση της παρούσας έρευνας οδήγησε σε σημαντικά συμπεράσματα αναφορικά με τη δυνατότητα χρήσης των ΑΕΚΚ για τη δημιουργία βιώσιμων και ανθεκτικών κατασκευών. Παράλληλα, συνιστά μια ολιστική προσέγγιση στο θέμα της εναλλακτικής διαχείρισης των στερεών αποβλήτων στη χώρα μας, που αποτελεί αντικείμενο μελέτης παγκοσμίως για την εισαγωγή μεθόδων βελτιστοποίησης των κατασκευαστικών διαδικασιών.

1.3 Ανάπτυξη της εργασίας

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελείται από πέντε κεφάλαια.

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της διδακτορικής διατριβής και έχει σκοπό να παρουσιάσει το γενικότερο πλαίσιο αυτής. Ξεκινά με μια εισαγωγική προσέγγιση αναφορικά με το ανακυκλωμένο σκυροδέμα, ήτοι το σκυροδέμα με τη χρήση στερεών απόβλητων ως αδρανή σκυροδέματος. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο επιδιωκόμενος στόχος της έρευνας αυτής και το βασικό αντικείμενο μελέτης. Τέλος, ολοκληρώνεται με την παρούσα αναφορά στο αντικείμενο που πραγματεύεται και μελετάται σε κάθε κεφάλαιό της ξεχωριστά.

Το δεύτερο κεφάλαιο είναι το κεφάλαιο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Το κεφάλαιο αυτό, ξεκινά με μια αναφορά στα αδρανή υλικά, στο σκυροδέμα και στους λόγους για τους οποίους υπάρχει ανάγκη ανακύκλωσης αυτών. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται η ισχύουσα για τα στερεά απόβλητα νομοθεσία, στην Ευρωπαϊκή Ένωση και στην Ελλάδα, στατιστικά στοιχεία για τα απόβλητα εκσκαφών κατασκευών και κατεδαφίσεων, τα χαρακτηριστικά αυτού του ρεύματος αποβλήτων, οι εταιρίες και η διαδικασία διαχείρισης των αποβλήτων αυτών. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μελετών που έχουν διεξαχθεί παγκοσμίως,

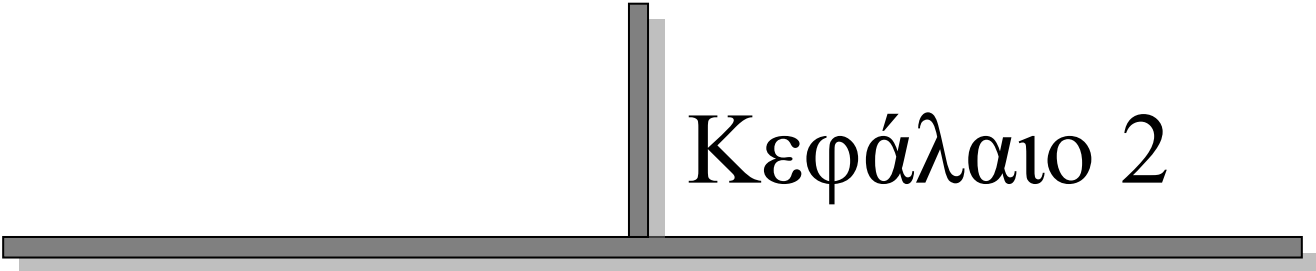
αναφορικά με τις ιδιότητες ανακυκλωμένων αδρανών (από απόβλητα εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων) και τις ιδιότητες ανακυκλωμένου σκυροδέματος (από ανακυκλωμένα αδρανή). Τέλος, το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση της καινοτομίας της παρούσας έρευνας.

Το τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζει το θεωρητικό υπόβαθρο της πειραματικής διαδικασίας. Ειδικότερα, περιέχει βασικά θεωρητικά στοιχεία για το σκυρόδεμα και τα συστατικά του, τα αδρανή υλικά και τις ιδιότητές τους, την σύνθεση σκυροδέματος και των προτύπων βάσει των οποίων προσδιορίστηκαν οι ιδιότητες των αδρανών καθώς και του νωπού - σκληρυμένου σκυροδέματος.

Το τέταρτο κεφάλαιο είναι το κεφάλαιο στο οποίο παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία και γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Παράλληλα με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται σύγκρισή τους με τις προδιαγραφές της ισχύουσας νομοθεσίας, ούτως ώστε να προσδιοριστεί η καταλληλότητα των ανακυκλωμένων υλικών σε κατασκευές.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, έπειτα από σύνοψη των εξαγόμενων αποτελεσμάτων, παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ερμηνεία τους. Γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στη χρησιμότητα των βασικών αποτελεσμάτων της διδακτορικής διατριβής, ενώ παρατίθενται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο, παρατίθενται αναλυτικά και αριθμημένες με αύξοντα αριθμό ανάλογα με τη σειρά εμφάνισής τους στο κείμενο, οι βιβλιογραφικές αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας.



Κεφάλαιο 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Εισαγωγικά στοιχεία

2.1.1 Σκυρόδεμα

Παγκοσμίως, το σκυρόδεμα είναι το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο υλικό και έρχεται δεύτερο σε κατανάλωση μόνο μετά το νερό. Για κάθε κάτοικο του πλανήτη μας παράγεται κάθε χρόνο λίγο παραπάνω από ένας τόνος σκυροδέματος και η παραγωγή αυτή συνεχώς αυξάνεται υπό την πίεση των αναπτυσσομένων χωρών. Το σκυρόδεμα υπό την ευρύτερη του έννοια, δηλαδή ως υλικό που κατασκευάζει ο άνθρωπος με τη χρήση κάποιου συνδετικού υλικού μέσα στο οποίο προσθέτει διάφορα άλλα φυσικά υλικά που συνδέονται με τη συγκολλητική του δράση και σχηματίζουν ένα νέο στερεό υλικό, έχει ιστορία 9000 ετών [6]. Εντούτοις, η χρήση του σκυροδέματος διαδόθηκε ευρέως μετά το Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, όταν οι ανάγκες στέγασης ώθησαν την ανάπτυξη των κατασκευών.

Το σκυρόδεμα δεν είναι ούτε τόσο δυνατό ούτε τόσο σκληρό υλικό όσο άλλα υλικά (για παράδειγμα ο χάλυβας) εντούτοις είναι το περισσότερο χρησιμοποιούμενο δομικό υλικό και τείνει να αντικαταστήσει τα άλλα βασικά δομικά υλικά, λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει ως υλικό. Εντούτοις, έχει και ορισμένα μειονεκτήματα τα οποία αφορούν όχι μόνο στο ίδιο το υλικό αλλά και στην παραγωγική του διαδικασία. Η μεγάλη χρήση του σκυροδέματος είχε σαν αποτέλεσμα να δημιουργηθούν βιομηχανίες που παράγουν έτοιμο για χρήση σκυρόδεμα, οι οποίες έχουν δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Συγκεκριμένα, αναφορικά με τις μονάδες έτοιμου σκυροδέματος τα μειονεκτήματα αφορούν καταρχήν στη μεγάλη ποσότητα παραπροϊόντων, τα οποία προκύπτουν καθημερινά και είτε απορρίπτονται είτε συγκεντρώνονται σε ειδικούς χώρους αποθήκευσης. Τα παραπροϊόντα αυτά είναι κυρίως το επιστρεφόμενο νωπό σκυρόδεμα και το νερό έκπλυσης των ειδικών σιλοφόρων οχημάτων μεταφοράς έτοιμου σκυροδέματος.

Ένα ακόμα μειονέκτημα, του τομέα παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος είναι οι περιβαλλοντικές του επιπτώσεις και συγκεκριμένα: οι καταναλώσεις σε πρώτες ύλες (αδρανή υλικά, τσιμέντο, νερό), πρόσθετα υλικά, ενέργεια (ηλεκτρική ενέργεια, πετρέλαιο κίνησης), υλικά συντήρησης (γράσα, ορυκτέλαια,) και οι εκπομπές σε αέρα (CO, NO_x, VOC, PM, σκόνη), νερό (υγρά απόβλητα), έδαφος (στερεά απόβλητα) καθώς επίσης ο θόρυβος [7]. Λόγω της σύνθεσης του σκυροδέματος που αποτελείται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό από αδρανή, τσιμέντο και νερό, τα εργοστάσια παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος συμβάλλουν κατά κύριο λόγο στα προβλήματα που συνεπάγεται η εξόρυξη των πρώτων υλών και η παραγωγή του τσιμέντου [8].

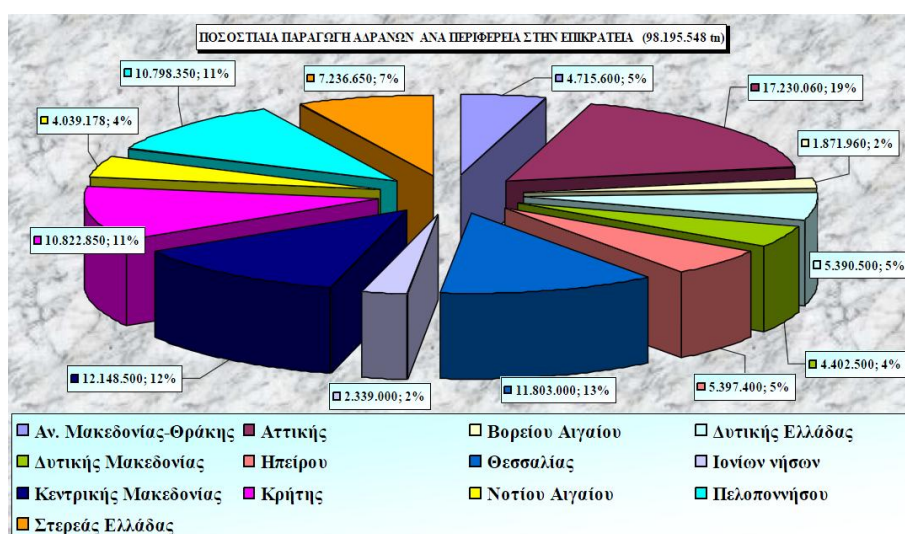
Τα φυσικά αδρανή υλικά, όπως το αμμοχάλικο και τα θραυστά πετρώματα, αποτελούν σημαντικούς μη ανανεώσιμους πόρους. Είναι επίσης εμφανής η άσχημη και άχρηστη κατάσταση των λατομείων (με εξαίρεση μερικών από τα χιλιάδες που έχουν γίνει πολιτιστικά κέντρα) που χρησιμοποιούνται σε δομικά έργα και έργα

υποδομής. Στη χώρα μας λειτουργούν λατομεία αδρανών υλικών είτε εντός των ορίων θεσμοθετημένων λατομικών περιοχών είτε σε μεμονωμένες θέσεις. Ο αριθμός των δημόσιων, δημοτικών/κοινοτικών και ιδιωτικών λατομείων αδρανών υλικών που βρίσκονται σε λειτουργία ανέρχεται σε 195 [9]. Φυσικά υπάρχει κι ένας αριθμός λατομείων που λειτουργούν χωρίς την απαιτούμενη άδεια και των οποίων ο υπολογισμός καθίσταται δυσχερής. Από τον αριθμό των λατομείων γίνεται αντιληπτό η μεγάλη ποσότητα αδρανών υλικών που εξορύσσονται στη χώρα μας.

Ο τομέας των αδρανών υλικών καθώς και όλοι οι συναφείς με τα δομικά υλικά κλάδοι, παρουσίασαν έντονη κάμψη λόγω της οικονομικής κρίσης και της συνέχισης και κορύφωσης της ύφεσης στην οικοδομική δραστηριότητα και τις κατασκευές. Είναι ενδεικτικό ότι πριν την περίοδο της κρίσης, όταν είχαμε ένα συνολικό όγκο παραγωγής περί τους 100 εκατομμύρια τόνους αδρανών (όλων των κλασμάτων συνολικά) ετησίως, το δεδομένο αυτό (των 25 εκατ. τόνων) αποτελούσε εκτίμηση που αφορούσε μόνο την παράνομη –μη καταγραφόμενη- εξορυκτική δραστηριότητα (εικόνα 2.1) [10].

Αντιθέτως, η παγκόσμια αγορά για τα αδρανή οικοδομικά υλικά αναμένεται να αυξηθεί κατά 5,2 τις εκατό ετησίως και να φτάσει στους 48,3 δισεκατομμύρια τόνους το 2015. Παρά την επιβράδυνση της ανάπτυξης (συγκριτικά με την περίοδο 2005-2010), η ζήτηση αδρανών υλικών αυξάνεται και είναι ενδεικτική της οικοδομικής δραστηριότητας (πίνακας 2.1).

Η κύρια χρήση των αδρανών αφορά στην παραγωγή σκυροδέματος. Κατά συνέπεια, τα αδρανή υλικά είναι ένας απαραίτητος πόρος για την οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη μιας χώρας αφού η αύξηση του πληθυσμού δημιουργεί συνεχείς απαιτήσεις για νέα κτίρια και έργα υποδομής. Ωστόσο, μία περαιτέρω αύξηση είναι πιθανό να προκαλέσει προβλήματα στη συνολική διαχείριση των αδρανών υλικών και ως εκ τούτου και στη λατομική δραστηριότητα, η οποία σε τοπικό επίπεδο είναι εξαιρετικά ανομοιογενής και εξακολουθεί να συνδέεται με φαινόμενα παράνομης δραστηριότητας ή/και περιβαλλοντικής επιβάρυνσης [10].



Εικόνα 2.1 Ποσοστιαία παραγωγή αδρανών ανά περιφέρεια στην Ελλάδα [11]

Επιπλέον, ο ρυθμός μιας οικονομικής μεγέθυνσης μπορεί να συνοδεύεται υπό ορισμένες προϋποθέσεις από δυσμενείς επιπτώσεις στην ευημερία του κοινωνικού συνόλου, μεταξύ των οποίων είναι η εξάντληση των φυσικών πόρων. Η συνεχής μείωση των διαθέσιμων φυσικών πόρων οδηγεί στην ανάγκη ορθολογικής διαχείρισης και εξοικονόμησής τους.

Επομένως, είναι προφανές ότι δεν αρκεί η συνειδητοποίηση των περιβαλλοντικών προβλημάτων στον τομέα παραγωγής ετοιμού σκυροδέματος, αλλά επιβάλλεται η άμεση εφαρμογή ολοκληρωμένων και αποτελεσματικών συστημάτων περιβαλλοντικής διαχείρισης για την παραγωγή «οικολογικού» σκυροδέματος. Σε μια εποχή στην οποία η ανακύκλωση είναι ανάγκη και λύση για ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζει ο πλανήτης, ο τομέας αυτός μπορεί να συμβάλει στην προστασία του περιβάλλοντος αξιοποιώντας στην διαδικασία παραγωγής εναλλακτικές πρώτες ύλες.

Πίνακας 2.1 Παγκόσμια κατανάλωση αδρανών [12 – τροποποίηση ίδια]

Παγκόσμια Ζήτηση Αδρανών Υλικών	% Ετήσια Αύξηση				
	2005	2010	2015	2005-2010	2010-2015
Ζήτηση Αδρανών Υλικών	27300	37400	48300	6.5	5.2
Βόρεια Αμερική	3280	3010	3710	-1.7	4.3
Δυτική Ευρώπη	2920	2630	3050	-2.1	3.0
Ασία/ Ειρηνικός	16000	24750	32600	9.1	5.7
Λοιπά	5100	7010	8940	6.6	5.0

Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, πρέπει να αναπτυχθεί η έννοια της περιβαλλοντικής διατήρησης, δηλαδή η μακροχρόνια διατήρηση της βιωσιμότητας του οικοσυστήματος. Για την επίτευξη αυτού του στόχου απαιτούνται παρεμβάσεις πολιτικής στο οικονομικό και περιβαλλοντικό πεδίο και ταυτόχρονα ευρύτερη διακρατική συνεργασία των αναπτυγμένων χωρών με τις αναπτυσσόμενες και οικονομικά αδύναμες χώρες που αποτελούν περίπου το 80% του παγκόσμιου πληθυσμού.

2.1.2 Αειφορία και κατασκευές

Τα τελευταία 40 χρόνια, λόγω της ραγδαίας βιομηχανικής ανάπτυξης που επήλθε από τα μέσα του 19ου αιώνα και μετά, έγινε αισθητά αντιληπτό ότι η φύση και οι φυσικοί πόροι, δεν αποτελούν ούτε ανεξάντλητα ούτε αλώβητα στοιχεία του περιβάλλοντος. Οι έννοιες «περιβάλλον» και «περιβαλλοντικό πρόβλημα» όλο και περισσότερο απασχολούσαν την παγκόσμια κοινότητα.

Η ευρέως διαδομένη άποψη ότι τα πάντα είναι δυνατά αν διαθέτουμε «αρκετή ενέργεια και τεχνολογία», άρχισε να αμφισβητείται, όταν διαπιστώθηκε η περιορισμένη αντοχή των φυσικών κύκλων αλλά και οι αστάθμητοι κίνδυνοι από τις παρενέργειες της τεχνολογίας. Η αρχή της «ανάπτυξης χωρίς όρια» που επικρατούσε μεταπολεμικά αντικαταστάθηκε από αυτή της «ανάπτυξης χωρίς καταστροφή», αφού με το πέρασμα του χρόνου διαπιστώθηκαν οι αρνητικές συνέπειες και επιπτώσεις στο περιβάλλον αλλά και στην ποιότητα της ζωής του ανθρώπου.

Για το λόγο αυτό, ο άνθρωπος θα πρέπει να διαχειρίζεται τα στοιχεία του περιβάλλοντος με τέτοιο τρόπο, ώστε η άσκηση κάθε παραγωγικής δραστηριότητας

να αφήνει την ουσία τους ακέραια και για τις μελλοντικές γενεές. Ο τρόπος αυτός ονομάζεται αειφορία (αρχή της αειφορίας) και η ανάπτυξη που σέβεται την αειφορία ονομάζεται αειφορική ή βιώσιμη ανάπτυξη. Η αειφόρος ανάπτυξη έχει στόχο την ορθολογική διαχείριση των φυσικών πόρων, με τρόπο ώστε να καλύπτονται οι ανθρώπινες ανάγκες του παρόντος, ενώ ταυτόχρονα να μην υπονομεύεται η κάλυψη των αναγκών του μέλλοντος.

Η εκβιομηχάνιση και η δημιουργία νέων δραστηριοτήτων με τη χρήση νέων τεχνολογιών, είχε ως αποτέλεσμα τις σοβαρές ανησυχίες του ανθρώπου για την ποιότητα του φυσικού περιβάλλοντος. Αποτελεί γεγονός ότι τα πρώτα βήματα ανάπτυξης της βιομηχανίας έγιναν σε ένα περιβάλλον υγιές, εύρωστο και κυρίως ικανό να απορροφήσει οποιαδήποτε σχεδόν επίπτωση, όσο αρνητική κι αν ήταν. Καθώς όμως υπήρξε επιτάχυνση του ρυθμού βιομηχανικής ανάπτυξης μετά τα μέσα του αιώνα, οι επιπτώσεις στο περιβάλλον αθροιστικά από τις βιομηχανικές μονάδες ήταν πάρα πολλές κι άρχισαν να διαφαίνονται οι πρώτες ανησυχίες για το περιβάλλον και για τον τρόπο αντιμετώπισης των προβλημάτων που ανέκυπταν [13].

Στο πλαίσιο αυτό, η αναζήτηση ενός συγκεκριμένου πλαισίου βιωσιμότητας για το δομημένο περιβάλλον είναι εξαιρετικά σημαντική. Η αύξηση του πληθυσμού απαιτεί συνεχώς την κατασκευή έργων. Ο κατασκευαστικός τομέας σε σύγκριση με άλλες βιομηχανικές δραστηριότητες υπερέχει σε μέγεθος και συγχρόνως συνδέεται στενά με ποικίλες δραστηριότητες εξαιρετικά κρίσιμες για το κοινωνικό σύνολο. Οι κατοικίες και οι υποδομές όπως οι μεταφορές, οι επικοινωνίες, η υδροδότηση και η αποχέτευση αποτελούν την προϋπόθεση για την σωστή οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη κάθε χώρας και έχουν στενή συνάφεια με την επίτευξη της βιωσιμότητας σε παγκόσμιο επίπεδο.

Με άξονα τη συλλογιστική της βιωσιμότητας, σήμερα αναπτύσσονται κριτήρια με τα οποία οι κατασκευές, στο σύνολό τους, να είναι φιλικές προς το περιβάλλον. Η έννοια αυτή είναι διαφορετική για κάθε χώρα και σχετίζεται με τον βαθμό της οικονομικής ανάπτυξης. Οι περισσότερο ανεπτυγμένες χώρες στοχεύουν στην αναβάθμιση των υπαρχόντων κατασκευών με την ανάπτυξη και εφαρμογή νέων τεχνολογιών, ενώ οι λιγότερο ανεπτυγμένες ή αναπτυσσόμενες χώρες στοχεύουν περισσότερο στην οικονομική βιωσιμότητα και στην κοινωνική ισοκατανομή.

Η αντίληψη για την βιωσιμότητα των κατασκευών ακολούθησε μια πορεία εξέλιξης τα τελευταία χρόνια. Αρχικά η βιωσιμότητα των κατασκευών αφορούσε τεχνικά κυρίως θέματα, όπως το είδος των υλικών, την εξοικονόμηση ενέργειας και την μείωση των γενικότερων επιπτώσεων στο περιβάλλον. Σήμερα η βιωσιμότητα των κατασκευών επεκτείνεται σε νέα μη τεχνικά θέματα που αφορούν στα κοινωνικά και πολιτιστικά προβλήματα που συνδέονται με τις κατασκευές.

Το γεγονός ότι ο κατασκευαστικός τομέας είναι διασπασμένος σε μικρές, συνήθως, εταιρείες που δεν απασχολούν περισσότερους από είκοσι εργαζόμενους, είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την συνολική διαχείριση των ζητημάτων που αφορούν τις βιώσιμες κατασκευές. Η διαδικασία της κατασκευής επεκτείνεται από τις φάσεις του αρχικού σχεδιασμού και περιλαμβάνει μέχρι και την φάση της κατεδάφισης, κατά συνέπεια εμπλέκει μεγάλο αριθμό ενδιαφερομένων μερών ή/και κοινωνικών ομάδων.

Οι κατασκευές κάθε είδους εξασκούν άμεση επίπτωση στα φυσικά συστήματα, διότι διασπούν την φυσική συνέχεια των οικοσυστημάτων και απειλούν την βιοποικιλότητα. Παράλληλα, για την κατασκευή των κτηρίων χρησιμοποιούνται μεγάλες ποσότητες υλικών που αποτελούν μη ανανεώσιμους φυσικούς πόρους, παράγοντας παράλληλα ποσότητες αποβλήτων τις οποίες το περιβάλλον αδυνατεί να απορροφήσει.

Από την άλλη, οι σημαντικές ποσότητες αποβλήτων που προέρχονται από τον κατασκευαστικό τομέα έχουν δημιουργήσει ανάγκες εξεύρεσης, είτε περιοχών απόθεσης, είτε εγκαταστάσεων ανάκτησης, οι οποίες είναι δύσκολο να εκπληρωθούν, με αποτέλεσμα τη συχνή ανεξέλεγκτη απόρριψή τους στο προαστιακό περιβάλλον. Η ανάγκη να μειωθεί η χρήση μη ανανεώσιμων φυσικών πόρων και την ίδια στιγμή, να ελαχιστοποιηθούν οι αρνητικές επιπτώσεις εξαιτίας της παραγωγής και της διαχείρισης των αποβλήτων του κατασκευαστικού τομέα, έχει προκαλέσει ένα συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ανακύκλωση [10].

Η χρήση πρώτων υλών από ανακυκλούμενα υλικά μέσω της ανάκτησης ενός ποσοστού των αποβλήτων και της επαναισαγωγής τους στην παραγωγική διαδικασία με την μορφή προϊόντων ή πρώτων υλών, δυστυχώς δεν είναι διαδεδομένη. Επιπρόσθετα, ένα επίσης σημαντικό θέμα που σχετίζεται με την κατασκευαστική βιομηχανία είναι η σπατάλη δυνητικών πόρων, όπως είναι τα αδρανή απόβλητα που προέρχονται από δραστηριότητες που σχετίζονται με κατασκευές και κατεδαφίσεις και απορρίπτονται σε χώρους ταφής ενίοτε παράνομους. Τέτοιου είδους απόβλητα θα μπορούσαν να τύχουν κατάλληλης επεξεργασίας σε υφιστάμενες - τεχνικά κατάλληλες, οικονομικά βιώσιμες και κοινωνικά αποδεκτές εγκαταστάσεις ανακύκλωσης και να μετατραπούν σε ανακυκλωμένα αδρανή που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σαν συμπληρωματική πηγή προμήθειας αδρανών.



Εικόνα 2.2 Απόβλητα εκσκαφών κατασκευών και κατεδαφίσεων [14]

Το κόστος αυτών των αποβλήτων είναι τεράστιο και για το λόγο αυτό υπάρχουν σε εξέλιξη έρευνες για την προσπάθεια επανάχρησης αυτών. Σε πολλές χώρες ως και το 85% των δομικών υλικών ανακυκλώνεται με αυτό τον τρόπο. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της Σουηδίας όπου επαναχρησιμοποιείται το 90% περίπου των φυσικών πετρωμάτων, της άμμου και του χαλικιού, το 60% της ασφάλτου, ενώ το 80% του ξύλου χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας. Η

επαναχρησιμοποίηση του σκυροδέματος είναι σχετικά χαμηλή και φθάνει μόνο το 20%. Ωστόσο, πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη να μην ανακυκλώνονται τοξικά ή επιβλαβή υλικά όπως ο αμίαντος ή τα βαριά μέταλλα [15].

Δυστυχώς η Ελλάδα, χαρακτηρίζεται από την έλλειψη ενός δικτύου συλλογής και χρήσης των υλικών που περιέχονται στα απορρίμματα κατασκευών-κατεδαφίσεων. Κύριος ανασταλτικός παράγοντας ήταν η έως σήμερα έλλειψη ενός οργανωμένου δικτύου συλλογής και αξιοποίησης τους, με αποτέλεσμα η διαχείριση των υλικών αυτών να γίνεται αποσπασματικά. Οι περιορισμένες δράσεις είναι εξαιρετικά εύθραυστες και εξαρτώνται από την προθυμία των υπευθύνων της κατασκευής.

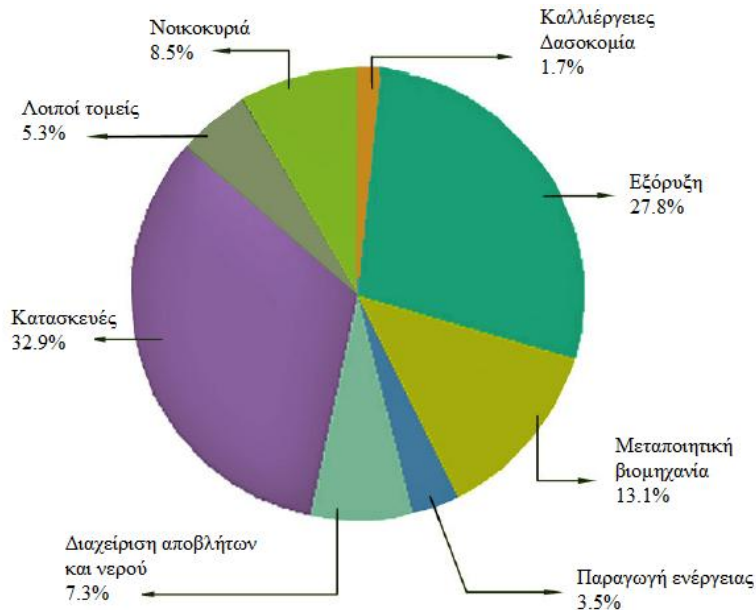
Στη χώρα μας η χρήση τους περιορίζεται αποκλειστικά σε συγκεκριμένες δράσεις. Λίγα υλικά επαναχρησιμοποιούνται αυτούσια, όπως καλώδια, γυαλιά, κάσες ανοιγμάτων. Αρκετές ποσότητες χρησιμοποιούνται για επιχωματώσεις ή για έργα οδοποιίας, καθώς επίσης και για παραγωγή ασφαλτομίγματος ενώ η πλειονότητά τους καταλήγει σε ανεξέλεγκτες χωματερές ή σε άλλες ακατάλληλες περιοχές.

Μια προσπάθεια έχει γίνει, κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, για την απόρριψη των αποβλήτων αυτών σε αδρανείς περιοχές εξόρυξης ώστε να χρησιμοποιούνται στην αποκατάσταση του φυσικού τοπίου. Δυστυχώς όμως υπάρχει ακόμα καχυποψία για την χρήση των αδρανών υλικών των προερχόμενων από ανακύκλωση ιδίως όσον αφορά σε συγκεκριμένες χρήσεις τους μεταξύ αυτών και ως αδρανή για την παρασκευή σκυροδέματος. Εκτός από τα πολλά περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη που παρουσιάζει, η μεθοδολογία αυτή θα αποτελέσει επανάσταση στον τομέα των κατασκευών. Για το λόγο αυτό είναι σημαντική η πειραματική έρευνα του εν λόγω αντικειμένου και ο καθορισμός ελάχιστων προδιαγραφών για την χρήση τους.

2.2 Απόβλητα εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων

Οι σημαντικότεροι τομείς από την άποψη των παραγόμενων αποβλήτων στην Ευρώπη είναι ο κατασκευαστικός τομέας, που αντιστοιχεί σε 859 εκατομμύρια τόνους ή 32,9% του συνόλου (2008) και αυτός της εξόρυξης, συμβάλλοντας κατά 727 εκατομμύρια τόνους ή 27,8% στο σύνολο των αποβλήτων (εικόνα 2.3). Συνολικά, το 97% των αποβλήτων που παράγονται σε αυτούς τους δύο τομείς, ή 1,53 εκατ. τόνοι, αντίστοιχα, είναι μεταλλεύματα ή χρώματα (από εκσκαφή γης, κατασκευή δρόμων, κατεδαφίσεις, μπάζα εκσκαφών, υπολείμματα από εξόρυξη βράχων) [14].

Παγκοσμίως, η ετήσια παραγωγή οικοδομικών αποβλήτων από κατεδαφίσεις είναι περίπου ίση με την ετήσια παραγωγή αστικών αποβλήτων και εκτιμάται ότι αποτελεί το 25% της συνολικής ποσότητας των στερεών αποβλήτων [16]. Στην Ελλάδα βέβαια ο ρυθμός κατεδαφίσεων κτιρίων είναι χαμηλός και επομένως το πρόβλημα ηπιότερο. Καθώς ένας μεγάλος αριθμός κτιρίων θεωρείται πλέον γερασμένος, προβλέπεται ότι στο μέλλον θα απαιτηθεί ένας σημαντικός αριθμός εργασιών επισκευής ακόμη και κατεδαφίσεων, ο οποίος αναμένεται να αυξήσει σημαντικά τον όγκο των οικοδομικών απορριμμάτων.



Εικόνα 2.3 Συνολική παραγωγή αποβλήτων EU-27 κατά οικονομική δραστηριότητα το 2008 [14 – τροποποίηση ίδια]

Ο όρος απόβλητα εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ) είναι αρκετά γενικός και αναφέρεται σε ένα ιδιαίτερα ευρύ φάσμα υλικών. Τα απόβλητα αυτά εμπίπτουν στην εφαρμογή των διατάξεων των άρθρων 12 και 13 του Ν.1650/1986 καθώς και των άρθρων 15-18 και 24 του Ν.2939/2001 [17].

Γενικά, τα ΑΕΚΚ προέρχονται από τις ακόλουθες δραστηριότητες:

- Οικοδομικές εργασίες: ανεγέρσεις, κατεδαφίσεις, ανακαινίσεις, επισκευές, περιφράξεις και περιστοιχίσεις μεμονωμένων οικιών- κτιρίων και κτιριακών συγκροτημάτων.
- Τεχνικά έργα υποδομών: κατεδαφίσεις, κατασκευές ή και επιδιορθώσεις δρόμων, γεφυρών, σηράγγων, αποχετευτικών δικτύων, πεζοδρομίων, αναπλάσεις χώρων, κ.α..
- Φυσικές/τεχνολογικές καταστροφές: σεισμοί, πλημμύρες, κατολισθήσεις, δυσμενείς κλιματολογικές συνθήκες και λοιπές καταστροφές οικοδομών [17].

Με βάση τα παραπάνω μπορεί να γίνει κατάταξη των ΑΕΚΚ ανάλογα με την προέλευσή τους στις ακόλουθες κατηγορίες:

(α) Υλικά Εκσκαφών: Τα υλικά αυτά μπορεί να είναι μητρικά χώματα εκσκαφών, άμμος, χαλίκι, πέτρες, άργιλος και οποιαδήποτε άλλα υλικά που μπορεί να προκύψουν από εκσκαφές. Τα άχρηστα υλικά εκσκαφών υπάρχουν σχεδόν σε κάθε κατασκευαστική δραστηριότητα και ιδιαίτερα στις υπόγειες κατασκευές και σε έργα της γεωτεχνικής μηχανικής. Τα υλικά αυτά μπορούν να προέλθουν και από φυσικά φαινόμενα, όπως για παράδειγμα από υπερχειλίσεις χειμάρρων, κατολισθήσεις σε δρόμους κ.λπ. Η σύσταση των υλικών εκσκαφών εξαρτάται σημαντικά από τα γεωλογικά δεδομένα.

(β) Υλικά Οδοποιίας: Τα υλικά αυτά μπορεί να είναι ασφαλτος και οποιαδήποτε άλλα υλικά οδοστρώματος, υλικά βάσεων και υποβάσεων, δηλαδή χαλίκι, άμμος, σκύρα και υλικά που προκύπτουν από την αποξήλωση και ανακαίνιση οδών. Τα άχρηστα

υλικά οδοποιίας προέρχονται όχι μόνο από την αποξήλωση και τη συντήρηση των δρόμων αλλά και από τις υπόγειες υδραυλικές και ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πόλεων καθώς και από έργα επιδιόρθωσης αυτών.

(γ) Υλικά Κατεδαφίσεων-Μπάζα: Τα υλικά αυτά μπορεί να είναι χώματα, χαλίκι, κομμάτια ή στοιχεία από μπετόν (σκυροδέματα), επιχρίσματα, πλίνθοι (τούβλα), πλάκες επιστρώσεως, γύψος, άμμος, λαξευμένες πέτρες, θρύμματα ειδών υγιεινής κ.λπ. Τα υλικά κατεδαφίσεων χαρακτηρίζονται από μεγάλη ανομοιογένεια και προκύπτουν από την εξολοκλήρου ή επιμέρους κατεδάφιση των κατασκευών.

(δ) Απόβλητα από Εργοτάξια: Τα απόβλητα αυτά μπορεί να είναι ξύλο, πλαστικό, χαρτί, γυαλί, μέταλλα, καλώδια, χρώματα, βερνίκια, στοιχεία επικαλύψεων προσόψεων, κόλλες και γενικά όλα τα υλικά που προέρχονται από τη λειτουργία εργοταξίων κατασκευής, κατεδάφισης, επισκευής, ενίσχυσης, προσθήκης, επέκτασης και ανακαίνισης. Πρέπει να σημειωθεί ότι μεγάλες ποσότητες άχρηστων υλικών στα εργοτάξια αποτελούν τα υλικά συσκευασίας οικοδομικών υλικών [18].

Στον Ευρωπαϊκό Κατάλογο Αποβλήτων, τα ΑΕΚΚ ταξινομούνται με τον κωδικό 17 όπως αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 2.2 (τα απόβλητα που θεωρούνται επικίνδυνα σημειώνονται με αστερίσκο όπως ορίζει η Απόφαση 2000/532/ΕΚ).

Πίνακας 2.2 Ταξινόμηση ΑΕΚΚ βάσει Ευρωπαϊκού Κατάλογου Αποβλήτων[16]

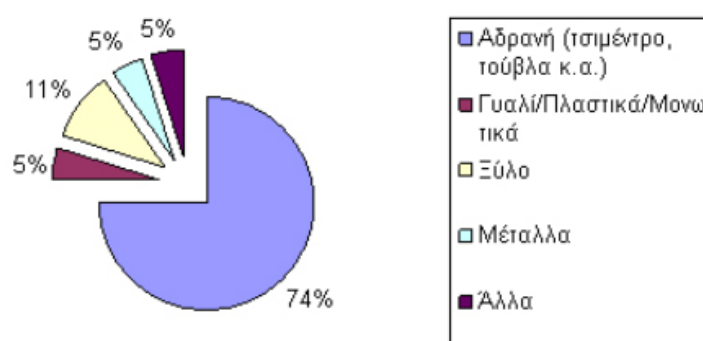
17 00 00	ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΑΠΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΚΑΤΕΔΑΦΙΣΕΙΣ(ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΙ ΚΑΙ ΤΑ ΧΩΜΑΤΑ ΕΚΣΚΑΦΩΝ ΑΠΟ ΡΥΠΑΣΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ)
17 01	Σκυρόδεμα , τούβλα, πλακάκια και κεραμικά
17 01 01	Σκυρόδεμα
17 01 02	Τούβλα
17 01 03	Πλακάκια και κεραμικά
17 01 06*	Μίγμα , ή ξεχωριστό κλάσμα από σκυρόδεμα, τούβλα, κεραμικά και πλακάκια που περιέχουν επικίνδυνα υλικά
17 01 07	Μίγμα από σκυρόδεμα, τούβλα, κεραμικά και πλακάκια διαφορετικό από αυτό που αναφέρεται στη 17 01 06
17 02	Ξύλο, γυαλί και πλαστικό
17 02 01	Ξύλο
17 02 02	Γυαλί
17 02 03	Πλαστικό
17 02 04*	Ξύλο, γυαλί , πλαστικό που περιέχει ή έχει μολυνθεί με επικίνδυνα υλικά
17 03	Μίγματα βιτουμενίου, ανθρακόπισσα και άλλα προϊόντα πίσσας
17 03 01*	Μίγματα βιτουμενίου που περιέχουν ανθρακόπισσα
17 03 02	Μίγματα βιτουμενίου που δεν υπάγονται στην 17 03 01
17 03 03*	Ανθρακόπισσα και προϊόντα πίσσας
17 04	Μέταλλα (περιλαμβάνονται και τα κράματά τους)
17 04 01	Χαλκός, Μπρούτζος, ορείχαλκος
17 04 02	Αλουμίνιο
17 04 03	Μόλυβδος
17 04 04	Ψευδάργυρος
17 04 05	Σίδηρος και χάλυβας
17 04 06	Κασσίτερος
17 04 07	Μίγμα υλικών

17 04 09*	Απόβλητα μετάλλων ρυπασμένα με επικίνδυνα υλικά
17 04 10*	Καλώδια που περιέχουν έλαια , ανθρακόπισσα και άλλα επικίνδυνα υλικά
17 04 11	Καλώδια που δεν υπάγονται στην 17 04 11
17 05	Χώματα (περιλαμβάνονται τα χώματα εκσκαφών από ρυπασμένα εδάφη), πέτρες και μπάζα εκσκαφών
17 05 03*	Χώματα και πέτρες που περιλαμβάνουν επικίνδυνα υλικά
17 05 04	Χώματα και πέτρες που δεν υπάγονται στην 17 05 03
17 05 05*	Μπάζα εκσκαφών που περιέχουν επικίνδυνα υλικά
17 05 06	Μπάζα εκσκαφών που δεν υπάγονται στην 17 05 05
17 05 07*	Άχρηστο φορτίο φορητών οχημάτων (track ballast) που περιέχει επικίνδυνα υλικά
17 05 08	Άχρηστο φορτίο οχημάτων που δεν υπάγεται στη 17 05 07
17 06	Μονωτικά υλικά και κατασκευαστικά υλικά που περιέχουν αμίαντο
17 06 01*	Μονωτικά υλικά που περιέχουν αμίαντο
17 06 03*	Άλλα μονωτικά υλικά που περιέχουν η αποτελούνται από επικίνδυνα υλικά
17 06 04	Μονωτικά υλικά που δεν αναφέρονται στις 17 06 03 και 17 06 01
17 06 05*	Κατασκευαστικά υλικά που περιέχουν αμίαντο
17 08	Κατασκευαστικά υλικά με βάση το γύψο
17 08 01*	Κατασκευαστικά υλικά με βάση το γύψο ρυπασμένα με επικίνδυνα υλικά
17 08 02	Κατασκευαστικά υλικά με βάση το γύψο που δεν υπάγονται στη 17 08 01
17 09	Άλλα υλικά από κατασκευές και κατεδαφίσεις
17 09 01*	Απόβλητα από κατασκευές και κατεδαφίσεις που περιέχουν υδράργυρο
17 09 02*	Απόβλητα από κατασκευές και κατεδαφίσεις που περιέχουν PCB (για παράδειγμα υλικά στεγανοποίησης που περιέχουν PCB, ηλεκτρικοί πυκνωτές που περιέχουν PCB ως μέσα πλήρωσης, προστατευτικές επικαλύψεις ξύλων και μετάλλων που περιέχουν PCB)
17 09 03*	Άλλα απόβλητα από κατασκευές και κατεδαφίσεις (περιλαμβανομένων των αποβλήτων μικτών κατασκευών και κατεδαφίσεων) που περιέχουν επικίνδυνα υλικά
17 09 04	Απόβλητα μικτών κατασκευών και κατεδαφίσεων που δεν αναφέρονται στις 17 09 01 17 09 02 17 09 03

Η σύσταση των ΑΕΚΚ εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, ιδίως όσον αφορά στα απόβλητα κατεδαφίσεων. Μεταξύ των παραγόντων που επηρεάζουν τα ποιοτικά τους χαρακτηριστικά είναι: ο χρόνος κατασκευής, το είδος και η χρήση της κατασκευής, τα βασικά υλικά και οι τεχνικές κατασκευής καθώς και η ιστορική, πολιτιστική και οικονομική αξία αυτής. Είναι φανερό ότι τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή παλαιότερων κτιρίων, και τα οποία τώρα κατεδαφίζονται, καθορίζουν την τωρινή σύσταση των εν λόγω αποβλήτων, ενώ στο μέλλον, η διαφοροποίηση στην επιλογή των δομικών υλικών θα προκαλέσει και αλλαγή στη σύσταση των αποβλήτων που θα προκύπτουν.

Συγκεκριμένα, τα υλικά κατεδαφίσεων στο μέλλον προβλέπεται να περιέχουν αυξημένες ποσότητες σκυροδέματος το οποίο θα αντικαταστήσει τα τούβλα και το ασβεστοκονίαμα, προϊόντα από ασφάλι, περισσότερα μονωτικά υλικά και γενικότερα υλικά που θα απαιτούν πιο εξειδικευμένη διαχείριση για τη σωστή επεξεργασία και πιθανόν ανακύκλωση αυτών. Όσον αφορά στα απόβλητα που παράγονται στα εργοτάξια κατά την κατασκευή νέων κτιρίων, αυτά είναι κυρίως υλικά συσκευασίας, κατεστραμμένα υλικά καθώς και υλικά που δεν χρησιμοποιήθηκαν [18].

Τα υλικά που συνήθως περιέχονται στα ΑΕΚΚ είναι: σκυρόδεμα, τούβλα, πλακάκια και κεραμικά, μίγματα από σκυρόδεμα, τούβλα, πλακάκια και κεραμικά, ξύλο, γυαλί, πλαστικό, κονιάματα, μίγματα ορυκτής ασφάλτου, λιθανθρακόπισσα και προϊόντα πίσσας, χαλκό – ορείχαλκο - μπρούτζο, σίδηρο και χάλυβα, αλουμίνιο, ανάμικτα μέταλλα, καλώδια, χρώματα και πέτρες, μάζα εκσκαφών, μονωτικά υλικά, αμιάντος και αμιαντοτσιμέντο, γύψος και γυψοσανίδες, συνθετικά μονωτικά υλικά (πολυουρεθάνη, αφρολέξ, υαλοβάμβακας), κόλλες, γαλακτώματα, χρώματα – βαφές και ρητίνες. Στο διάγραμμα 2.1 που ακολουθεί απεικονίζεται η μέση σύσταση των ΑΕΚΚ.



Διάγραμμα 2.1 Μέση σύσταση ΑΕΚΚ [18]

Στον πίνακα 2.3 παρατίθενται τα κυριότερα απορρίμματα τα οποία συναντώνται κατά τη διάρκεια των τριών κυρίων διεργασιών από τις οποίες προέρχονται τα ΑΕΚΚ [17].

Πίνακας 2.3 Κύρια παραγόμενα ΑΕΚΚ ανάλογα με την κατασκευή τους [17].

Διεργασία	Απορρίμματα
Κατεδάφιση	Ανάμεικτα. Περιλαμβάνουν σκυρόδεμα, τούβλα, χάλυβα, ξύλο, πλαστικό, καλώδια, μηχανικό εξοπλισμό, κτλ.
Κατασκευή	Ξύλο, μονωτικό υλικό, σωλήνες, απορρίμματα συσκευασιών, σκυρόδεμα, τούβλα.
Ανακαίνιση	Ξύλο, μονωτικό υλικό, σωλήνες, απορρίμματα συσκευασιών, σκυρόδεμα, τούβλα, μηχανικός εξοπλισμός.

Ανάλογα με το είδος των αποβλήτων που παράγονται, τα ΑΕΚΚ μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο ευρείες κατηγορίες, τα αδρανή και τα επικίνδυνα απόβλητα:

- Αδρανή θεωρούνται τα απόβλητα τα οποία δεν υφίστανται καμία σημαντική φυσική, χημική ή βιολογική μετατροπή, δεν διαλύονται, δεν καίγονται, ούτε συμμετέχουν σε άλλες φυσικές ή χημικές αντιδράσεις, δεν διασπώνται βιολογικά, ούτε επιδρούν δυσμενώς σε άλλα υλικά με τα οποία έρχονται σε

επαφή κατά τρόπο ικανό να προκαλέσουν ρύπανση του περιβάλλοντος ή να βλάψουν την υγεία του ανθρώπου.

- Επικίνδυνα είναι τα απόβλητα που περιέχουν ουσίες οι οποίες χαρακτηρίζονται ως τοξικές, εύφλεκτες, καρκινογόνες, ραδιενεργές, ερεθιστικές και μεταλλαξιγόνες, καθώς και κάθε ουσία που μπορεί να προκαλέσει αλλοιώσεις στα νερά, επιφανειακά ή υπόγεια, τον αέρα ή το έδαφος. Το σύνολο των επικίνδυνων αποβλήτων καθώς και ο τρόπος διαχείρισής τους αναφέρεται σε σχετικές διατάξεις και νομοθετικές ρυθμίσεις (Οδηγία 91/689/ΕΟΚ).

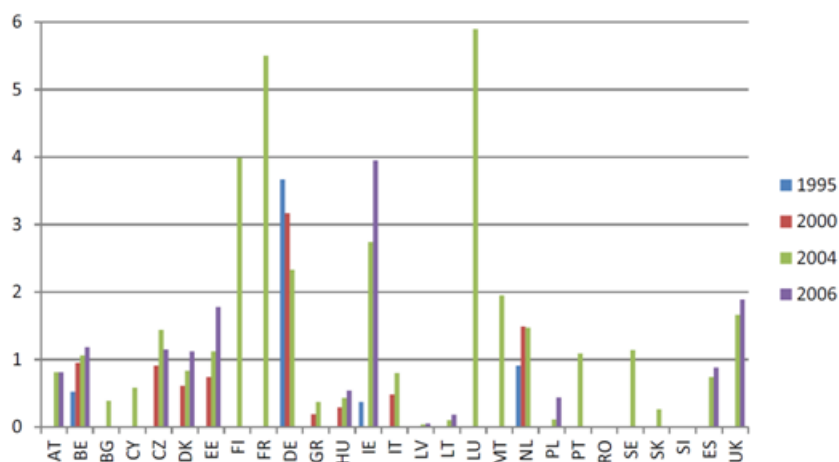
Η πλειοψηφία των ΑΕΚΚ διακρίνονται για τον αδρανή χαρακτήρα τους, ενώ μικρές ποσότητες επικίνδυνων αποβλήτων είναι δυνατόν να περιέχονται σε συγκεκριμένο ρεύμα αποβλήτων. Επίσης, υπάρχουν περιπτώσεις όπου αδρανή υλικά έχουν αναμιχθεί με επικίνδυνα απόβλητα. Στην περίπτωση αυτή τα απόβλητα στο σύνολό τους θεωρούνται επικίνδυνα [17].

Γενικά, ο έλεγχος των επικίνδυνων υλικών είναι πιο εύκολο να πραγματοποιηθεί στους χώρους κατασκευής παρά στους χώρους κατεδάφισης. Επιπλέον, με βάση οικονομικά κριτήρια, θεωρείται ευκολότερος ο έλεγχος και η οργάνωση των υλικών σε κατασκευαστικούς χώρους μεγάλης κλίμακας. Σε κάθε περίπτωση ένα κατάλληλα οργανωμένο σχέδιο πριν τη διαδικασία της κατεδάφισης μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμο [18].

Η καταγραφή των οικοδομικών αποβλήτων ανά τον κόσμο και ειδικότερα στο χώρο της Ευρώπης στον οποίο ανήκει και η Ελλάδα αποτελεί ένα δύσκολο και ποικιλόμορφο έργο. Για να κατανοήσουμε σε κάποιο βαθμό και να μπορέσουμε να συγκρίνουμε την παραγωγή αποβλήτων μεταξύ των διαφόρων χωρών, η σύγκριση μεταξύ χωρών πρέπει να γίνεται ανάλογα με το πληθυσμιακό δυναμικό της. Έτσι τα ποσά υπολογίζονται κατά κεφαλήν (per capita) [14]. Το διάγραμμα 2.2 που ακολουθεί βασίζεται σε στοιχεία από το Ευρωπαϊκό Θεματικό Κέντρο για τη διαχείριση Πόρων και Αποβλήτων (European Topic Centre on Resource and Waste Management) και παρουσιάζει την παραγωγή ΑΕΚΚ στα κράτη/μέλη, σε τόνους ανά κάτοικο.

Παρατηρείται ότι με εξαίρεση τη Γερμανία, σε όλες οι χώρες που υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα για περισσότερα του ενός έτους, παρατηρήθηκε αύξηση της παραγωγής κατά κεφαλήν για την περίοδο 1995 έως 2006 [19].

Φυσικά οι υψηλές γεωγραφικές διακυμάνσεις που παρατηρούνται, δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι αντικατοπτρίζουν τις πραγματικές παραγόμενες ποσότητες ΑΕΚΚ. Σύμφωνα με τους ειδικούς, οι κυριότεροι λόγοι είναι αφενός ότι η καταγραφή των οικοδομικών αποβλήτων δεν είναι συστηματική και ολοκληρωμένη για πολλές από τις χώρες της ΕΕ, αφετέρου ότι υπάρχουν διαφορετικά επίπεδα ελέγχου και αναφοράς αποβλήτων στα μέλη/κράτη, καθώς και διαφορές στους ορισμούς και τους μηχανισμούς υποβολής στατιστικών εκθέσεων των κρατών. Η ποιότητα των διαθέσιμων στοιχείων είναι ως εκ τούτου το βασικό ζήτημα στην εκτίμηση των ποσοτήτων ΑΕΚΚ [20].



Διάγραμμα 2.2 Παραγωγή ΑΕΚΚ κατά κεφαλήν στην Ευρωπαϊκή Ένωση [19]

Η διακύμανση των ποσοτήτων των οικοδομικών αποβλήτων μεταξύ των χωρών εξαρτάται από: οικονομικούς λόγους, τις αρχιτεκτονικές - κατασκευαστικές συνήθειες και λοιπά τεχνικά θέματα [14]. Επιπλέον, πολύ σημαντικό ρόλο στην παραγωγή τους παίζει η ανάπτυξη την κατασκευαστικής δραστηριότητας. Στην Ευρώπη, από το 1998 περίπου, ο τομέας των κατασκευών παρουσίαζε μια σταθερή ανοδική πορεία, αλλά με την οικονομική και χρηματοπιστωτική κρίση το 2007 άρχισε να μειώνεται αρκετά εντυπωσιακά. Μέσα σε τρία χρόνια το επίπεδο του συνόλου των κατασκευών στην ΕΕ-27 μειώθηκε στο επίπεδο που ήταν το 1999 δηλαδή 8 χρόνια πριν την κρίση.

Η Ελλάδα τα τελευταία χρόνια αντιμετώπισε μεγάλο ποσοστό ύφεσης των οικοδομικών δραστηριοτήτων γεγονός που οδηγεί σε μειωμένο ποσοστό παραγωγής ΑΕΚΚ σε σχέση με τις υπόλοιπες χώρες. Οι εκτιμήσεις για την Ελλάδα (από την ελληνική στατιστική εταιρεία - ΕΛ.ΣΤΑΤ.) δείχνουν έως -67% μείωση στην παραγωγή των ΑΕΚΚ μεταξύ του 2010 και του 2020 (πίνακας 2.4) [21].

Πίνακας 2.4 Εκτιμήσεις για την παραγωγή ΑΕΚΚ στην Ελλάδα [21].

ΕΤΟΣ	ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ (χιλιάδες t)
	Εξέλιξη παραγωγής ως το 2020
2010	2.080
2011	1.310
2012	810
2013	590
2014	520
2015	480
2020	690
ΜΕΤΑΒΟΛΗ 2010-2020	-67%

Το πρόβλημα οφείλεται αρχικά στην έλλειψη ενός οργανωμένου δικτύου συλλογής και αξιοποίησης των υλικών αυτών, με αποτέλεσμα η διαχείρισή τους σήμερα να γίνεται αποσπασματικά, δημιουργώντας μεγάλα προβλήματα στο περιβάλλον εξαιτίας της ανεξέλεγκτης διάθεσής τους [22].

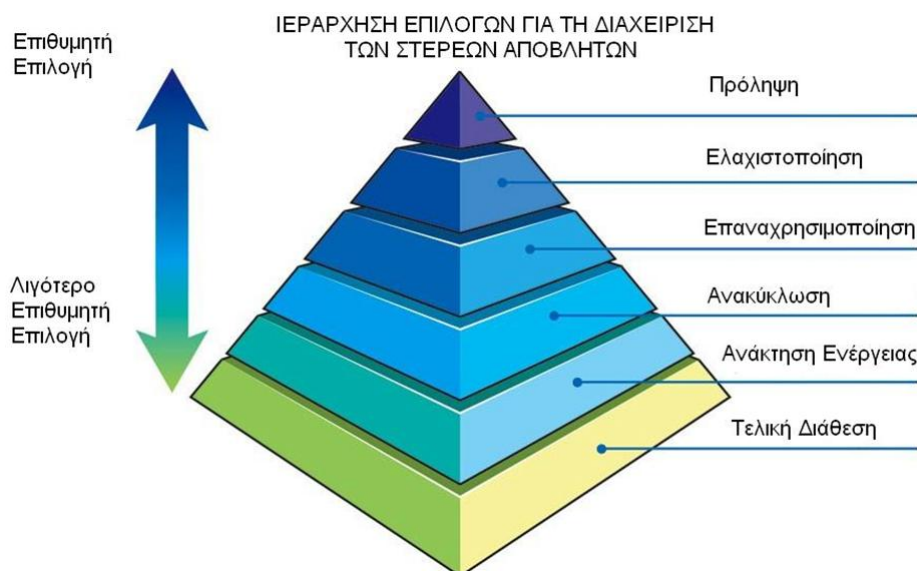
Οι περιορισμένες δράσεις είναι εξαιρετικά εύθραυστες και εξαρτώνται από την προθυμία των υπευθύνων της κατασκευής. Παράλληλα, αρνητικό ρόλο έπαιξε η απουσία έως προσφάτως του απαιτούμενου νομοθετικού πλαισίου για τη διαχείριση αυτών.

2.2.1 Νομοθετικό πλαίσιο στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Η κοινοτική πολιτική για την προστασία του περιβάλλοντος ξεκίνησε ουσιαστικά με τη Σύνοδο κορυφής του Παρισιού το 1974. Ακολούθησαν τα «προγράμματα δράσης» της Κοινότητας και ήδη από το 1975 προβλέπονται στον κοινοτικό προϋπολογισμό κονδύλια για την προστασία του περιβάλλοντος. Τα βασικότερα σημεία της περιβαλλοντικής πολιτικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι τα εξής:

- Η πρόληψη είναι προτιμότερη από τη λήψη διορθωτικών μέτρων
- Τα περιβαλλοντικά προβλήματα πρέπει να αντιμετωπίζονται στην πηγή τους
- Ο ρυπαίνων πρέπει να πληρώνει το κόστος των μέτρων που θα ληφθούν για την προστασία του περιβάλλοντος
- Η περιβαλλοντική πολιτική πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και να αποτελεί τμήμα των άλλων πολιτικών της Ευρωπαϊκής Κοινότητας.

Ολόκληρη η περιβαλλοντική πολιτική της Ε.Ε. βασίζεται στην αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει». Οι πληρωμές μπορεί να πραγματοποιηθούν με τη μορφή επενδύσεων για να επιτευχθεί συμμόρφωση προς αυστηρότερα πρότυπα ή με τη μορφή φόρου επιβαλλόμενου στις επιχειρήσεις ή στους καταναλωτές που χρησιμοποιούν μη οικολογικά προϊόντα.



Εικόνα 2.4 Αρχές διαχείρισης στερεών αποβλήτων [18]

Όταν οι κίνδυνοι που απειλούν το περιβάλλον είναι περισσότερο δυνητικοί παρά αποδεδειγμένα υπαρκτοί, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εφαρμόζει αυτό που είναι γνωστό ως «αρχή της προφύλαξης», δηλαδή προτείνει μέτρα προστασίας, αν ο κίνδυνος φαίνεται πραγματικός, ακόμα και αν δεν υπάρχει απόλυτη επιστημονική

βεβαιότητα. Ειδικότερα η διαχείριση των στερεών αποβλήτων, βάση των κοινοτικών οδηγιών θα πρέπει να βασίζεται στις εξής αρχές:

1) Αρχή της πρόληψης ή και μείωσης των παραγόμενων αποβλήτων: Βασικό ζήτημα της πρόληψης παραγωγής απορριμμάτων αποτελεί η εκτίμηση των επιπτώσεων από το στάδιο της εξαγωγής παρθένων πρώτων υλών, της επεξεργασίας, μεταποίησης, μεταφοράς και χρήσης.

2) Αρχή επαναχρησιμοποίησης των υλικών: Ο κατασκευαστής οφείλει να εξασφαλίζει τα μέσα, όχι μόνο για να περιορίσει τη δημιουργία αποβλήτων, αλλά και για τη δημιουργία προϊόντων ώστε να διευκολύνεται η επαναχρησιμοποίηση και ανάκτησή τους.

3) Αρχή ανακύκλωσης και αξιοποίησης των υλικών: Η ανάκτηση από τα απορρίμματα αποτελεί τον πυρήνα κάθε αειφόρου πολιτικής διαχείρισής τους. Αυτό σημαίνει ότι σε περιπτώσεις όπου η δημιουργία τους δεν μπορεί να αποφεύγεται, θα πρέπει να επαναχρησιμοποιούνται ή να υποβάλλονται σε διαδικασίες ανάκτησης υλικών. Βασική διαδικασία για την ανάκτηση των υλικών, είναι ο διαχωρισμός τους στην πηγή. Σημαντική επίσης προϋπόθεση αποτελεί για την οικονομική βιωσιμότητα συστημάτων ανακύκλωσης και η δημιουργία αγορών για τα προϊόντα που θα προκύψουν.

4) Αρχή ανάκτησης ενέργειας: Στις περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η ανάκτηση υλικών λόγω τεχνικών περιορισμών, θα πρέπει να οδηγούνται τα απόβλητα με σημαντικό θερμικό περιεχόμενο σε μονάδες καύσης με στόχο την ανάκτηση ενέργειας, ώστε να διατεθεί τελικώς μόνο το κλάσμα που δεν δύναται να αξιοποιηθεί.

5) Αρχή της ασφαλούς διάθεσης: Η απόρριψη στερεών αποβλήτων σε χώρους διάθεσης έχει βαρύτερες επιπτώσεις στο περιβάλλον και θα πρέπει να επιλέγεται ως έσχατη λύση. Χρησιμοποιείται εκτενώς μιας και είναι η οικονομικότερη λύση, αλλά οι πρόσφατες νομοθετικές διατάξεις έχουν ως μεσοπρόθεσμο στόχο να καταλήγουν σε χώρους διάθεσης μόνο τα μη ανακτήσιμα και αδρανή απόβλητα.

Η πιο πρόσφατη νομοθετική ρύθμιση για τα απόβλητα είναι η οδηγία πλαίσιο 2008/98/EK, η οποία έπρεπε να ενσωματωθεί στο εθνικό δίκαιο των κρατών μελών ως το Δεκέμβριο του 2010 [18] και μεταξύ άλλων θέτει ως στόχο η ανακύκλωση των αστικών αποβλήτων και των αποβλήτων από τον κατασκευαστικό τομέα και των τομέα κατεδαφίσεων να φτάσει το 50% και 70% αντίστοιχα μέχρι το 2015 και το 2020. Σύμφωνα με την Οδηγία, ο δρόμος για να φθάσουμε στο επιθυμητό επίπεδο ανακύκλωσης, αναπόφευκτα ξεκινάει από τη βιώσιμη διαχείριση των αποβλήτων, με στόχο την μείωση των περιβαλλοντικών και κοινωνικών επιπτώσεων, που σχετίζονται με την παραγωγή τους, μέσω της ανάκτησης και της ανακύκλωσης [10].

2.2.2 Νομοθετικό πλαίσιο στην Ελλάδα

Η πρώτη διάταξη για τη διαχείριση των αποβλήτων στην Ελλάδα, ήταν η ΥΑ ΕΙΒ/301/64 «περί συλλογής, αποκομιδής και διάθεσης απορριμμάτων», η οποία και καθόριζε τις τεχνικές προδιαγραφές για τη διαχείριση των απορριμμάτων και πιο συγκεκριμένα για τη συλλογή αλλά και τη διάθεση αυτών.

Η πρώτη προσπάθεια προσαρμογής της Ελληνικής Νομοθεσίας για τη διαχείριση των απορριμμάτων με την αντίστοιχη Κοινοτική έγινε με την ΚΥΑ 49541/1424/86 «Στερεά απόβλητα σε συμμόρφωση με την Οδηγία 75/442/ΕΟΚ». Με την ΚΥΑ αυτή, διατυπώνονται οι βασικές αρχές που πρέπει να διέπουν τη διαχείριση των απορριμμάτων, ώστε να μην τίθεται σε κίνδυνο, άμεσα ή έμμεσα η Δημόσια Υγεία και να μην δημιουργούνται βλάβες στο περιβάλλον, ενώ περιγράφεται για πρώτη φορά η αναγκαιότητα σύνταξης Σχεδίων Διαχείρισης, καθώς και οι διαδικασίες που πρέπει να τηρούνται.

Πολλά χρόνια αργότερα ο Ν. 2939/2001 διαμορφώνει το θεσμικό πλαίσιο για την εναλλακτική διαχείριση συσκευασιών και άλλων προϊόντων ενώ παράλληλα θεσπίζονται συγκεκριμένοι ποσοτικοί στόχοι και χρονικά όρια για την προσέγγισή τους [148].

Ο νόμος αυτός εναρμονίζεται με τις διατάξεις της Οδηγίας 94/62/ΕΚ για τις συσκευασίες και τα απόβλητα της συσκευασίας. Σκοπός του νόμου είναι η θέσπιση μέτρων για τη διαχείριση των συσκευασιών και άλλων προϊόντων, στα οποία ανήκουν και τα απόβλητα από εκσκαφές, κατασκευές και κατεδαφίσεις, με στόχο την πρόληψη δημιουργίας τους, την επαναχρησιμοποίηση, την ανακύκλωση ή αξιοποίησή τους. Όσον αφορά τους ποσοτικούς στόχους που θέτει ο νόμος σχετικά με την ανάκτηση και ανακύκλωση των αποβλήτων άλλων προϊόντων, δεν καθορίζονται ρητά, παραπέμποντας σε σχετικό ΠΔ, το οποίο τελικά θεσμοθετήθηκε τελικά το 2010 (ΦΕΚ 1312/24.08.2010 - ΚΥΑ 36259/1757/Ε103/2010) [23].

Η ΚΥΑ 36259/1757/Ε103/2010 «Μέτρα, όροι και πρόγραμμα για την εναλλακτική διαχείριση των αποβλήτων εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ)» αποσκοπούσε στην εφαρμογή της κείμενης νομοθεσίας, ώστε με την κατά προτεραιότητα πρόληψη δημιουργίας αποβλήτων από οικοδομικές εργασίες, έργα τεχνικών υποδομών, φυσικές και πάσης φύσεως καταστροφές, την επαναχρησιμοποίηση, την ανακύκλωση και άλλες μορφές αξιοποίησης να μειώνεται η ποσότητα και επικινδυνότητα των προς διάθεση αποβλήτων και η βελτίωση της περιβαλλοντικής επίδοσης όλων των οικονομικών παραγόντων που συμμετέχουν τόσο στην παραγωγή, όσο και στην διαχείριση των υλικών αυτών. Παράλληλα, καθορίζονταν καθορίζονται συγκεκριμένες υποχρεώσεις για τους διαχειριστές ΑΕΕΚ. [18].

Από τη νομοθεσία αυτή εξαιρούνται:

- τα επικίνδυνα απόβλητα
- τα υλικά εκσκαφών και κατεδαφίσεων που έχουν υποστεί ρύπανση από προηγούμενη χρήση ή έχουν αναμιχθεί με επικίνδυνες ουσίες ή ύλες.
- τα απόβλητα έρευνας, εξαγωγής, επεξεργασίας και εναποθήκευσης των μεταλλευτικών πόρων και των βιομηχανικών ορυκτών καθώς και τα προερχόμενα από την εκμετάλλευση λατομείων.
- τα προϊόντα εκσκαφής τα οποία με βεβαιότητα θα επαναχρησιμοποιηθούν στη φυσική τους κατάσταση στο χώρο από τον οποίο προήλθαν [24].

Επιπλέον, για την αξιοποίηση των αποβλήτων από κατασκευές, εκσκαφές και κατεδαφίσεις, εξαιρουμένων των κατηγοριών 17 05 04 και 17 05 06 του Ευρωπαϊκού

Καταλόγου Αποβλήτων (χώματα και πέτρες) σύμφωνα με την απόφαση 2001/118/ΕΚ, τίθενται οι ακόλουθοι συγκεκριμένοι ποσοτικοί στόχοι:

1. μέχρι την 1η Ιανουαρίου 2012, η επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση, ανάκτηση άλλων υλικών αποβλήτων και αξιοποίηση πρέπει να ανέλθει κατ' ελάχιστον στο 30%, ως προς το συνολικό βάρος των παραγομένων ΑΕΚΚ στη χώρα
2. μέχρι την 1η Ιανουαρίου 2015, πρέπει να ανέλθει κατ' ελάχιστον στο 50%
3. μέχρι την 1η Ιανουαρίου 2020 πρέπει να ανέλθει κατ' ελάχιστον στο 70% [25].

Για τον υπολογισμό των ποσοτικών στόχων ακολουθείται η ακόλουθη μέθοδος [21]:

$$\% \text{ Ανάκτηση ΑΕΚΚ} = \frac{\text{Ποσότητα ΑΕΚΚ που υποβλήθηκαν σε ανάκτηση υλικών}}{\text{Συνολική ποσότητα παραγόμενων ΑΕΚΚ}}$$

Ακολούθησαν και λοιπές νομοθετικές ρυθμίσεις για τη διαχείριση των ΑΕΚΚ, μεταξύ των οποίων ο Ν.4030/2011 «Νέος τρόπος έκδοσης αδειών δόμησης, ελέγχου κατασκευών και λοιπές διατάξεις», βάσει του άρθρου 40 του οποίου (θέματα σχετικά με ΑΕΚΚ) επιτρέπεται η εγκατάσταση μονάδων επεξεργασίας αποβλήτων από εκσκαφές, κατασκευές και κατεδαφίσεις (ΑΕΚΚ) σε ανενεργά λατομεία ανεξαρτήτως του ιδιοκτησιακού καθεστώτος τους, επιτρέπεται η απόθεση προϊόντων εκσκαφών από την κατασκευή δημόσιων έργων, σε ανενεργά λατομεία για τη μερική ή ολική αποκατάστασή τους και τέλος καταργείται η εξαίρεση των αποβλήτων της κατηγορίας 17 05 06 του Ευρωπαϊκού Καταλόγου Αποβλήτων από τους ποσοτικούς στόχους για την αξιοποίηση των αποβλήτων [26].

2.2.3 Διαχείριση αποβλήτων εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων

Αναφορικά με τη διαχείριση των ΑΕΚΚ η κοινοτική νομοθεσία (Οδηγία 1999/31) απαγορεύει τη διάθεση αδρανών υλικών και εν γένει μπαζών στους ΧΥΤΑ και επιβάλλει τη διάθεση τους σε ανεξάρτητους χώρους ταφής αδρανών. Στην Ελλάδα το θεσμικό πλαίσιο καθορίζεται όπως έχει αναφερθεί ήδη από το Ν. 2939/2001, όπως αυτός τροποποιήθηκε με το Ν. 3854/10 και την ΚΥΑ 36259/2010.

Προβλέπεται η δημιουργία συστημάτων εναλλακτικής διαχείρισης στον ευρύτερο κλάδο των κατασκευών, οι οποίες θα αναλαμβάνουν τη συλλογή, ανακύκλωση ή επαναχρησιμοποίηση των μπαζών και λοιπών υλικών. Οι εταιρείες αυτές θα πρέπει να πληρούν συγκεκριμένες προδιαγραφές και για τον λόγο αυτό αδειοδοτούνται από το κράτος [18].

Παραγωγοί ΑΕΚΚ είναι οι κατασκευαστές ή οι εργολήπτες τεχνικών και οικοδομικών έργων, οι προμηθευτές προϊόντων του τομέα δομικών κατασκευών, οι οργανισμοί τοπικής αυτοδιοίκησης, άλλοι δημόσιοι και ιδιωτικοί οργανισμοί και ο κύριος του έργου. Οι παραγωγοί ΑΕΚΚ οφείλουν, κατά το σχεδιασμό ενός έργου, να λαμβάνουν υπόψη ότι η αποξήλωση των κατασκευαστικών υλικών θα πρέπει να γίνει

κατά τέτοιον τρόπο ώστε να διευκολύνετε η αξιοποίηση και ιδίως η ανακύκλωση των υλικών αυτών με στόχο την επαναχρησιμοποίηση τους.

Κατά τον σχεδιασμό ενός έργου, ο κατασκευαστής (παραγωγός ΑΕΚΚ) θα πρέπει να υποβάλει, πριν από την έναρξη των οικοδομικών εργασιών ή των έργων τεχνικών υποδομών, στοιχεία για τη Διαχείριση των Αποβλήτων (Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων - ΣΔΑ) που θα παραχθούν από τις δραστηριότητες τους. Μεταξύ των πληροφοριών που θα παρέχονται περιλαμβάνονται:

- το όνομα και τη διεύθυνση του διαχειριστή
- τον τόπο και τη δραστηριότητα προέλευσης των αποβλήτων
- τον κύριο του έργου
- τη συνολική ποσότητα κατ'όγκο (κ.ο.) ή κατά βάρος (κ.β.) των αποβλήτων που εκτιμάται ότι θα παραχθεί από την υλοποίηση του έργου
- τις ποσότητες κ.ο ή κ.β. ανά κατηγορία αποβλήτων, σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Κατάλογο Αποβλήτων, που εκτιμάται ότι θα παραχθούν
- εκτίμηση της ποσότητας των υλικών που μπορούν να αξιοποιηθούν
- εκτίμηση της ποσότητας των καταλοίπων για υγειονομική ταφή
- επικυρωμένο αντίγραφο της σύμβασης του διαχειριστή με εγκεκριμένο σύστημα εναλλακτικής διαχείρισης ΑΕΚΚ ή υπεύθυνη δήλωση του διαχειριστή ότι θα συνεργασθεί με εγκεκριμένο σύστημα [27].

Διαχειριστές ΑΕΚΚ είναι οι ανάδοχοι των δημόσιων ή ιδιωτικών έργων (κατασκευαστές, εργολήπτες τεχνικών και οικοδομικών έργων, φορείς εκμίσθωσης εξοπλισμού και παροχής υπηρεσιών προσωρινής αποθήκευσης, συλλογής και μεταφοράς των ΑΕΚΚ) ή ο κύριος του έργου εφόσον δεν έχει αναθέσει το έργο σε ανάδοχο. Οι διαχειριστές οφείλουν:

1. να είναι κάτοχοι αδείας συλλογής /μεταφοράς (ΚΥΑ 50910/2727/2003)
2. να έχουν συμβληθεί με ένα τουλάχιστον εγκεκριμένο σύστημα εναλλακτικής διαχείρισης ΑΕΚΚ
3. να διευκολύνουν την αποξήλωση, την επαναχρησιμοποίηση, την αξιοποίηση και ιδίως την ανακύκλωση των κατασκευαστικών υλικών
4. να μεταφέρουν σε τακτά διαστήματα τα ΑΕΚΚ και να τα παραδίδουν σε εγκεκριμένες μονάδες επεξεργασίας ή σε εγκεκριμένους χώρους αξιοποίησης ή διάθεσης με μεταφορικά μέσα που διαθέτουν κατάλληλα καλύμματα
5. να εκδίδουν τα νόμιμα παραστατικά που συνοδεύουν τα ΑΕΚΚ
6. να καταβάλουν το τέλος επεξεργασίας στο σύστημα
7. να παραλαμβάνουν την βεβαίωση παραλαβής αποβλήτων από το σύστημα και να την υποβάλουν στην επιβλέπουσα το έργο αρχή [28].

Το πρώτο συλλογικό σύστημα εναλλακτικής διαχείρισης (ΣΣΕΔ) μη επικίνδυνων ΑΕΚΚ εγκρίθηκε το 2011 με γεωγραφική εμβέλεια εφαρμογής τους νομούς Θεσσαλονίκης, Πέλλας, Πιερίας, Κιλκίς, Ημαθίας και Χαλκιδικής. Τα επόμενα έτη αδειοδοτήθηκαν και άλλα συστήματα διαχείρισης με αποτέλεσμα σήμερα στη χώρα μας να εδρεύουν εννέα πιστοποιημένα συλλογικά συστήματα εναλλακτικής διαχείρισης ΑΕΚΚ, τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα 2.5 [22].

Πίνακας 2.5 Συλλογικά συστήματα εναλλακτικής διαχείρισης ΑΕΚΚ [22].

Επωνυμία	Αριθ. Απόφασης Έγκρισης ΕΟΑΝ	Γεωγραφική Εμβέλεια Συστήματος
Ανακύκλωση Αδρανών Βορείου Ελλάδος Α.Ε. (ΑΝ.Α.Β.Ε. Α.Ε.)	717/7-12-2011	Ν. Ημαθίας, Ν. Θεσ/νίκης, Ν. Κιλκίς, Ν. Πέλλας, Ν. Πιερίας, Ν. Χαλκιδικής
Σύστημα Ανακύκλωσης Κεντρικής Ελλάδας Ε.Π.Ε. «ΣΑΝΚΕ ΕΠΕ»	66/18-01-2012 426/26-04-2012	Ν. Εύβοιας, Ν. Βοιωτίας, Ν. Αττικής
Εναλλακτική Διαχείριση Προϊόντων Εκσκαφών, Κατεδαφίσεων Α.Ε. «ΣΕΔΠΕΚΑΤ Α.Ε.»	427/26-04-2012	Ν. Αττικής
Ι.ΚΟΥΦΙΔΗΣ-Ι.ΚΤΕΝΙΔΗΣ & ΣΙΑ Ο.Ε.	1050/28-09-2012	Ν. Χαλκιδικής
Ανακύκλωση Αδρανών Μακεδονίας Α.Ε.	1183/19-10-2012	Ν. Ημαθίας, Ν. Θεσ/νίκης, Ν. Κιλκίς, Ν. Πέλλας, Ν. Πιερίας, Ν. Σερρών, Ν. Χαλκιδικής
Ψάρρας - Εναλλακτική Διαχείριση Α.Ε.Κ.Κ. Α.Μ.Κ.Ε.	2174/09-12-2013	Ν. Ημαθίας, Ν. Θεσ/νίκης, Ν. Κιλκίς, Ν. Πέλλας, Ν. Πιερίας, Ν. Σερρών, Ν. Χαλκιδικής
Ανακύκλωση Αδρανών Νότιας Ελλάδας	2204/12-12-2013	Ν. Λακωνίας και Ν. Κυκλάδων
«Αποστολάκης Εμμ. & ΣΙΑ Ο.Ε.» «ΔΙΑΣ Σύστημα Ανακύκλωσης ΑΕΚΚ»	<u>535/1-4-2014</u>	Ν. Ηρακλείου και Ν. Λασιθίου της Περιφέρειας Κρήτης
«ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ Α.Ε.Κ.Κ. ΑΤΤΙΚΗΣ Α.Ε.»	<u>633/15-4-2014</u>	Ν. Αττικής

Εκτός των πιστοποιημένων συστημάτων εναλλακτικής διαχείρισης ΑΕΚΚ υπάρχουν και ιδιωτικές εταιρείες που ασχολούνται με τη διαχείριση και την ανακύκλωση ΑΕΚΚ και οι οποίες συνήθως συνεργάζονται με τα συστήματα αυτά προμηθεύοντας τα με πρώτες ύλες.

2.2.4 Μονάδες διαχείρισης ΑΕΚΚ – Μεθοδολογία διαχωρισμού

Τα απόβλητα που προκύπτουν από την κατεδάφιση κτιρίων εμφανίζουν μεγαλύτερο βαθμό δυσκολίας όσον αφορά στη διαχείρισή τους, συγκριτικά με τα απόβλητα που προκύπτουν από τις κατασκευές κτιρίων. Σημαντικό πρόβλημα αποτελεί το γεγονός, ότι ο εργολάβος που αναλαμβάνει τις εργασίες κατεδάφισης δεν μπορεί να γνωρίζει εκ των προτέρων τη σύσταση των άχρηστων υλικών που θα

προκύψουν. Αντίθετα, όσον αφορά στα απόβλητα που προκύπτουν από τα εργοτάξια κατασκευαστικής δραστηριότητας, ο εργολάβος γνωρίζει ακριβώς τη σύσταση των υλικών που χρησιμοποιούνται. Έχει τη δυνατότητα να οργανώσει καλύτερα τη διαχείριση των αποβλήτων που προκύπτουν, καθώς και να αντιμετωπίσει τα προβλήματα που πιθανόν να προκύψουν κατά το σχεδιασμό διαχείρισης.

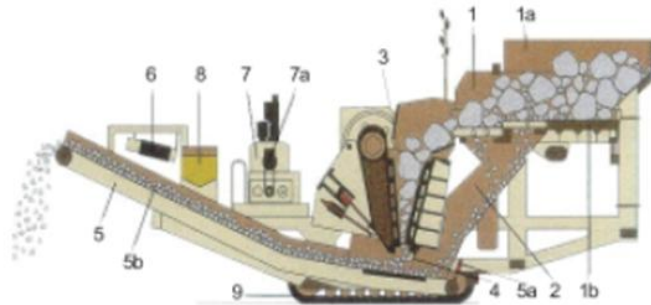
Για την καλύτερη διαχείριση των αποβλήτων από κατεδαφίσεις, κρίνεται ενδεδειγμένη η πρακτική της επιλεκτικής κατεδάφισης. Η επιλεκτική κατεδάφιση, είναι η οργανωμένη απομάκρυνση ή και επεξεργασία συγκεκριμένων υλικών και συστατικών, πριν την έναρξη της διαδικασίας της κατεδάφισης του βασικού σκελετού της κατασκευής. Τα υλικά αυτά πρέπει να απομακρυνθούν είτε λόγω της οικονομικής τους αξίας, είτε γιατί η παρουσία τους ρυπαίνει ή μειώνει την ποιότητα του ρεύματος των αποβλήτων (π.χ. η παρουσία επικίνδυνων ή ανόργανων συστατικών στο ρεύμα των αδρανών αποβλήτων). Τα μεγαλύτερα εμπόδια για τη διάδοση της επιλεκτικής κατεδάφισης, είναι η απαίτηση για ταχύτητα στην κατεδάφιση και η αβεβαιότητα όσον αφορά στη ζήτηση συγκεκριμένων υλικών που θα επαναχρησιμοποιηθούν [18].

Για την ορθή διαχείριση των ΑΕΚΚ, πρέπει μετά την ολοκλήρωση της κατεδάφισης / κατασκευής και δεδομένου ότι το εισερχόμενο ρεύμα είναι ιδιαίτερα ετερογενές, η διεργασία να συνδυαστεί με κάποιο σύστημα διαχωρισμού, απλό ή εξεζητημένο.

Οι διαθέσιμες τεχνολογίες ανακύκλωσης πρακτικά χωρίζονται σε τρία επίπεδα - μεθόδους. Το πρώτο επίπεδο αναφέρεται κυρίως σε μονάδες φορητές (αυτοφερόμενες [29]), μικρής δυναμικότητας, οι οποίες είτε εγκαθίστανται επί τόπου του έργου (*on site*) για την απευθείας ανακύκλωση των υλικών είτε εγκαθίστανται σε σταθερή βάση σε ΧΥΤΑ. Το δεύτερο επίπεδο αποτελεί μια ενδιάμεση κατάσταση και αναφέρεται σε μονάδες με ελαφρώς πιο πολύπλοκο εξοπλισμό χωρίς ιδιαίτερα μεγάλη αύξηση στο κόστος, οι οποίες επιτυγχάνουν και κάποιο βασικό διαχωρισμό (π.χ. μαγνητικός διαχωρισμός, απομάκρυνση ανεπιθύμητων προσμίξεων). Τέλος, το τρίτο επίπεδο περιλαμβάνει μονάδες επεξεργασίας μεγάλης κλίμακας [30] σε μόνιμα συγκροτήματα εγκατεστημένα σε οργανωμένες κεντρικές μονάδες δημόσιες, κοινοτικές ή ιδιωτικές (*off-site*), οι οποίες ανταποκρίνονται στις νέες τεχνολογικές εξελίξεις [29] και περιλαμβάνουν εξεζητημένα συστήματα διαχωρισμού. Επιπλέον, πολλές φορές συνδυάζονται με συστήματα διαλογής στην πηγή, στα οποία χρήσιμα υλικά απομακρύνονται και ταξινομούνται σε σωρούς πριν την κατεδάφιση [30].

Οι αυτοφερόμενες μονάδες διαχείρισης ΑΕΚΚ (εικόνες 2.5 -2.6) μπορούν να επεξεργαστούν ποσότητες από 100 έως 400 m³/h μάζων. Τα συγκροτήματα αυτά αποτελούνται από ένα θραυστήρα μάζων σκυροδέματος, ένα πλευρικό μεταφορέα απόθεσης ακατάλληλων υλικών, θραυστήρα δευτερογενούς θραύσης, συγκρότημα κοσκινίσματος, και ταινιόδρομο επαναφοράς του υπερδιάστατου υλικού από το κόσκινο στο θραυστήρα για συμπληρωματική θραύση. Σε περίπτωση μικρών ποσοτήτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν μικρά αυτοφερόμενα συγκροτήματα (μέχρι 100 m³/h) τα οποία μπορούν να εγκατασταθούν σε στενούς χώρους μέσα σε πόλεις [29].

1. Ανατρεπόμενη καρότσα τροφοδοσίας, με επέκταση (1a) και κυλιόμενο τροφοδότη (1b)
2. Πλαγιά παράκαμψη
3. Θραυστήρας με σιαγόνες
4. Θωράκιση για την προστασία του μάντα
5. Μεταφορική ταινία, με υδραυλικό έλεγχο (5a) και ενισχυμένο μάντα (5b)
6. Μαγνητικός διαχωριστής
7. Κινητήρας με γεννήτρια (7a)
8. Δεξαμενές καυσίμου και λαδιού
9. Ερπύστριες



Εικόνα 2.5 Αυτοφερόμενη μονάδα διαχείρισης ΑΕΚΚ (τμήματα που την απαρτίζουν)[31]

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης των αυτοφερόμενων μονάδων διαχείρισης επιτόπου του έργου είναι το χαμηλότερο κόστος διαχείρισης και μεταφοράς των υλικών, το χαμηλότερο κόστος αγοράς μηχανημάτων και επιπλέον στην περίπτωση που τα παραγόμενα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο ίδιο εργοτάξιο, αυτόματα μειώνονται οι οχλήσεις λόγω της μεταφοράς των υλικών. Οι μονάδες αυτές εντούτοις παρουσιάζουν μειονεκτήματα μεταξύ των οποίων είναι: μικρότερη ευκινησία όσον αφορά στην επιλογή του χρόνου και του τόπου χρήσης των υλικών που παράγονται, υψηλότερο επίπεδο ηχορύπανσης και τοπικής ρύπανσης στο χώρο του έργου, απαίτηση χώρου για τα μηχανήματα επεξεργασίας των υλικών και πιθανότητα καθυστέρησης στην ολοκλήρωση της κατασκευής [18].



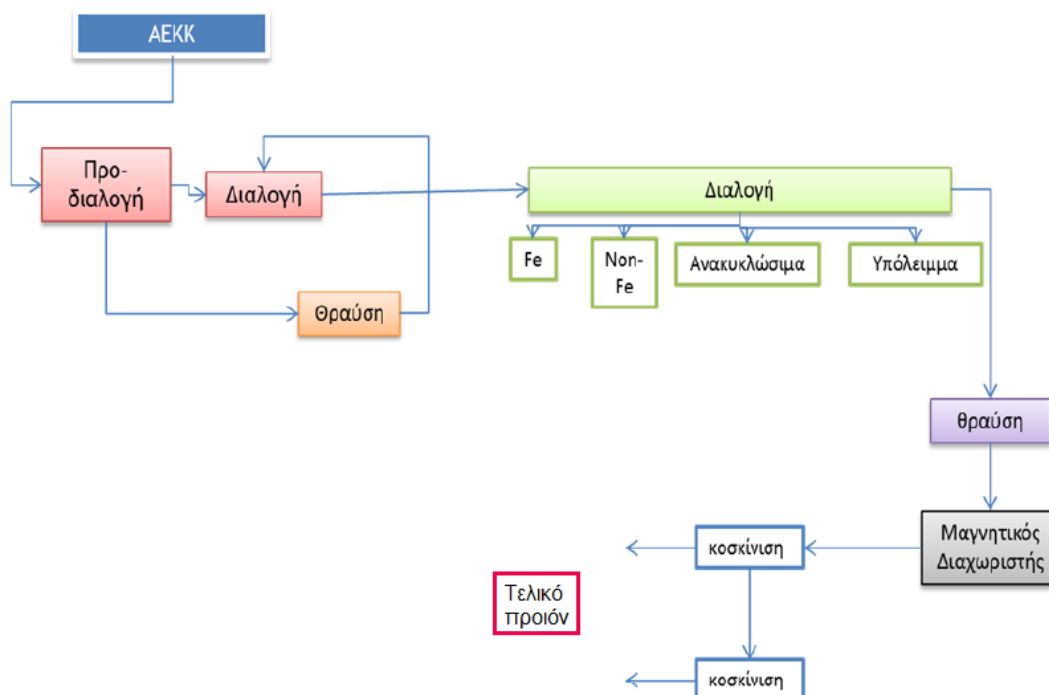
Εικόνα 2.6 Αυτοφερόμενη μονάδα διαχείρισης ΑΕΚΚ [31]

Τα μόνιμα συγκροτήματα διαχείρισης, είναι ολοκληρωμένα εργοστάσια παραγωγής με εξελιγμένα μηχανήματα καθαρισμού, θραύσεως, διαλογής μηχανικής ή με μαγνήτες, διαχωρισμού, κοσκινίσματος, πλύσεως του λεπτόκοκκου υλικού και ελέγχου της παραγωγής [29]. Το διάγραμμα 2.3 είναι ένα χαρακτηριστικό διάγραμμα ροής διαχείρισης ΑΕΚΚ που παρουσιάζει τις διάφορες φάσεις από τις οποίες μπορεί να αποτελούνται οι μόνιμες μονάδες διαχείρισης.

Σύμφωνα με το διάγραμμα αυτό οι μόνιμες μονάδες διαχείρισης ΑΕΚΚ δύνανται να περιλαμβάνουν ορισμένα ή το σύνολο των ακόλουθων σταδίων λειτουργίας:

1. Αρχικός οπτικός έλεγχος εισερχομένου φορτίου στη μονάδα επεξεργασίας.
2. Ζύγιση με γεφυροπλάστιγγα κατά τη μεταφορά προς και από την μονάδα και διαρκής καταγραφή του τύπου και της ποσότητας των υλικών που εισέρχονται και ανακυκλώνονται στην εγκατάσταση.

3. Προσωρινή αποθήκευση σε κώνους προσωρινής αποθήκευσης ομοειδών χαρακτηριστικών.
4. Διαλογή υλικών, μια διαδικασία που διαχωρίζει τα ανακυκλώσιμα υλικά (π.χ. χαρτί, γυαλί, πλαστικό, ξύλο), τα οποία αποθηκεύονται σε σκαφοκοντέϊνερ ως ότου οδηγηθούν σε αντίστοιχες μονάδες ανακύκλωσης.
5. Θραύση, όπου πραγματοποιείται διαχωρισμός ή θρυμματισμός των υλικών σε μικρότερης κοκκομετρίας υλικά.
6. Μαγνητικός διαχωρισμός των χαλύβδινων και μεταλλικών μερών (π.χ. σπλισμός σκυροδέματος).
7. Κοσκίνιση και διαχωρισμός σε διάφορες κοκκομετρικές διαβαθμίσεις.
8. Αποθήκευση των τελικών προϊόντων σε κώνους απόθεσης [32].



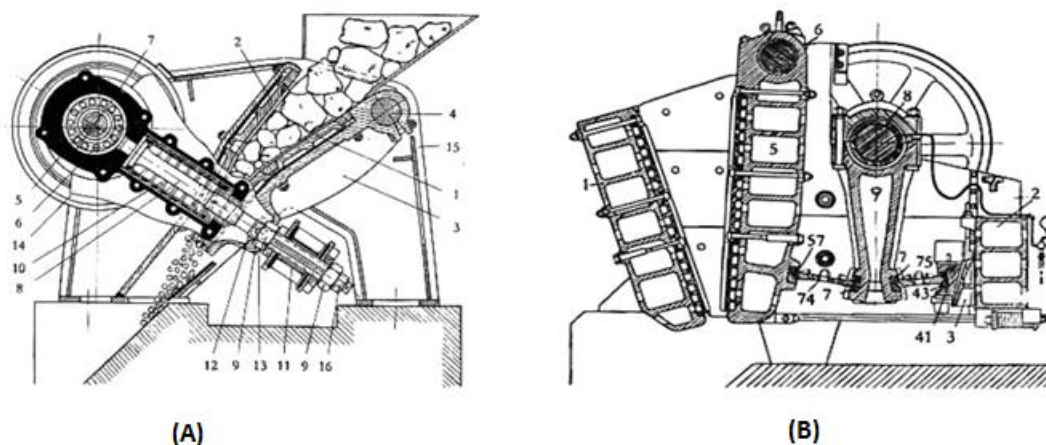
Διάγραμμα 2.3 Διάγραμμα ροής διαχείρισης ΑΕΚΚ [32]

Αναφορικά με τη θραύση του υλικού, αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με θραυστήρες κρούσης ή θραυστήρες με σιαγόνες. Η επιλογή του είδους του θραυστήρα εξαρτάται από τις υπάρχουσες συνθήκες αλλά και από την επιθυμητή μορφή του παραγόμενου προϊόντος. Ο θραυστήρας κρούσης (εικόνα 2.7 (Α)) δίνει ένα πιο σταθερό και προβλέψιμο μίγμα υλικών, όπου οι κόκκοι χαρακτηρίζονται για τις κοφτερές ακμές τους. Η λειτουργία αυτή είναι παρόμοια με αυτή μιας συμβατικής μηχανής κοπής γκαζόν.

Οι θραυστήρες με σιαγόνες (εικόνα 2.7 (Β)) είναι σφηνοειδής μορφής, όπου μία από τις δύο πλευρές κινείται προς την άλλη και συνθλίβει τα υλικά. Η τροφοδοσία των υλικών γίνεται στο πάνω μέρος, ενώ το στενό άκρο της εξόδου δύναται να καθορίσει και τη φύση των διασπασμένων υλικών.

Η επιλογή ανάμεσα στα δυο είδη θραυστήρων εναπόκειται στο υπεύθυνο λειτουργίας της μονάδας επεξεργασίας και κυρίως καθορίζεται από τη χρήση για την οποία προορίζεται το παραγόμενο κονιορτοποιημένο υλικό. Οι θραυστήρες κρούσης

έχουν μικρότερο κόστος αγοράς αλλά μεγαλύτερο κόστος λειτουργίας ειδικά όταν επεξεργάζονται σκληρά υλικά όπως το σπλισμένο σκυρόδεμα. Γενικότερα οι θραυστήρες κρούσης έχουν σχεδιαστεί για την επεξεργασία υψηλότερων ροών υλικών σε σχέση με τους θραυστήρες με σιαγόνες [18].



Εικόνα 2.7 Θραυστήρας κρούσης (A) και θραυστήρας με σιαγόνες (B) [33].

Τα πλεονεκτήματα των μόνιμων συγκροτημάτων διαχείρισης ΑΕΚΚ (εικόνα 2.8) συνοψίζονται στα ακόλουθα: είναι ευκολότερο να μετριαστούν οι όποιες αρνητικές συνέπειες στις γειτονικές περιοχές, χαμηλότερο το κόστος λειτουργίας των μηχανημάτων ανά τόνο αποβλήτων, πιο πρακτικό να χρησιμοποιείται εξοπλισμός μεγαλύτερης κλίμακας και δυναμικότητας και πιο εύκολος ο έλεγχος της ποιότητας του τελικού προϊόντος. Από την άλλη πλευρά, η μεθοδολογία αυτή απαιτεί: να πραγματοποιείται έλεγχος της διεργασίας κατεδάφισης (ώστε να μην έρχονται άγνωστα υλικά στο χώρο), υψηλότερο κεφάλαιο αγοράς μηχανημάτων και υψηλότερο κόστος διαχείρισης και μεταφοράς των υλικών.



Εικόνα 2.8 Μόνιμο συγκρότημα διαχείρισης ΑΕΚΚ [27].

Πολλές φορές για την διαχείριση των ΑΕΚΚ ακολουθούνται και οι δύο μεθοδολογίες παράλληλα ανάλογα με την ποσότητα που παράγεται και το κόστος διαχείρισής του. Οι τιμές κόστους διαφέρουν ανάλογα με την τοποθεσία και τις συνθήκες, που επικρατούν στην περιοχή. Δίνονται ορισμένα ενδεικτικά μεγέθη από τη διεθνή βιβλιογραφία. Η επένδυση για την εγκατάσταση συγκροτήματος ανακύκλωσης εξαρτάται από το μέγεθος και τη σύνθεση της εγκατάστασης [29]. Στη χώρα μας, τα τελευταία χρόνια, είναι συνηθέστερη η χρήση των μόνιμων συγκροτημάτων διαχείρισης ΑΕΚΚ ενώ πριν τη θέσπιση της σχετικής νομοθεσίας τα υλικά αυτά απορρίπτονταν σε χώρους ανεξέλεγκτης διάθεσης αποβλήτων (ΧΑΔΑ) ή χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ).

2.2.5 Επαναχρησιμοποίηση – Ανακύκλωση ΑΕΚΚ

Η λειτουργία αυτών των συγκροτημάτων διαχείρισης ΑΕΚΚ, σε συνδυασμό με το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο διαχείρισης των υλικών αυτών στοχεύει στην επαναχρησιμοποίηση των αποβλήτων αυτών. Τα τελικά προϊόντα των εταιρειών αυτών είναι κλάσματα αδρανών υλικών διαφορετικής κοκκομετρίας. Συνήθως, τα διάφορα κλάσματα είναι απαλλαγμένα από πρόσμικτα (γυαλί, πλαστικά, χαρτί, σίδηρο) χωρίς σχεδόν καθόλου χρώμα [27].

Έχουμε ήδη αναφέρει ότι σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία έχει τεθεί ο στόχος της επαναχρησιμοποίησης, ανακύκλωσης και ανάκτησης του 70% ως προς το συνολικό βάρος των παραγόμενων ΑΕΚΚ στη χώρα μας έως το 2020. Με τον τρόπο αυτό, τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων, αντί να αποτελούν βάρος για την κοινωνία και το περιβάλλον, θα μπορούν να γίνουν ένας πόρος που θα ανακυκλώνεται και επαναχρησιμοποιείται στο πλαίσιο του τομέα των κατασκευών μειώνοντας έτσι την κατανάλωση πρώτων υλών.

Δυστυχώς, για οικονομικούς, πολιτιστικούς και τεχνικούς λόγους παρουσιάζονται εμπόδια στην επίτευξη του στόχου αυτού:

1. Οικονομικά εμπόδια: μεγάλη διαθεσιμότητα και χαμηλό κόστος πρώτων υλών. Τα ΑΕΚΚ αποτελούνται σε μεγάλο ποσοστό από υλικά (σκυρόδεμα, τούβλα, άσφαλτο και άλλα μεταλλευτικά απόβλητα, όπως πέτρες, άμμο, χαλίκι) που είναι εύκολα και τοπικά διαθέσιμα και μπορούν να παραχθούν με χαμηλό κόστος. Ως αποτέλεσμα, η οικονομική ελκυστικότητα των δευτερογενών πρώτων υλών από ανακυκλωμένα ΑΕΚΚ είναι χαμηλή σε σύγκριση με παρθένες πρώτες ύλες.
2. Πολιτιστικοί φραγμοί: εσφαλμένη αντίληψη για την ποιότητα των προϊόντων κυρίως λόγω της έλλειψης πιστοποίησης της ποιότητάς τους.
3. Τεχνικοί λόγοι: αναποτελεσματική διαλογή και μόλυνση της ροής αποβλήτων, κυρίως λόγω του γεγονότος ότι δεν συντελείται επιλεκτική κατεδάφιση και πολλές φορές δεν αποτρέπεται η μόλυνση και επαφή τους με μολυσμένα/επικίνδυνα υλικά τα οποία πρέπει να διαχειριστούν με διαφορετικό τρόπο [14].

Η ανάγκη να υπερνικήσουμε αυτές τις δυσκολίες είναι επιτακτική, αφού ο κατασκευαστικός τομέας έχει εκμεταλλευτεί με εντατικούς ρυθμούς τους φυσικούς πόρους, παράγοντας ποσότητες αποβλήτων τις οποίες το περιβάλλον αδυνατεί να απορροφήσει. Από την μία, η απαιτούμενη ζήτηση για αδρανή υλικά προκαλεί σοβαρές επιπτώσεις εξαιτίας των δραστηριοτήτων εξόρυξης αυτών και από την άλλη, οι σημαντικές ποσότητες ΑΕΚΚ έχουν δημιουργήσει ανάγκες εξεύρεσης, είτε περιοχών απόθεσης, είτε εγκαταστάσεων ανάκτησης, οι οποίες είναι δύσκολο να εκπληρωθούν, με αποτέλεσμα τη συχνή ανεξέλεγκτη απόρριψή τους στο προαστιακό περιβάλλον [10].

Παράλληλα, τα οφέλη από την ανακύκλωση – επαναχρησιμοποίηση των ΑΕΚΚ είναι πολλά:

1. Εξοικονόμηση χώρου στις χωματερές, μείωση της ανάγκης για νέους χώρους διάθεσης ή υγειονομικής ταφής και των συναφών δαπανών τους.

Παράλληλα με την μείωση και σταδιακή εξάλειψη των φαινομένων ανεξέλεγκτης απόρριψης σε ευαίσθητους αποδέκτες (ρέματα, περιοχές ιδιαίτερου φυσικού κάλλους, κλπ.) [34]

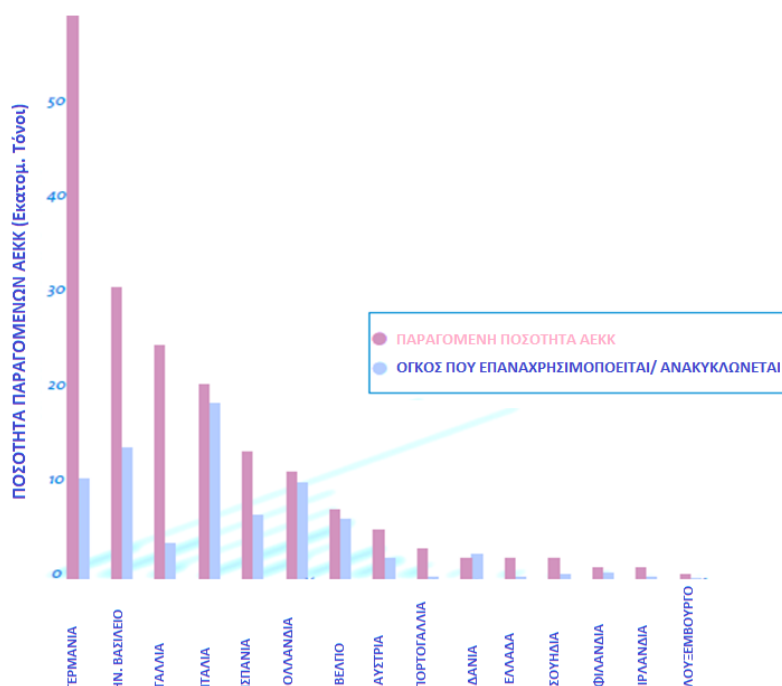
2. Μείωση της παραγωγής των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και άλλων ρύπων, μειώνοντας την ανάγκη για την εξαγωγή πρώτων υλών και τη μεταφορά νέων υλικών σε μεγάλες αποστάσεις.
3. Εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την παραγωγή νέων υλικών αποφεύγοντας την εξόρυξη και των διαδικασιών παραγωγής.
4. Δημιουργία ευκαιριών απασχόλησης και οικονομικών δραστηριοτήτων στις βιομηχανίες ανακύκλωσης.
5. Εξοικονόμηση χρημάτων από τη μείωση του κόστους του έργου, το κόστος μεταφοράς, και το κόστος ορισμένων νέων οικοδομικών υλικών μέσω της ανακύκλωσης παλαιών υλικών επιτόπου.
6. Δημιουργία ενός κλειστού κυκλώματος παραγωγής και ροής των οικοδομικών υλικών. [14]
7. Συμβολή στην ανάπλαση ανενεργών λατομείων με την πλήρη επανένταξη τους στο φυσικό περιβάλλον μέσω αξιοποίησης προϊόντων και υπολειμμάτων των μονάδων διαχείρισης ΑΕΚΚ σύμφωνα με κατάλληλες προδιαγραφές [34].

Για το λόγο αυτό ήδη πολλές ευρωπαϊκές χώρες έχουν προσανατολίσει την πολιτική τους προς την κατεύθυνση αυτή. Στο διάγραμμα 2.4 παρουσιάζεται η ετήσια παραγωγή ΑΕΚΚ σε ευρωπαϊκές χώρες καθώς και ο βαθμός επαναχρησιμοποίησης – ανακύκλωσης σε αυτές, για το έτος 2011. Παρατηρείται ότι με εξαίρεση την Ιταλία, η οποία ήδη από το 1997 ανακύκλωνε το 10% περίπου της παραγόμενης ποσότητας ΑΕΚΚ [35], στην πλειοψηφία τους οι ευρωπαϊκές χώρες, παρά την ισχύουσα νομοθεσία, δεν έχουν επιτύχει τους επιδιωκόμενους στόχους.

Κύρια αιτία είναι ο περιορισμός της χρήσης των τελικών προϊόντων συγκροτημάτων διαχείρισης ΑΕΚΚ ως ανακυκλωμένα αδρανή υλικά σε ασύνδετη μορφή σε έργα υποδομών (θεμελιώσεις δρόμων και σιδηροδρόμων) ή για περιβαλλοντικές αποκαταστάσεις [10]. Εντούτοις, πραγματική επανάσταση στην κατασκευαστική βιομηχανία, θα προκαλούσε η χρήση αυτών των ανακυκλωμένων υλικών για την παραγωγή σκυροδέματος. Δυστυχώς, υπάρχει μεγάλη επιφύλαξη σχετικά με τη χρησιμοποίηση ανακυκλωμένων αδρανών υλικών από ΑΕΚΚ ειδικά για τη χρήση τους στην παραγωγή σκυροδέματος. Αυτό μπορεί να αλλάξει μέσω της πιστοποίησης της ποιότητάς τους και της ανάπτυξης διαφόρων κριτηρίων που θα καθιστούν κατάλληλα τα ανακυκλώσιμα υλικά [14].

Προς την κατεύθυνση αυτή προσανατολίζονται οι προσπάθειες ερευνητών στην Ελλάδα και το εξωτερικό για να γεφυρώσουν τη έλλειψη εμπειρίας και γνώσης στον τομέα αυτό [14]. Η ερευνητική διαδικασία όπως θα παρουσιαστεί εκτενώς ακολούθως περιλαμβάνει διερεύνηση των ιδιοτήτων των ανακυκλωμένων αδρανών αλλά και των ιδιοτήτων σκυροδέματος με τη χρήση τους. Παράλληλα, πρέπει να εδραιωθεί η αντίληψη ότι η επιλογή των αδρανών υλικών για μία συγκεκριμένη

εφαρμογή πρέπει να βασίζεται μόνο στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του υλικού και όχι στην πηγή προέλευσής του [10].



Διάγραμμα 2.4 Ετήσια παραγωγή ΑΕΚΚ στην Ευρώπη και βαθμός επαναχρησιμοποίησης ανά χώρα το 2011[31- επεξεργασία ίδια].

2.3 Ανασκόπηση υπάρχουσας έρευνας

2.3.1 Ανακυκλωμένα Αδρανή

Παγκοσμίως, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η παραγόμενη ποσότητα ΑΕΚΚ αυξάνεται με ταχύ ρυθμό, γεγονός που οδήγησε στη θέσπιση της σχετικής νομοθεσίας για την επαναχρησιμοποίησή τους. Φυσικά, η αξιοποίηση των αποβλήτων αυτών, ιδίως στην περίπτωση που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή σκυροδέματος, ως ανακυκλωμένα αδρανή προϋποθέτει την ερευνητική διερεύνηση των ιδιοτήτων τους με σκοπό την πιστοποίηση ότι η χρήση τους είναι ασφαλής. Προς την κατεύθυνση αυτή προσανατολίζονται οι μελέτες ερευνητών στην Ελλάδα και το εξωτερικό.

Από τις πρώτες ερευνητικές εργασίες, αναφορικά με την εναλλακτική διαχείριση των ΑΕΚΚ στη χώρα μας, ήταν αυτή των Οικονόμου και Σελεβού (1999) [36]. Ακολούθησαν λοιπές μελέτες, στις οποίες τονίζεται η αναγκαιότητα επαναχρησιμοποίησης των ΑΕΚΚ, τονίζοντας τα οικονομικά οφέλη και την εξασφάλιση της προστασίας του περιβάλλοντος [29, 37-42]. Ο Οικονόμου (2004) πρότεινε τις απαιτούμενες δοκιμές για τον έλεγχο της χρήσης των ΑΕΚΚ ως ανακυκλωμένα αδρανή για την παραγωγή σκυροδέματος και παράλληλα τόνισε την αναγκαιότητα καθορισμού επιτρεπόμενων ορίων που θα καθιστούν δυνατή τη χρήση τους για το σκοπό αυτό [43, 44]. Σε επόμενη μελέτη, προέκυψε το συμπέρασμα ότι τα

ανακυκλωμένα αδρανή υλικά είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν ως υλικά βάσης και υπόβασης για οδοποιία, υλικό κάλυψης σε ΧΥΤΑ, και ενδεχομένως παραγωγή σκυροδέματος χαμηλής ποιότητας [45].

Μεταγενέστερα, μελετήθηκε η λειτουργία μίας πρότυπη μονάδας διαχείρισης και ανακύκλωσης ΑΕΚΚ [46, 47], ενώ σε άλλη μελέτη αξιολογήθηκαν τα κριτήρια για την βέλτιστη χωροθέτηση μίας μονάδας αυτού του τύπου [48]. Οι Μουσιόπουλος κ.α. επικεντρώθηκαν στην επισκόπηση των δυνατοτήτων επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης των εν αχρηστία δομικών απορριμμάτων, παρουσιάζοντας ξεχωριστά για κάθε επιμέρους κλάσμα των ΑΕΚΚ τις συνηθέστερες πρακτικές αξιοποίησής τους σε διεθνές επίπεδο [49].

Αντίστοιχες έρευνες προηγήθηκαν χρονικά στο εξωτερικό [50-62], ενώ παράλληλα πολλές προσανατολίστηκαν στη διερεύνηση της καταλληλότητας των ανακυκλωμένων αδρανών, προσδιορίζοντας τις γεωμετρικές, φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες. Για το λόγο ότι το επιμέρους κλάσμα των αποβλήτων με τη μεγαλύτερη παρουσία, είναι το σκυρόδεμα, πλήθος μελετών ερεύνησε τις ιδιότητες ανακυκλωμένων αδρανών μόνο από παλαιά σκυροδέματα [63-74]. Εντούτοις, πολλές φορές ο διαχωρισμός αυτού του ρεύματος αποβλήτων στα επιμέρους υλικά που το αποτελούν είναι δύσκολος ή οικονομικά ασύμφορος και για το λόγο αυτό η πλειοψηφία των ερευνών επικεντρώθηκε στον έλεγχο ιδιοτήτων των αδρανών από ΑΕΚΚ στο σύνολό τους [44, 75-78].

Ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων των ανακυκλωμένων αδρανών και ιδίως η διεξαγωγή ενός μοντέλου το οποίο θα καθορίζει και θα προβλέπει τις ιδιότητες των ανακυκλωμένων αδρανών, αποτελεί μία πρόκληση, λόγω της μεγάλης ετερογένειας που παρουσιάζουν τα ΑΕΚΚ και της αδυναμίας να γνωρίζουμε την προέλευσή τους. Σημαντικό ρόλο στις ιδιοτήτες τους διαδραματίζει και η μεγάλη ποσότητα ακαθαρσιών που περιέχουν.

Βάσει ερευνών, τα ανακυκλωμένα αδρανή συγκρινόμενα με τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα, φυσικά αδρανή υλικά, παρουσιάζουν σχετικά χαμηλότερες αντοχές, είναι πιο πορώδη και άρα έχουν χαμηλότερη πυκνότητα και υψηλότερες τιμές απορρόφησης του νερού. Αναλυτικότερα, τα αποτελέσματα των ερευνών έχουν δείξει ότι τα ανακυκλωμένα αδρανή έχουν τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά:

1. Προσκολλημένη τσιμεντόπαστα.

Η ιδιότητα αυτή αφορά ειδικά στα αδρανή που προκύπτουν από τη θραύση στοιχείων σκυροδέματος. Τα αδρανή αυτά έχουν υποδεέστερη ποιότητα, λόγω της τσιμεντόπαστας που είναι συνδεδεμένη με την επιφάνεια των αρχικών αδρανών [79]. Αυτή η εξαιρετικά πορώδης πάστα τσιμέντου συμβάλλει στη χαμηλότερη πυκνότητα και στο μεγαλύτερο πορώδες, στη διακύμανση της ποιότητας τους και στη μεγαλύτερη απορρόφηση του νερού [80-84]. Οι κύριοι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την ποσότητα της τσιμεντόπαστας αυτής είναι κάποιες από τις ιδιότητες του αρχικού σκυροδέματος: ο λόγος νερού / τσιμέντου, η αρχική αντοχή του και το μέγεθος των αδρανών. Επίσης, ρόλο διαδραματίζει και η διαδικασία θρυμματισμού των αρχικών στοιχείων. Αντιθέτως, η ηλικία και η αντοχή την οποία έχει το σκυρόδεμα όταν συνθλίβεται, δεν επηρεάζουν την ποσότητά της [85].

Έρευνες του BCSJ έδειξαν ότι το 20% της υπάρχουσας τσιμεντόπαστας είναι προσκολλημένο στα αδρανή με μέγεθος κόκκων μεταξύ 20 και 30mm, ενώ το φίλλερ (υλικό έως 0,3mm) αποτελείται σε ποσοστό 45 - 65% από τσιμεντόπαστα. Ο Katz (2003) αναφέρει ότι τα χονδρόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή περιέχουν περίπου 6,5% προσκολλημένη τσιμεντόπαστα ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για τα λεπτόκοκκα είναι περίπου 25% [85].

Ο Hasaba ανέφερε ότι η ποσότητα τσιμεντόπαστας που παραμένει είναι ανάλογη της αντοχής του αρχικού σκυροδέματος και συγκεκριμένα όσο υψηλότερη η αντοχή του σκυροδέματος τόσο μεγαλύτερη η ποσότητα της παραμένουσας τσιμεντόπαστας, για την ίδια μεθοδολογία και ενέργεια θραύσης. Οι Hansen και Nagud (1983) διαπίστωσαν ότι η αναλογία νερού/τσιμέντου του αρχικού σκυροδέματος επηρεάζει την παραμένουσα ποσότητα τσιμεντόπαστας ενώ η ποσότητα της τσιμεντόπαστας αυξάνει με τη μείωση του μέγιστου κόκκου αδρανούς.

2. Σχήμα και υφή

Τα ανακυκλωμένα αδρανή, χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα, τείνουν να είναι γωνιώδη [86], επιμήκη [76] και με τραχιά υφή λόγω της διαδικασίας παραγωγής τους (σύνθλιψη – κρούση) [77]. Σύμφωνα με τους Tseng et al. (1998) αυτή η επιφανειακή υφή συμβάλλει στην καλύτερη σύνδεση μεταξύ ανακυκλωμένων αδρανών και τσιμεντόπαστας, όταν αυτά χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή σκυροδέματος [44].

3. Ειδικό βάρος

Τα ανακυκλωμένα αδρανή εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές ειδικού βάρους συγκρινόμενα με φυσικά αδρανή, γεγονός που οφείλεται στην παρουσία της τσιμεντόπαστας, η οποία τα καθιστά λιγότερο πυκνά εξαιτίας του αυξημένου πορώδους της και του εγκλωβισμένου αέρα στους πόρους [44,77,87]. Παράλληλα, τα μικρότερου μεγέθους αδρανή τείνουν να έχουν χαμηλότερα ειδικά βάρη από αυτά μεγαλύτερου μεγέθους [77]. Ειδικότερα, οι Hansen et al. (1983) διαπίστωσαν ότι το ειδικό βάρος μειώνεται σε ποσοστό 4,5 έως 7,6% συγκριτικά με το ειδικό βάρος των φυσικών αδρανών. Σύμφωνα με τους Prasad et al. (2007) το ειδικό βάρος των ανακυκλωμένων αδρανών συνήθως κυμαίνεται από 2600 έως 2800 kg/m³ [44], ενώ βάσει άλλων μελετών κυμαίνεται μεταξύ 2200 - 2600 kg/m³ [88, 89].

4. Υδροαπορροφητικότητα

Η υδροαπορροφητικότητα στα ανακυκλωμένα αδρανή κυμαίνεται από 3 έως 12% για τα χονδρόκοκκα και τα λεπτόκοκκα κλάσματα με την πραγματική τιμή να εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των ΑΕΚΚ που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των αδρανών. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η τιμή είναι πολύ υψηλότερη από αυτή του φυσικών αδρανών υλικών των οποίων η απορρόφηση νερού είναι περίπου 0,5 -1% [75, 90] και θεωρείται το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό των ανακυκλωμένων αδρανών [89]. Οι Hansen et al. (1983) προσδιόρισαν την υδροαπορροφητικότητα 8,7% για τα αδρανή μεγέθους κόκκων μεταξύ 4-8mm και 3,7% για τα αδρανή με 16-32mm. Επιπλέον, συσχέτισαν την αύξησή της με την αυξημένη παρουσία την τσιμεντόπαστας, ενώ στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν οι Torcu et al. (2004). Οι Bairagi et al. (1993) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η απορρόφηση νερού στα ανακυκλωμένα αδρανή πραγματοποιείται με πολύ γρήγορους ρυθμούς. Συγκεκριμένα, σχεδόν το 75% της ικανότητας απορρόφησης (24 ωρών)

επιτεύχθηκε στα πρώτα 30 λεπτά κατόπιν της διαβροχής των αδρανών. Για το λόγο αυτό, σε μεταγενέστερη έρευνα που διεξήγαγαν οι Gao et al. (2008) διαπίστωσαν ότι η παραδοσιακή μέθοδος προσδιορισμού της υδροαπορροφητικότητας, με 24ωρη διαβροχή των αδρανών, δεν είναι κατάλληλη για τα ανακυκλωμένα και μπορεί να δώσει ανακριβή αποτελέσματα [44].

5. Αντοχή στην τριβή

Αναφορικά με την αντοχή σε τριβή των ανακυκλωμένων αδρανών (σύμφωνα με τη δοκιμή Los Angeles) είναι διαθέσιμη πολύ περιορισμένη βιβλιογραφία [90]. Οι υπάρχουσες μελέτες δείχνουν ότι η απώλεια μάζας για τα ανακυκλωμένα αδρανή είναι συνήθως υψηλότερη από φυσικά αδρανή [44] [77], ωστόσο είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων [77]. Οι Hansen et al. (1983) διαπίστωσαν ότι η απώλεια μάζας κατά τη δοκιμή Los-Angeles είναι 22,4% για τα αδρανή μεγέθους κόκκων 16-32 mm και 41,4% για τα αδρανή μεγέθους κόκκων μεταξύ 4-8mm [44]. Σύμφωνα με τους Sagoe-Crentsil (2001) η αντοχή σε τριβή είναι 12% μικρότερη από αυτή φυσικών αδρανών [91] και βάσει άλλης έρευνας η αντοχή σε τριβή για τα ανακυκλωμένα αδρανή κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 20-45% με ανώτατο όριο το 50% [78].

6. Ανθεκτικότητα σε αποσάθρωση

Δοκιμές ανθεκτικότητας σε αποσάθρωση πραγματοποιήθηκαν σε ανακυκλωμένα αδρανή, τόσο με τη χρήση διαλύματος θειικού νατρίου όσο και με τη χρήση διαλύματος θειικού μαγνησίου. Εντούτοις, τα αποτελέσματα των δύο δοκιμών διαφέρουν. Τα ανακυκλωμένα αδρανή παρουσιάζουν την απαιτούμενη ανθεκτικότητα μόνο όταν η δοκιμή πραγματοποιείται με θειικό μαγνήσιο, εγείροντας έτσι απορίες σχετικά με το εάν η δοκιμή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανακυκλωμένα αδρανή [77].

7. Χημικά – ορυκτολογικά χαρακτηριστικά

Οι Limbachiya et al. (2007) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα χονδρόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή έχουν χημική και ορυκτολογική σύσταση κατάλληλη για χρήση σε παραγωγή σκυροδέματος. Επιπλέον, δεν υπήρχε σημαντική μεταβολή αυτής της σύστασης για δείγματα ληφθέντα από διαφορετικές περιοχές [44].

8. Περιεχόμενο χλωριόντων

Αναφορικά με την περιεκτικότητα σε χλωριόντα, πολλές φορές μπορεί να είναι αυξημένη συγκρινόμενη με αυτή των φυσικών αδρανών. Για το λόγο αυτό, υπάρχει ανησυχία ότι ανακυκλωμένα αδρανή με υψηλή περιεκτικότητα σε χλωριόντα μπορεί να επηρεάσουν την αντοχή του νέου σκυροδέματος και να προκαλέσουν διάβρωση του χάλυβα στον οπλισμό [77].

Ειδικότερα, όσον αφορά στα λεπτόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή, η δημιουργία υψηλής ποιότητας χονδρόκοκκων ανακυκλωμένων αδρανών, οδηγεί στην παραγωγή μεγάλης ποσότητας λεπτόκοκκων που μπορεί να είναι προβληματική η διαχείρισή τους [92]. Το λεπτόκοκκο αυτό υλικό μπορεί να αναμιχθεί με αργιλικό έδαφος για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του, βελτιώνοντας το δείκτη πλαστικότητάς του και ταξινομώντας το από πηλό σε λασπώδη άμμο [93].

Ανακεφαλαιώνοντας, μπορούμε να αναφέρουμε ότι τα προερχόμενα από ΑΕΚΚ ανακυκλωμένα αδρανή είναι γωνιώδη, με τραχιές επιφάνειες, έχουν υψηλότερη ικανότητα απορρόφησης νερού, χαμηλότερο ειδικό βάρος, υψηλότερη απώλεια μάζας

σε τριβή κατά Los Angeles, συχνά παρουσιάζουν χαμηλή ανθεκτικότητα σε δοκιμή θεικού νατρίου και επαρκή σε αντίστοιχη δοκιμή θεικού μαγνησίου ενώ μπορεί να έχουν υψηλότερα επίπεδα χλωριόντων. Στον πίνακα 2.6 παρουσιάζεται μία σύγκριση των ιδιοτήτων των ανακυκλωμένων αδρανών με τις αντίστοιχες φυσικών αδρανών [77].

Πίνακας 2.6 Πίνακας σύγκρισης ιδιοτήτων φυσικών και ανακυκλωμένων αδρανών [77].

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΦΥΣΙΚΑ ΑΔΡΑΝΗ	ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΑ ΑΔΡΑΝΗ
Σχήμα και Υφή	Στρογγυλευμένα, λεία (συλλεκτά) ή γωνιώδη και τραχιά (θραυστά)	Γωνιώδη με την τραχιά επιφάνεια.
Ικανότητα απορρόφησης	0.8 – 3.7 %	3.7 – 8.7 %
Ειδικό βάρος	2.4 – 2.9	2.1 – 2.4
Δοκιμή απώλειας μάζας σε απότριψη Los Angeles	15 – 30 %	20 – 45 %
Δοκιμή απώλειας μάζας σε φθορά από θεικό άλας νατρίου	7 – 21 %	18 – 59 %
Δοκιμή απώλειας μάζας σε φθορά από θεικό άλας	4 – 7 %	1 – 9 %
Περιεχόμενο χλωριόντων	0 – 1.2 kg/m ³	0.6 – 7.1 kg/m ³

2.3.2 Ανακυκλωμένο σκυροδέμα

Σήμερα, η παραγωγή σκυροδέματος, το οποίο θα είναι φιλικό προς το περιβάλλον, αποτελεί αντικείμενο μελέτης από τους ερευνητές. Στο πλαίσιο αυτό έχουν ερευνηθεί οι ιδιότητες μιγμάτων σκυροδέματος με τη χρήση φθαρμένων ελαστικών αυτοκινήτων [94-96], ανακυκλωμένου πλαστικού [97], πολυμερών [98, 99] και λοιπών στερεών αποβλήτων όπως γυαλί [100, 101].

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έλκει η παραγωγή σκυροδέματος με τη χρήση ανακυκλωμένων αδρανών προερχόμενα από ΑΕΚΚ. Προς την κατεύθυνση αυτή έχουν κινηθεί ερευνητές στην Ελλάδα και το εξωτερικό. Πολλές από τις μελέτες, χρησιμοποιούν ως ανακυκλωμένα αδρανή, θραύσματα από στοιχεία σκυροδέματος, τα οποία είτε έχουν παρασκευαστεί στο εργαστήριο με γνωστά χαρακτηριστικά [102-107] είτε προέρχονται από υπάρχουσες κατασκευές που κατεδαφίστηκαν [100, 108-112]. Εντούτοις, έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες, οι οποίες χρησιμοποίησαν ΑΕΚΚ ως ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος [72, 83, 113-116].

Σημαντική έρευνα στην Ελλάδα πραγματοποιήθηκε από την Α.Ε. Σάββα [117], η οποία όμως χρησιμοποίησε ως ανακυκλωμένα αδρανή, θραυσμένα δοκίμια σκυροδέματος τα οποία είχαν χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της παραγωγής βιομηχανίας έτοιμου σκυροδέματος. Κατέληξε στο συμπεράσματα ότι: (α) όσο μεγαλύτερη είναι η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος προέλευσης, τόσο μεγαλύτερη είναι και η εφελκυστική αντοχή των ανακυκλωμένων σκυροδεμάτων, ανεξαρτήτως του ποσοστού αντικατάστασης, (β) η αύξηση του

ποσοστού ανακυκλωμένων αδρανών αυξάνει την εφελκυστική αντοχή των σκυροδεμάτων με ομοιογενή αδρανή, ενώ τη μειώνει, όταν τα αδρανή είναι ανομοιογενή (γ) η χαρακτηριστική αντοχή όλων των σκυροδεμάτων με ανακυκλωμένα αδρανή είναι μεγαλύτερη από τη χαρακτηριστική αντοχή των σκυροδεμάτων από τα οποία προήλθαν, (δ) Τα ανακυκλωμένα σκυροδέματα, ανεξαρτήτως προέλευσης ή ποσοστού συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών τους, στους 100 °C παρουσιάζουν μικρότερες απώλειες από αυτές του συμβατικού, ενώ στους 550 °C μεγαλύτερες. Στους 300 °C, σκυροδέματα με ομοιογενή προέλευση ανακυκλωμένων αδρανών είναι ανθεκτικότερα του συμβατικού, αντίθετα, όταν τα αδρανή έχουν ανομοιογενή προέλευση παρουσιάζουν μεγαλύτερες του συμβατικού απώλειες, (ε) δυσμενέστερη για τα ολικώς ανακυκλωμένα μείγματα ήταν η πλευρική είσοδος των χλωριόντων, ενώ για τα μείγματα με 50% ανακυκλωμένα δυσμενέστερη είναι η συντήρηση με κύκλους διαβροχής (παλίρροιες κλπ).

Στην έρευνα των Μαυρίδου και Οικονόμου [118,119] χρησιμοποιήθηκαν ανακυκλωμένα αδρανή από παλαιά σκυροδέματα (άγνωστης προέλευσης, ηλικίας και κατηγορίας αντοχής) για την σύνθεση δοκιμίων σκυροδέματος. Αρχικά μελετήθηκαν οι ιδιότητες των ανακυκλωμένων αδρανών και στη συνέχεια μελετήθηκαν οι ιδιότητες νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι όσον αφορά τα μηχανικά χαρακτηριστικά των μιγμάτων, η προσθήκη ανακυκλωμένων αδρανών είχε ως συνέπεια τη μείωση των χαρακτηριστικών αλλά την επίτευξη της κατηγορίας αντοχής σχεδιασμού. Οι τιμές της αντίστασης σε ολίσθηση για όλα τα μείγματα κυμάνθηκαν στα ίδια επίπεδα, χωρίς ιδιαίτερες αυξομειώσεις. Όσον αφορά στην έκθεση των μιγμάτων σε υψηλές θερμοκρασίες, η προσθήκη ανακυκλωμένων αδρανών οδήγησε σε μείγματα ανθεκτικότερα σε σύγκριση με τα συμβατικά.

Σε μεταγενέστερη μελέτη των ίδιων [120,121] χρησιμοποιήθηκαν χονδρόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή από παλαιά σκυροδέματα για την παραγωγή μιγμάτων συμβατικού σκυροδέματος. Οι συνθέσεις αφορούσαν σε ποσοστό αντικατάστασης των φυσικών χονδρόκοκκων αδρανών σε ποσοστό 50% και υποβλήθηκαν σε σειρά ελέγχων και δοκιμών για να διαπιστωθεί η καταλληλότητα και η συμπεριφορά τους. Τα αδρανή ικανοποίησαν τους αντίστοιχους ελέγχους για χρήση στην παραγωγή σκυροδέματος ενώ, η εργασιμότητα των παραγόμενων μιγμάτων (μετρημένη με κάθιση) εμφανίστηκε αισθητά μειωμένη σε σχέση με την αντίστοιχη μιγμάτων με φυσικά αδρανή. Επιπλέον, οι συνθέσεις έδωσαν δοκίμια ικανοποιητικής αντοχής και στην στερεοσκοπική παρατήρηση του μίγματος διαπιστώθηκε ικανοποιητική σύνδεση μεταξύ ανακυκλωμένων αδρανών και τσιμεντόπαστας. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν συνθέσεις αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, με τη χρήση ανακυκλωμένης άμμου σε ποσοστό αντικατάστασης 0-60% της φυσικής.

Οι Οικονόμου και Τσώχος [122] χρησιμοποίησαν ως ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή (4-16mm), για τη σύνθεση του νέου σκυροδέματος, θραυσμένα δοκίμια σκυροδέματος κατηγορίας C16/20, ηλικίας 2 ετών. Παρατηρήθηκε ότι η θλιπτική αντοχή (28 ημερών) του παραγόμενου σκυροδέματος κάλυψε την απαίτηση για σκυρόδεμα C16/20. Σε δοκιμές ανθεκτικότητας και αντίστασης σε ολίσθηση παρατηρήθηκαν μικρές μόνο αποκλίσεις από τις αντίστοιχες τιμές του σκυροδέματος

αναφοράς ακόμα και σε πλήρη αντικατάσταση του χονδρόκοκκου αδρανούς με χονδρόκοκκο ανακυκλωμένο αδρανές ενώ, οι αποκλίσεις αυτές μειώθηκαν με την προσθήκη ρευστοποιητή.

Βάσει ερευνών, τα μίγματα του σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή μπορούν να σχεδιαστούν με τον ίδιο τρόπο όπως και αυτά που χρησιμοποιούν φυσικά αδρανή, με την προϋπόθεση ότι η επιπλέον απορρόφηση νερού λαμβάνεται κατάλληλα υπόψη κατά τον καθορισμό του περιεχομένου νερού στο μίγμα. Επιπλέον, πρέπει να ληφθούν υπόψη και τα ακόλουθα: (α) Κατά το σχεδιασμό σκυροδέματος με χρήση ανακυκλωμένων αδρανών μεταβλητής ποιότητας, ένα υψηλότερο πρότυπο απόκλισης πρέπει να υιοθετηθεί προκειμένου να επιτευχθεί ένας στόχος αντοχών βάσει μίας συγκεκριμένης απαίτησης αντοχής, (β) για να επιτευχθεί σε ένα μίγμα με ανακυκλωμένα αδρανή η ίδια κάθιση με το συμβατικό σκυρόδεμα, η ελεύθερη περιεκτικότητα σε νερό θα πρέπει να είναι περίπου 5% περισσότερη από ό, τι για τα συμβατικά, (γ) το συνολικό ποσοστό άμμου είναι ίδιο είτε χρησιμοποιούνται ανακυκλωμένα είτε φυσικά αδρανή και (δ) δοκιμαστικά μίγματα είναι υποχρεωτικά και οι κατάλληλες προσαρμογές ανάλογα με την πηγή και τις ιδιότητες των ανακυκλωμένων αδρανών θα πρέπει να γίνονται για να αποκτήσουν την απαιτούμενη εργασιμότητα, τον κατάλληλο λόγο w/c και τις κατάλληλες αντοχές για το τελικό προϊόν [90].

Επιπλέον, ερευνητές έχουν αναπτύξει εκτός της συνήθους διαδικασίας ανάμιξης του σκυροδέματος, δύο διαδικασίες ανάμιξης ειδικά για τη χρήση ανακυκλωμένων αδρανών: (α) τη διαδικασία ανάμιξης δύο σταδίων (Two-Stage Mixing Approach – TSMA) [83,113] και (β) τη διαδικασία ανάμιξης ισοδύναμου όγκου κονιάματος (equivalent mortar volume method - EMV) [123-125].

Η διαδικασία ανάμιξης των δύο σταδίων στοχεύει στη βελτίωση της αντοχής σε θλίψη για το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα και ως εκ τούτου, στο να μειώσει το μεγάλο εύρος τιμών της αντοχής. Η μέθοδος διαιρεί τη διαδικασία ανάμιξης των υλικών, κατά την παραγωγή του νέου σκυροδέματος, σε δύο φάσεις. Πρώτα τοποθετούνται στον αναμικτήρα όλα τα αδρανή υλικά (λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα), και αφού αναμιχθούν, προστίθεται η μισή ποσότητα του συνολικά απαιτούμενου νερού και η ανάμιξη αφήνεται να συνεχιστεί. Κατόπιν, εισάγεται στο μίγμα όλη η ποσότητα τσιμέντου με τον αναμικτήρα να συνεχίζει την λειτουργία του και τέλος προστίθεται το υπόλοιπο νερό για την παραγωγή του νωπού σκυροδέματος [83]. Η σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου παρουσιάζεται στην εικόνα 2.9.



Εικόνα 2.9 Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας ανάμιξης των δύο σταδίων [83]

Τα οφέλη από τη χρήση της διαδικασίας αυτής αφορούν στη βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς του τελικού ανακυκλωμένου σκυροδέματος και συγκεκριμένα οδηγούν σε: βελτίωση της θλιπτικής αντοχής έως 22%, της καμπτικής αντοχής έως 15% και της εφελκυστικής αντοχής έως 9%, για αντικατάσταση των φυσικών αδρανών από ανακυκλωμένα σε ποσοστό 20% [83]. Παράλληλα,

βελτιώνεται η συμπεριφορά του ανακυκλωμένου σκυροδέματος ως προς την παραμόρφωση και τη διαπερατότητα. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται βελτίωση της συστολής ξήρανσης έως 68%, του ερπυσμού έως 46% και της διαπερατότητας σε νερό έως 35%, για πλήρη αντικατάσταση των φυσικών αδρανών από ανακυκλωμένα [113].

Η δεύτερη διαδικασία ανάμιξης, η διαδικασία ανάμιξης ισοδύναμου όγκου κονιάματος, βασίζεται στην υπόθεση ότι τα ανακυκλωμένα αδρανή είναι ένα σύνθετο υλικό από τσιμεντόπαστα και φυσικά αδρανή. Επομένως, πρέπει να ληφθεί υπόψη στην παραγωγή σκυροδέματος (ποσοτικά και ποιοτικά) και να προσαρμοστεί κατάλληλα η προσθήκη νέου τσιμέντου και νέων αδρανών [124]. Το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα που παράγεται με τη μέθοδο αυτή παρουσιάζει: (α) χρήση μικρότερης ποσότητας τσιμέντου, έως 22% [124], καθιστώντας τη μέθοδο πιο φιλική προς το περιβάλλον, (β) μειωμένη κάθιση [125], (γ) αυξημένη θλιπτική αντοχή και πυκνότητα (νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος), (δ) αυξημένη ανθεκτικότητα έναντι του πάγου και τήξης και τέλος, (ε) αντίσταση στην διείσδυση χλωριόντων και μειωμένο βάθος ενανθράκωσης λόγω της αυξημένης αλκαλικότητας του συνδετικού μέσου [126].

Διεθνώς, έχει διεξαχθεί έρευνα, αναφορικά με το σκυρόδεμα από ανακυκλωμένα αδρανή, που αφορά συνήθως τις μηχανικές τους ιδιότητες (θλιπτική – καμπτική αντοχή) και λιγότερο την ανθεκτικότητά τους (υδατοπερατότητα, ενανθράκωση, συστολή ξήρανσης και αντοχή σε ψύξη - απόψυξη). Επίσης, λίγες είναι οι εργασίες που αφορούν στη διείσδυση των χλωριόντων και τη διάβρωση του σιδηρού οπλισμού.

Το νωπό ανακυκλωμένο σκυρόδεμα τείνει να έχει πιο άγρια τελική επιφάνεια, λόγω του γωνιώδους σχήματος και της τραχιάς επιφάνεια των ανακυκλωμένων αδρανών, να είναι πιο επιρρεπές σε απώλεια κάθισης και να απαιτείται υψηλότερη περιεκτικότητα νερού λόγω της μεγαλύτερης υδροαπορροφητικότητας των αδρανών αυτών, και τέλος παρουσιάζεται υψηλότερη περιεκτικότητα σε αέρα λόγω του αυξημένου πορώδους και του εγκλωβισμένου μέσα στους πόρους [77]. Αναλυτικότερα, οι ιδιότητες του νωπού ανακυκλωμένου σκυροδέματος παρουσιάζονται ακολούθως.

1. Εργασιμότητα

Το σκυρόδεμα με χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή συνήθως παρουσιάζει δυσκολία στη διάστρωση και μη ομοιόμορφη τελική επιφάνεια, λόγω του σχήματος των αδρανών αυτών. Για να επιτευχθεί η ίδια εργασιμότητα με συμβατικό σκυρόδεμα η προσθήκη νερού είναι απαραίτητη, η οποία με τη σειρά της πιθανό να οδηγήσει σε μία αύξηση στην περιεκτικότητα τσιμέντου. Αποτέλεσμα είναι μια πιο δαπανηρή μελέτη σύνθεσης. Λύση αποτελούν η μείωση της ποσότητας των χρησιμοποιούμενων ανακυκλωμένων αδρανών, η χρήση μειωτών νερού, η προσθήκη ιπτάμενης τέφρας ή ένας συνδυασμός και των τριών [77].

Μετά το πέρας πέντε έως δέκα λεπτών από την ανάμιξη, το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα παρουσιάζει δυσκαμψία και χάνει εργασιμότητα με ταχύτερο ρυθμό από ότι το συμβατικό σκυρόδεμα [86]. Η χρήση πρόσμικτων δεν αποδείχτηκε να είχε σημαντική επίδραση στη μείωση της εργασιμότητας, μετρούμενη μέσω της κάθισης

[127] ενώ όσο αυξάνεται η ποσότητα ανακυκλωμένων αδρανών που χρησιμοποιείται σε ένα μίγμα σκυροδέματος, τόσο υψηλότερη είναι η αναλογία νερού/τσιμέντου που απαιτείται και οδηγεί σε μια υψηλότερη τιμή κάθισης [128].

Σύμφωνα με τους Hansen et al. (1983) και Ravindrarajah et al. (1985), ανακυκλωμένο σκυρόδεμα με ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή και φυσική άμμο χρειάζεται 5% περισσότερο νερό από ότι αντίστοιχο συμβατικό σκυρόδεμα, προκειμένου να επιτευχθεί η ίδια εργασιμότητα. Εάν η άμμος είναι επίσης ανακυκλωμένη, τότε 15% περισσότερο ποσότητα νερού απαιτείται. Επιπλέον, ο Hansen (1986) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα ανακυκλωμένα αδρανή πρέπει να χρησιμοποιούνται σε μια κατάσταση κοντά στο σημείο κορεσμού για να μειωθεί η υδροαπορροφητικότητά τους.

Οι Poon et al. (2004) ερεύνησαν επίσης την επίδραση του περιεχόμενου νερού στα ανακυκλωμένα αδρανή στην επίδραση της κάθισης του παραγόμενου νωπού σκυροδέματος. Αδρανή πλήρως ξηραμένα σε φούρνο παρουσίασαν υψηλότερη κάθιση και ταχύτερη απώλειά της, ενώ τα πλήρως κορεσμένα επιφανειακά στεγνά και τα ξηραμένα σε αέρα αδρανή παρουσίασαν κανονικές τιμές αρχικής κάθισης και απώλειας κάθισης. Οι Torcu et al. (2004) οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι σκυρόδεμα με περισσότερο από 50% ανακυκλωμένα αδρανή αντιμετωπίζει περισσότερα προβλήματα εργασιμότητας, ενώ οι Tu et al. (2006) απέδειξαν ότι οι ανακυκλωμένα αδρανή δεν είναι κατάλληλα για χρήση στην παραγωγή σκυροδέματος υψηλής αντοχής λόγω της σχετικά υψηλής υδροαπορροφητικότητας, τις ασταθείς τους ιδιότητες και τη μειωμένη αντοχή [44].

2. Περιεκτικότητα αέρα

Το περιεχόμενο αέρα είναι υψηλότερο και με μεγαλύτερη διακύμανση σε νωπό ανακυκλωμένο σκυρόδεμα. Αυτό οφείλεται κυρίως στο υψηλότερο πορώδες των ανακυκλωμένων αδρανών [75, 77]. Κατά συνέπεια, στοχεύοντας σε μείγματα ίδιας αντοχής με συμβατικά μείγματα, πρέπει ο σχεδιασμός να πραγματοποιείται για υψηλότερη περιεκτικότητα αέρα [77]. Ειδικότερα, για την περίπτωση χρήσης μόνο ανακυκλωμένων αδρανών, το περιεχόμενο αέρα του σκυροδέματος είναι μεταξύ 4 – 5,5% υψηλότερο από ότι σε αντίστοιχο συμβατικό σκυρόδεμα [129].

3. Πυκνότητα νωπού σκυροδέματος

Η φαινόμενη πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος με φυσικά αδρανή κυμαίνεται περί τα 2400 kg/ m³, ενώ η αντίστοιχη τιμή για ανακυκλωμένο σκυρόδεμα είναι 2150 kg/m³, σημαντικά ελαφρύτερο, ανεξάρτητα από τον τύπο του τσιμέντου που χρησιμοποιείται [129,130]. Η χαμηλότερη πυκνότητα είναι αποτέλεσμα του ειδικού βάρους των αδρανών και της αυξημένης περιεκτικότητας αέρα στο ανακυκλωμένο σκυρόδεμα [99].

Το σκληρυμένο ανακυκλωμένο σκυρόδεμα συνοπτικά παρουσιάζει μικρότερη αντοχή σε θλίψη και κάμψη, μικρότερη δυσκαμψία (μέτρο ελαστικότητας), υψηλότερη αντοχή σε ψύξη - απόψυξη λόγω του υψηλότερου περιεχόμενου αέρα, υψηλότερο ερπυσμό και συστολή ξήρανσης συγκρινόμενο με σκυρόδεμα από φυσικά αδρανή [77]. Αναλυτικότερα, οι ιδιότητες του σκληρυμένου ανακυκλωμένου σκυροδέματος παρουσιάζονται ακολούθως.

1. Θλιπτική αντοχή

Η επίδραση της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών στην θλιπτική αντοχή του παραγόμενου σκυροδέματος έχει μελετηθεί λεπτομερώς [131-135]. Στις μελέτες διαπιστώθηκε γενικά ότι η θλιπτική αντοχή σκυροδέματος μειώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε ανακυκλωμένα αδρανή, εντούτοις έχει αναφερθεί ότι δεν παρατηρήθηκε καμία συστηματική μείωση της αντοχής, εάν η περιεκτικότητα σε ανακυκλωμένα αδρανή είναι μικρότερη από 30% [136].

Λόγω της υψηλότερης υδροαπορροφητικότητας των ανακυκλωμένων αδρανών, για τη βελτίωση της εργασιμότητας, απαιτείται περισσότερο νερό. Η αύξηση του λόγου νερού προς τσιμέντο αποδείχτηκε ότι οδηγεί σε μείωση της θλιπτικής αντοχής [133]. Επιπλέον, η υδροαπορροφητικότητα των ανακυκλωμένων αδρανών υλικών προσδιορίστηκε ότι μπορεί να επηρεάσει τη θλιπτική αντοχή. Διαπιστώθηκε ότι η αντοχή σε θλίψη μειώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε ανακυκλωμένα αδρανή υψηλότερης υδροαπορροφητικότητας. Σαφώς, ο άριστος συνδυασμός για τη χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών εξαρτάται από: την αναλογία νερού /τσιμέντο, την ποιότητα και τον όγκο των ανακυκλωμένων αδρανών που χρησιμοποιούνται [136].

Σε μία από τις πρώτες έρευνες, ο Nixon (1978) απέδειξε ότι η θλιπτική αντοχή σκυροδέματος με 100% ανακυκλωμένα αδρανή, είναι 20% χαμηλότερη από το αντίστοιχο συμβατικό σκυρόδεμα. Οι Oliveira et al. (1996) μελέτησαν τα αποτελέσματα τριών διαφορετικών συνθηκών υγρασίας των ανακυκλωμένων αδρανών (ξηρά, κορεσμένα και ημι-κορεσμένα), καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι όταν το σκυρόδεμα παράγεται από ξηρά ή κορεσμένα ανακυκλωμένα αδρανή παρατηρείται μικρότερη μείωση της αντοχής σε θλίψη. Οι Salem et al. (1998) συμπέραναν ότι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος με 100% ανακυκλωμένα αδρανή αυξάνει κατά 2% από τις 7 έως τις 28 ημέρες, ενώ το συμβατικό σκυρόδεμα αυξάνεται κατά 16%. Αυτό πιθανόν να οφείλεται είτε στην υδροαπορροφητικότητα των ανακυκλωμένων αδρανών ή στην κακή προσκόλληση των αδρανών με την τσιμεντόπαστα.

Σύμφωνα με τους Limbachiya et al. (2000) η χρήση έως 30% χοντρόκοκκων αδρανών, δεν είχε καμία επίδραση επί της μέγιστης θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, αλλά περεταίρω αύξηση του ποσοστού οδηγεί σε μείωσή της. Παράλληλα, προτάθηκε μία μέθοδος η οποία λαμβάνει υπόψη τις επιδράσεις των ανακυκλωμένων αδρανών στη θλιπτική αντοχή, απαιτώντας μία απλή προσαρμογή της αναλογίας νερού/ τσιμέντου. Μεθοδολογία για βελτιώσεις στη θλιπτική αντοχή πρότειναν οι Otsuki et al. (2003) με τη χρήση της μεθόδου της διπλής ανάμιξης στην περίπτωση υψηλού λόγου νερού στο σκυρόδεμα.

Οι Poon et al. (2004) απέδειξαν ότι για σκυρόδεμα ανακυκλωμένων αδρανών, όταν αυτά έχουν ξεραθεί σε αέρα, το παραγόμενο σκυρόδεμα παρουσιάζει υψηλότερη αντοχή σε θλίψη. Βάσει των Kheder et al. (2005) η θλιπτική αντοχή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αναλογία νερού / τσιμέντο του μίγματος ενώ βάσει των Etxeberria et al. (2007) το σκυρόδεμα από 100% ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή έχει 20 - 25% λιγότερη θλιπτική αντοχή από το αντίστοιχο συμβατικό σκυρόδεμα στις 28 ημέρες.

Οι Eguchi et al. (2007) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι όταν το ποσοστό αντικατάστασης χονδρόκοκκων φυσικών αδρανών από ανακυκλωμένα αυξάνει, η αντοχή σε θλίψη μειώνεται. Ωστόσο, εκτιμώντας την μείωση της ποιότητας, μέσω σχετικών τιμών της ποιότητας και ρυθμίζοντας το ποσοστό αντικατάστασης, μπορεί να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη κατά περίπτωση ποιότητα του σκυροδέματος. Αντίστοιχα, οι Gonzalez et al. (2007) απέδειξαν ότι ήταν δυνατόν να παραχθεί ένα ανακυκλωμένο σκυρόδεμα (με 50% ανακυκλωμένα αδρανή) με την ίδια θλιπτική αντοχή με το συμβατικό σκυρόδεμα, αρκεί να αυξηθεί η ποσότητα τσιμέντου κατά 6,2% εκείνης του συμβατικού σκυροδέματος [44].

2. Καμπτική αντοχή

Οι έρευνες δείχνουν ότι η χρήση ανακυκλωμένων χονδρόκοκκων αδρανών μειώνει την καμπτική αντοχή έως και οκτώ τοις εκατό για την ίδια αναλογία νερού/τσιμέντου. Η μείωση αυτή αυξάνει επιπλέον, στην περίπτωση χρήσης και λεπτόκοκκων ανακυκλωμένων αδρανών. [77] Στη μελέτη του Rao, παρουσιάζεται μείωση στην καμπτική αντοχή 15-20% σε σχέση με την αντίστοιχη συμβατικού σκυροδέματος για χρήση ανακυκλωμένων αδρανών σε ποσοστό 100% [137].

Οι Ravindrarajah et al. (1985) απέδειξαν ότι δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ της καμπτικής αντοχής σκυροδέματος με ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή και φυσική άμμο, συγκρινόμενο με συμβατικό σκυρόδεμα. Οι Oliveira et al. (1996) μελέτησαν τα αποτελέσματα τριών διαφορετικών συνθηκών υγρασίας των ανακυκλωμένων αδρανών (ξηρά, κορεσμένα και ημι-κορεσμένα), καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η μείωση της καμπτικής αντοχής είναι εντονότερη στην περίπτωση των κορεσμένων ανακυκλωμένων αδρανών. Οι Casuccio et al. (2008) οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών τροποποιεί την διαδικασία της θραύσης [44].

3. Μέτρο ελαστικότητας

Η ακαμψία ή το μέτρο ελαστικότητας του ανακυκλωμένου σκυροδέματος είναι 20 έως 40% μικρότερα από αυτά συμβατικού σκυροδέματος με την ίδια αναλογία νερού-τσιμέντου. Η μείωση αυτή, αυξάνεται με την παράλληλη χρήση λεπτόκοκκων ανακυκλωμένων αδρανών. Η μείωση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι τα ανακυκλωμένα αδρανή τυπικά, έχουν χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας από τα φυσικά αδρανή [77].

Οι Hansen et al. (1985) ανέφεραν ότι τόσο το δυναμικό όσο και το στατικό μέτρο ελαστικότητας μειώθηκαν σε ποσοστό μεταξύ 14 και 28% κατά τη χρήση ανακυκλωμένων αδρανών. Οι Xiao et al. (2005) απέδειξαν ότι το μέτρο ελαστικότητας του ανακυκλωμένου σκυροδέματος είναι χαμηλότερο από εκείνο του συμβατικού σκυροδέματος και ειδικότερα μειώνεται με την αύξηση των περιεχόμενων ανακυκλωμένων αδρανών. Τέλος, οι Kheder et al. (2005) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το μέτρο ελαστικότητας του ανακυκλωμένου σκυροδέματος είναι περίπου 20 έως 25% χαμηλότερο από του συμβατικού σκυροδέματος [44].

4. Ανθεκτικότητα σε ψύξη – απόψυξη

Οι έρευνες σχετικά με την ανθεκτικότητα του ανακυκλωμένου σκυροδέματος έδωσαν θετικά και αρνητικά αποτελέσματα [138,139]. Κάποιες έρευνες απέδειξαν ότι η ανθεκτικότητα του ανακυκλωμένου σκυροδέματος είναι ίδια ή καλύτερη από

εκείνη του αρχικού σκυροδέματος. Ειδικότερα, αναφορικά με την ανθεκτικότητα σε ψύξη – απόψυξη, διάφοροι ερευνητές έχουν αναφέρει αύξησή της ως αποτέλεσμα του αυξημένου ποσοστού του περιεχόμενου αέρα [77].

Οι Oliveira et al. (1996) μελέτησαν τα αποτελέσματα των τριών διαφορετικών συνθηκών υγρασίας των ανακυκλωμένων αδρανών (ξηρά, κορεσμένα και ημι-κορεσμένα), καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι καλύτερα ήταν τα αποτελέσματα εκείνων που κατασκευάζονται με ημι-κορεσμένα ανακυκλωμένα αδρανή. Οι Salem et al. (1998) κατέληξαν στο γεγονός ότι ο εγκλωβισμένος στους πόρους αέρας είναι ο καλύτερος τρόπος για να βελτιωθεί η αντοχή σε ψύξη του ανακυκλωμένου σκυροδέματος. Ωστόσο η μέθοδος αυτή μειώνει άλλες φυσικές ιδιότητες του σκυροδέματος.

Αντίθετα, οι Zaharieva et al. (2004) απέδειξαν ότι η αντίσταση στον παγετό των κορεσμένων ανακυκλωμένων αδρανών σκυροδέματος δεν είναι ικανοποιητική, και η χρήση τους σε κατασκευές που εκτίθενται σε ψυχρά κλίματα δεν συνιστάται. Ο κύριος λόγος φαίνεται να είναι ο υψηλός ολικός λόγος νερού/ τσιμέντου, σε συνδυασμό με το υψηλό πορώδες και τις κατώτερες μηχανικές ιδιότητες των ανακυκλωμένων αδρανών [44].

5. Ερπυσμός

Ο ερπυσμός του σκυροδέματος είναι ανάλογος με την περιεχόμενη σε αυτό τσιμεντόπαστα. Το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα, συνήθως περιέχει αυξημένη ποσότητα τσιμεντόπαστας από ότι το συμβατικό σκυρόδεμα, με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται αυξημένος ερπυσμός σε ποσοστό 20 – 40% υψηλότερο [77].

Ωστόσο, σε κάποιες έρευνες, τα αποτελέσματα των δοκιμών ερπυσμού υπό κανονικές εργαστηριακές συνθήκες δεν είναι τόσο σαφή, αν και έχουν δείξει την τάση να μειώνεται, δηλαδή ο ερπυσμός μετά από ένα χρόνο παρουσιάζεται 20% χαμηλότερος από ότι σε συμβατικό σκυρόδεμα [140].

6. Συστολή ξήρανσης

Η ιδιότητα αυτή εξαρτάται από την ποσότητα της περίσσειας νερού που υπάρχει στη νωπή τσιμεντόπαστα και την ικανότητα των αδρανών να εμποδίζουν την τσιμεντόπαστα να συρρικνωθεί. Υψηλότερες αναλογίες νερού-τσιμέντου, υψηλότερες περιεκτικότητες σε τσιμεντόπαστα, και μειωμένη ποσότητα χονδρόκοκκων αδρανών στο μείγμα τείνουν να αυξήσουν τη συστολή ξήρανσης. Συνήθως, το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα έχει αυξημένη ποσότητα τσιμεντόπαστας και ως εκ τούτου αυξημένη συστολή ξήρανσης. Επιπλέον, το σκυρόδεμα που περιέχει ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα αδρανή, έχει ακόμα υψηλότερη συστολή ξήρανσης [77].

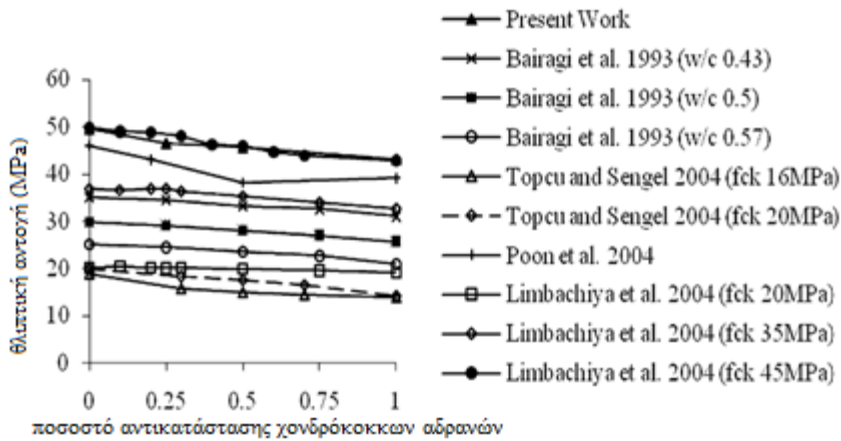
Ορισμένες μελέτες δείχνουν ότι το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα σε ηλικία 90 ημερών, παρουσιάζει συρρίκνωση περί τα 0,55 έως 0,8 mm/m, ενώ η αντίστοιχη τιμή για το συμβατικό σκυρόδεμα είναι μόνο περί τα 0,30 mm/m [85]. Σύμφωνα με τον Hansen (1985) η αύξηση της συστολής ξήρανσης για το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα κυμαίνεται μεταξύ 20-90% [141]. Σε άλλη μελέτη, διαπιστώθηκε η αύξηση της συστολής ξήρανσης με την αύξηση της ποσότητας των ανακυκλωμένων αδρανών [142].

Μελέτη που διεξάχθηκε το 2009 από την Πολιτεία της Ουάσιγκτον, συνοψίζοντας τα αποτελέσματα διαφόρων ερευνών, παρουσίασε το εύρος των αναμενόμενων αλλαγών στις ιδιότητες του παραγόμενου σκυροδέματος λόγω της χρήσης ανακυκλωμένων αδρανών είτε αποκλειστικά χονδρόκοκκων είτε χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων αδρανών. Και στις δύο περιπτώσεις, πραγματοποιείται σύγκριση με αντίστοιχων χαρακτηριστικών μείγμα φυσικών αδρανών (πίνακας 2.7). Παρατηρούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις η χρήση συνδυαστικά λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων ανακυκλωμένων αδρανών οδηγεί σε περαιτέρω μείωση των ιδιοτήτων του παραγόμενου σκυροδέματος.

Πίνακας 2.7 Επίδραση χρήσης ανακυκλωμένων αδρανών στις ιδιότητες του σκυροδέματος[77].

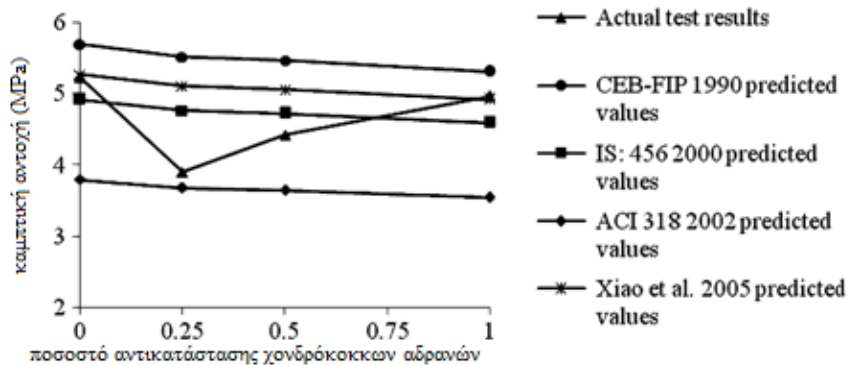
ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΧΡΗΣΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ	
	Χονδρόκοκκα	Χονδρόκοκκα και Λεπτόκοκκα
ΝΩΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ		
Απαιτήση σε νερό	μεγαλύτερη	πολύ μεγαλύτερη
Ειδικό βάρος	5% με 10% λιγότερο	
Εργασιμότητα	Μικρή εργασιμότητα και τραχύτητα όταν χρησιμοποιούνται χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα αδρανή. Μεγάλη κάθιση. Το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με τη χρήση μόνο χονδρόκοκκων αδρανών σε συνδυασμό με φυσικά λεπτόκοκκα αδρανή.	
ΣΚΛΗΡΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ		
Θλιπτική αντοχή	5% με 24% λιγότερο	15% με 40% λιγότερο
Εφελκυστική αντοχή	10% λιγότερο	10% με 20% λιγότερο
Μέτρο ελαστικότητας	10% με 33% λιγότερο	25% με 40% λιγότερο
Συρρίκνωση ξήρανσης	20% με 50% περισσότερο	70% με 100% περισσότερο
Ερπυσμός	30% με 60% λιγότερο	30% με 60% λιγότερο
Ρυθμός Διάβρωσης	ταχύτερος	ταχύτερος
Συνάφεια σκυροδέματος με οπλισμό	σταθερό	5% λιγότερο
Περατότητα	200% με 500% περισσότερο	
Θερμική Διαστολή	Λιγότερο από αυτό που αναμενόταν	
Ενανθράκωση	65% περισσότερο	
Αντίσταση σε θειικά άλατα	εξαρτάται από το μείγμα σκυροδέματος	
Αντίσταση σε ψύξη - απόψυξη	εξαρτάται από το σύστημα κενών με αέρα (μπορεί να παρουσιαστεί βελτίωση)	

Οι M. Chakradhara Rao (2010) πραγματοποίησαν έρευνα, στην οποία προσδιόρισαν την επίδραση στις ιδιότητες του σκυροδέματος, διαφορετικών ποσοστών αντικατάστασης φυσικών από ανακυκλωμένα αδρανή. Εν συνεχεία, συνέκριναν τα αποτελέσματα της ερευνάς τους με αντίστοιχες έρευνες που είχαν προηγηθεί. Τα αποτελέσματα της ερευνητικής τους δραστηριότητας παρουσιάζονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 2.5 Διακύμανση της θλιπτικής αντοχής βάσει του ποσοστού αντικατάστασης των χονδρόκοκκων αδρανών από διάφορους μελετητές [143- επεξεργασία ίδια]

Αναφορικά με την θλιπτική αντοχή, η μεταβολή της αντοχής για διαφορετικά ποσοστά αντικατάστασης παρουσιάζονται στο διάγραμμα που ακολουθεί (διάγραμμα 2.5). Αποδείχτηκε ότι για όλα τα ποσοστά αντικατάστασης τα αποτελέσματα συνηγορούν με την υπάρχουσα βιβλιογραφία. Ενώ, παρατηρείται ότι για ποσοστό έως 25% δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στην θλιπτική αντοχή σκυροδέματος με φυσικά και ανακυκλωμένα αδρανή. Αντίστοιχες είναι οι παρατηρήσεις για την καμπτική αντοχή (διάγραμμα 2.6) [143].



Διάγραμμα 2.6 Διακύμανση της καμπτικής αντοχής βάσει του ποσοστού αντικατάστασης των χονδρόκοκκων αδρανών από διάφορους μελετητές [143 – επεξεργασία ίδια].

Ολοκληρώνοντας, την ανασκόπηση των ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα των πειραματικών ερευνών γενικά επιδεικνύουν ότι οι ιδιότητες του σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή είναι μειωμένες. Ωστόσο, η μείωση της διαθεσιμότητας των φυσικών αδρανών κατάλληλων για χρήση στο σκυρόδεμα και η αυξημένη έλλειψη σε χώρους υγειονομικής ταφής, καθιστά τη χρήση ανακυκλωμένων αδρανών σε μίγματα σκυροδέματος, σε υψηλά ποσοστά στο συνολικό μείγμα, μία αναγκαιότητα. Ωστόσο, αυτό μπορεί καταστεί δυνατό με την περαιτέρω διερεύνηση για την υποστήριξη της χρήσης του, στον τομέα των κατασκευών [136]. Παράλληλα, απαιτείται ο ορισμός ελάχιστων απαιτήσεων αντοχής και λοιπών ιδιοτήτων που πρέπει να πληρούν τα ανακυκλωμένα αδρανή, καθώς και η ανεύρεση λύσεων στα συνήθη προβλήματα της χρήσης τους, όπως ενδεικτικά αναφέρονται στον πίνακα 2.8 [77].

Πίνακας 2.8 Πίνακας προτεινόμενων λύσεων σε προβλήματα που προκύπτουν από τη χρήση ανακυκλωμένων αδρανών [77].

ΠΡΟΒΛΗΜΑ	ΛΥΣΗ
<i>Γωνιώδης και τραχύ σχήμα και υφή</i>	Χρήση διαδικασίας θραύσης η οποία απομακρύνει την πλειονηφία του κονιάματος στα χονδρόκοκκα αδρανή και μείωση ή αποκλεισμός της χρήσης των ανακυκλωμένων λεπτόκοκκων αδρανών
<i>Μεγάλη απορροφητικότητα νερού</i>	ομοίως
<i>Μικρό ειδικό βάρος</i>	μείωση ή αποκλεισμός της χρήσης των ανακυκλωμένων λεπτόκοκκων αδρανών
<i>Μεγάλη απώλεια μάζας με απόξεση Los Angeles</i>	απομάκρυνση του κονιάματος θα μειώσει τις απώλειες
<i>Μικρή εργασιμότητα</i>	μείωση της χρήσης των ανακυκλωμένων λεπτόκοκκων αδρανών καθώς και χρήση ιπτάμενης τέφρας σε όλα τα μείγματα
<i>Μεγάλη κάθιση</i>	Απομάκρυνση του κονιάματος από τα χονδρόκοκκα αδρανή και περιορισμός της χρήσης λεπτόκοκκων αδρανών
<i>Αυξημένη απαίτηση σε νερό</i>	Προσθήκη μεγαλύτερης ποσότητας τσιμέντου ή ιπτάμενης τέφρας
<i>Μεγάλη συστολή ξήρανσης</i>	Περιορισμός της χρήσης ανακυκλωμένων λεπτόκοκκων αδρανών, χρήση ιπτάμενης τέφρας και χρήση μικρότερης ποσότητας νερού
<i>Μείωση θλιπτικής και καμπτικής αντοχής</i>	Χρήση ανακυκλωμένων αδρανών σε περιορισμένο ποσοστό

2.4 Καινοτομία της παρούσας έρευνας

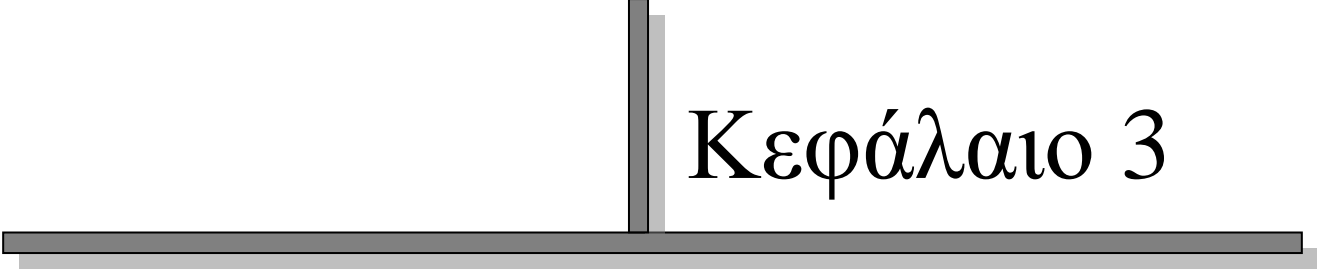
Πολλές έρευνες στην Ελλάδα και παγκοσμίως, όπως παρουσιάζονται στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, έχουν επικεντρωθεί στην διεξαγωγή πειραμάτων σχετικά με τις ιδιότητες των ανακυκλωμένων αδρανών από ΑΕΚΚ και στην χρήση τους ως αδρανή σκυροδέματος. Η παρούσα έρευνα πραγματοποιεί μία σειρά ελέγχων στο αντικείμενο αυτό, προσφέροντας νέα στοιχεία σχετικά με το θέμα αυτό. Στο σημείο αυτό, πρέπει να τονιστεί ότι τα ΑΕΚΚ παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλομορφία ανάλογα με την προέλευσή τους, κατά συνέπεια τα χαρακτηριστικά των ανακυκλωμένων αδρανών κάθε χώρας αναμένονται να είναι διαφορετικά.

Η καινοτομία της παρούσας έρευνας έγκειται κυρίως στο γεγονός ότι τα ανακυκλωμένα αδρανή τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, δεν ήταν αδρανή που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο ειδικά για το σκοπό αυτό, ούτε αφορούσαν σε ένα μόνο συστατικό του ρεύματος των αποβλήτων ΑΕΚΚ (σκυροδέμα, τούβλο κ.ο.κ.). Απεναντίας χρησιμοποιήθηκαν ανακυκλωμένα αδρανή προερχόμενα από τη συνήθη διαδικασία διαχείρισης ΑΕΚΚ μίας εταιρείας που δραστηριοποιείται στην Ελλάδα. Κατά συνέπεια, τα αποτελέσματα της ερευνητικής διαδικασίας έχουν άμεσο αντίκτυπο, διότι αφενός αφορούν στα χαρακτηριστικά των ΑΕΚΚ στη χώρα μας και αφετέρου το υλικό αυτό είναι άμεσα διαθέσιμο εφόσον κριθεί δυνατή η χρήση του.

Εκτός αυτού, η πειραματική διαδικασία επεκτάθηκε σε μεγάλο εύρος διαφορετικών δοκιμών τόσο αναφορικά με τις ιδιότητες των ανακυκλωμένων αδρανών όσο και αναφορικά με τις ιδιότητες του ανακυκλωμένου σκυροδέματος, προσφέροντας έτσι μία πληρέστερη διερεύνηση της καταλληλότητάς τους.

Ενδεικτικά, μελετήθηκαν οι χημικές ιδιότητες των ανακυκλωμένων αδρανών και η ποιοτική – ποσοτική τους στοιχειακή ανάλυση, ενώ η έρευνα για το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα περιελάμβανε την διερεύνηση των ιδιοτήτων του παραγόμενου σκυροδέματος με διαφορετικό ποσοστό αντικατάστασης των φυσικών αδρανών από τα ανακυκλωμένα, στοχεύοντας στην αναζήτηση του ποσοστού για το οποίο η απομείωση των ιδιοτήτων του παραγόμενου σκυροδέματος, δεν καθιστά απαγορευτική τη χρήση τους. Παράλληλα, μελετήθηκε πλήθος ιδιοτήτων, πολλές από τις οποίες δεν μελετώνται συχνά, για παράδειγμα ο έλεγχος της καμπτικής αντοχής με παράλληλα χρήση ακουστικής εκπομπής, η ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα του ανακυκλωμένου σκυροδέματος κ.α.. Ολοκληρώνοντας, ακολουθήθηκε μία μεθοδολογία τροποποίησης των ανακυκλωμένων αδρανών με σκοπό τη βελτίωση των ιδιοτήτων τους.

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε θα παρουσιαστεί αναλυτικά στα ακόλουθα κεφάλαια, καθιστώντας εμφανές το εύρος της παρούσας έρευνας και την αξιοπιστία της. Παράλληλα, επιτυγχάνεται σε μεγάλο βαθμό, ο στόχος της έρευνας αυτής, ήτοι το να παρουσιάσει τις δυνατότητες αξιοποίησης των ΑΕΚΚ για την παραγωγή σκυροδέματος κατάλληλων προδιαγραφών.



Κεφάλαιο 3

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

3.1 Σκυρόδεμα

Η λέξη σκυρόδεμα προέρχεται από τη σύνδεση δύο λέξεων: «σκύρα» (μικρά κομμάτια σπασμένης πέτρας) και «δένω» [144]. Το σκυρόδεμα είναι ένα σύνθετο υλικό το οποίο προέρχεται από ανάμιξη μίας συνδετικής κονίας, συνήθως τσιμέντου, αδρανών και νερού ενώ παράλληλα είναι ευρέως γνωστό με τη γαλλική ονομασία του μπετόν (beton). Μερικές φορές για την βελτίωση ορισμένων ιδιοτήτων του νωπού ή του σκληρυμένου σκυροδέματος εισάγονται στο μίγμα σε κατάλληλες αναλογίες πρόσμικτα ή πρόσθετα [145].

Το σκυρόδεμα είναι εξαιρετικά εύπλαστο υλικό και έχει τη μοναδική ιδιότητα να περνάει σε μικρό χρονικό διάστημα από τη ρευστή κατάσταση (νωπό σκυρόδεμα) στη στερεά (σκληρυμένο), παρέχοντας τη δυνατότητα να μορφωθεί σε καλούπια κάθε σχήματος, πριν στερεοποιηθεί και αποκτήσει τις τελικές αντοχές του. Αναφορικά με το ρυθμό σκλήρυνσης του σκυροδέματος σε μία εβδομάδα (επτά -7- ημέρες) αυτό έχει αποκτήσει περί το 70% της τελικής αντοχής του και σε εικοσιοκτώ (28) ημέρες περί το 90%. Το 100% το αποκτά μετά παρέλευση πολλών ετών. Υπό καλές συνθήκες περιβάλλοντος, το όριο ηλικίας του σκυροδέματος μπορεί να ξεπεράσει κατά πολύ τα εκατό χρόνια χωρίς σημαντικές αλλοιώσεις στη μάζα του. Το κλειδί για την παραγωγή δυνατού και ανθεκτικού στο χρόνο σκυρόδεμα είναι η σωστή αναλογία και ανάμιξη των συστατικών του [144].

3.1.1 Τσιμέντο

Το τσιμέντο είναι υδραυλική λεπτόκοκκη κονία που χρησιμοποιείται ως συνδετικό υλικό για την παραγωγή σκυροδέματος. Το άνυδρο τσιμέντο δεν μπορεί να συνδεθεί με την άμμο και τα αδρανή αλλά αποκτά την συνδετική του ικανότητα μόνο όταν αναμιχθεί με νερό. Αυτό συμβαίνει γιατί η χημική αντίδραση του τσιμέντου με το νερό (ενυδάτωση τσιμέντου) παράγει προϊόντα που έχουν χαρακτηριστικά πήξης και σκλήρυνσης [146].

Στην Ευρώπη, όλοι οι τύποι τσιμέντων συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις του προτύπου EN 197-1 (σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για τα κοινά τσιμέντα). Το πρότυπο αυτό κατηγοριοποιεί το κοινό τσιμέντο σε 5 κύριους τύπους, οι οποίοι είναι οι εξής: CEM I (τσιμέντο τύπου Πόρτλαντ), CEM II (σύνθετα τσιμέντα), CEM III (σκωριοτσιμέντο), CEM IV (ποζολανικό τσιμέντο) και CEM V (σύνθετο τσιμέντο).

Το πρότυπο αυτό παρέχει επίσης βαθμίδες αντοχής στις οποίες πρέπει να εμπίπτουν τα παραγόμενα τσιμέντα για την αγορά. Τα τσιμέντα χωρίζονται σε 3 κατηγορίες αντοχής, ανάλογα με τη θλιπτική αντοχή του πρότυπου κονιάματος στις 28 ημέρες. Οι κατηγορίες αντιπροσωπεύονται από την απαιτούμενη ελάχιστη θλιπτική αντοχή των 32,5/42,5/52,5 N/mm² [145].

Σε πολλές εφαρμογές, ειδικότερα σε δριμείες περιβαλλοντικές συνθήκες, η επιλογή του τσιμέντου έχει επίδραση στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Για το

λόγο αυτό η επιλογή του τσιμέντου που θα χρησιμοποιηθεί, ειδικά όσον αφορά στον τύπο και την κατηγορία αντοχών πρέπει να ακολουθήσει τα κατάλληλα πρότυπα ή/και κανονισμούς για το σκυρόδεμα που ισχύουν στην περιοχή χρήσης.

3.1.2 Αδρανή

Ως αδρανή χαρακτηρίζονται τα διαβαθμισμένα υλικά ορυκτής ή βιομηχανικής προέλευσης τα οποία χρησιμοποιούνται χωρίς ή με κάποιο συγκολλητικό υλικό στα τεχνικά έργα. Χαρακτηρίζονται ως αδρανή καθώς θεωρείται ότι δεν αντιδρούν χημικά με το συγκολλητικό μέσο παρά μόνο συγκολλούνται από αυτό. Στην πραγματικότητα όμως είναι χημικώς ενεργά υλικά τα οποία ελέγχουν τις ιδιότητες και τη συμπεριφορά της μάζας στην οποία συμμετέχουν [147].

Τα αδρανή υλικά είναι σχετικά φθηνά υλικά και δε συμμετέχουν σε σύνθετες χημικές επιδράσεις με το νερό, επομένως έχει επικρατήσει να αντιμετωπίζονται ως συμπληρωματικό υλικό στο σκυρόδεμα [148]. Εντούτοις, τα αδρανή του σκυροδέματος αποτελούν κατά προσέγγιση το 80% του συνολικού βάρους του σκυροδέματος, καταλαμβάνουν το 70-75% του όγκου του και συνιστούν την πετρώδη δομή του σκυροδέματος [145].

Η κατηγοριοποίηση των αδρανών γίνεται ανάλογα με τον μέγιστο κόκκο, τη φαινόμενη πυκνότητα και την προέλευσή τους. Αναφορικά με το μέγιστο κόκκο, ο όρος χονδρόκοκκα αδρανή χρησιμοποιείται για να περιγράψει αδρανή με μέγεθος κόκκων μεγαλύτερο των 4,75 mm και ο όρος λεπτόκοκκα αδρανή χρησιμοποιείται για μέγεθος κόκκων μικρότερο των 4,75 mm. Συνήθως, τα λεπτόκοκκα αδρανή περιλαμβάνουν μεγέθη κόκκων που κυμαίνονται από 75μm έως 4,75 mm και τα χονδρόκοκκα αδρανή από 4,75 mm έως 50 mm.

Τα περισσότερα αδρανή έχουν πυκνότητα όγκου από 1520 έως 1680 kg/m³ και παράγουν σκυρόδεμα κανονικού βάρους. Για ειδικές εφαρμογές μπορούν να χρησιμοποιηθούν αδρανή με μικρότερη ή μεγαλύτερη πυκνότητα για να παραχθεί ελαφρύ ή βαρύ σκυρόδεμα αντίστοιχα. Γενικά, τα αδρανή με πυκνότητα κάτω από 1120 kg/m³ ονομάζονται ελαφριά αδρανή και αυτά με πυκνότητα πάνω από 2080 kg/m³ ονομάζονται βαριά αδρανή.

Η σημαντικότερη πηγή αδρανών στην παραγωγή σκυροδέματος και όχι μόνο, είναι τα φυσικά αδρανή, δηλαδή τα προερχόμενα από φυσικές πηγές. Τα φυσικά αδρανή μπορεί να είναι θραυστά (προερχόμενα από θραύση πετρωμάτων σε λατομεία) ή συλλεκτά (προκύπτουν από τη φυσική αποσάθρωση των πετρωμάτων) [148]. Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα φυσικά αδρανή στην Ελλάδα είναι ασβεστολιθικής προέλευσης. Αντίθετα, προϊόντα θερμικής επεξεργασίας ονομάζονται τεχνητά (συνθετικά) αδρανή.

Για παραγωγή υψηλής ποιότητας σκυροδέματος, τα αδρανή καθαρίζονται και κοκκομετρούνται σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις με μηχανικές διεργασίες. Κατάλληλα για χρήση ως αδρανή σκυροδέματος είναι υλικά τα οποία δεν επηρεάζουν τη σκλήρυνση του τσιμέντου, έχουν ισχυρή πρόσφυση με τον τσιμεντοπολτό και δεν αποτελούν κίνδυνο για την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος [148].

3.1.3 Νερό

Η καταλληλότητα του νερού ανάμιξης για παραγωγή σκυροδέματος εξαρτάται από την προέλευσή του. Το ευρωπαϊκό πρότυπο EN1008 κατηγοριοποιεί τους ακόλουθους τύπους νερού αναφορικά με τη χρήση στην παραγωγή σκυροδέματος: πόσιμο νερό, υπόγεια ύδατα, νερό φυσικών πόρων, νερό βιομηχανικών διεργασιών, θαλασσίνο ή υφάλμυρο νερό και νερά αποβλήτων. Στην περίπτωση νερού άγνωστης ποιότητας, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί έλεγχος της καταλληλότητάς του και να χρησιμοποιηθεί μόνο εφόσον πληροί τις απαιτήσεις του προτύπου [145].

3.1.4 Πρόσμικτα σκυροδέματος

Ως πρόσμικτο σκυροδέματος καθορίζεται ένα υλικό εκτός από το νερό, τα αδρανή, τα υδραυλικά τσιμέντα και τις ίνες οπλισμού, που χρησιμοποιείται ως συστατικό του σκυροδέματος και προστίθεται στο μίγμα αμέσως πριν ή κατά τη διάρκεια της ανάμιξης [148]. Πρόκειται για ουσίες σε υγρή μορφή ή σκόνη, οι οποίες επηρεάζουν τις ιδιότητες του νωπού και/ή του σκληρυμένου σκυροδέματος με χημικό και / ή φυσικό τρόπο [145].

Οι ορισμοί και οι χρήσεις των πρόσμικτων σκυροδέματος καθορίζονται από το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 934-2. Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό, υπάρχουν οι ακόλουθοι τύποι πρόσμικτων: μειωτές νερού, υπερρευστοποιητές, αερακτικά, επιταχυντές πήξης ή σκλήρυνσης, επιβραδυντές και στεγανωτικά μάζας, καθένα από τους οποίους προσδίδει διαφορετικές ιδιότητες στο παραγόμενο νωπό ή σκληρυμένο σκυρόδεμα.

Η επιτρεπόμενη δοσολογία των πρόσμικτων σκυροδέματος δεν πρέπει να ξεπερνά το 5% κατά βάρος της χρησιμοποιηθείσας ποσότητας τσιμέντου. Τα πρόσμικτα μπορούν με βεβαιότητα να ενισχύσουν τις ιδιότητες του σκυροδέματος, αλλά δεν πρέπει να αναμένεται να αντισταθμίσουν την πτωχή ποιότητα των συστατικών του σκυροδέματος ή την κακή αναλογία ανάμιξης.

3.1.5 Πρόσθετα σκυροδέματος

Τα πρόσθετα σκυροδέματος είναι λεπτόκοκκα υλικά, τα οποία προστίθενται στο σκυρόδεμα εν γένει σε αρκετά μεγάλες αναλογίες (περίπου 5-20%). Χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν ή να προσδώσουν συγκεκριμένες ιδιότητες στο νωπό και/ή στο σκληρυμένο σκυρόδεμα. Υπάρχουν δύο τύποι ανόργανων προσθέτων σκυροδέματος.

Ο τύπος I περιλαμβάνει πρακτικά ανενεργά υλικά, όπως πούδρα αδρανών, χαλαζιακή σκόνη και χρωστικές ουσίες, ενώ ο τύπος II περιλαμβάνει ποζολανικά ή λανθάνοντα υδραυλικά υλικά, όπως φυσικές ποζολάνες, ιπτάμενες τέφρες και πυριτική πούδρα [145]. Εφαρμογή των πρόσθετων πραγματοποιείται στην περίπτωση όπου επιδιώκεται: (α) βελτίωση της εργασιμότητας, για τα μίγματα νωπού σκυροδέματος που εμφανίζουν τάση για εξίδρωση και απόμιξη, (β) ανθεκτικότητα

στη θερμική ρηγμάτωση (γ) ανθεκτικότητα στη χημική προσβολή και (δ) παραγωγή σκυροδέματος υψηλής αντοχής και απόδοσης [148].

3.1.6 Μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος

Η μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος είναι η διαδικασία που χρησιμοποιούμε για να καταλήξουμε στο σωστό συνδυασμό τσιμέντου, αδρανών, νερού και πρόσμικτων ώστε να παράγουμε σκυρόδεμα ορισμένων προδιαγραφών. Στόχος της μελέτης σύνθεσης σκυροδέματος είναι να παραχθεί ένα προϊόν το οποίο θα καλύπτει κάποιες προκαθορισμένες απαιτήσεις με το χαμηλότερο δυνατόν κόστος [148].

Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται υπολογισμός του όγκου του κάθε υλικού, στη σύνθεση του σκυροδέματος, ώστε να καθοριστεί ο όγκος του παραγόμενου σκυροδέματος βάσει του όγκου των πρώτων υλών παρασκευής του. Ο υπολογισμός γίνεται με την προϋπόθεση, ότι οι ποσότητες του τσιμέντου, νερού, αδρανών, πρόσμικτων και προσθέτων, που θα αναμιχθούν για την παραγωγή 1m^3 νωπού σκυροδέματος, συνυπολογίζοντας τα κενά μετά τη συμπίκνωση, αθροιζόμενες έχουν όγκο 1m^3 .

Ο λόγος νερού/τσιμέντου είναι ένας από τους πιο σοβαρούς παράγοντες που πρέπει να καθοριστούν, καθώς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη. Γι' αυτό, όταν προσδιορίζουμε το συνολικό ποσό του νερού που χρειάζεται ένα σκυρόδεμα, αναφερόμαστε στο λόγο του βάρους του νερού προς το βάρος του τσιμέντου που χρησιμοποιήσαμε. Έχει αποδεχτεί πειραματικά ότι, όσο αυξάνεται ο λόγος νερού/τσιμέντου, τόσο ελαττώνεται η αντοχή του σκυροδέματος [149]. Η αντοχή του σκυροδέματος γίνεται μέγιστη όταν η ποσότητα του νερού αναμίξεως ή όταν ο όγκος των κενών ή όταν και τα δύο γίνουν συγχρόνως ελάχιστα.

Ο λόγος νερού/τσιμέντου πρέπει να είναι περίπου 0,26 έως 0,28 για να μπορεί να γίνεται πλήρως η χημική αντίδραση κατά την πήξη και σκλήρυνση του σκυροδέματος. Συνήθως όμως, λόγω του εργασιμότητας του σκυροδέματος, δεν είναι μικρότερος από 0,45 [149].

3.1.7 Τύποι σκυροδέματος

Οι προδιαγραφές που πρέπει να πληρούνται στο παραγόμενο σκυρόδεμα, στην Ευρώπη, καθορίζονται από το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 206-1. Το πρότυπο αυτό βρίσκει εφαρμογή σε περιπτώσεις κατασκευών επί τόπου στο έργο, σε προκατασκευασμένα στοιχεία και δομικά προϊόντα κτιρίων και έργων [145]. Επιπλέον, στη χώρα μας ισχύει ο κανονισμός τεχνολογίας σκυροδέματος (ΚΤΣ -97) ο οποίος με σκοπό την εναρμόνιση με το EN 206-1 και τα λοιπά σχετικά ευρωπαϊκά πρότυπα, αντικαταστάθηκε από νέο ΚΤΣ ο οποίος εκδόθηκε τον Ιούνιο του 2016.

Το σκυρόδεμα χρησιμοποιείται στην κατασκευή των δομικών έργων που παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία και διαφέρουν πάρα πολύ το ένα από το άλλο. Υπάρχουν λοιπόν πολλές κατηγορίες και ποιότητες σκυροδέματος και κάθε φορά χρειάζεται να διαλέγεται η κατάλληλη. Η διάκριση σε κατηγορίες γίνεται με πολλούς τρόπους, ανάλογα με την ιδιότητα, που εξετάζεται κάθε φορά.

Συνηθέστερα χρησιμοποιείται η διαφοροποίηση των σκυροδεμάτων βάσει της θλιπτικής τους αντοχής. Οι κατηγορίες του σκυροδέματος συμβολίζονται με το κεφαλαίο γράμμα C και δύο ακέραιους αριθμούς δεξιά του, εκ των οποίων ο μιν πρώτος ορίζει τη χαρακτηριστική αντοχή σε θλίψη (MPa) του κυλίνδρου με διάμετρο βάσης 15cm και ύψος 30cm ($f_{ck,cyl}$) και ο δεύτερος του κύβου με ακμή 15cm ($f_{ck,cube}$). Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι κατηγορίες σκυροδέματος βάσει της τιμής της θλιπτικής αντοχής σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 206-1.

Πίνακας 3.1 Κατηγορίες θλιπτικής αντοχής για σκυρόδεμα.

Κατηγορία Θλιπτικής αντοχής	Ελάχιστη χαρακτηριστική αντοχή κυλίνδρου $f_{ck,cyl}$ N/mm ²	Ελάχιστη χαρακτηριστική αντοχή κύβου $f_{ck,cube}$ N/mm ²
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105
C100/115	100	115

3.2 Ιδιότητες Αδρανών Υλικών

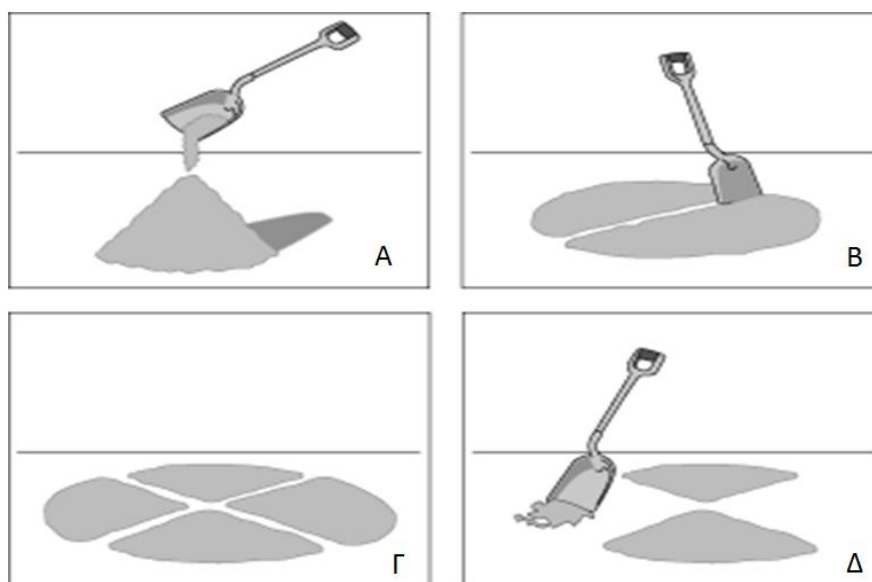
Τα αδρανή υλικά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή σκυροδέματος, επιδρούν σημαντικά στις ιδιότητές του ιδίως στη διαδικασία της πήξης και της σκλήρυνσης, στην τελική αντοχή του, την ευστάθεια του όγκου, την κατάσταση της επιφάνειάς του και στην προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση. Για το λόγο αυτό παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Οι ιδιότητες των αδρανών διακρίνονται σε γεωμετρικές, φυσικές και χημικές (πίνακας 3.2). Επιπλέον συχνά μελετάται η ποσοτική και ποιοτική στοιχειακή τους ανάλυση.

Στις γεωμετρικές ιδιότητες των αδρανών υλικών περιλαμβάνονται οι: (1) κοκκομετρική διαβάθμιση, (2) σχήμα χονδρόκοκκων αδρανών, (3) περιεκτικότητα χονδρόκοκκων αδρανών σε κελύφη, (4) περιεκτικότητα αδρανών σε παιπάλη και (5) ποιότητα λεπτόκοκκων αδρανών. Στις φυσικές ιδιότητες, περιλαμβάνονται οι: (1) αντίσταση σε θρυμματισμό (Δοκιμή Los Angeles), (2) αντίσταση σε φθορά (δοκιμή micro-Deval), (3) αντίσταση σε στίλβωση και ολισθηρότητα, (4) ειδικό βάρος και υδροαπορροφητικότητα, (5) ανθεκτικότητα σε: ψύξη – απόψυξη, αποσάθρωση (υγεία) και σταθερότητα όγκου – συστολή ξήρανσης και (6) αλκαλοπυριτική

αντίσταση. Τέλος, αναφορικά με τις χημικές ιδιότητες των αδρανών μελετώνται οι: (1) περιεκτικότητα σε χλωριόντα, (2) περιεκτικότητα σε θειικά όπου υπολογίζονται τα θειικά διαλυτά σε οξύ και το ολικό θείο και (3) περιεκτικότητα σε λοιπά συστατικά που επηρεάζουν είτε την ταχύτητα της σκλήρυνσης του σκυροδέματος είτε τη σταθερότητα όγκου αυτού είτε τις λοιπές του ιδιότητες.

Στην Ευρώπη, τα χαρακτηριστικά των αδρανών σκυροδέματος καθορίζονται βάσει του προτύπου EN 12620, το οποίο είναι ιδιαίτερα διεξοδικό. Το πρότυπο αυτό ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου στο οποίο θα ενσωματωθούν και την προέλευση τους, καθορίζει για τα αδρανή, μια σειρά δοκιμών που πρέπει να εκτελεστούν. Επιπλέον, ειδικά για την Ελλάδα ο ΚΤΣ - 97 καθορίζει επιτρεπόμενα όρια για την κάθε ιδιότητα. Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων αυτών, πραγματοποιούνται δοκιμές βάσει εγκεκριμένων προτύπων τα οποία μπορεί να είναι: αμερικάνικα (ASTM) ή/και ευρωπαϊκά (EN). Στον πίνακα 3.2 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα πρότυπα βάσει των οποίων πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές ελέγχου των ιδιοτήτων αδρανών, στην παρούσα έρευνα.

Τον έλεγχο κάθε ιδιότητας των αδρανών υλικών πρέπει να προηγηθεί η επιλογή κατάλληλου και αξιόπιστου δείγματος αδρανών. Η δειγματοληψία ενός αδρανούς μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα των δοκιμών στις οποίες θα υποβληθεί ένα δείγμα κατά συνέπεια αποτελεί τον κρισιμότερο παράγοντα ενός ελέγχου ή δοκιμής. Η δειγματοληψία πρέπει να γίνει κατά τέτοιο τρόπο ώστε το δείγμα που θα ληφθεί να εκφράζει πιστά τις ιδιότητες όλης της ποσότητας του υλικού. Η μεθοδολογία της δειγματοληψίας καθορίζεται από το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 932-1 και το αμερικανικό πρότυπο ASTM D75.



Εικόνα 3.1 Τετραμερισμός [150].

Το πρότυπο EN 932-1 καθορίζει μια σταθερή αναλογία με την οποία πρέπει να λαμβάνεται το δείγμα από τον σωρό για την περίπτωση που η επιλογή του γίνεται χειρονακτικά με τη χρήση σέσουλας [151]. Στην περίπτωση που το πρότυπο βάσει του οποίου προσδιορίζεται μία συγκεκριμένη ιδιότητα, καθορίζει μέγιστη μάζα δείγματος μικρότερη από την ληφθείσα, τότε το δείγμα που έχει ληφθεί μειώνεται.

Για τη μείωση του δείγματος, μπορεί να γίνει είτε χρήση διαχωριστή μείγματος είτε να ακολουθηθεί η μεθοδολογία του τετραμερισμού, όπως αυτή περιγράφεται στα πρότυπα EN 932 -2 και ASTM C702.

Η διαδικασία του τετραμερισμού πραγματοποιείται όπως περιγράφεται ακολούθως (εικόνα 3.1). Το προς διαχωρισμό υλικό αδειάζεται προσεκτικά σε μια επίπεδη επιφάνεια ώστε να σχηματιστεί ένας κώνος (εικόνα 3.1 –Α). Στη συνέχεια με ένα φτυάρι ή μία σπάτουλα ανακατεύουμε το δείγμα παίρνοντας υλικό από τη βάση του κώνου και ρίχνοντάς το στην κορυφή του (εικόνα 3.1 –Β). Με το φτυάρι ή την σπάτουλα επιπεδώνουμε την κορυφή του κώνου και χωρίζουμε το υλικό σε τέσσερα τεταρτημόρια (εικόνα 3.1 –Γ). Απομακρύνουμε τα δύο κατά κορυφή τεταρτημόρια και κρατούμε το υλικό των δύο άλλων (εικόνα 3.1 –Δ). Στη συνέχεια επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία άλλη μία φορά έτσι που το τελικό προς εξέταση δείγμα να είναι το ένα τέταρτο περίπου του αρχικού δείγματος [150].

Πίνακας 3.2 Δοκιμές αδρανών υλικών ανά ελεγχόμενη ιδιότητα [152 - επεξεργασία ίδια].

A/A	ΙΔΙΟΤΗΤΑ – ΔΟΚΙΜΗ	ΠΡΟΤΥΠΟ
ΓΕΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ		
1	Μέθοδοι δειγματοληψίας	ASTM D75, EN 932-1
2	Μέθοδοι μείωσης εργαστηριακών δειγμάτων	ASTM C702, EN 932-2
ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ		
1	Κοκκομετρική διαβάθμιση	ASTM C-136, EN 933-1
2	Σχήμα χονδρόκοκκων αδρανών: Δείκτης πλακοειδούς	EN 933-3
3	Περιεκτικότητα σε χονδρόκοκκων αδρανών σε κελύφη	EN 933-7
4	Περιεκτικότητα σε παιπάλη	ASTM C-117, EN 933-1
5A	Ποιότητα λεπτόκοκκων: Ισοδύναμο Άμμου	ASTM D-2419
5B	Ποιότητα λεπτόκοκκων: Μπλε μεθυλενίου	EN 933-9
ΦΥΣΙΚΕΣ/ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ		
1	Αντοχή σε θρυμματισμό κατά Los Angeles	ASTM C 131
2	Ειδικό βάρος -Υδροαπορροφητικότητα	ASTM C127, ASTM C128
3	Ανθεκτικότητα στην αποσάθρωση (Υγεία πετρώματος)	AASHTO T 104-94
ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ		
1	Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε χλωρίοντα	EN 1744-1, (άρθρα 7,8)
2A	Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε Θειικά: Προσδιορισμός ολικού Θείου	EN 1744-1, (άρθρο 11)
2B	Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε Θειικά: Προσδιορισμός ευδιάλυτων σε οξέα SO ₃	EN 1744-1, (άρθρο 12)
3	Προσδιορισμός απώλειας κατά την πύρωση (στους 950 °C)	EN 196-2
4	Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε ανθρακικά άλατα	EN 196-21, (άρθρο 5)

Σε περίπτωση που τα προς χρήση αδρανή υλικά εικάζεται ότι περιέχουν χημικώς ασταθή ορυκτά ή ορυκτά που είναι δυνατόν να επηρεάσουν τις ιδιότητες και την ποιότητα του τελικού προϊόντος, πραγματοποιείται προσδιορισμός των φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών των αδρανών με πετρογραφικές μεθόδους ανάλυσης.

Για την πραγματοποίηση όλων των παραπάνω δοκιμών, χρησιμοποιείται εργαστηριακός εξοπλισμός, ο οποίος οφείλει να πληροί συγκεκριμένες προδιαγραφές και να είναι πιστοποιημένος από τους αρμόδιους φορείς.

3.2.1 Γεωμετρικές ιδιότητες

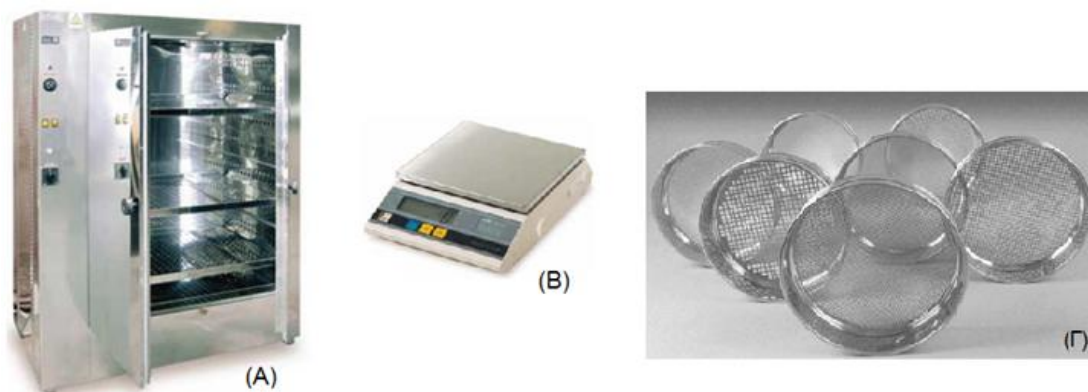
Κοκκομετρική διαβάθμιση

Κοκκομετρική διαβάθμιση είναι η κατανομή του μεγέθους των κόκκων των αδρανών που εκφράζεται ως το ποσοστό μάζας που διέρχεται από μια καθορισμένη ομάδα κόσκινων [153]. Η κοκκομετρική διαβάθμιση προσδιορίζεται με τη χρήση ομάδας πρότυπων κόσκινων και ορίζει την ποσότητα χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων αδρανών στο υπό εξέταση κλάσμα.

Στη χώρα μας, τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα κόσκινα είναι: τα κόσκινα της αμερικάνικης σειράς (βάσει του ASTM E11) και τα κόσκινα της γερμανικής σειράς (βάσει των DIN 4187 και 4188). Η εφαρμογή του EN 12620 οδήγησε στη χρήση νέας σειράς κόσκινων πιστοποιημένα κατά EN 933-1.

Ο προσδιορισμός της κοκκομετρικής διαβάθμισης ενός κλάσματος αδρανών ή ενός μείγματος κλασμάτων είναι όμοιος για την περίπτωση των αμερικάνικων και των ευρωπαϊκών προτύπων με τη διαφορά ότι χρησιμοποιούνται τα αντίστοιχα κόσκινα κατά περίπτωση. Η διαδικασία είναι κοινή για λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα αδρανή, ενώ παράλληλα το κάθε πρότυπο καθορίζει την ελάχιστη ποσότητα αδρανών υλικών που πρέπει να εξεταστούν, συναρτήσει του μέγιστου μεγέθους κόκκου αδρανών.

Για την πραγματοποίηση της δοκιμής (κατά ASTM C136) απαιτείται ο ακόλουθος εργαστηριακός εξοπλισμός: (α) κλίβανος, που να διατηρεί σταθερή θερμοκρασία $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, (β) ζυγοί συγκεκριμένης ευαισθησίας και (γ) πιστοποιημένα κόσκινα (εικόνα 3.2). Αρχικά, επιλέγεται η κατάλληλη ελάχιστη ποσότητα δείγματος, ξηραίνεται μέχρι σταθερού βάρους σε θερμοκρασία $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ και καταγράφεται το βάρος ως βάρος στεγνό. Επιλέγονται τα κατάλληλα κόσκινα και τοποθετούνται σε μία στήλη (το κόσκινο με την μεγαλύτερη οπή τοποθετείται πάνω και το κόσκινο με τη μικρότερη οπή τοποθετείται κάτω). Τα κόσκινα στη συνέχεια, αναταράσσονται με το χέρι ή με την μηχανική κοσκινίστρα για τόσο χρόνο ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του προτύπου. Αποφεύγεται να γίνει υπερφόρτωση των κόσκινων εκτελώντας το κοσκίνισμα του δείγματος σε δύο ή περισσότερα τμήματα. Κατόπιν, ζυγίζεται η ποσότητα του συγκρατούμενου υλικού αθροιστικά σε κάθε κόσκινο και καταγράφεται η ένδειξη του ζυγού ως συνολικό συγκρατούμενο βάρος ξεκινώντας από το μεγαλύτερο κόσκινο. Για να είναι έγκυρη η δοκιμή, το συνολικό βάρος του δείγματος όπως προέκυψε από τη διαδικασία του κοσκινίσματος δεν πρέπει να διαφέρει πάνω από 0,3% του βάρους του αρχικού δείγματος πριν το κοσκίνισμα [154].



Εικόνα 3.2 Εργαστηριακός εξοπλισμός για την κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών: (Α) κλίβανος [155], (Β) ζυγοί [155] και (Γ) κόσκινα [156].

Τα αποτελέσματα της δοκιμής εκφράζονται ως επί τις εκατό ποσοστό του διερχόμενου υλικού από το κάθε κόσκινο i , βάσει του τύπου:

$$\text{διερχόμενο \% στο κόσκινο } i = \frac{\text{διερχόμενο κόσκινο } i}{\text{αρχικό βάρος δείγματος}} * 100$$

Τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης αποτυπώνονται στο κοκκομετρικό διάγραμμα, το οποίο στον οριζόντιο άξονα έχει την διάμετρο της οπής των κοσκίων και στον κατακόρυφο το ποσοστό του διερχόμενου υλικού. Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα για τον λόγο ότι είναι επιθυμητή η ανάπτυξη της περιοχής των μικρών διαμέτρων. Η συνένωση των σημείων του διαγράμματος δίνει μια πολυγωνική γραμμή που καλείται κοκκομετρική καμπύλη [157].

Βάσει της χρήσης του παραγόμενου σκυροδέματος, ο ΚΤΣ -97 ορίζει ανώτατα και κατώτατα όρια απαιτούμενης κοκκομετρικής διαβάθμισης, συναρτήσεως των χρησιμοποιηθέντων κοσκίων και του μέγιστου κόκκου των αδρανών. Ανάλογες είναι οι απαιτήσεις από το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 480-1. Η επιλογή της καταλληλότερης κοκκομετρικής καμπύλης από τις θεωρητικά άπειρες σε αριθμό που ικανοποιούν τα κριτήρια των κανονισμών, καθορίζεται από τις επιμέρους επιθυμητές ιδιότητες του τελικού προϊόντος, τα διαθέσιμα υλικά, τις εργοταξιακές συνθήκες και το οικονομικό κόστος.

Σχήμα χονδρόκοκκων αδρανών – δείκτης πλακοειδούς

Το σχήμα των κόκκων των αδρανών επηρεάζει την εργασιμότητα και την αντοχή του σκυροδέματος [158]. Ανάλογα με το σχήμα τους οι κόκκοι διακρίνονται σε σφαιρικούς, γωνιώδεις, πλακοειδείς, επιμήκεις, ή κυβικούς. Τα γωνιώδη αδρανή χρειάζονται μεγαλύτερη ποσότητα τσιμεντοπολτού σε σχέση με τα σφαιρικά, για την ίδια εργασιμότητα του σκυροδέματος αλλά παρουσιάζουν καλύτερη συνοχή μεταξύ τους και καλύτερη πρόσφυση με το κονίαμα [159].

Ο προσδιορισμός του σχήματος των χονδρόκοκκων αδρανών πραγματοποιείται βάσει δύο δεικτών: του δείκτη πλακοειδούς (flakiness index- FI) και του δείκτη μορφής (shape index –SI). Ο μελετητής μπορεί να επιλέξει

εναλλακτικά τη μία ή την άλλη δοκιμή. Στην παρούσα έρευνα αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα του δείκτη πλακοειδούς.

Η δοκιμή καθορισμού του δείκτη πλακοειδούς στοχεύει στον καθορισμό του μέσου ελάχιστου πάχους του συνόλου των αδρανών και εφαρμόζεται στα χονδρόκοκκα αδρανή με ονομαστική διάμετρο μικρότερη των 80 mm και μεγαλύτερη των 4 mm (χονδρόκοκκα αδρανή) [158]. Ο δείκτης πλακοειδούς προσδιορίζεται βάσει του προτύπου EN 933-3 με την πραγματοποίηση δύο διαδοχικών κοσκινισμάτων.

Αρχικά, με τη χρήση των κόσκινων με τετραγωνικές οπές (δηλαδή με αυτά που χρησιμοποιούνται στην κοκκομετρική ανάλυση των αδρανών) το δείγμα διαχωρίζεται σε διάφορα κλάσματα μεγέθους σωματιδίων d_i/D_i . Ζυγίζονται και απομακρύνονται όλα τα αδρανή που διέρχονται από το κόσκινο των 4mm και συγκρατούνται στο κόσκινο των 80mm. Στη συνέχεια ζυγίζονται και τοποθετούνται χωριστά όλα τα αδρανή σε κάθε μέγεθος κλάσματος d_i/D_i μεταξύ 4 mm και 80 mm. Καθένα από τα κλάσματα αδρανών d_i/D_i κατόπιν κοσκινίζεται χρησιμοποιώντας ειδικά κόσκινα τα οποία φέρουν παράλληλες μπάρες (κόσκινα bar – εικόνα 3.3) και παράλληλες σχισμές πλάτους $D_i/2$. Η διαδικασία αυτή διεξάγεται χειρονακτικά και θεωρείται πλήρης, όταν το υλικό που διατηρείται δεν μεταβάλλεται περισσότερο από 1% κατά τη διάρκεια ενός λεπτού κοσκινίσματος. Τέλος, ζυγίζεται το υλικό από κάθε κλάσμα αδρανών που διέρχεται από το αντίστοιχο κόσκινο bar [160].



Εικόνα 3.3 Κόσκινα με παράλληλες μπάρες (κόσκινα bar) [165].

Ο γενικός δείκτης πλακοειδούς υπολογίζεται ως η συνολική μάζα των σωματιδίων που διέρχεται από τα κόσκινα και εκφράζεται ως ένα ποσοστό της συνολικής ξηρής μάζας της διερχόμενης ποσότητας από το κόσκινο bar προς την συνολική ποσότητα του κλάσματος d_i/D_i .

Περιεκτικότητα σε κελύφη

Ο προσδιορισμός της περιεκτικότητας σε κελύφη (shell content – SC) πραγματοποιείται σε χονδρόκοκκα αδρανή, με μέγεθος κόκκου αδρανών μεταξύ 4 -

63mm, βάσει του EN 933-7. Κατά τη δοκιμή, όλα τα όστρακα ή θραύσματα οστράκων διαχωρίζονται χειρονακτικά από το δείγμα των αδρανών. Η περιεκτικότητα κατά μάζα σε όστρακα εκφράζεται ως ποσοστιαία (%) αναλογία [158]. Η δοκιμή εφαρμόζεται σε φυσικά αδρανή (λιμναίων ή ποταμίστιων αποθέσεων), σε αδρανή θαλάσσιας προέλευσης ή σε αδρανή άγνωστης προέλευσης που προορίζονται για χρήση στο σκυρόδεμα.

Το πρότυπο EN 12620 δεν καθορίζει συγκεκριμένο επιτρεπόμενο όριο, αλλά χαρακτηρίζει τα αδρανή σύμφωνα με την περιεκτικότητα σε κελύφη βάσει του ακόλουθου πίνακα 3.3 [161].

Πίνακας 3.3 Περιεκτικότητα σε κελύφη κατά EN12620 [161].

Shell content %	Category SC
≤ 10	SC ₁₀
> 10	SC _{Declared}
No requirement	SC _{NR}

Περιεκτικότητα σε παιπάλη (fines)

Ως παιπάλη, κατά τα αμερικανικά πρότυπα, ορίζεται το λεπτόκοκκο κλάσμα αδρανών το οποίο διέρχεται από το κόσκινο No200 (το οποίο έχει άνοιγμα τετραγωνικής οπής 0,075mm). Σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 12620 ως παιπάλη ορίζεται το διαβαθμισμένο λεπτομερές αδρανές υλικό με μέγιστο κόκκο 2mm, το οποίο διέρχεται σε ποσοστό 70 – 100% από το κόσκινο 0,063 mm [150]. Η παιπάλη εμπεριέχεται στα χονδρόκοκκα και στα λεπτόκοκκα αδρανή σε ποσοστά που ποικίλουν ανάλογα με την προέλευση του υλικού και τη διαδικασία παραγωγής του [152].

Λόγω της προσκόλλησης της παιπάλης στο χονδρόκοκκο υλικό, ο διαχωρισμός της από αυτό με τον συνήθη τρόπο κοσκίνισματος είναι αρκετά δύσκολος και όχι πλήρης, γι' αυτό ο προσδιορισμός της ποσότητας στο κλάσμα κάθε αδρανούς γίνεται με υγρό κοσκίνισμα του υλικού και στη συνέχεια με κοσκίνισμα του ξηρού δείγματος που έμεινε μετά την πλύση του υλικού. Ο προσδιορισμός της παιπάλης εΐθισται να πραγματοποιείται παράλληλα με τον έλεγχο της κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών. Από πλευράς χημικής σύστασης, στο κλάσμα της είναι πιθανή η παρουσία αργίλου.

Η παιπάλη είναι ανεπιθύμητη, σε αδρανή που προορίζονται στην παραγωγή σκυροδέματος. Σύμφωνα με τον Κ.Τ.Σ., για αδρανή σκυροδέματος, το μέγιστο επιτρεπτό ποσοστό παιπάλης δεν πρέπει να υπερβαίνει το 16% κατά βάρος στην άμμο και το 1% κατά βάρος στα χονδρόκοκκα κλάσματα. Ειδικότερα για άοπλα σκυροδέματα το ποσοστό παιπάλης στην άμμο μπορεί να φτάσει το 20% [150].

Το πρότυπο EN12620 κατατάσσει τα αδρανή, ανάλογα με το ποσοστό που η παιπάλη συμμετέχει σε αυτά, σε διαφορετική κατηγορία [162]. Παράλληλα, το Παράρτημα D του ίδιου προτύπου, ορίζει μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή το 3% κατά

βάρος, τιμή η οποία μπορεί να διαφοροποιηθεί βάσει των συνθηκών στο εκάστοτε έργο [161].

Ποιότητα λεπτόκοκκων αδρανών

Η καταλληλότητα των αδρανών υλικών προσδιορίζεται μεταξύ άλλων από την ποιότητα των λεπτόκοκκων αδρανών. Η ποιότητα αφορά κυρίως αλλά όχι αποκλειστικά στην «καθαρότητα» αυτών από αργιλικά υλικά. Το γενικότερο ενδιαφέρον για τα αργιλικά υλικά έγκειται στο γεγονός ότι ορισμένα από αυτά περιέχουν ορυκτά τα οποία έχουν την τάση να προσροφούν νερό και να διογκώνονται, ιδιότητα που τα καθιστά ακατάλληλα για χρήση [163]. Οι δύο βασικές δοκιμές που προσδιορίζουν την ποιότητα των λεπτόκοκκων αδρανών είναι η δοκιμή ισοδύναμου άμμου και η δοκιμή μπλε του μεθυλενίου.

Η *δοκιμή ισοδύναμου άμμου (sand equivalent-SE)* ορίζει έναν έμμεσο και συγκριτικό προσδιορισμό του ποσοστού κόκκων λεπτόκοκκου κλάσματος, όχι κατ' ανάγκη αργιλικών, που παραμένουν σε αιώρηση σε υδατικό διάλυμα μετά από συγκεκριμένη ώρα, σε σχέση με το σύνολο των κόκκων [152]. Χαμηλό ποσοστό ισοδύναμου άμμου χαρακτηρίζει τα αδρανή ως «μη καθαρά» και είναι ένδειξη για πιθανή ύπαρξη επιβλαβούς ποσότητας λεπτών κόκκων αργίλου [158], ενώ σε συνδυασμό με την ποσότητα της παιπάλης δίνει μια ολοκληρωμένη εικόνα.

Κατά την πραγματοποίηση της δοκιμής, λαμβάνεται αντιπροσωπευτικό δείγμα του υπό δοκιμή υλικού και τοποθετείται σε ειδικό διαφανή ογκομετρικό σωλήνα. Ακολούθως, προστίθεται στο σωλήνα ειδικό υδατικό διάλυμα χλωριούχου ασβεστίου, μέχρι το ύψος των 100 mm περίπου. Το δείγμα του υλικού και το διάλυμα αφήνονται σε ηρεμία για 10 λεπτά περίπου. Με το πέρας του χρονικού αυτού διαστήματος, το περιεχόμενο του σωλήνα αναταράσσεται με παλινδρομικές κινήσεις για 30±1 δευτερόλεπτα. Κατόπιν προστίθεται επιπλέον ποσότητα διαλύματος από σωλήνα με σύστημα άρδευσης, μέχρι την πάνω στάθμη. Το διάλυμα με τα αδρανή αφήνεται σε ηρεμία για 20 min και κατόπιν μετράται το ύψος της άμμου (h_s) και το ύψος της αργίλου (h_c) (θολό αιώρημα). Η τιμή του ισοδύναμου άμμου (SE) υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$SE = (h_s / h_c) \times 100$$

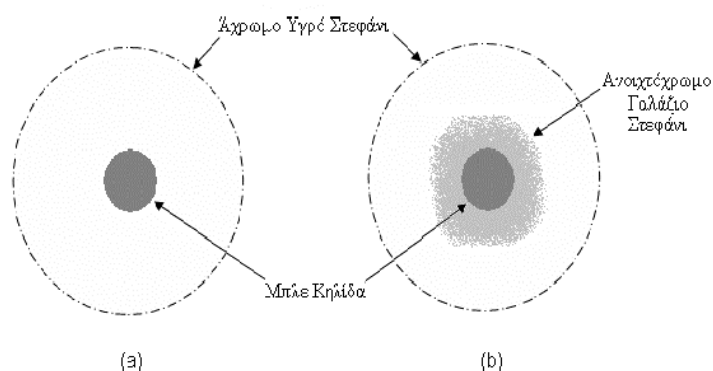
Η τιμή του ισοδύναμου άμμου για το συγκεκριμένο αδρανές προσδιορίζεται από το μέσο όρο δύο ογκομετρικών σωληνίων και το αποτέλεσμα στρογγυλοποιείται στον πλησιέστερο ακέραιο αριθμό [163].

Η *δοκιμή μπλε του μεθυλενίου* δίνει έναν έμμεσο προσδιορισμό των κόκκων, όχι κατ' ανάγκη αργιλικών, που έχουν την ικανότητα απορρόφησης διαλύματος μπλε του μεθυλενίου. Η ένδειξη είναι αντίστοιχη της ληφθείσας με την δοκιμή ισοδύναμου άμμου. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων, όπου αυτό είναι εφικτό, δίνει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα για τον χαρακτηρισμό του εξεταζόμενου δείγματος.

Κατά τη δοκιμή, κατάλληλη ξηρή ποσότητα του υπό δοκιμή υλικού προστίθεται σε 500+5ml αποσταγμένου νερού. Το διάλυμα αναδεύεται για 5 min και μετά το πέρας της ανάδευσης εισάγεται μέσα σε αυτό, μία δόση των 5 ml χρωστικής

ουσίας (μπλε του μεθυλενίου). Εκτελείται νέα ανάδευση, για τουλάχιστον 1 λεπτό. Στη συνέχεια εκτελείται μια δοκιμή «κηλίδας».

Η δοκιμή συνίσταται στο σχηματισμό με μια σταγόνα διαλύματος και πάνω σε διηθητικό χαρτί, μιας κηλίδας που αποτελείται από μία κεντρικά αποτιθέμενη ουσία με γενικά στερεό μπλε χρώμα, που περιβάλλεται από μία άχρωμη ζώνη. Η δοκιμή θεωρείται θετική (εικόνα 3.4) όταν σχηματιστεί, περιφερειακά της κεντρικής απόθεσης, μία στεφάνη από ένα συνεχή δακτύλιο χρώματος ανοιχτού μπλε, γύρω στο 1 mm.



Εικόνα 3.4 Δοκιμή μπλε του μεθυλενίου [164].

Εάν μετά την προσθήκη της αρχικής ποσότητας των 5 ml χρωστικού διαλύματος δεν εμφανιστεί η στεφάνη, προστίθενται επιπλέον 5 ml χρωστικού διαλύματος, πραγματοποιείται ανάδευση για 1 λεπτό και εκτελείται μία δεύτερη δοκιμή «κηλίδας». Εάν εξακολουθεί να μην εμφανίζεται η στεφάνη η διαδικασία επαναλαμβάνεται, κατά τον ίδιο ακριβώς τρόπο, έως ότου αυτή εμφανιστεί. Η στεφάνη πρέπει να παραμείνει για 5min, ώστε να θεωρήσουμε ότι η δοκιμή περατώθηκε. Αν εξαφανιστεί στα 4min, προστίθενται επιπλέον 5 ml χρωστικού διαλύματος. Αν εξαφανιστεί κατά τη διάρκεια του πέμπτου λεπτού, προστίθενται μόνο 2 ml χρωστικού διαλύματος.

Μετά το πέρας της δοκιμής, καταγράφεται ο συνολικός όγκος του χρωστικού διαλύματος V_i , που προστέθηκε για να παραχθεί η στεφάνη, η οποία διατηρείται για 5min, με ακρίβεια 1ml. Η τιμή του μπλε του μεθυλενίου, MB, εκφρασμένη σε γραμμάρια χρωστικής ουσίας ανά χιλιόγραμμο αδρανούς υλικού κλάσματος 0/2mm δίνεται από την εξίσωση:

$$MB = (V_i/M_i) * 10$$

Όπου M_i είναι η μάζα του δείγματος σε γραμμάρια και V_i , είναι ο συνολικός όγκος του προστιθέμενου χρωστικού διαλύματος σε ml [163].

Σύμφωνα με τον ΚΤΣ -97, η καταλληλότητα των λεπτόκοκκων αδρανών κρίνεται βάσει της δοκιμής του ισοδυνάμου της άμμου, που ανάλογα με το περιβάλλον του έργου πρέπει να μην δίνει τιμή μικρότερη από 65 και σε εξαιρετικές περιπτώσεις να είναι μεγαλύτερη του 75.

Το πρότυπο EN 12620 για την ποιοτική αξιολόγηση της παιπάλης ορίζει την εφαρμογή μίας από τις παρακάτω συνθήκες:

- Ολικό ποσοστό παιπάλης μικρότερο από 3% ή άλλη τιμή που να ικανοποιεί τις απαιτήσεις στον τόπο χρήσης
- Τιμή ισοδύναμου άμμου μεγαλύτερη από ένα καθορισμένο κατώτερο όριο (το οποίο όμως δεν διευκρινίζεται)
- Τιμή μπλε του μεθυλενίου μικρότερη από ένα συγκεκριμένο καθορισμένο ανώτερο όριο (το οποίο επίσης δεν διευκρινίζεται)
- Ισοδύναμη συμπεριφορά των αδρανών προς εξέταση με αδρανή γνωστών ιδιοτήτων και αποδόσεων στα έργα.

Παρόλο που δεν έχει ακόμα καθοριστεί συγκεκριμένο κάτω όριο ή κατηγοριοποίηση από το πρότυπο αυτό για την δοκιμή του ισοδύναμου άμμου, αυτή χρησιμοποιείται. Εντούτοις τα αποτελέσματα που προκύπτουν δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα με τα όρια και τις τιμές του ισοδύναμου άμμου που ορίζει ο ΚΤΣ-97 (που πραγματοποιούνται κατά ASTM λόγω της διαφοράς στον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό) [159].

Πίνακας 3.4 Επιτρεπτές τιμές μπλε του μεθυλενίου [163].

Αδρανή υλικά για :	Επιτρεπτές τιμές μπλε του μεθυλενίου			
	Κατά NF XP P 18-540		Προσχέδια νέων Ελληνικών προδιαγραφών	
	MB	MB _F	MB	MB _F
Βάσεις και υποβάσεις, ή	≤2.0 όταν S.E.<60		-	-
Ασφαλτικές βάσεις, ή	≤2.5 όταν S.E. <50	≤10	(≤3.0 ^(α))	(≤10 ^(α))
Συνδετικές στρώσεις	≤3.0 όταν S.E.<40		-	≤10
Επιφανειακές ασφαλτικές στρώσεις	≤2	≤10	-	≤10
Σκυροδέματα	≤1	≤10	-	-
Σιδηροδρομικές γραμμές:	1 ή 2	-	-	-
Βάσεις έδρασης				
	Επιτρεπτές τιμές μπλε του μεθυλενίου ^(β)			
Ψυχρά ασφαλτομίγματα για μικρο-επιφανειακές στρώσεις		≤7, ή ≤8, ή ≤10		

(α) Κατά Εγνατία Οδό Α.Ε., απόφαση 354/12/29.8.03

(β) Σύμφωνα με προδιαγραφές άλλων χωρών

Ενδεικτικά, για τις επιτρεπόμενες τιμές της δοκιμής μπλε του μεθυλενίου παρουσιάζεται ο παραπάνω πίνακας 3.4, ο οποίος παρουσιάζει τις επιτρεπόμενες τιμές βάσει του γαλλικού προτύπου NF XP P 18-540 καθώς και τα προσχέδια των νέων ελληνικών προδιαγραφών. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, φαίνεται ότι το όριο μπλε μεθυλενίου μικρότερο του 1 (MB<1) που υπάρχει σαν όριο σε διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες, είναι επαρκές [164].

3.2.2 Φυσικές Ιδιότητες

Αντοχή σε θρυμματισμό (με τριβή και κρούση) – Δοκιμή Los Angeles

Η δοκιμή της αντοχής των αδρανών σε θρυμματισμό ή αλλιώς δοκιμή Los Angeles (LA) υπάγεται στους ελέγχους σκληρότητας και ανθεκτικότητας των αδρανών. Προσδιορίζει την έκταση της φθοράς των αδρανών, τα οποία υπόκεινται σε

δράσεις τριβής, λείανσης, θρυμματισμού και κρούσης. Τα αποτελέσματά της αξιολογούνται αναφορικά με τον καθορισμό της συμπεριφοράς των αδρανών σε συνθήκες μηχανικής καταπόνησης [165]. Η δοκιμή αυτή επινοήθηκε και σχεδιάστηκε στο εργαστήριο δοκιμών του Los Angeles και θεωρείται μέχρι σήμερα η πιο κατάλληλη για τον προσδιορισμό της σκληρότητας, της δυσθραυστότητας και της φθοράς.



Εικόνα 3.5 Συσσκευή Los Angeles [165].

Κατά τη δοκιμή, αδρανές υλικό συγκεκριμένης μάζας και διαβάθμισης εισάγεται σε κυλινδρικό περιστρεφόμενο κάδο (εικόνα 3.5) μαζί με φορτίο σφαιρών ορισμένης διαμέτρου και μάζας – συνολικής αλλά και μεμονωμένης για κάθε σφαίρα – ανάλογα με τη διαβάθμιση του υλικού. Με την περιστροφή του κάδου, τα αδρανή υποβάλλονται σε δράσεις τριβής που αναπτύσσονται είτε μεταξύ των ίδιων των κόκκων, είτε μεταξύ των κόκκων και των σφαιρών είτε μεταξύ των κόκκων και των τοιχωμάτων του κάδου. Καθώς η στροφή προχωρεί, το εσωτερικό περύγιο του κάδου ανασηκώνει προς στιγμή το μίγμα αδρανούς και φορτίου για να το απορρίψει μετά από λίγο, υποβάλλοντας το αδρανές σε δράσεις κρούσεις. Αυτές αναπτύσσονται είτε με την πρόσκρουση των κόκκων στο τοίχωμα του κάδου είτε με την πρόσκρουση των σφαιρών στους κόκκους του αδρανούς. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται διαδοχικά μέχρι την ολοκλήρωση 500 στροφών. Το δείγμα απομακρύνεται από τον κάδο, κοσκινίζεται, πλένεται σε ορισμένο κόσκινο και ξηραίνεται μέχρι σταθερής μάζας. Το διερχόμενο του κόσκινου προς τη μάζα του αρχικού δείγματος που υπέστη τη δοκιμή αποτελεί και το ποσοστό φθοράς του αδρανούς σύμφωνα με τη δοκιμή Los Angeles.

Χαμηλές τιμές του συντελεστή Los Angeles αποτελούν ένδειξη υγείας πετρώματος. Ο ΚΤΣ- 97 προβλέπει για τα φυσικά αδρανή, στα οποία ο προσδιορισμός της αντοχής μητρικού πετρώματος είναι αδύνατος, η καταλληλότητα τους στο σκυρόδεμα να προσδιορίζεται από την δοκιμή αυτή, εφόσον το αποτέλεσμα ελέγχου με την μέθοδο Los Angeles δεν υπερβαίνει το 40%. Στο πρότυπο EN12620 υπάρχουν κατηγορίες αντίστασης σε θρυμματισμό (βάσει της μεθόδου αντοχής σε Los Angeles) και είναι από 15 - 50.

Παρόλο που οι δύο προδιαγραφές χρησιμοποιούν τη δοκιμή του Los Angeles, τα αποτελέσματα που προκύπτουν δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα. Διαφορές υπάρχουν στα ποσοστά συμμετοχής των κλασμάτων στο δείγμα που εισάγεται στον κάδο της μηχανής, στο συνολικό βάρος και στο πλήθος των σφαιρών που εισάγονται στη μηχανής έτσι ώστε πρακτικά να μιλάμε για μια σχεδόν διαφορετική δοκιμή. Επιπλέον για τον υπολογισμό της αντίστασης σε θρυμματισμό (EN12620) και αντοχής σε επιφανειακή φθορά και κρούση (Κ.Τ.Σ.'97) οι δύο προδιαγραφές χρησιμοποιούν διαφορετικό κόσκινο (1,6mm κατά EN και 1,7mm κατά ASTM) [159].

Ειδικό βάρος και υδροαπορροφητικότητα



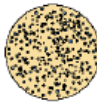
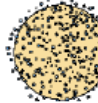
Οι δύο αυτές ιδιότητες είναι απαραίτητες για τον σχεδιασμό της μελέτης σύνθεσης σκυροδέματος. Εντούτοις, δεν είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί το πραγματικό ειδικό βάρος ενός αδρανούς, αλλά να γνωρίζουμε τον όγκο που καταλαμβάνουν οι κόκκοι των αδρανών, συμπεριλαμβανομένων των πόρων που υφίστανται εντός των κόκκων [148]. Επομένως, αρκεί ο προσδιορισμός του φαινομένου ειδικού βάρους (*apparent specific gravity*) που ορίζεται ως ο λόγος του βάρους του αδρανούς προς τον όγκο συμπαγούς υλικού και των αδιαπέρατων κενών (κλειστών πόρων) [157].

Για τον υπολογισμό των αναλογιών στη σύνθεση σκυροδέματος εκτός του φαινομένου ειδικού βάρους απαιτούνται και τα:

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

Μεικτό φαινόμενο ειδικό βάρος κορεσμένου υλικού επιφανειακά ξηρού (bulk specific gravity / Saturated - Surface - Dry): είναι ο λόγος του συνολικού βάρους του αδρανούς και του νερού που προσροφήθηκε προς το συνολικό φαινόμενο όγκο [157].

Οι διάφορες καταστάσεις απορρόφησης υγρασίας στις οποίες μπορεί να περιέλθει ένας κόκκος αδρανούς παρουσιάζονται στην εικόνα 3.6.

Κατάσταση	Ξήρανση σε φούρνο	Ξήρανση στον αέρα	Κορεσμένη, επιφανειακά στεγνή	Υγρή
				
Συνολική ποσότητα	Καθόλου	Μικρότερη από αυτή που μπορεί να απορροφηθεί	Ίση με αυτή που μπορεί να απορροφηθεί	Μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να απορροφηθεί

Εικόνα 3.6 Καταστάσεις απορρόφησης υγρασίας αδρανών [148].

Όταν όλοι οι υδατοπερατοί πόροι είναι πλήρεις και δεν υπάρχει στρώση νερού στην εξωτερική επιφάνεια, τότε λέμε ότι τα αδρανή είναι κορεσμένα και επιφανειακά στεγνά (SSD), ενώ όταν τα αδρανή είναι κορεσμένα και επίσης υπάρχει ελεύθερη

υγρασία στην επιφάνεια, τότε λέμε ότι τα αδρανή είναι σε υγρή κατάσταση. Στην ξηρή κατάσταση όλο το διαθέσιμο νερό έχει εξατμιστεί με θέρμανση στους 100°C.

Η ικανότητα απορρόφησης ορίζεται ως η ποσότητα υγρασίας που απαιτείται για να φέρει ένα αδρανές από την ξηρή στην SSD κατάσταση. Πραγματική απορρόφηση ορίζεται η ποσότητα της υγρασίας που απαιτείται για να φέρει ένα αδρανές από την κατάσταση ξήρανσης στον αέρα στην κατάσταση SSD. Η ποσότητα του νερού σε ένα αδρανές, πέρα από αυτή που απαιτείται για την κατάσταση SSD, αναφέρεται ως επιφανειακή υγρασία [148]. Συνήθως, η απορροφητική ικανότητα ενός αδρανούς ή αλλιώς υδροαπορροφητικότητα ορίζεται ως ποσοστό επί τις εκατό (absorption) και είναι η ποσότητα του νερού που απορροφάται από 100 gr του υλικού σε ορισμένο χρόνο και θερμοκρασία [157].

Για τον προσδιορισμό των ειδικών βαρών και της υδροαπορροφητικότητας χονδρόκοκκων αδρανών απαιτείται καταρχήν εργαστηριακός εξοπλισμός που περιλαμβάνει: ζυγό συγκεκριμένης ακρίβειας και ικανότητας 5 kg τουλάχιστον, ο οποίος να φέρει διάταξη ανάρτησης καλάθιου στο κάτω μέρος του, συρμάτινο καλάθι κυλινδρικού σχήματος κατασκευασμένο από ανοξείδωτο πλέγμα, δοχείο νερού που να επιτρέπει ανεμπόδιστα την βύθιση του καλάθιου σε αυτό και πιστοποιημένα κόσκινα (εικόνα 3.7).



Εικόνα 3.7 Εργαστηριακός εξοπλισμός μέτρησης ειδικού βάρους και υδροαπορροφητικότητας χονδρόκοκκων αδρανών [155].

Λαμβάνεται κατάλληλη ποσότητα χονδρόκοκκου αδρανούς, ξηραίνεται σε κλίβανο μέχρι σταθερού βάρους σε θερμοκρασία $105 \pm 5^\circ\text{C}$ και ψύχεται στον αέρα για 1-3 ώρες μέχρι το υλικό να πιάνεται με το χέρι. Στη συνέχεια το δείγμα βυθίζεται σε νερό για 24 ± 4 ώρες, σε θερμοκρασία δωματίου. Μετά το πέρας του απαιτούμενου χρονικού διαστήματος, βγάζουμε το δείγμα από το νερό, το σκουπίζουμε προσεκτικά με απορροφητικό χαρτί ύφασμα όπου οι κόκκοι του αδρανούς κυλινδρικοί μέχρως όπου απομακρυνθούν οι ορατοί υδατινοί υμένες. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και απαλό ρεύμα αέρα, στοχεύοντας στο να διώξουμε την επιφανειακή υγρασία. Αμέσως μετά το υλικό ζυγίζεται και καταγράφεται η ένδειξη ως βάρος κορεσμένου και επιφανειακά ξηρού υλικού (B). Τοποθετούμε το δείγμα σε συρμάτινο καλάθι που είναι συνδεδεμένο με το ζυγό και αφού βυθίσουμε το καλάθι μέσα στον κύλινδρο με

το νερό ξαναζυγίζουμε (Γ). Λόγω της άνωσης το δείγμα μέσα στο νερό ζυγίζει λιγότερο, τόσο όσο και η άνωση. Η άνωση Α ισούται με $V \cdot \rho_{\nu}$, όπου V: ο όγκος του βυθιζόμενου στο νερό αντικειμένου και ρ_{ν} : 1 gr/cm³, η πυκνότητα του νερού. Ισχύει ότι η άνωση Α ισοδυναμεί με την διαφορά Β - Γ. Κατόπιν, το δείγμα ξεραίνεται μέχρι σταθερού βάρους, ψύχεται στον αέρα για 1-3 ώρες και το ζυγίζουμε (Δ). Κατόπιν πραγματοποιούνται οι ακόλουθοι υπολογισμοί:

1. Μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος (ε.β.) = $\Delta / (B - \Gamma)$
2. Μικτό φαινόμενο ε.β. κορεσμένου και επιφανειακά ξηρού υλικού = $B / (B - \Gamma)$
3. Φαινόμενο ειδικό βάρος = $\Delta / (\Delta - \Gamma)$
4. Υδροαπορροφητικότητα % = $(B - \Delta) \cdot 100 / \Delta$ [157].

Για τον προσδιορισμό του ειδικού βάρους και της υδροαπορροφητικότητας των λεπτόκοκκων αδρανών, η διαδικασία παρουσιάζει ορισμένες διαφοροποιήσεις. Συγκεκριμένα, απαιτείται διαφορετικός εργαστηριακός εξοπλισμός: ζυγός, πυκνόμετρο, μεταλλικός κώνος συγκεκριμένων διαστάσεων, τυπάδα συγκεκριμένης μάζας και επίπεδη κυκλική επιφάνεια πρόσκρουσης (εικόνα 3.8).



Εικόνα 3.8 Εργαστηριακός εξοπλισμός μέτρησης ειδικού βάρους και υδροαπορροφητικότητας χονδρόκοκκων αδρανών [165].

Για την προετοιμασία του δείγματος, επιλέγουμε κατάλληλη ποσότητα λεπτόκοκκου αδρανούς (άμμου), το ξηραίνουμε και αφού κρυώσει σε θερμοκρασία δωματίου, τοποθετούμε το δείγμα μέσα σε λεκάνη με νερό και το αφήνουμε για 15 έως 19 ώρες. Μετά το πέρας του διαστήματος αυτού, απομακρύνουμε προσεκτικά το νερό από τη λεκάνη χωρίς να χαθεί μέρος του δείγματος ή να διαταραχθεί. Απλώνουμε το υλικό σε επίπεδη μη απορροφητική επιφάνεια και αφήνουμε να στεγνώσει. Φροντίζουμε η ξήρανση της άμμου να είναι ομοιόμορφη ανακατεύοντας τη, μπορεί παράλληλα να χρησιμοποιηθεί και ρεύμα αέρα.

Η δοκιμή πραγματοποιείται όταν η άμμος φτάσει στο σημείο κορεσμού. Για να διαπιστωθεί αυτό, χρησιμοποιείται ο κώνος και η τυπάδα, ως εξής:

- Τοποθετούμε τον κώνο σε επίπεδη μη απορροφητική επιφάνεια με τη μεγάλη διάσταση σε επαφή με την επιφάνεια.
- Γεμίζουμε τον κώνο με άμμο.
- Χτυπάμε με την τυπάδα 25 φορές την επιφάνεια της άμμου από ύψος 5mm. Κάθε φορά, καθώς η επιφάνεια της άμμου οπισθοχωρεί, ρυθμίζουμε το ύψος της τυπάδας πάντα στα 5mm.

- Απομακρύνουμε τη χαμένη άμμο στη βάση του κώνου και ανασηκώνουμε τον κώνο. Αν η άμμος είναι υγρή, το σχήμα του κώνου θα παραμείνει. Αν η άμμος αρχίσει απαλά να γλιστράει, σημαίνει ότι έφτασε στο σημείο κορεσμού.
- Επαναλάβουμε τη διαδικασία αυτή όσες φορές χρειαστεί.

Αφού διαπιστώσουμε ότι η άμμος έχει φτάσει στο σημείο κορεσμού της ζυγίζουμε 500 ± 10 gr κορεσμένης άμμου και καταγράφουμε το ακριβές βάρος της. Στη συνέχεια την τοποθετούμε μέσα στο πυκνόμετρο και γεμίζουμε με αποσταγμένο νερό μέχρι το 90% της χωρητικότητας του, χτυπάμε ελαφρά και γυρίζουμε γύρω-γύρω το πυκνόμετρο ώστε να απελευθερωθεί ο εγκλωβισμένος αέρας. Πληρώνουμε το πυκνόμετρο με νερό ως το προδιαγραφόμενο σημείο. Ζυγίζουμε και καταγράφουμε την ένδειξη βάρους πυκνόμετρου νερού και δείγματος. Απομακρύνουμε όλο το υλικό από το πυκνόμετρο, το ξηραίνουμε για να απομακρυνθεί όλο το νερό, το αφήνουμε να κρυσταλλώσει σε θερμοκρασία δωματίου για και ζυγίζουμε. Επιπλέον, γεμίζουμε το πυκνόμετρο με απιονισμένο νερό και καταγράφουμε το βάρος του. Κατόπιν πραγματοποιούνται οι ακόλουθοι υπολογισμοί:

1. Ξηρό φαινόμενο ειδικό βάρος = $A / B + \Gamma - E$
2. Μεικτό φαινόμενο ειδικό βάρος = $\Gamma / B + \Gamma - E$
3. Φαινόμενο ειδικό βάρος = $A / B + A - E$
4. Απορροφητικότητα άμμου = $(\Gamma - A / A) \times 100$

όπου: A = Βάρος ξηρού δείγματος, B = Βάρος πυκνόμετρου και νερού, Γ = Βάρος κορεσμένης άμμου, E = Βάρος πυκνόμετρου νερού και δείγματος .

Σύμφωνα με τον ΚΤΣ-97, οι τιμές του ειδικού βάρους για τα αδρανή του σκυροδέματος πρέπει να βρίσκονται μεταξύ 2,40 και 3,0. Αντίθετα, σύμφωνα EN12620 δεν υπολογίζονται ειδικά βάρη αλλά πυκνότητα των αδρανών, χωρίς όμως να δίνονται όρια πυκνότητας για τα αδρανή που ενσωματώνονται στο σκυρόδεμα.

Η υδροαπορροφητικότητα έχει ιδιαίτερη σημασία διότι αποτελεί έναν έμμεσο προσδιορισμό του πορώδους των αδρανών, που είναι σε αντίστροφη αναλογία με την αντοχή και την ανθεκτικότητα τους. Κανένα πρότυπο (ευρωπαϊκό ή αμερικάνικο) δεν ορίζει μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της υδροαπορροφητικότητας των αδρανών. Συνήθως, τα λεπτόκοκκα αδρανή, τα οποία βρίσκονται αποθηκευμένα σε υπαίθριους σωρούς έχουν επιφανειακή υγρασία κυμαινόμενη από 0-10% κατά βάρος (κ.β.), ενώ τα χονδρόκοκκα από 0-2% κ.β.. Στα λεπτόκοκκα αδρανή κατακρατείται μεγαλύτερη ποσότητα νερού μεταξύ των τεμαχίων τους συγκριτικά με τα χονδρόκοκκα αδρανή, λόγω μεγαλύτερης ειδικής επιφάνειας. Αυτό το λεπτό στρώμα επιφανειακής υγρασίας διατηρεί τους κόκκους των αδρανών σε μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους και αυξάνει το φαινόμενο όγκο τους, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο το φαινόμενο ειδικό τους βάρος.

Ανθεκτικότητα σε αποσάθρωση (Υγεία)

Η αποσάθρωση των αδρανών υλικών, συνδέεται άμεσα με τη συμπεριφορά του τελικού προϊόντος, αφού τα υγιή και καλής ποιότητας αδρανή οδηγούν σε μακροχρόνια ανθεκτική συμπεριφορά του σκυροδέματος. Ένα προϊόν με αποσαθρωμένα, σαθρά και πορώδη αδρανή παρουσιάζει πολύ χαμηλές αντοχές και

μειωμένη ανθεκτικότητα [166]. Η ανθεκτικότητα των αδρανών υλικών σε αποσάθρωση προσδιορίζεται με πλήθος δοκιμών μεταξύ των οποίων είναι: η δοκιμή αντοχής σε ψύξη – απόψυξη, η δοκιμή ανθεκτικότητας σε αποσάθρωση και ο έλεγχος σε σταθερότητα όγκου – συστολή ξήρανσης.

Η *δοκιμή ανθεκτικότητας σε αποσάθρωση (υγεία αδρανών)* δίνει ένα δείκτη υγείας των αδρανών και καθορίζει την ανθεκτικότητα τους σε αποσάθρωση λόγω καιρικών μεταβολών. Προσομοιάζει τις δυνάμεις διόγκωσης που ασκούνται στα αδρανή, με διαδοχικούς κύκλους εμποτισμού σε διάλυμα θεικών αλάτων [158]. Υπάρχουν δύο είδη δοκιμών και αντίστοιχα πρότυπα τα οποία αναφέρονται στον έλεγχο αποσάθρωσης, το αμερικάνικο το οποίο χρησιμοποιεί διάλυμα θεικού νατρίου και το ευρωπαϊκό που χρησιμοποιεί διάλυμα θεικού μαγνησίου. Το διάλυμα θεικού μαγνησίου είναι πιο δραστικό από το διάλυμα θεικού νατρίου και για το λόγο αυτό δοκιμές με τα δύο πρότυπα δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα μεταξύ τους, αφού αυτό επηρεάζει αντίστοιχα και τους προσδιορισθέντες συντελεστές αποσάθρωσης [166].

Για τον έλεγχο της υγείας των αδρανών με τη χρήση διαλύματος θεικού νατρίου, βάσει του AASHTO T 104-94, απαιτείται συγκεκριμένος εργαστηριακός εξοπλισμός ο οποίος περιλαμβάνει: κόσκινα, υποδοχείς για την εμβάπτιση των δειγμάτων, θάλαμο για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της εμβάπτισης, ζυγούς, κλίβανο και διάλυμα θεικού νατρίου. Το διάλυμα πρέπει να είναι μεν κορεσμένο, αλλά να υπάρχει περίσσεια κρυστάλλων. Το μίγμα αναδεύεται κατά την προσθήκη του άλατος και έπειτα αναδεύεται σε συχνά διαστήματα μέχρι να χρησιμοποιηθεί. Επιπλέον, πρέπει να παραμένει προς ωρίμανση 48 ώρες πριν τη χρήση καθώς και να διατηρείται σε θερμοκρασία δωματίου.

Η διαδικασία που απαιτείται είναι η ακόλουθη. Αρχικά παρασκευάζεται το δείγμα το οποίο θα εξεταστεί, πλένεται, ξηραίνεται μέχρι σταθερού βάρους και στη συνέχεια κοσκινίζεται και διαχωρίζεται στα διάφορα κλάσματα. Το δείγμα εμβάπτιζεται εντός του διαλύματος θεικού νατρίου για 16 έως 18 ώρες σε θερμοκρασία μεταξύ 20,3°C και 21,9 °C, έτσι ώστε το διάλυμα να υπερκαλύπτει τα αδρανή. Τα δοχεία καλύπτονται προς αποφυγή εξατμίσεως του διαλύματος και το δείγμα διατηρείται εμβαπτισμένο εντός του διαλύματος.

Μετά το τέλος της εμβάπτισης, το δείγμα στραγγίζεται για περίπου 15min και τοποθετείται σε φούρνο, σε θερμοκρασία 110±5°C, μέχρι σταθερού βάρους. Η διαδικασία αυτή της εμβάπτισης και ξηράνσεως επαναλαμβάνεται για συγκεκριμένο αριθμό κύκλων. Μετά τη συμπλήρωση του τελικού κύκλου και αφού το δείγμα ψυχθεί, πλένεται με τρεχούμενο νερό μέχρι να απομακρυνθεί το διάλυμα. Στη συνέχεια, στεγνώνεται μέχρι σταθερού βάρους. Τελικά κοσκινίζεται ανάλογα του μεγέθους του και προσδιορίζεται η απώλεια μάζας του αρχικού δείγματος ανά κλάσμα [167].

Αναφορικά με την ανθεκτικότητα των αδρανών, η σταθερότητα του όγκου και η μη απώλεια υλικού λόγω ύγρανσης, ξήρανσης, ψύξης - απόψυξης είναι προϋποθέσεις για τη χρήση τους στο σκυρόδεμα. Σύμφωνα με τον ΚΤΣ – 97 (που συνήθως χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της υγείας διάλυμα θεικού νατρίου) τα λεπτόκοκκα αδρανή πρέπει να παρουσιάζουν απώλεια μικρότερη από 10% και τα χονδρόκοκκα μικρότερη του 12%. Στο πρότυπο EN12620 (που προϋποθέτει τη χρήση

διαλύματος θεικού μαγνησίου) δεν καθορίζονται μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές αλλά η επί τις εκατό απώλεια μάζας του χονδρόκοκκου αδρανούς σε κύκλους ψύξης - απόψυξης κατηγοριοποιείται να είναι 0 - 4% ενώ η αντίστοιχη απώλεια μάζας στην δοκιμή υγείας διάλυμα θεικού μαγνησίου δηλώνεται και πρέπει να είναι εντός των ορίων 0 - 35% [159].

3.2.3 Χημικές Ιδιότητες

Ο προσδιορισμός της χημικής σύστασης και των βλαπτικών συστατικών που τυχόν περιέχονται στα αδρανή του σκυροδέματος είναι αναγκαίος ιδίως για τον έλεγχο παρουσίας οργανικών προσμίξεων και λοιπών συστατικών τα οποία επηρεάζουν τις ιδιότητες του παραγόμενου σκυροδέματος [152]. Τα χημικά χαρακτηριστικά δεν πρέπει να επηρεάζουν δυσμενώς την πήξη, την σκλήρυνση, την αντοχή, την σταθερότητα του όγκου και την προστασία του οπλισμού από την διάβρωση [158].

Περιεκτικότητα σε χλωριόντα

Για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε χλωριόντα, βάσει της μεθόδου αναφοράς Volhard (EN 1744-1:1998, παράγραφος 7), το δείγμα περιχύνεται με αποσταγμένο νερό για να μεταφερθούν τα ευδιάλυτα ιόντα χλωρίου στο νερό. Ακολούθως προστίθεται περίσσεια διαλύματος νιτρικού αργύρου και ακολουθεί ογκομέτρηση με ένα πρότυπο διάλυμα θειοκυανικών. Η περιεκτικότητα σε χλώριο εκφράζεται ως επί τοις εκατό περιεκτικότητα ιόντων χλωρίου στη μάζα των αδρανών [158]. Ο έλεγχος συνηθίζεται σε αδρανή θαλάσσιας ή άγνωστης προέλευσης που θα χρησιμοποιηθούν σε σκυρόδεμα [152]. Ο έλεγχος έχει ιδιαίτερη σημασία για το οπλισμένο σκυρόδεμα, στο οποίο η αυξημένη συγκέντρωση ιόντων χλωρίου προκαλεί οξειδωση του οπλισμού [158].

Περιεκτικότητα σε θειικά

Όσον αφορά στην περιεκτικότητα των αδρανών σε θεικές ενώσεις, υπάρχει δυνατότητα να πραγματοποιηθούν δύο έλεγχοι, η σημασία των οποίων έγκειται στο γεγονός ότι η ύπαρξη θειούχων ενώσεων σε αδρανή υλικά είναι δυνατόν να προκαλέσει διογκώσεις στο σκυρόδεμα [152]:

1. Περιεκτικότητα σε θειικά διαλυτά σε οξύ. Στη μέθοδο αυτή τα θειικά ιόντα εξάγονται από το δείγμα μετά από επεξεργασία με υδροχλωρικό οξύ 1:9 και στη συνέχεια καταβυθίζονται και ζυγίζονται υπό τη μορφή θεικού βαρίου (BaSO). Η περιεκτικότητα σε διαλυτά θειικά εκφράζεται ως επί τοις εκατό περιεκτικότητα εκφρασμένη σε SO.
2. Περιεκτικότητα σε ολικό θείο. Στη μέθοδο αυτή το δείγμα αδρανών υλικών αναμιγνύεται με βρώμιο και νιτρικό οξύ για να μετατραπούν όλες οι θειούχες ενώσεις σε θειικά ιόντα, τα οποία στη συνέχεια καταβυθίζονται και ζυγίζονται

υπό τη μορφή θειικού βαρίου (BaSO). Η περιεκτικότητα σε θείο εκφράζεται ως επί τοις εκατό περιεκτικότητα εκφρασμένη σε S [158].

Προσδιορισμός απώλειας πύρωσης

Η απώλεια πύρωσης προσδιορίζεται σε οξειδωτική ατμόσφαιρα (αέρα). Ειδικότερα, με την πύρωση στον αέρα στους (975±25) °C το περιεχόμενο CO₂ και το νερό απομακρύνονται και οξειδώνονται όλα τα περιεχόμενα οξειδούμενα στοιχεία. Η απώλεια πύρωσης προσδιορίστηκε βάσει του προτύπου EN 196-2, για χρόνο πύρωσης μία ώρα.

Για την πραγματοποίηση της δοκιμής, συγκεκριμένη μάζα δείγματος τοποθετείται μέσα σε χωνευτήριο και πυρώνεται. Ακολούθως, ψύχεται μέσα σε ξηραντήρα στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και ζυγίζεται κάθε 5 min, μέχρις ότου σταθεροποιηθεί το βάρος του. Η απώλεια πύρωσης εκφράζεται σε ποσοστό επί τις εκατό του αρχικού δείγματος [168].

Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε ανθρακικό περιεχόμενο

Το ανθρακικό περιεχόμενο συνήθως προσδιορίζεται για λεπτόκοκκα αδρανή που χρησιμοποιούνται για επιφανειακές στρώσεις οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα [161], εντούτοις δεν αποκλείεται ο προσδιορισμός του και για αδρανή λοιπών χρήσεων. Ο προσδιορισμός πραγματοποιείται σύμφωνα με τα οριζόμενα στο πρότυπο EN 196-21 (παράγραφος 5) σε δείγμα το οποίο έχει προετοιμαστεί σε συμφωνία με το πρότυπο EN 1744-1 (παράγραφος 12.3) [161].

Όσον αφορά στις χημικές ιδιότητες των αδρανών υλικών, σύμφωνα με τον ΚΤΣ-97, στα φυσικά αδρανή συλλεκτά από θάλασσα, η περιεκτικότητα σε άνυδρο χλωριούχο ασβέστιο πρέπει να είναι μικρότερη από 1%, σε SO₃ μικρότερη από 1%, σε Cl μικρότερη από 0,2% και σε γαιάνθρακες μικρότερη από 1%.

Το πρότυπο EN12620 ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου στο οποίο θα ενσωματωθούν τα αδρανή και την προέλευση τους, καθορίζει για αυτά, τις δοκιμές που πρέπει να εκτελεστούν και τα αποτελέσματά τους να δηλωθούν από τον παραγωγό. Επιπλέον ορίζονται οι ακόλουθες απαιτήσεις:

- Περιεκτικότητα σε χλωριόντα μικρότερη από 1% κατά βάρος
- Θειικά διαλυτά σε όξινο περιβάλλον μεταξύ 0 - 0,8% κατά βάρος
- Σύνολο θειικών μικρότερο από 1% κατά βάρος [158].

3.2.4 Φασματοσκοπία ακτίνων X φθορισμού

Η μέθοδος φασματοσκοπίας ακτίνων X φθορισμού (X-ray Fluorescence, XRF) είναι μία μη καταστροφική μέθοδος ποιοτικής και ποσοτικής στοιχειακής ανάλυσης στερεών και υγρών σωμάτων. Η μεθοδολογία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη στοιχειακή ανάλυση των αδρανών υλικών και είναι ιδιαίτερος

χρήσιμη στην περίπτωση που δεν είναι γνωστή η προέλευση των αδρανών όπως στην περίπτωση των ανακυκλωμένων αδρανών προερχόμενων από ΑΕΚΚ.

Η μέθοδος XRF πλεονεκτεί συγκρινόμενη με ανταγωνιστικές τεχνικές, διότι είναι μη καταστροφική, πολύ-στοιχειακή, ταχεία και εφαρμόσιμη σε ευρεία περιοχή συγκεντρώσεων. Επιπλέον, χαρακτηρίζεται από χαμηλό λειτουργικό κόστος, δεν απαιτεί πολύπλοκη προετοιμασία των προς μέτρηση δειγμάτων και η ανάλυση των φασμάτων είναι κατά κανόνα απλή.

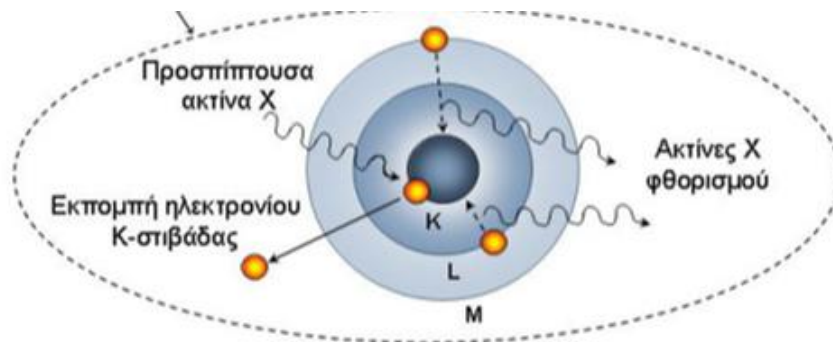


Εικόνα 3.9 Οργανολογία μεθόδου XRF [169].

Η μέθοδος στηρίζεται στη διέγερση των ατόμων του δείγματος από ακτινοβολία κατάλληλου μήκους κύματος και στην ανίχνευση των ακτίνων X που εκπέμπονται από το δείγμα κατά τη μετάπτωση των διεγερμένων ατόμων στη βασική τους κατάσταση. Η τυπική διάταξη φασματοσκοπίας XRF αποτελείται από μια πηγή πρωτογενούς ακτινοβολίας (ραδιοϊσότοπο ή λυχνία ακτίνων X) και ένα σύστημα ανίχνευσης της δευτερεύουσας ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το δείγμα (εικόνα 3.9) [169].

Οι ακτίνες X είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που έχει διπλό χαρακτήρα. Έχουν τις ιδιότητες των κυμάτων, δείχνουν δηλαδή τυπικά χαρακτηριστικά κυμάτων όπως η περίθλαση και η διάθλαση, ενώ παράλληλα έχουν τις ιδιότητες των σωματιδίων, μπορούν δηλαδή να συγκρουστούν με άλλα σωματίδια και να αλληλεπιδράσουν με αυτά. Όταν ένα δείγμα δέχεται ακτινοβολία υψηλής ενέργειας και μικρού μήκους κύματος, όπως είναι οι ακτίνες X, τότε τα άτομα του δείγματος διεγείρονται. Αν η ενέργεια της ακτινοβολίας είναι αρκετή, τότε ένα ηλεκτρόνιο από την εσωτερική στιβάδα απελευθερώνεται και τη θέση του παίρνει ένα ηλεκτρόνιο από υψηλότερη ενεργειακή στιβάδα (εικόνα 3.10). Η μετάπτωση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα την εκπομπή ενέργειας, ίση με την ενεργειακή διαφορά των δύο στιβάδων [170]. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία ακτίνων X είναι μικρότερης ενέργειας από την αρχική προσπίπτουσα ακτινοβολία ακτίνων X και ονομάζεται ακτινοβολία φθορισμού (φθορίζουσα ακτινοβολία). Η ακτινοβολία αυτή είναι χαρακτηριστική του στοιχείου από το οποίο εκπέμπεται και δίνει πληροφορίες για τη σύσταση του δείγματος.

Επομένως, η ανάλυση κυρίων στοιχείων και ιχνοστοιχείων γεωλογικών δειγμάτων με XRF είναι δυνατή εξαιτίας της συμπεριφοράς των ατόμων όταν αλληλεπιδρούν με ακτινοβολία ακτίνων X. Το δείγμα ακτινοβολείται από μία δέσμη ακτίνων X, γνωστή ως προσπίπτουσα δέσμη. Ένα μέρος της ενέργειας της δέσμης διασκορπίζεται και ένα άλλο μέρος της ενέργειας απορροφάται από το δείγμα με τρόπο που εξαρτάται από τη σύστασή του.



Εικόνα 3.10 Ακτινοβολία ακτίνων X [169].

Με τη μέθοδο XRF μπορούν να μετρηθούν όλα τα στοιχεία του περιοδικού συστήματος. Τα δείγματα μπορεί να είναι στερεά, σε μορφή σκόνης ή υγρά. Με την μέθοδο αυτή μπορούν να μετρηθούν πολύ μικρές συγκεντρώσεις από μερικά ppm έως υψηλές συγκεντρώσεις μέχρι 100%. Τα όρια ανιχνευσιμότητας κυμαίνονται από 0,1 έως 10 ppm [170].

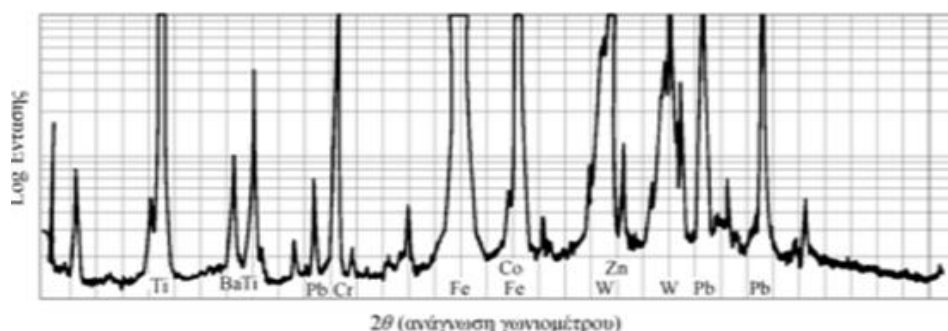
Το δείγμα που πρόκειται να αναλυθεί πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικό του υλικού που θέλουμε να αναλύσουμε, ομογενές και να έχει επιφάνεια επίπεδη και λεία, χωρίς ανωμαλίες. Τα δείγματα που αναλύονται έχουν τη μορφή δίσκων με διάμετρο που κυμαίνεται από 20 μέχρι 50mm. Οι επιφάνειες των δισκίων πρέπει να είναι εντελώς επίπεδες γιατί οι δευτερογενείς ακτίνες X των ελαφριών στοιχείων εκπέμπονται από τα πρώτα μm της επιφάνειας του δείγματος. Επιπλέον, το πάχος του δείγματος πρέπει να είναι τόσο ώστε να απορροφάται όλη η προσπίπτουσα δέσμη. Για τα βαριά στοιχεία μερικά mm είναι αρκετά και απαιτείται πάχος 30-40 mm.

Για δείγματα πετρωμάτων, το υλικό πρέπει να κονιοποιηθεί πολύ καλά (αναφής σκόνη) και στη συνέχεια με την εφαρμογή πίεσης παίρνει τη μορφή δίσκου (pressed pellet). Στην εικόνα 3.11 παρουσιάζεται η διαδικασία παρασκευής του δίσκου.



Εικόνα 3.11 Διαδικασία παρασκευής δίσκου [170].

Στο φάσμα ακτίνων X ενός δείγματος που υποβάλλεται στην ανωτέρω διαδικασία, εμφανίζεται μια σειρά χαρακτηριστικών ενεργειακών κορυφών (εικόνα 3.12). Η ενεργειακή θέση των κορυφών οδηγεί στην ταυτοποίηση των στοιχείων που περιέχονται στο δείγμα (ποιοτική ανάλυση), ενώ από την έντασή τους προκύπτουν οι σχετικές ή απόλυτες συγκεντρώσεις των στοιχείων του δείγματος (ημιποσοτική ή ποσοτική ανάλυση).



Εικόνα 3.12 Σειρά χαρακτηριστικών ενεργειακών κορυφών [170].

3.2.5 Γενικές απαιτήσεις αδρανών

Βάσει της ισχύουσας νομοθεσίας, τα αδρανή υλικά οφείλουν να φέρουν από την έναρξη εφαρμογής του EN12620 σήμανση CE (1/4/2004) στην οποία παρουσιάζονται οι ιδιότητές τους. Παράλληλα από την ίδια ημερομηνία, το αρμόδιο υπουργείο είχε ορίσει επιτροπή αναθεώρησης του ΚΤΣ - 97 ούτως ώστε να εναρμονιστεί με τις απαιτήσεις και την ορολογία των ευρωπαϊκών προτύπων. Το έργο αυτό, ολοκληρώθηκε και δημοσιεύτηκε τον Ιούνιο του 2016 και θα εφαρμόζεται υποχρεωτικά τόσο στα δημόσια όσο και στα ιδιωτικά έργα, από 2/4/2017. Έως τότε, είναι σε ισχύ ο ΚΤΣ - 97 και το ΕΛΟΤ 408 παρά τις μεταξύ τους ασυμβατότητες.

Ενδεικτικά παρουσιάζονται ακολούθως τα όρια ιδιοτήτων αδρανών βάσει του ΚΤΣ-97, του EN12620 και του νέου ΚΤΣ-2016 (πίνακας 3.5). Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημάνουμε το γεγονός ότι στον ΚΤΣ - 97 προβλέπονται κι άλλες δοκιμές, που δεν περιλαμβάνονται στο EN 12620 (πχ. αντοχή μητρικού πετρώματος), και το αντίστροφο. Ο αναθεωρημένος ΚΤΣ-2016 βασίστηκε κυρίως στα Ευρωπαϊκά πρότυπα: EN 206, EN 12620 και EN 13670 ενώ έπρεπε να λάβει υπόψη του την ελληνική πραγματικότητα και τις ειδικές διατάξεις που είχε ο ΚΤΣ-97 καθώς και πλήθος άλλων κανονιστικών διατάξεων.

Πίνακας 3.5 Απαιτούμενα όρια ιδιοτήτων αδρανών [171, 172].

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΚΤΣ -97	EN 12620	ΚΤΣ 2016
Αντοχή μητρικού πετρώματος MPa	>65	Δεν απαιτείται	Δεν απαιτείται
Los Angeles L.A. %	LA<40	LA ₍₁₅₋₅₀₎	LA<40
Υγεία MS%	<10	MS ₍₁₈₋₃₅₎	<25 κατηγορία XF1 <18 κατηγορία XF2-4
Δείκτης πλακοειδούς FI%	FI<50	FI ₍₁₅₋₅₀₎	FI<35
Παιπάλη (για θραυστή άμμο 0/4)	≤16	f ₍₃₋₂₂₎	≤16%
Παιπάλη (για φυσικά αδρανή 0/4)	≤5	f ₍₃₋₁₆₎	≤3%
Ισοδύναμο άμμου SE (0/4)	≥65	Δηλούμενη τιμή	≥60 (θραυστή άμμος) ≥70 (συλλεκτική άμμος)
Μπλε μεθυλενίου MB	-	Δηλούμενη τιμή	MB(0/2) ≤1 g/kg

3.3 Ιδιότητες Σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα χρησιμοποιείται σε ένα εκτεταμένο εύρος διαφορετικών κατασκευαστικών έργων και για να προσδιοριστεί εάν είναι κατάλληλο για το εκάστοτε έργο απαιτείται ο προσδιορισμός συγκεκριμένων ιδιοτήτων του. Οι

ιδιότητες αφορούν τόσο στο νωπό όσο και στο σκληρυμένο σκυρόδεμα. Νωπό ονομάζεται το σκυρόδεμα για όσο χρονικό διάστημα διατηρεί το εργάσιμο, δηλαδή όσο είναι δυνατόν να μεταφέρεται και να διαστρώνεται. Οι ιδιότητες που ελέγχονται κατά τη νωπή κατάσταση του σκυροδέματος είναι: η εργασιμότητα, η πυκνότητά του, ο περιεχόμενος σε αυτό αέρας, η εξίδρωση και η θερμοκρασία του.

Πίνακας 3.6 Ιδιότητες σκυροδέματος.

A/A	ΙΔΙΟΤΗΤΑ – ΔΟΚΙΜΗ	ΠΡΟΤΥΠΟ
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΝΩΠΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ		
1	Δειγματοληψία	EN 12350-1 ASTM C175
2A	Εργασιμότητα: Δοκιμή Κάθισης	ASTM C143
2B	Εργασιμότητα: Δοκιμή Εξάπλωσης	EN 12350-6
3	Πυκνότητα	EN 12360-6
4	Περιεχόμενος αέρας	ASTM C231
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΚΛΗΡΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ		
1	Δοκίμια - καλούπια	EN 12390-1
2	Παραγωγή – Ωρίμανση δοκιμών	EN 12390-2
3	Πυκνότητα	EN 12390-7
4	Θλιπτική αντοχή	EN 12390-3
5	Καμπτική αντοχή	EN 12390-5
6	Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας – λόγος Poisson	ASTM C 597
7	Ηλεκτρική αγωγιμότητα	-
8	Θερμική αγωγιμότητα	-
9	Μικροδομή	ASTM C856
10A	Ανθεκτικότητα: Προσβολή χλωριόντων	ASTM C1202
10B	Ανθεκτικότητα: Προσβολή θεικών	-

Σκληρυμένο σκυρόδεμα ονομάζεται το σκυρόδεμα το οποίο έχει αποκτήσει σταθερή μορφή και δεν επιδέχεται αλλαγές [173]. Ενδιαφέρουσες ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος είναι οι: πυκνότητα, θλιπτική και καμπτική αντοχή, μέτρο ελαστικότητας – λόγος Poisson, ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, μικροδομή και ανθεκτικότητα (προσβολή χλωριόντων, ενανθράκωση, προσβολή θεικών ιόντων). Στον πίνακα 3.6 παρουσιάζονται οι ιδιότητες που εξετάστηκαν στην παρούσα έρευνα και τα αντίστοιχα πρότυπα δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό τους.

3.3.1 Ιδιότητες Νωπού Σκυροδέματος

Η δειγματοληψία για διαδοχικούς ελέγχους νωπού σκυροδέματος καλύπτεται από το πρότυπο EN 12350-1 για σύνθετα και τυχαία δείγματα. Σύνθετα δείγματα θεωρούνται οι ποσότητες σκυροδέματος οι οποίες αποτελούνται από έναν αριθμό μεμονωμένων δειγμάτων τα οποία λαμβάνονται ομοιόμορφα γύρω από έναν αναμκτήρα ή τη μάζα του σκυροδέματος και μετά αναμιγνύονται πλήρως. Τα τυχαία δείγματα είναι μεμονωμένα δείγματα που προέρχονται από ένα μόνο μέρος του αναμκτήρα ή της μάζας του σκυροδέματος και μετά αναμιγνύονται πλήρως.

Η απόφαση για τη λήψη τυχαίων ή σύνθετων δειγμάτων εξαρτάται από τον επιδιωκόμενο σκοπό. Η ολική ποσότητα δειγμάτων πρέπει να είναι τουλάχιστον 1,5 φορές μεγαλύτερη της απαιτούμενης ποσότητας σκυροδέματος που απαιτείται για έλεγχο [145].

Εργασιμότητα

Η εργασιμότητα του σκυροδέματος ορίζεται ως η ιδιότητα που καθορίζει την προσπάθεια που απαιτείται για χειρισμό νωπού αναμίγματος σκυροδέματος με την ελάχιστη απώλεια ομοιογένειας του μίγματος. Η εργασιμότητα για να έχει σημασία ως έννοια πρέπει να συσχετιστεί με τις μεθόδους τοποθέτησης, συμπύκνωσης και φινιρίσματος [148]. Οι ιδιότητες με τις οποίες συνδέεται το εργάσιμο και το επηρεάζουν είναι η ρευστότητα, η πλαστικότητα, η συνοχή, η συμπτύκνωσιμότητα και η συνεκτικότητα [173].

Η σύνθετη φύση της εργασιμότητας ως ιδιότητας και η εξάρτησή της από τον τύπο της κατασκευής και τις μεθόδους τοποθέτησης, συμπύκνωσης και φινιρίσματος των επιφανειών, είναι οι αιτίες που δεν μπορεί να σχεδιαστεί μια απλή μέθοδος για τη μέτρηση της εργασιμότητας. Η πιο χρησιμοποιούμενη δοκιμασία παγκοσμίως, που μετράει μόνο τη συνοχή και ρευστότητα ονομάζεται δοκιμή κάθισης [148]. Για τον ίδιο σκοπό χρησιμοποιούνται η δοκιμή της εξάπλωσης και η δοκιμή Vebe η οποία έχει περισσότερη σημασία για μείγματα χαμηλής ρευστότητας.

Το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 206-1 κατηγοριοποιεί την εργασιμότητα σε 4-6 τάξεις ανάλογα με τη μέθοδο μέτρησης. Αυτές οι κατηγορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προδιαγράψουν και να ελέγξουν εργασιμότητα σκυροδέματος από άκαμπτο έως ρευστό σκυρόδεμα [145]. Αντίστοιχα ο ΚΤΣ-97 καθορίζει ελάχιστες απαιτούμενες τιμές ανάλογα με την μέθοδο συμπύκνωσης και τα αδρανή που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή του (θραυστά ή συλλεκτά) [174].

Δοκιμή κάθισης

Η κάθιση εκφράζεται με την απώλεια ύψους, σε cm, που παρουσιάζει μια κωνική στήλη νωπού σκυροδέματος, όταν ανασυρθεί η κωνική μήτρα (κώνος καθίσεως) με την οποία μορφώθηκε. Η κάθιση μπορεί να προσδιοριστεί βάσει του πρότυπου ASTM C143, που εφαρμόζεται για σκυρόδεμα με μέγιστο κόκκο αδρανούς 40 mm.

Ο εξοπλισμός για τη δοκιμασία της κάθισης είναι πολύ απλός. Αποτελείται από μία χαλύβδινη ράβδο συμπτύκνωσεως, τον κώνο κάθισης, που είναι μεταλλική μήτρα σχήματος ορθού κόλουρου κώνου 300mm ύψους και 100mm διαμέτρου στην κορυφή και 200mm διαμέτρου στη βάση και μία επίπεδη, άκαμπτη, οριζόντια, μη απορροφητική επιφάνεια (εικόνα 3.13).

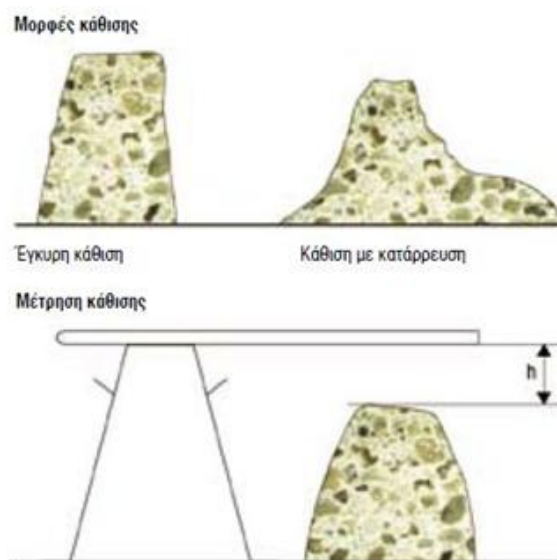
Πριν την έναρξη της δοκιμής διαβρέχονται εσωτερικά ο κώνος κάθισης και η επίπεδη επιφάνεια. Ο κώνος γεμίζεται με σέσουλα σε τρεις στρώσεις ίσου ύψους και διατηρείται ακίνητος καθ' όλη τη διάρκεια του γεμίσματος, με τη βοήθεια των δύο πτερυγίων στηρίζεως, πάνω στα οποία πατάει με τα πόδια του ο παρασκευαστής.

Κάθε στρώση συμπυκνώνεται με 25 κτυπήματα της ράβδου συμπυκνώσεως, που κατανέμονται κατά το δυνατόν ομοιόμορφα στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Αμέσως μετά το γέμισμα του κώνου και τη συμπύκνωση του σκυροδέματος, καθαρίζεται η περιοχή γύρω από τη βάση του και ο κώνος ανασύρεται αργά, από τις πλευρικές χειρολαβές. Η διαφορά ανάμεσα στο ύψος του κώνου και του υψηλότερου σημείου του σκυροδέματος, που ελευθερωμένο από το μεταλλικό περίβλημα «κάθισε», μετριέται με προσέγγιση 5 mm, εκφράζεται σε ακέραια εκατοστά του μέτρου και αποτελεί την κάθιση του σκυροδέματος που ελέγχεται.



Εικόνα 3.13 Εργαστηριακός εξοπλισμός για τη μέτρηση της κάθισης.

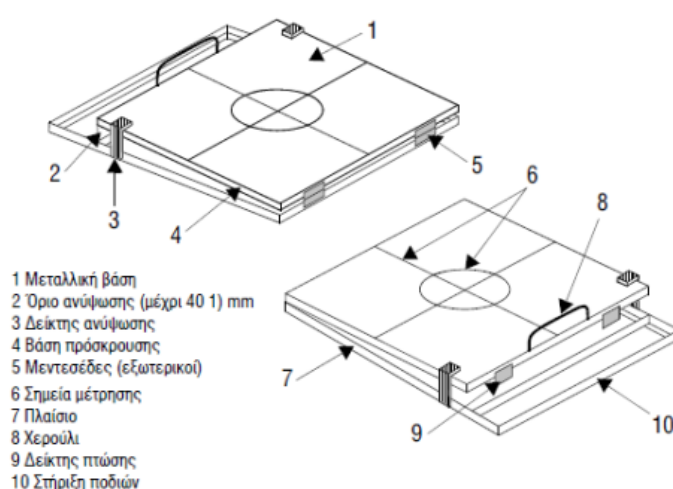
Ολόκληρη η διαδικασία από την αρχή του γεμίσματος μέχρι να σηκωθεί ο κώνος πρέπει να ολοκληρώνεται εντός 150 δευτερολέπτων. Η δοκιμή είναι έγκυρη μόνο όταν δίνει κάθιση κατά την οποία το σκυρόδεμα παραμένει σε μεγάλο βαθμό ακέραιο και συμμετρικό μετά την αφαίρεση του κώνου, δηλαδή το σκυρόδεμα να παραμένει όρθιο στη μορφή ενός κολουρού κώνου (ή τμήματος κώνου). Εάν το σκυρόδεμα καταρρέυσει (εικόνα 3.14), πρέπει να ληφθεί άλλο δείγμα. Εάν το δείγμα καταρρέυσει σε δύο διαδοχικούς ελέγχους, το σκυρόδεμα δε διαθέτει την πλαστικότητα και τη συνοχή που απαιτούνται για τη δοκιμή κάθισης [145]. Η δοκιμή της κάθισης είναι μία πολύ διαδεδομένη δοκιμή, διότι παρέχει έναν εύκολο και απλό έλεγχο της ομοιομορφίας ενός μείγματος σκυροδέματος από παρτίδα σε παρτίδα [148].



Εικόνα 3.14 Μορφές κάθισης [145].

Δοκιμή εξάπλωσης

Η δοκιμή καθορίζει την εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος μετρώντας την εξάπλωση του σκυροδέματος σε οριζόντια επίπεδη βάση, βάσει του προτύπου EN 12350-6. Η δοκιμή αυτή αφορά σε σκυρόδεμα με μέγιστο κόκκο αδρανούς 63mm και εκτελείται σε τράπεζα εξάπλωσης. Επάνω στην τράπεζα είναι χαραγμένος ένας κύκλος διαμέτρου 210 mm και δύο άξονες αριθμημένοι, με γωνία 90°, που διέρχονται από το κέντρο του κύκλου. Χρησιμοποιείται ένας κώνος μεταλλικός με ανοικτή την επάνω και κάτω βάση του και δύο χερούλια. Η άνω βάση έχει διάμετρο 130 mm, η κάτω βάση 200 mm και ύψος 200mm. Ο κώνος τοποθετείται ακριβώς επάνω στον κύκλο της τράπεζας, πληρούται με το υπό δοκιμή σκυρόδεμα σε δύο τμήματα, τα οποία συμπυκνώνονται με τη χρήση ξύλινου κόπανου (εικόνα 3.15).



Εικόνα 3.15 Διάταξη δοκιμής εξάπλωσης [145].

Ο κώνος γεμίζει με σκυρόδεμα σε δύο στρώσεις, ισοπεδώνεται το σκυρόδεμα στην επάνω επιφάνεια του κώνου και αμέσως ο κώνος ανασύρεται αργά και κατακόρυφα. Το σκυρόδεμα εξαπλώνεται γύρω από τον κύκλο ανάλογα με την συνεκτικότητα του περισσότερο ή λιγότερο επάνω στην τράπεζα. Μετά από την οποιαδήποτε κατάρρευση σκυροδέματος, η βάση ανυψώνεται χειροκίνητα ή μηχανικά 15 φορές έως το δείκτη ανύψωσης και αφήνεται να πέσει έως τους δείκτες πτώσης οπότε πραγματοποιείται η κυρίως εξάπλωση του σκυροδέματος.

Το μέτρο εξάπλωσης είναι ο μέσος όρος: $(d_1 + d_2)/2$ σε ακέραια εκατοστά, των αποστάσεων εξάπλωσης του σκυροδέματος όπως μετριοούνται επάνω στους άξονες. Δηλαδή το d_1 είναι η μία διάμετρος της επιφάνειας όπου απλώθηκε το σκυρόδεμα και d_2 είναι η κάθετη διάμετρος. Καθώς το σκυρόδεμα απλώνεται σε ένα σχήμα που προσεγγίζει τον κύκλο [200]. Η εξάπλωση του σκυροδέματος μετριέται παράλληλα προς τις πλευρές της βάσης διαμέσου του κέντρου της [145].

Απώλεια εργασιμότητας (κάθισης)

Η απώλεια κάθισης ορίζεται ως η απώλεια ρευστότητας στο νωπό σκυρόδεμα με την πάροδο του χρόνου. Εμφανίζεται σε όλα τα μείγματα σκυροδέματος για το

λόγο ότι προκύπτει από τη βαθμιαία σκλήρυνση και πήξη, της ενυδατωμένης τσιμεντόπαστας, ένα φαινόμενο που συνδέεται με το σχηματισμό προϊόντων ενυδάτωσης. Απώλεια της εργασιμότητας συμβαίνει όταν το ελεύθερο νερό από το μείγμα του σκυροδέματος απομακρύνεται λόγω των αντιδράσεων ενυδάτωσης και λόγω της εξάτμισης του νερού.

Υπό κανονικές συνθήκες, ο όγκος των προϊόντων ενυδάτωσης κατά τη διάρκεια των τριάντα πρώτων λεπτών από την προσθήκη νερού στο τσιμέντο, είναι μικρός και η απώλεια κάθισης είναι αμελητέα. Έπειτα το σκυρόδεμα αρχίζει να χάνει κάθιση με ένα ρυθμό που καθορίζεται κυρίως από το χρόνο που έχει παρέλθει μετά την ενυδάτωση, τη θερμοκρασία, τη σύνθεση του τσιμέντου και την παρουσία ή όχι πρόσμικτου. Υπό συγκεκριμένες συνθήκες, ένα μείγμα μπορεί να παρουσιάζει μία ασυνήθιστα μεγάλη απώλεια κάθισης κατά τη διάρκεια των πρώτων 30 με 60 λεπτών με αποτέλεσμα να γίνεται δύσκολη η ανάμιξη, η μεταφορά, η τοποθέτηση, η συμπίκνωση και οι εργασίες φινιρίσματος ή σε μερικές περιπτώσεις, ακόμη και να είναι αδύνατες οι εργασίες αυτές.

Πρακτικά, ένα σκυρόδεμα με τάση απώλειας κάθισης, σημαίνει ένα προϊόν που υφίσταται μία γρήγορη και συνήθως μεγάλη απώλεια ρευστότητας που είναι πέρα από την αναμενόμενη ή τη συνήθη συμπεριφορά. Οι κυριότερες αιτίες των προβλημάτων του σκυροδέματος με απώλεια κάθισης είναι οι ακόλουθες: (α) χρήση τσιμέντου μη ομαλής πήξης, (β) ασυνήθιστα μεγάλος χώρος ανάμιξης, μεταφοράς, τοποθέτησης, συμπίκνωσης ή εργασιών φινιρίσματος (γ) υψηλή θερμοκρασία σκυροδέματος οφειλόμενη σε επιπλέον θερμότητα ενυδάτωσης ή/και χρήση υλικών μέσα στο σκυρόδεμα που είναι αποθηκευμένα σε υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να λαμβάνονται τα απαιτούμενα μέτρα για τον έλεγχο της απώλειας κάθισης [148].

Πυκνότητα νωπού σκυροδέματος

Η πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος είναι η μάζα σε kg ανά m³ νωπού, κανονικά συμπτυκνωμένου σκυροδέματος, συμπεριλαμβάνοντας τα υπολειπόμενα κενά. Με δεδομένο την ίδια ποσότητα τσιμέντου και αδρανών, χαμηλότερη πυκνότητα σκυροδέματος είναι ενδεικτική χαμηλότερης αντοχής σκυροδέματος, επειδή η πυκνότητα μειώνεται όσο το περιεχόμενο νερό και τα κενά αυξάνονται, ενώ αυξάνεται με τη μείωση του λόγου νερού/ τσιμέντο.

Ο προσδιορισμός της πυκνότητας του νωπού σκυροδέματος βασίζεται στο πρότυπο EN12360-6. Το νωπό σκυρόδεμα συμπτυκνώνεται σε στερεό, στεγανό δοχείο και μετά ζυγίζεται. Οι ελάχιστες διαστάσεις του δοχείου πρέπει να είναι τουλάχιστον τέσσερις φορές μεγαλύτερες από τη μέγιστη ονομαστική διάμετρο των μεγαλύτερων αδρανών του σκυροδέματος, αλλά δεν πρέπει να είναι μικρότερες από 150mm. Η χωρητικότητα του δοχείου πρέπει να είναι τουλάχιστον 5 λίτρα και το χείλος του παράλληλο με τη βάση του δοχείου. Έχει αποδειχτεί ότι τα δοχεία μέτρησης περιεκτικότητας αέρα του νωπού σκυροδέματος χωρητικότητας 8 λίτρων είναι ιδιαίτερα κατάλληλα [145].

Ειδικότερα, η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι η εξής: Ζυγίζεται το δοχείο και προσδιορίζεται η μάζα του (M_1). Στη συνέχεια, γεμίζεται έως το $\frac{1}{3}$ του ύψους του με νωπό σκυρόδεμα και συμπυκνώνεται. Η συμπύκνωση μπορεί να πραγματοποιηθεί μηχανικά με δονητή χειρός ή τράπεζα δόνησης ή χειροκίνητα με ράβδο. Στην περίπτωση χρήσης ράβδου, απαιτούνται 25 ραβδισμοί, με πρότυπη ράβδο διαμέτρου $\Phi 16$. Το ίδιο ακολουθεί για τις 2 επόμενες στρώσεις. Η επιφάνεια του δοχείου επιπεδώνεται με μυστρί και ζυγίζεται η μικτή μάζα (M_2) του συστήματος (δοχείο – σκυρόδεμα). Προσδιορίζεται η καθαρή μάζα ($M = M_2 - M_1$) και έχοντας γνωστή την χωρητικότητα του δοχείου (V) υπολογίζεται η πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος από τη σχέση: $\rho = M/V$.

Περιεκτικότητα αέρα

Κατά την ανάμιξη των συστατικών του σκυροδέματος είναι αναπόφευκτο το φαινόμενο της παγίδευσης φυσαλίδων αέρα στην μάζα του σκυροδέματος, συνήθως σφαιρικού σχήματος με διάμετρο έως 3 mm. Η περιεκτικότητα του αέρα στο σκυρόδεμα πέραν ενός ορίου προκαλεί δυσμενείς επιπτώσεις στην αντοχή και στη διαπερατότητα του σκληρυμένου σκυροδέματος [175].

Όλα τα μείγματα σκυροδέματος περιέχουν κενά. Ακόμα και μετά από προσεκτική συμπύκνωση, το υπολειπόμενο περιεχόμενο αέρα, π.χ. με μέγιστο κόκκο αδρανών 32 mm, καταλαμβάνει ποσοστό 1-2% κατά όγκο και αυτό το σύνθηδες περιεχόμενο μπορεί να ανέλθει σε ποσοστό 4% κατά όγκο σε σκυροδέματα με λεπτά αδρανή. Η αύξηση του περιεχόμενου αέρα επηρεάζει την αντοχή του σκυροδέματος, γενικά, για κάθε 1% αύξηση του περιεχόμενου αέρα στο σκυρόδεμα προκαλείται μείωση της θλιπτικής αντοχής του κατά 5% περίπου.

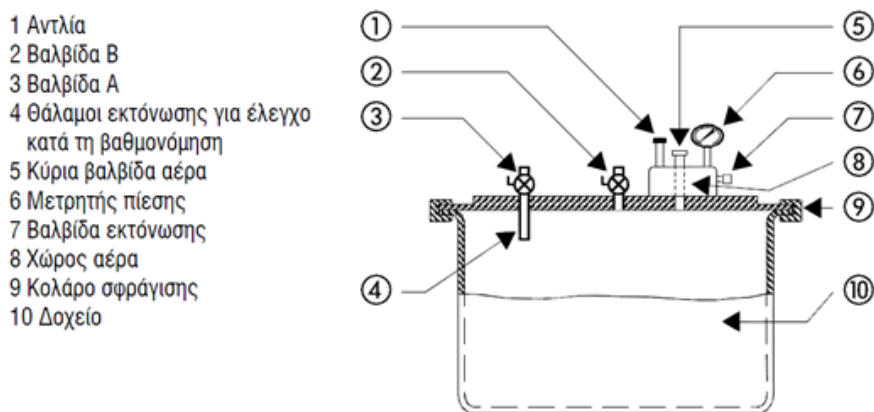


Εικόνα 3.16 Συσκευή μέτρησης περιεχόμενου αέρα.

Ο καθορισμός των περιεχόμενου αέρα δύναται να πραγματοποιηθεί σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C231, το οποίο βασίζεται στο νόμο Boyle-Marriote δηλαδή στη μέθοδο εξισορρόπησης πίεσης. Σύμφωνα με αυτή, ένας γνωστός όγκος αέρα σε γνωστή πίεση εξισορροπείται με άγνωστο όγκο αέρα στο σκυρόδεμα σε ένα σφραγισμένο θάλαμο.

Η εικόνα 3.17 παρουσιάζει ένα διάγραμμα της συσκευής μέτρησης του περιεχόμενου αέρα με τη μέθοδο αυτή. Τα δοχεία μέτρησης της περιεκτικότητας αέρα για συμβατικό σκυρόδεμα έχουν χωρητικότητα 8 λίτρων. Το δείγμα νωπού

σκυροδέματος τοποθετείται στο δοχείο με τη χρήση σέσουλας, σε τρία τμήματα ισομεγέθη, τα οποία συμπυκνώνονται με δονητή χειρός, ράβδο συμπύκνωσης ή τράπεζα δόνησης. Σε περίπτωση χρήσης δονητή χειρός, εξασφαλίζεται ότι δε θα απελευθερωθεί ο εγκλεισμένος αέρας από υπερβολική δόνηση, ενώ με τη ράβδο συμπύκνωσης απαιτούνται 25 χτυπήματα για κάθε στρώση τα οποία ακολουθούνται από 10-15 εξωτερικά χτυπήματα του δοχείου με ματσόλα για να κλείσουν τα κενά.



Εικόνα 3.17 Διάγραμμα συσκευής μέτρησης περιεκτικότητας αέρα για τη μέθοδο εξισορρόπησης πίεσης [145].

3.3.2 Ιδιότητες σκληρυμένου σκυροδέματος

Για τον έλεγχο των ιδιοτήτων του σκληρυμένου σκυροδέματος παρασκευάζονται δοκίμια, τα οποία για να θεωρούνται έγκυρα και να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις δοκιμές οφείλουν να παρασκευάζονται, συμπυκνώνονται και ωριμάζουν βάσει συγκεκριμένων πρότυπων. Αντίστοιχα προδιαγραφές απαιτούνται για τα καλούπια (μήτρες) των δοκιμίων, τις διαστάσεις τους και τον αριθμό τους. Παράλληλα, ανάλογα με την δοκιμή η οποία θα πραγματοποιηθεί, καθορίζεται η μορφή των δοκιμίων. Συγκεκριμένα, για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής χρησιμοποιούνται κυβικά ή κυλινδρικά δοκίμια και για την καμπτική αντοχή πρισματικά. Επιπλέον, τα μηχανήματα τα οποία χρησιμοποιούνται για την κάθε δοκιμή, οφείλουν να πληρούν ορισμένα κριτήρια.

Τα δοκίμια και τα καλούπια παρασκευής τους οφείλουν να ακολουθούν τις προδιαγραφές του ευρωπαϊκού πρότυπου EN 12390-1. Συγκεκριμένα, τα καλούπια που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να είναι στεγανά και μη απορροφητικά. Πριν τη χρήση τους, οι αρμοί μπορούν να σφραγιστούν με κατάλληλο υλικό, το οποίο συνήθως είναι κάποιο λάδι (π.χ. λάδι μηχανής). Τα βαθμονομημένα καλούπια πρέπει να είναι κατασκευασμένα από ατσάλι ή χυτοσίδηρο, ενώ στην περίπτωση χρήσης κάποιου άλλου υλικού, πρέπει να τεκμηριώνεται η μακρόχρονη συμβατότητά του με τα καλούπια από ατσάλι ή χυτοσίδηρο [145].

Τα παραγόμενα δοκίμια για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις δοκιμές, οφείλουν να μην αποκλίνουν από το προκαθορισμένο μέγεθος περισσότερο από τα καθοριζόμενα στον πίνακα 3.7. Εάν η ανοχή υπερβαίνεται, τα δοκίμια πρέπει να απορρίπτονται, να προσαρμόζονται ή να ελέγχονται.

Πίνακας 3.7 Ανοχές δοκιμίων [145].

Ανεκτή απόκλιση	Κύβος	Κύλινδρος	Πρίσμα
Προκαθορισμένο μέγεθος	± 0.5%	± 0.5%	± 0.5%
Προκαθορισμένο μέγεθος μεταξύ κορυφής και βάσης	± 1.0%		± 1.0%
Επιπεδότητα των επιφανειών φόρτισης	± 0.0006 d, σε mm	± 0.0005 d, σε mm	
Τετραγωνισμός των πλευρών σε σχέση με την περιοχή βάσης	± 0.5 mm	± 0.5 mm	± 0.5 mm
Ύψος		± 5 %	
Απόκλιση σε ευθύτητα του κατά μήκος άξονα του κυλίνδρου για δοκιμές κάμψης		± 0.2 mm	
Ευθυγράμμιση της περιοχής υποστήριξης, για δοκιμές κάμψης			± 0.2 mm
Ευθυγράμμιση της επιφάνειας φόρτισης, για δοκιμές εφελκυστικής αντοχής			± 0.2 mm

Η συμπύκνωση των δοκιμίων μπορεί να πραγματοποιηθεί με μία από τις ακόλουθες μεθόδους: (α) με δονητές χειρός, (β) με τράπεζα δόνησης, (γ) με κυκλική χαλύβδινη ράβδο διαμέτρου 16 mm, μήκους περίπου 600 mm, με στρογγυλεμένες γωνίες ή (δ) με χαλύβδινη ράβδο, τετραγωνική ή κυκλική, περίπου 25 x 25 mm, μήκους περίπου 380 mm. Κατά τη συμπύκνωση με δόνηση, η πλήρης συμπύκνωση επιτυγχάνεται όταν δεν εμφανίζονται πλέον μεγάλες φουσκάλες αέρα στην επιφάνεια και η επιφάνεια έχει γυαλιστερή και λεία εμφάνιση.

Τα δοκίμια μετά την παρασκευή τους πρέπει να παραμένουν στα καλούπια σε θερμοκρασίες 20 (± 2)°C, ή σε 25 (± 5)°C σε χώρες με θερμό κλίμα, για τουλάχιστον 16 ώρες αλλά όχι περισσότερο από 3 ημέρες. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος, πρέπει να προστατεύονται από φυσικά και κλιματικά πλήγματα και ξήρανση. Μετά την αποκαλούπωση, τα δοκίμια συντηρούνται έως την έναρξη των δοκιμών σε θερμοκρασίες 20 (± 2)°C, είτε στο νερό ή σε θάλαμο συντήρησης, με υγρασία μεγαλύτερη του 95% [145].

Θλιπτική αντοχή

Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι η ιδιότητα που εκτιμάται περισσότερο κατά τους ελέγχους ποιότητας και το σχεδιασμό του σκυροδέματος και αποτελεί το πιο χαρακτηριστικό μέγεθος του υλικού. Σε αντίθεση με άλλα υλικά, το σκυρόδεμα περιέχει πολλές μικρορηγματώσεις στη δομή του ακόμα και πριν εκτεθεί σε φόρτιση. Κατά συνέπεια, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος αφορά στην τάση που απαιτείται για να προκληθεί αστοχία και ορίζεται ως η μέγιστη τάση που ένα δείγμα μπορεί να αντέξει λίγο πριν τη θραύση. Στην θλίψη, το δοκίμιο θεωρείται ότι έχει αστοχήσει ακόμα και αν δεν υπάρχουν ορατές ενδείξεις εξωτερικής θραύσης αλλά στο εσωτερικό η ρηγμάτωση έχει προχωρήσει σε τέτοιο βαθμό που δεν μπορεί να μεταφέρει επιπλέον αύξηση φορτίου [148].

Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, f_c , μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί πειραματικά, με καταπόνηση σε κεντρική θλίψη δοκιμίων από

σκυρόδεμα, κυβικών ή κυλινδρικών ανάλογα με το επιλεγθέν πρότυπο. Τα αποτελέσματα αυτού του προσδιορισμού για ηλικία σκυροδέματος 28 ημερών και για συμβατικές συνθήκες παρασκευής, συντήρησης και δοκιμασίας των δοκιμίων χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν την ποιότητα του υλικού και καθορίζουν το όνομα της ποιότητάς του όπως έχει ήδη αναφερθεί.

Για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής ακολουθείται το πρότυπο EN 12390-3, σύμφωνα με το οποίο, το μηχάνημα που χρησιμοποιείται πρέπει να πληροί τις προδιαγραφές του EN 12390-4. Τα δοκίμια πρέπει να είναι κύβοι ή πρίσματα και να συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις διαστασιολογικής ακρίβειας του EN 12390-1. Εάν η ανοχή υπερβαίνεται, τα δοκίμια πρέπει να απορρίπτονται, να προσαρμόζονται ή να ελέγχονται σύμφωνα με το παράρτημα του προτύπου αυτού, που ορίζει τι απαιτείται για την προσαρμογή των διαστάσεων: κόψιμο, τριβή ή εφαρμογή υλικού πλήρωσης [145].

Για το λόγο ότι τα αποτελέσματα των μετρήσεων ενδέχεται να επηρεαστούν από διάφορους άλλους δευτερογενείς παράγοντες πέρα από το μέγεθος του δοκιμίου, όπως ο ρυθμός επιβολής του φορτίου, η υγρασία ή ακόμα και το μηχάνημα στο οποίο γίνεται η δοκιμή και οι επιβαλλόμενες συνθήκες φόρτισης και παραμόρφωσης στα σημεία επιβολής του φορτίου, απαιτείται να διατηρούνται ίδιες συνθήκες για την εξαγωγή συγκρίσιμων αποτελεσμάτων.

Τα δοκίμια κύβων πρέπει να ελέγχονται κάθετα προς τη διεύθυνση της έγχυσης κατά την παρασκευή τους. Στην περίπτωση της μονοαξονικής θλίψης σχηματίζονται ρωγμές κυρίως παράλληλες με τα επιβαλλόμενα φορτία. Οι ρωγμές σχηματίζουν επίπεδα κάθετα μεταξύ τους και τελικά το δοκίμιο αστοχεί σχηματίζοντας κολονάκια [176]. Στο τέλος του ελέγχου, πρέπει να εκτιμάται ο τύπος της θραύσης, ενώ εάν είναι ασυνήθιστος, πρέπει να καταγράφεται [145].



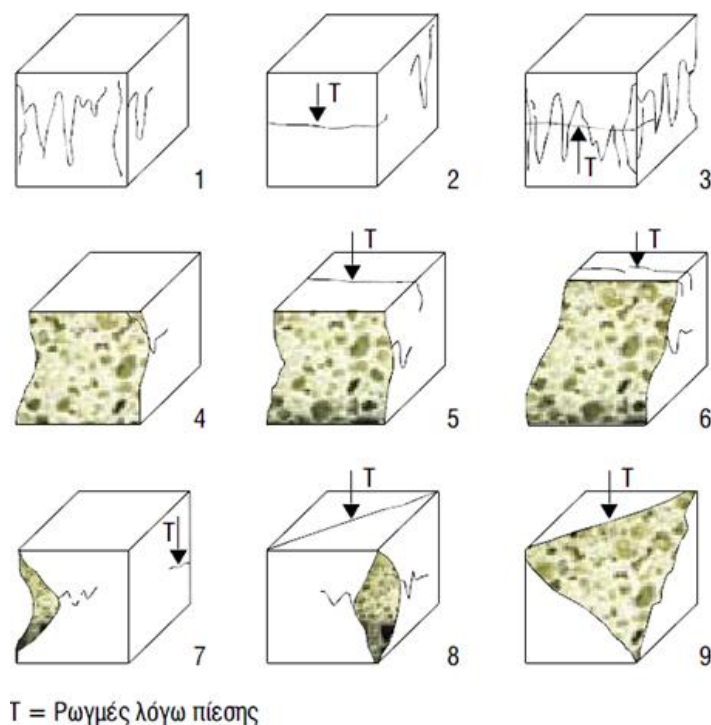
Εικόνα 3.18 Συνήθης μορφές αστοχίας θλιπτικής αντοχής [145].

Στα κυβικά δοκίμια παρατηρείται η ακόλουθη μορφή αστοχίας: οι οριζόντιες τάσεις εξασθενούν καθώς κινούμαστε προς το μέσον του δοκιμίου. Οι πλευρές του δοκιμίου είτε εμφανίζουν κατακόρυφες ρωγμές, είτε διασπώνται τελείως και ο πυρήνας παραμένει πρακτικά άθικτος. Εάν η μηχανή στην οποία γίνεται η δοκιμή δεν είναι αρκετά δύσκαμπτη υπάρχει η περίπτωση να εμφανισθεί αστοχία εκρηκτικού τύπου [176]. Οι συνήθεις και οι ασυνήθιστες μορφές αστοχίας παρουσιάζονται στις εικόνες 3.18 και 3.19 αντίστοιχα.

Κατά τον υπολογισμό της αντοχής σε θλίψης ακολουθείται ο ακόλουθος τύπος:

$$f_c = F/A_c$$

όπου: f_c η θλιπτική αντοχή σε MPa, F το μέγιστο φορτίο σε N και A_c το εμβαδόν του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με την πλάκα φόρτισης. Τα αποτελέσματα της δοκιμής πρέπει να έχουν ακρίβεια τουλάχιστον της τάξης του 0,5 MPa [176].



Εικόνα 3.19 Ασυνήθιστες μορφές αστοχίας θλιπτικής αντοχής [145].

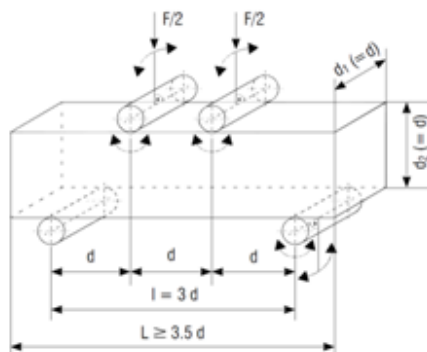
Καμπτική αντοχή

Το σκυρόδεμα στις περισσότερες κατασκευές υπόκεινται κυρίως σε θλιπτική καταπόνηση, ενώ η καμπτική καταπόνηση είναι συνήθης σε έργα όπως η οδοποιία ή οι αεροδιάδρομοι [176]. Το σκυρόδεμα φημίζεται κυρίως για τη θλιπτική του αντοχή, εντούτοις διαθέτει κάποια καμπτική αντοχή, η οποία εξαρτάται κυρίως από το μείγμα [145] και κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 2 έως 7 MPa.

Για τον προσδιορισμό της καμπτικής αντοχής ακολουθείται το πρότυπο EN 12390-5, το οποίο βασίζεται στην αρχή ότι: καμπτική σημειακή πίεση εξασκείται σε πρισματικά δοκίμια μέσω μετάδοσης φορτίου από κυλίνδρους στο άνω και κάτω μέρος του δοκιμίου. Το ίδιο πρότυπο καθορίζει τις διαστάσεις του πρίσματος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Πρέπει να ισχύουν τα ακόλουθα: το πλάτος να ισούται με το ύψος (d) και το μήκος του δοκιμίου να είναι έως 3,5 φορές μεγαλύτερο ($\geq 3.5 d$). [145] Συνήθως τα πρισματικά δοκίμια έχουν διατομή 150mm x 150mm και μήκος 600 mm ή 700 mm [177].

Η δοκιμή σε κάμψη μπορεί να πραγματοποιηθεί στηρίζοντας τα δοκίμια αμφιέριστα και καταπονώντας τα καμπτικά είτε με την επιβολή κατακόρυφου θλιπτικού φορτίου από το επάνω μέρος μέσω δύο κυλίνδρων σε απόσταση d όπου ο καθένας τους απέχει $\frac{1}{2} d$ από το κέντρο του πρίσματος (κάμψη τεσσάρων σημείων) είτε με την εφαρμογή κατακόρυφου θλιπτικού φορτίου σε ένα σημείο κεντρικά

(κάμψη τριών σημείων). Ως μέθοδος αναφοράς θεωρείται η πρώτη, η οποία και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα. Οι κάτω κύλινδροι βρίσκονται σε απόσταση $3d$ (καθένας τους απέχει $1\frac{1}{2}d$ από το κέντρο του πρίσματος) όπως φαίνεται στην εικόνα 3.20 [145]. Το φορτίο πρέπει να εφαρμόζεται κάθετα ως προς τη κατεύθυνση έγχυσης κατά την παρασκευή των πρισμάτων.



Εικόνα 3.20 Δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων [145].

Λόγω της επιβαλλόμενης καμπτικής καταπόνησης αναπτύσσονται ορθές τάσεις καθ' ύψος της εγκάρσιας διατομής της δοκού. Όταν με την αύξηση του φορτίου η καμπτική τάση φθάσει την οριακή τιμή της η δοκός θραύεται στη μεσαία διατομή. Η μέγιστη αυτή τιμή της καμπτικής τάσης, οριζόμενη ως αντοχή σε κάμψη, δίνεται από την ακόλουθη σχέση για την περίπτωση της κάμψης τεσσάρων σημείων [177]:

$$f_{t,fl} = \frac{PL}{bd^2}$$

όπου: $f_{t,fl}$ είναι η αντοχή σε κάμψη, P το επιβαλλόμενο φορτίο, L η απόσταση μεταξύ των δύο στηριγμάτων, d το ύψος του δοκιμίου και b το πλάτος του δοκιμίου.

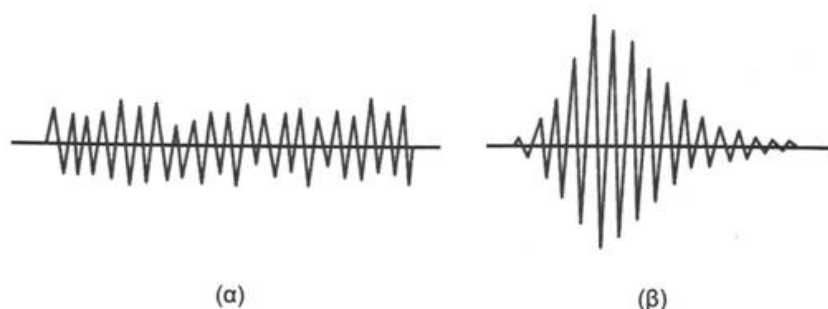
Ακουστική εκπομπή

Τα περισσότερα υλικά κατά το τελικό στάδιο της αστοχίας τους (κυρίως κατά την ψαθυρή θραύση) εκπέμπουν τασικά κύματα τα οποία τελικά γίνονται αντιληπτά και από τον άνθρωπο λόγω δημιουργίας ηχητικών κυμάτων στον αέρα [178]. Η ακουστική εκπομπή (AE) είναι μία μη διεισδυτική, μη καταστρεπτική μέθοδος που αναλύει τους θορύβους που δημιουργούνται όταν τα υλικά παραμορφώνονται ή θραύονται. Κάθε γεγονός ακουστικής εκπομπής είναι μία ένδειξη ενός πραγματικού μηχανισμού, ένα διακριτό γεγονός που απεικονίζει μία δεδομένη απόκριση του υλικού. Τα κύματα ακουστικής εκπομπής διαδίδονται μέσω του υλικού και μπορούν να ανιχνευτούν στην επιφάνεια από έναν αισθητήρα, ο οποίος μετατρέπει τις δονήσεις σε ηλεκτρικά σήματα [148]. Σε αντίθεση με αυτό που δηλώνει το όνομα της, τα σήματα της ακουστικής εκπομπής ελέγχονται σε εύρος συχνοτήτων από 15 kHz έως μερικά MHz, δηλ. σε συχνότητες υπερήχων [179].

Η AE εντοπίζει μετακινήσεις-μετατοπίσεις, δομικές ατέλειες σε πολύ πρώιμο στάδιο οι οποίες όμως είναι ενεργές και πιθανώς κρίσιμες σε συγκεκριμένα φορτία. Η τεχνική AE δε δίνει πληροφορίες για το μήκος και το βάθος των ατελειών και δεν προσδιορίζει άμεσα βασικές μηχανικές παραμέτρους όπως η τάση ή η παραμόρφωση,

αλλά κατατάσσει τη δραστηριότητα και κρισιμότητα σε κατηγορίες καθορίζοντας έτσι τη μηχανική ευστάθεια μιας δομής ή ενός δείγματος όταν αυτό υποβάλλεται σε τάση ή παραμόρφωση [180].

Ένα υλικό μπορεί να παραγάγει ακουστική εκπομπή δύο βασικών κυματομορφών: συνεχούς και εκρηκτικής (εικόνα 3.21) [148]. Η συνεχής εκπομπή είναι μία ποιοτική περιγραφή ενός σταθερού σήματος που παράγεται από ταχεία γεγονότα ακουστικής εκπομπής, όπως αυτά που δημιουργούνται από πλαστικές παραμορφώσεις σε μέταλλα. Η εκρηκτική εκπομπή είναι η ποιοτική περιγραφή ενός διακριτού σήματος που σχετίζεται με ένα μεμονωμένο γεγονός ακουστικής εκπομπής και συμβαίνει στο εσωτερικό του υλικού, όπως κατά τη διάρκεια διάδοσης μιας ρωγμής ή θραύσης ενός ψαθυρού υλικού [179].



Εικόνα 3.21 Βασικές μορφές κυματομορφών: (α) συνεχής και (β) εκρηκτική [148].

Μία τυπική συνδεσμολογία της ΑΕ, αποτελείται από τα παρακάτω μέρη, τα οποία μπορεί να διαφοροποιούνται ανάλογα με την πραγματοποιούμενη δοκιμή:

1. Αισθητήρες: Οι πιο συνηθισμένοι αισθητήρες είναι πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Πρόκειται για ειδικό κεραμικό υλικό, το οποίο αποτελεί και το ενεργό στοιχείο του αισθητήρα. Όταν ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος παραμορφώνεται, το ηλεκτρικό δυναμικό στα άκρα του μεταβάλλεται και έτσι η μετακίνηση, που επιβάλλεται στην επιφάνειά του λόγω ενός κύματος ΑΕ, μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Χρησιμοποιούνται ένας ή περισσότεροι ανάλογα με το αν επρόκειτο για σύστημα ενός ή πολλών καναλιών [180].
2. Προενισχυτές: Οι προενισχυτές έχουν ως σκοπό να παράγουν ένα σήμα υψηλότερης τάσης που να είναι πιο εύχρηστο για περαιτέρω επεξεργασία. Είναι προτιμότερο ο προενισχυτής να τοποθετείται κοντά στον αισθητήρα, μάλιστα ορισμένες φορές είναι ενσωματωμένος στο περίβλημα του αισθητήρα και περιέχει ένα φίλτρο συχνοτήτων για την απόρριψη του ανεπιθύμητου θορύβου [180].
3. Φίλτρα ζωνών διέλευσης: χρησιμοποιούνται για την αποκοπή σημάτων ακουστικής εκπομπής μη επιθυμητής συχνότητας.
4. Κύριος ενισχυτής: ενισχύει περαιτέρω τα σήματα επιπλέον 20 – 60 db.
5. Διευκρινιστής: χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση ενός ορίου στην τάση πάνω από το οποίο ξεκινάει η καταγραφή σημάτων [179].

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνικής ΑΕ είναι ότι, με τη χρήση πολλών αισθητήρων και από την ανάλυση των στοιχείων που λαμβάνονται, είναι δυνατός ο εντοπισμός της θέσης της πηγής ΑΕ. Ο υπολογισμός της θέσης

γίνεται από την ταχύτητα του ακουστικού κύματος και τους χρόνους άφιξης του σήματος στους διαφορετικούς αισθητήρες. Για το γραμμικό εντοπισμό θέσης απαιτούνται δύο αισθητήρες, τρεις για τον επίπεδο προσδιορισμό αυτής και τέσσερις για τον εντοπισμό της θέσης στο χώρο [180].

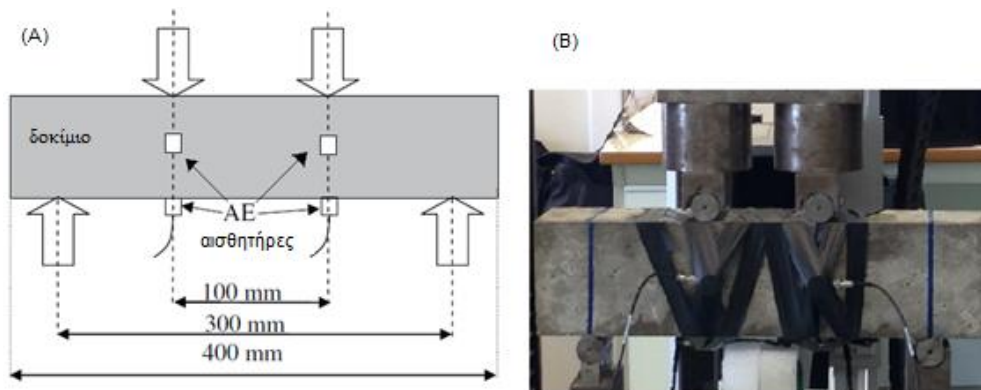
Κατά συνέπεια, η ακουστική εκπομπή είναι μία ελπιδοφόρος τεχνική για να ελεγχθεί η συμπεριφορά υλικών στα οποία είναι δυνατή η επιβολή φορτίου με ελεγχόμενο τρόπο. Ειδικότερα στο σκυρόδεμα, η ακουστική εκπομπή χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με δοκιμές θλιπτικής και καμπτικής αντοχής, για τον έλεγχο της εξέλιξης ρηγματώσεων. Το σκυρόδεμα είναι ένα υλικό υψηλής εξασθένισης των κυματομορφών, όπου το πλάτος των κυμάτων μειώνεται γρήγορα.

Εντούτοις, κατά τη χρήση της ακουστικής εκπομπής στο σκυρόδεμα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη αφενός ότι το σκυρόδεμα είναι ένα μέσο που χαρακτηρίζεται από διασπορά και πολλά από τα θεωρητικά και αναλυτικά εργαλεία που είναι διαθέσιμα για τα υπόλοιπα υλικά και κυρίως τα μέταλλα δεν ισχύουν αυτομάτως στο σκυρόδεμα και αφετέρου ότι η ποσοτική ανάλυση της ακουστικής εκπομπής στο σκυρόδεμα είναι δύσκολη επειδή οι πραγματικοί ακριβείς μηχανισμοί δεν είναι γνωστοί ή πλήρως χαρακτηρισμένοι εκ των προτέρων και το μέσο διάδοσης δεν είναι ένα ομοιογενές, ιστροπικό και ελαστικό στερεό αλλά οι ιδιότητές του μπορούν να αλλάξουν κατά μία τάξη μεγέθους μέσα σε μικρές αποστάσεις [148].

Δοκιμή καμπτικής αντοχής και ακουστική εκπομπή

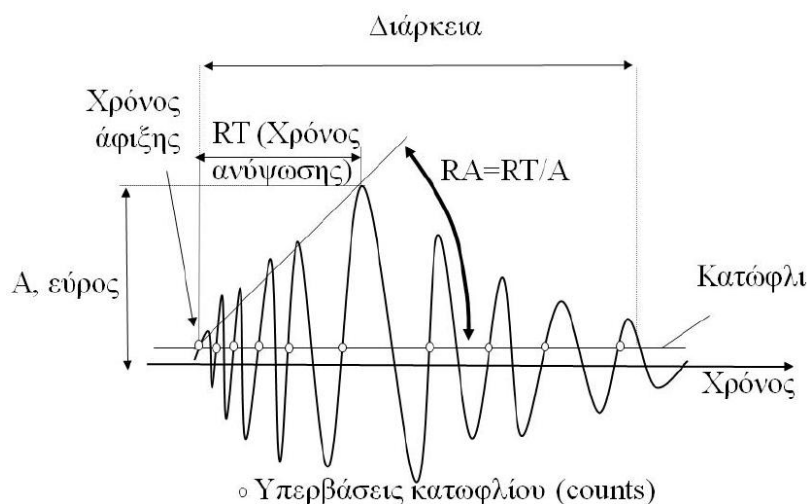
Στην παρούσα έρευνα, η ακουστική εκπομπή αξιοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των δοκιμών καμπτικής αντοχής. Ειδικότερα, κατά τη διάρκεια της δοκιμής κάμψης, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις αισθητήρες (R15, PAC) με μέγιστη ευαισθησία περί τα 150kHz και διάμετρο 15mm. Δύο από αυτούς τοποθετήθηκαν στην μπροστινή πλευρά του δοκιμίου (εικόνα 3.23), ενώ οι άλλοι δύο τοποθετήθηκαν στην κάτω εφελεκόμενη πλευρά του δοκιμίου. Για την αποφυγή μικρομετακινήσεων των αισθητήρων χρησιμοποιήθηκε κολλητική ταινία κατά τη διάρκεια του πειράματος. Η οριζόντια απόσταση μεταξύ των αισθητήρων ήταν 100 mm και το πρώτο τοποθετήθηκε στο οριζόντια απόσταση 50 χιλιοστών από το κέντρο, όπου αναμενόταν η ρωγμή. Οι πρώτοι δύο αισθητήρες είναι αυτοί που λαμβάνουν τις απαιτούμενες τιμές AE, ενώ οι άλλοι δύο εντοπίζουν τη θέση της ρωγμής. Τα σήματα καταγράφηκαν σε έναν πίνακα παρακολούθησης τεσσάρων καναλιών PCI-2, PAC με ρυθμό καταγραφής 10 MHz, ενώ το όριο καταγραφής ορίστηκε στα 40 dB, προκειμένου να αποφευχθεί η καταγραφή του θορύβου περιβάλλοντος [180].

Η συνολική δραστηριότητα AE (πόσα σήματα καταγράφηκαν) είναι ενδεικτική της έκτασης της βλάβης ή αριθμού ρωγμών και είναι το πιο σημαντικό δεδομένο, αφού σχετίζεται άμεσα με την ύπαρξη και διάδοση βλάβης. Επιπρόσθετα, το σχήμα της καταγεγραμμένης κυματομορφής προσφέρει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την πηγή του σήματος. Ως εκ τούτου, πολλές παράμετροι χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών της κυματομορφής. Οι βασικές παράμετροι μιας κυματομορφής AE απεικονίζονται στην εικόνα 3.22.



Εικόνα 3.22 (Α) Σχηματική απεικόνιση δοκιμής κάμψης τεσσάρων σημείων με την παρακολούθηση ΑΕ (Β) Λεπτομέρεια της θέσης των αισθητήρων ΑΕ κατά τη διάρκεια του πειράματος [180].

Βασικό στοιχείο του πειράματος είναι το «κατώφλι», μία τιμής τάσης που πρέπει να ξεπεραστεί ώστε να ξεκινήσει η καταγραφή. Έτσι αποφεύγεται ο χαμηλού επιπέδου θόρυβος. Μία παράμετρος που σχετίζεται με την ένταση του φαινομένου είναι το Εύρος (Amplitude, A), η οποία είναι η τάση του υψηλότερου σημείου της κυματομορφής. Επιπλέον, η ενέργεια (MARSE, measured area under the rectified signal envelope) λαμβάνει υπόψη το περιεχόμενο ολόκληρης της κυματομορφής. Ο χρόνος μεταξύ της πρώτης υπέρβασης κατωφλίου και του χρόνου της μέγιστης κορυφής ονομάζεται χρόνος ανύψωσης (Rise Time, RT).



Εικόνα 3.23 Κυματομορφή ΑΕ με τα βασικά της χαρακτηριστικά [181].

Παρομοίως, ως Διάρκεια (duration, Dur) ορίζεται ο χρόνος μεταξύ της πρώτης και της τελευταίας υπέρβασης κατωφλίου. Με βάση το σχήμα του πρώτου κομματιού του σήματος, έχει εισαχθεί η τιμή RA (RT over A) ή το αντίστροφο του αρχικής κλίσης ανόδου της κυματομορφής (εικόνα 3.23). Το περιεχόμενο συχνότητας είναι επίσης σημαντικό και υπάρχουν διάφορες παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία αυτής της πληροφορίας. Η απλούστερη είναι η «μέση συχνότητα» (average frequency, AF), η οποία υπολογίζεται στο πεδίο του χρόνου ως ο λόγος του συνολικού αριθμού των υπερβάσεων κατωφλίου (counts) προς τη διάρκεια της κυματομορφής σε kHz. Άλλες παράμετροι είναι η μέγιστη συχνότητα (peak

frequency) που είναι η συχνότητα με το μεγαλύτερο εύρος, και η κεντρική συχνότητα ή κέντρο βάρους του φάσματος (central frequency) που μετρώνται στο πεδίο συχνοτήτων.

Για να μετρηθούν αυτές οι παράμετροι είναι απαραίτητη η συλλογή ολόκληρης της κυματομορφής και να γίνει μετασχηματισμός Fourier (Fast Fourier Transformation, FFT) σε πραγματικό χρόνο. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε κάποια καθυστέρηση και πιθανή απώλεια δεδομένων σε στιγμές υψηλού ρυθμού καταγραφής αλλά από την άλλη διευρύνει τις δυνατότητες ανάλυσης αφού επιτρέπει την ανάλυση του «τανυστή ροπής» (Moment Tensor Analysis, MTA) για τον χαρακτηρισμό του τύπου θραύσης και το φιλτράρισμα του θορύβου [181].

Πυκνότητα σκληρυμένου σκυροδέματος

Η πυκνότητα του σκληρυμένου σκυροδέματος προσδιορίζεται σύμφωνα με το πρότυπο EN 12390-7 το οποίο περιγράφει μία μέθοδο καθορισμού της πυκνότητας του σκληρυμένου σκυροδέματος σύμφωνα με την οποία η πυκνότητα υπολογίζεται από τη μάζα (βάρος) και τον όγκο, οι οποίοι λαμβάνονται από ένα σκληρυμένο δοκίμιο σκυροδέματος.

Για τον καθορισμό της μάζας το πρότυπο καθορίζει τρεις συνθήκες κάτω από τις οποίες μπορεί να προκαθοριστεί η μάζα του δοκιμίου: ως έτοιμο δείγμα, ως δείγμα κορεσμένο σε νερό και ως δείγμα που ξηράθηκε σε θερμαινόμενο χώρο (μέχρι να αποκτήσει σταθερή μάζα). Αντίστοιχα για τον καθορισμό του όγκου, καθορίζονται τρεις μέθοδοι για να οριστεί ο όγκος ενός δοκιμίου: με εκτόπιση σε νερό (μέθοδος αναφοράς), με υπολογισμό από τις πραγματικά μετρούμενες μάζες, με υπολογισμό από τα δοκίμια ελέγχου [145].

Ο συνθηθέστερα χρησιμοποιούμενος και πιο εύχρηστος συνδυασμός μεθόδων είναι ο προσδιορισμός της μάζας ως δείγμα κορεσμένο σε νερό και του όγκου βάσει υπολογισμού από τα δοκίμια που πρόκειται να ελεγχθούν. Η πυκνότητα υπολογίζεται από τη μάζα των δοκιμίων που λαμβάνεται και από τον όγκο τους βάσει του ακόλουθου τύπου:

$$D = m/V$$

Όπου: D είναι η πυκνότητα σε kg/m^3 , m η μάζα του δοκιμίου τη στιγμή της μέτρησης σε kg και V ο όγκος υπολογισμένος με τη σχετική μέθοδο σε m^3 .

Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας – λόγος Poisson με τη χρήση υπερήχων

Η μέθοδος των υπερήχων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της ομοιομορφίας ενός στοιχείου, τον εντοπισμό ανωμαλιών (ύπαρξη ρωγμών, κοιλιοτήτων, πάχος στρώματος που έχει υποστεί φθορά), αλλά συχνότερα χρησιμοποιείται για την αποτίμηση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος [182].

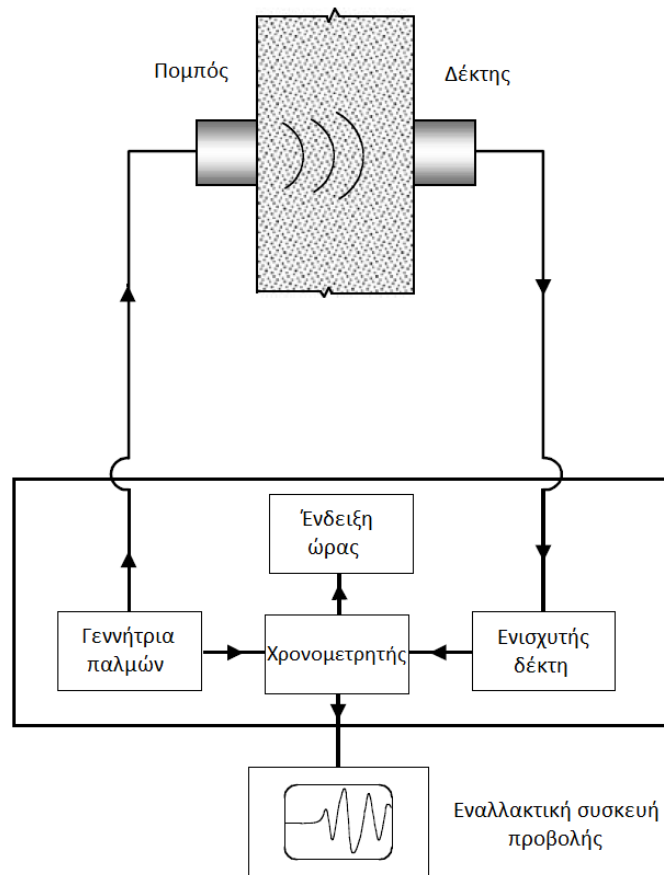
Πρόκειται για μία έμμεση μη καταστροφική μέθοδο η οποία βασίζεται στον προσδιορισμό της ταχύτητας των υπερήχων που μεταδίδονται στο σκυρόδεμα. Η μετάδοση των κυμάτων διαμέσου του στερεού μέσου πραγματοποιείται με τρόπο

ανάλογο τη μετάδοση των ηχητικών κυμάτων μέσω του αέρα. Κάθε τύπος κύματος έχει μία χαρακτηριστική ταχύτητα διάδοσης, η οποία εξαρτάται από τις ελαστικές ιδιότητες και την πυκνότητα του μέσου μετάδοσης. Για ελαστικά, ομοιογενή στερεά μέσα, η ταχύτητα παλμού κυμάτων δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$V = \sqrt{\frac{E(1 - \mu)}{\rho (1 + \mu)(1 - 2\mu)}}$$

Όπου V είναι η ταχύτητα των υπερήχων, E το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, μ ο δυναμικός λόγος Poisson και ρ η πυκνότητα του υλικού [183]. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων το σκυρόδεμα μπορεί να θεωρηθεί μακροσκοπικά ομοιογενές και κατά συνέπεια να χρησιμοποιηθεί η παραπάνω σχέση, χωρίς μεγάλα σφάλματα [184].

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από ένα μέσο το οποίο παράγει και μεταδίδει τους υπερήχους στο σκυρόδεμα (πομπός) και από ένα μέσο το οποίο αντιλαμβάνεται την άφιξη του παλμού (δέκτης) και μετρά με ακρίβεια το χρόνο που χρειάστηκε ο παλμός για να ταξιδέψει διαμέσου του υλικού. Η διάταξη αυτή μπορεί να είναι επίσης συνδεδεμένη με ένα παλμογράφο ή άλλη συσκευή προβολής, που διακρίνει τον τύπο του λαμβανόμενου παλμού. Ένα σχηματικό διάγραμμα παρουσιάζεται ακολούθως στην εικόνα 3.24 [183].



Εικόνα 3.24 Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης δοκιμής υπερήχων [183-επεξεργασία ίδια].

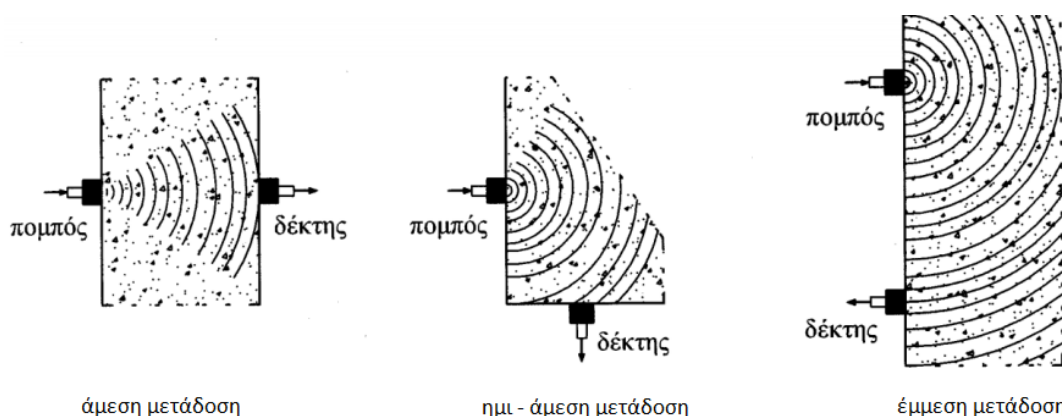
Ο πομπός και ο δέκτης αποτελούνται από κρυστάλλους πιεζοηλεκτρικών κεραμικών στοιχείων, τα οποία αλλάζουν μέγεθος όταν τους εφαρμόζεται ηλεκτρικό ρεύμα ή παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα όταν αλλάζουν μέγεθος. Η επιβολή κατάλληλου

ρεύματος έχει ως συνέπεια ο κρύσταλλος πομπός να πάλλεται με την φυσική του συχνότητα. Η ταλάντωση του κρυστάλλου παράγει τασικά κύματα τα οποία διαδίδονται δια μέσου του σκυροδέματος. Εν τω μεταξύ, ταυτόχρονα με την δημιουργία του παλμού του ηλεκτρικού ρεύματος, ένα ηλεκτρονικό χρονόμετρο ακριβείας τίθεται σε λειτουργία. Μόλις ο παλμός φθάσει στον δέκτη παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο σταματά το χρονόμετρο και στην οθόνη της συσκευής αναγράφεται ο αντίστοιχος χρόνος.

Αν το πάχος του δοκιμίου είναι ίσο με L , ο χρόνος που χρειάστηκε το υπερηχητικό κύμα για να το διανύσει T , τότε η ταχύτητα των υπερήχων V (συνήθως σε km/s) δίνεται απ' τον τύπο:

$$V = \frac{L}{Dt}$$

Μετρήσεις με την μέθοδο των υπερήχων μπορούν να γίνουν με τρεις τρόπους (εικόνα 3.25). Ο πρώτος είναι τοποθετώντας τους δύο κρυστάλλους σε δύο αντικριστές πλευρές του προς εξέταση δοκιμίου (άμεση μετάδοση), ο δεύτερος τοποθετώντας -τους σε δύο κάθετες μεταξύ τους πλευρές (ημι- άμεση μετάδοση), ενώ στον τρίτο οι κρύσταλλοι τοποθετούνται στην μοναδική προσιτή πλευρά του δομικού στοιχείου (έμμεση ή επιφανειακή μετάδοση).



Εικόνα 3.25 Τρόποι εφαρμογής μεθόδου υπερήχων [185- επεξεργασία ίδια].

Ο πρώτος τρόπος μετρήσεως της ταχύτητας των υπερήχων είναι ο περισσότερο ακριβής (και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα), επειδή με την τοποθέτηση των κρυστάλλων αντικριστά επιτυγχάνεται η μεταφορά της μέγιστης ενέργειας απ' τον πομπό στον δέκτη, ενώ ταυτόχρονα η μέτρηση του, διανυόμενου απ' το υπερηχητικό κύμα, μήκους του δομικού στοιχείου γίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Για την καλύτερη επαφή των κρυστάλλων στην επιφάνεια του σκυροδέματος χρησιμοποιείται λιπαντική ουσία, η οποία καλύπτει τις ατέλειες τις εξωτερικής επιφάνειας του στοιχείου. Η λιπαντική ουσία μπορεί να είναι γράσο, βαζελίνη ή γενικά κάποιο παράγωγο του πετρελαίου. Πρέπει να τοποθετείται σε μικρή ποσότητα γιατί διαφορετικά προκαλεί αθέλητες διαφοροποιήσεις στην μετρούμενη ταχύτητα των υπερήχων. Οι διαφοροποιήσεις αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι η ταχύτητα διαδόσεως των υπερήχων είναι διαφορετική στο σκυρόδεμα από ότι στην χρησιμοποιούμενη λιπαντική ουσία.

Παράλληλα με την χρήση των ανωτέρω λιπαντικών ουσιών, κατά την διάρκεια της μέτρησης, πρέπει οι κρύσταλλοι να πιέζονται με μεγάλη δύναμη πάνω στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Στην περίπτωση που οι εξωτερικές επιφάνειες του σκυροδέματος είναι πολύ ανώμαλες θα πρέπει, πριν την τοποθέτηση της λιπαντικής ουσίας, να επιπεδώνονται με την χρήση ηλεκτρικού περιστροφικού τριβείου [182].

Στην παρούσα έρευνα, οι μετρήσεις διενεργήθηκαν από αισθητήρες (R15, PAC) οι οποίοι εμφανίζουν μέγιστη ευαισθησία περίπου 150 kHz και έχουν διάμετρο 15 mm. Για την εξέταση των διαμηκών κυμάτων, οι υπέρηχοι τροφοδοτούν τον μετατροπέα σε κύκλους των 150 kHz, ενώ το λαμβανόμενο σήμα προ-ενισχύθηκε με 40 dB και ψηφιοποιήθηκε με ένα ρυθμό δειγματοληψίας τουλάχιστον 10 MHz. Ως λιπαντική ουσία χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη ποσότητα μελιού. Πριν από κάθε μέτρηση της ταχύτητας των υπερήχων ελέγχθηκε η ένδειξη του οργάνου, λαμβάνοντας υπόψη ότι για άμεση επαφή πομπού και δέκτη, η ένδειξη πρέπει να είναι μηδέν. Το επίπεδο θορύβου ήταν χαμηλό και ως εκ τούτου, η ταχύτητα υπερήχων μετρήθηκε με την πρώτη ανιχνεύσιμη διατάραξη της κυματομορφής (έναρξη) [186]. Η ταχύτητα παλμού για κάθε δείγμα και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας υπολογίστηκαν βάσει των παραπάνω εξισώσεων, λαμβάνοντας υπόψη τα οριζόμενα στο αμερικανικό πρότυπο ASTM C597.

Ηλεκτρική αγωγιμότητα σκυροδέματος

Η μέτρηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένας έμμεσος τρόπος προσδιορισμού των επιδόσεων του σκυροδέματος κυρίως ως εναλλακτική μέθοδος για τον προσδιορισμό της ικανότητάς του να αντιστέκεται στην διείσδυση χλωριόντων. Ως ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος περιγράφεται η ικανότητά του αντέχουν τη μεταφορά των ιόντων όταν υποβάλλεται σε ένα ηλεκτρικό πεδίο. Ως εκ τούτου, η ηλεκτρική αντίσταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιοριστεί το μέγεθος και η διασύνδεση των πόρων [187].

Επειδή η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος είναι μία ηλεκτρολυτική διαδικασία, η αυξανόμενη ιοντική δραστηριότητα προκαλεί μια μείωση στην ειδική αντίσταση του σκυροδέματος. Επομένως, η υψηλή αναλογία νερού προς τσιμέντο, ο υψηλός βαθμός κορεσμού του σκυροδέματος και η υψηλή συγκέντρωση διαλυμένων αλάτων στο διάλυμα των πόρων οδηγούν σε σκυρόδεμα χαμηλότερης ειδικής αντίστασης. Γενικά, το σκυρόδεμα υψηλής ηλεκτρικής αντίστασης έχει μικρή πιθανότητα διάβρωσης του οπλισμού. Ειδικότερα, το ποσοστό διάβρωσης είναι αμελητέο για σκυρόδεμα με ειδική αντίσταση υψηλότερη από 200 Ω.m, χαμηλή για τιμές ειδικής αντίστασης της τάξης των 100 έως 200 Ω.m, υψηλή για τιμές της τάξης των 50 έως 100 Ω.m και πολύ υψηλή για σκυρόδεμα με ειδική αντίσταση χαμηλότερη από 50 Ω.m.

Στο πεδίο, η ηλεκτρική ειδική αντίσταση καθορίζεται με τη μέτρηση των διαφορών δυναμικού στην επιφάνεια του σκυροδέματος που προκαλείται με την εισαγωγή ενός μικρού ρεύματος στην επιφάνεια. Η σχέση μεταξύ του ρεύματος έντασης i και του δυναμικού V δίνεται από το νόμο του Ohm:

$$i = \frac{V}{R}$$

όπου R είναι η αντίσταση του συστήματος. Η αντίσταση δεν είναι μια ιδιότητα του υλικού αλλά εξαρτάται από τις διαστάσεις του συστήματος. Για το λόγο αυτό κανονικοποιείται η παραπάνω σχέση για να δώσει την αντίσταση ως ιδιότητα του υλικού ως ακολούθως:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

όπου L το μήκος και A η διατομή του δοκιμίου [148].

Πολλές φορές, αντί της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιείται η ηλεκτρική ειδική αγωγιμότητα σ , για να προσδιορίσει τον ηλεκτρικό χαρακτήρα ενός υλικού. Είναι απλώς το αντίστροφο της ειδικής αντίστασης:

$$\sigma = 1/\rho$$

και είναι ενδεικτική της ευκολίας με την οποία ένα υλικό είναι ικανό να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα.

Η αντίσταση συχνά μετράται με ένα ψηφιακό πολύμετρο το οποίο μπορεί να κάνει μετρήσεις έως και 200ΜΩ. Εντούτοις, προτιμότερη είναι η χρήση ενός ηλεκτρόμετρου που μπορεί να μετρήσει ταυτόχρονα πολύ χαμηλές τιμές ρεύματος και πολύ υψηλές τιμές αντίστασης ταυτόχρονα. Για τον προσδιορισμό της ηλεκτρικής αντίστασης υπάρχουν διάφορες μέθοδοι. Όποια μέθοδος και να χρησιμοποιηθεί πρέπει να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα ούτως ώστε θόρυβος και πιθανή διαρροή ρεύματος να αποφευχθούν για να μην μειωθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

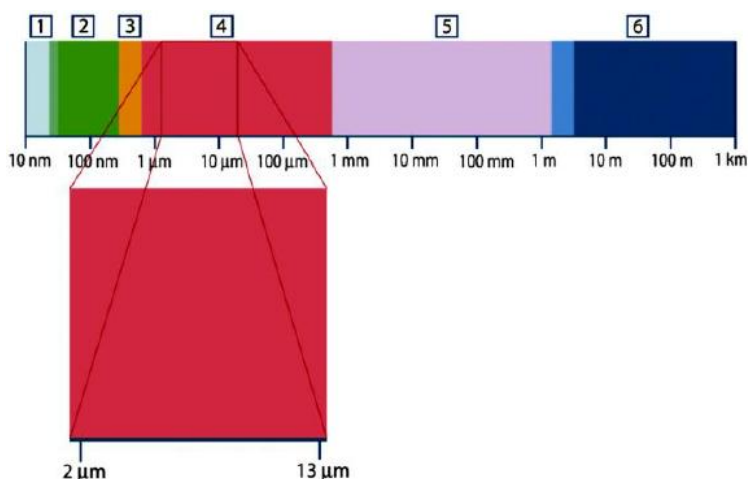
Για την διεξαγωγή των πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη μέθοδος, βάσει της οποίας μια πηγή σταθερής τάσης τοποθετείται σε σειρά με έναν άγνωστο αντιστάτη R και ένα αμπερόμετρο A . Καθώς η πτώση τάσης κατά μήκος του αμπερόμετρου είναι αμελητέα, όλη η τάση εμφανίζεται κατά μήκος του R . Το μετρούμενο ρεύμα και η αντίσταση υπολογίζονται βάσει του νόμου του Ohm. Για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιούνται δείγματα σκυροδέματος τα οποία έχουν τοποθετηθεί σε φούρνο με σκοπό να απομακρυνθεί τυχούσα υγρασία. Ανάλογα με τη συνδεσμολογία των ηλεκτροδίων στο υπό εξέταση δείγμα, προσδιορίζεται η επιφανειακή (surface resistivity) ή όγκου αντίσταση (volume resistivity) [188].

Θερμική αγωγιμότητα – Υπέρυθρη θερμογραφία

Υπέρυθρη ακτινοβολία εκπέμπουν όλα τα σώματα, τα οποία έχουν θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν, δηλαδή μεγαλύτερη από -273°C . Η θερμογραφία υπέρυθρου ή υπέρυθρη θερμογραφία, είναι η μέθοδος που ανιχνεύει τη θερμότητα, η οποία εκπέμπεται από ένα αντικείμενο σε μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας, τη μετατρέπει σε θερμοκρασία και απεικονίζει την κατανομή της θερμοκρασίας ως «θερμογράφημα» [181]. Η υπέρυθρη θερμογραφία δεν μετρά απ' ευθείας την θερμοκρασία μιας επιφάνειας αλλά την μεταβολή της επιφανειακής ακτινοβολίας.

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα χωρίζεται σε ζώνες διαφορετικών μηκών κύματος, οι οποίες διακρίνονται μεταξύ τους ανάλογα με την ακτινοβολία που

παράγουν. Όλοι οι τύποι ακτινοβολίας που αντιστοιχούν στις διάφορες ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (ακτίνες X, υπεριώδεις – UV, ορατό φως, υπέρυθρες – IR, μικροκύματα, ραδιοκύματα) διέπονται από τους ίδιους φυσικούς νόμους και οι μόνες τους διαφορές είναι εκείνες που οφείλονται στο διαφορετικό τους μήκος κύματος. Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.26, η θερμογραφία αξιοποιεί τη ζώνη της υπέρυθρης ακτινοβολίας του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος [181].



Εικόνα 3.26 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. 1: Ακτίνες X. 2: Υπεριώδεις (UV). 3: Ορατό. 4: Υπέρυθρες (IR). 5: Μικροκύματα. 6: Ραδιοκύματα [178].

Η μέθοδος της υπέρυθρης θερμογραφίας βασίζεται σε δύο αρχές. Η πρώτη αρχή είναι ότι κάθε επιφάνεια εκπέμπει ενέργεια υπό την μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Το μήκος κύματος εξαρτάται από την θερμοκρασία. Αυξανόμενη της θερμοκρασίας το μήκος κύματος γίνεται βραχύτερο μέχρι που σε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες βρίσκεται στο ορατό φάσμα (π.χ. πυρακτωμένη άκρη βελόνας). Η ακτινοβολία ανιχνεύεται με κατάλληλους ανιχνευτές οι οποίοι παράγουν ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας το οποίο με κατάλληλη βαθμονόμηση μετατρέπεται σε θερμοκρασία.

Η δεύτερη αρχή είναι ότι οι υποεπιφανειακές ανωμαλίες επηρεάζουν την ροή της θερμότητας. Αν οι ανωμαλίες ή οι διαφοροποιήσεις του υλικού δεν είναι σε πολύ μεγάλο βάθος, τότε η διαφοροποίηση της θερμικής ροής συνεπάγεται και διαφοροποιήσεις στην επιφανειακή θερμοκρασία [182].

Οι μηχανισμοί διάδοσης της θερμότητας εξαρτώνται από συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των υλικών, για το λόγο αυτό η θερμογραφία εξαρτάται από τις διαφορές σε αυτά τα χαρακτηριστικά των υλικών για να καθιερώσει ένα μετρήσιμο, και συνήθως εντοπισμένο, διαφορικό θερμοκρασίας [178].

Η υπέρυθρη θερμογραφία μπορεί να διαιρεθεί σε δύο κατηγορίες, την παθητική και την ενεργητική. Η παθητική θερμογραφία αναφέρεται στην τεχνική θερμογραφίας για τον έλεγχο των υλικών χωρίς τη χρήση εξωτερικής πηγής ενέργειας. Η τεχνική απαιτεί αρκετή θερμική αντίθεση ανάμεσα στο υπό έλεγχο αντικείμενο και στο περιβάλλον, ώστε να είναι ανιχνεύσιμη από ένα αισθητήρα υπέρυθρων. Με την παθητική θερμογραφία απεικονίζεται λοιπόν η θερμοκρασία της υπό έλεγχο κατασκευής όταν αυτή βρίσκεται, με φυσικό τρόπο, σε μια διαφορετική θερμοκρασία από εκείνη του περιβάλλοντος.

Η ενεργητική θερμογραφία βασίζεται στην ύπαρξη εξωτερικής πηγής θέρμανσης ώστε να προκύψουν και να μετρηθούν, οι σχετικές θερμικές διακυμάνσεις. Στην περίπτωση της ενεργητικής θερμογραφίας απαιτείται η δημιουργία θερμικής αντίθεσης με τη βοήθεια εξωτερικής πηγής ενέργειας, για να ενεργοποιηθεί το υπό έλεγχο αντικείμενο, με χρήση ψυχρού ή ζεστού αέρα, πίδακα νερού, ή ελαστικών κυμάτων διαφόρων συχνοτήτων και πλάτους.

Κατά τη διενέργεια ελέγχου υπέρυθρης θερμογραφίας χρησιμοποιείται ο ακόλουθος εξοπλισμός:

(α) ο ανιχνευτής / σαρωτής ο οποίος είναι ένα είδος οπτικής κάμερας (υπέρυθρη θερμική κάμερα – εικόνα 3.27) φακοί της οποίας επιτρέπουν την διέλευση υπέρυθρης ακτινοβολίας μήκους κύματος από 3 έως 5.6 μm (βραχεία κύματα) ή 8 έως 12 μm (μεσαία κύματα).

(β) το σύστημα συλλογής και ανάλυσης δεδομένων με το οποίο ψηφιοποιούνται τα δεδομένα και στην συνέχεια εμφανίζονται σε οθόνη ή σε χαρτί

(γ) έναν οπτικό καταγραφέα δηλαδή μία κοινή ή ψηφιακή φωτογραφική μηχανή ή βίντεο, για την αποτύπωση της ελεγχόμενης επιφάνειας.



Εικόνα 3.27 Υπέρυθρες θερμικές κάμερες [178].

Από την σύγκριση των οπτικών και υπέρυθρων εικόνων ελέγχεται αν οι διαφορές θερμοκρασίας στην υπέρυθρη εικόνα οφείλονται στην επιφανειακή ικανότητα εκπομπής ακτινοβολίας ή σε εσωτερικά αίτια (π.χ. επιφανειακά μπαλώματα ή τοπικά βαψίματα έχουν διαφορετική εκπομπή ακτινοβολίας από την υπόλοιπη επιφάνεια) [182].

Όπως κάθε μεθοδολογία ελέγχου, η θερμογραφία υπέρυθρου έχει πολλά πλεονεκτήματα αλλά και ορισμένους περιορισμούς. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνονται το ότι πρόκειται για μια καθολική μέθοδο με την οποία ελέγχονται μεγάλες επιφάνειες (μεγαλύτερες απ' ότι με άλλες μεθόδους) και άρα είναι οικονομικότερη. Επιπλέον, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αμέσως [182] και είναι σχετικά εύκολο να ερμηνευτούν (σε μορφή απεικόνισης στις οποίες μπορεί να γίνει επεξεργασία για την εξαγωγή περαιτέρω πληροφορίας). Τέλος, έχει μεγάλο εύρος εφαρμογών [181].

Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν και κάποιες ειδικές δυσκολίες στην εφαρμογή της θερμογραφίας υπέρυθρου, μεταξύ των οποίων είναι το μεγάλο κόστος εξοπλισμού, η απαίτηση εξειδικευμένου προσωπικού και η απαίτηση κατάλληλων καιρικών συνθηκών. Στους περιορισμούς της μεθόδου συγκαταλέγονται επίσης η αδυναμία προσδιορισμού του βάθους των ανωμαλιών και η μεταβολή των

λαμβανομένων αποτελεσμάτων με την μεταβολή των περιβαλλοντικών συνθηκών κατά την ώρα των μετρήσεων [182].

Μικροδομή σκυροδέματος

Με τον όρο μικροδομή αναφέρονται ο τύπος, η ποσότητα, το μέγεθος, η μορφή και η κατανομή των φάσεων που υπάρχουν σε ένα στερεό. Τα στοιχεία αυτά μπορούν εύκολα να διακριθούν χονδρικά με το μάτι σε μία διατομή του υλικού, αλλά για τη διάκριση των λεπτότερων στοιχείων απαιτείται η βοήθεια ενός μικροσκοπίου. Οι ιδιότητες και η συμπεριφορά των υλικών επηρεάζονται σημαντικά από την εσωτερική μικροδομή του, κατά συνέπεια οι ιδιότητες μπορούν να τροποποιηθούν, με κατάλληλες αλλαγές στη μικροδομή του υλικού.

Το σκυρόδεμα, αν και είναι ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό, η μικροδομή του παρουσιάζει μεγάλη ετερογένεια και πολυπλοκότητα. Από μία εξέταση διατομής σκυροδέματος μακροσκοπικά (με γυμνό μάτι), το σκυρόδεμα μπορεί να θεωρηθεί ως υλικό δύο φάσεων που αποτελείται από κόκκους αδρανών διάσπαρτους μέσα σε μία δομή τσιμεντόπαστας.

Σε μικροσκοπικό όμως επίπεδο, η πολυπλοκότητα της μικροδομής του σκυροδέματος είναι προφανής. Τα χαρακτηριστικά της μικροδομής του σκυροδέματος συνοψίζονται στα ακόλουθα: Πρώτον, υπάρχει διεπιφανειακή μεταβατική ζώνη που αντιπροσωπεύει μία μικρή περιοχή γύρω από τους κόκκους των χονδρόκοκκων αδρανών. Με τη μορφή μικρού κελύφους πάχους περίπου 10 έως 50 μm γύρω από τα χονδρόκοκκα αδρανή, η ζώνη αυτή είναι γενικά ασθενέστερη από τα άλλα δύο συστατικά του σκυροδέματος, δηλαδή τα αδρανή και την τσιμεντόπαστα, επομένως, ασκεί πολύ μεγαλύτερη επιρροή στη μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος από ότι αναμένεται σε σχέση με το μέγεθός της. Δεύτερον, κάθε μία από τις τρεις φάσεις έχει και η ίδια πολυφασικό χαρακτήρα. Για παράδειγμα, κάθε κόκκος αδρανούς μπορεί να περιέχει και πολλά ορυκτά εκτός από τα κενά και τις μικρορωγμές. Αναλόγως, τόσο η τσιμεντόπαστα όσο και η διεπιφανειακή ζώνη γενικά περιέχουν μία ετερογενή κατανομή διαφόρων τύπων και ποσοτήτων στερεών φάσεων, πόρων και μικρορωγμών. Τρίτον, η μικροδομή του σκυροδέματος δεν αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό του υλικού επειδή τα δύο συστατικά της μικροδομής, η ενυδατωμένη πάστα του τσιμέντου και η διεπιφανειακή μεταβατική ζώνη, υφίστανται αλλαγές με το χρόνο, την υγρασία του περιβάλλοντος και τη θερμοκρασία [148].

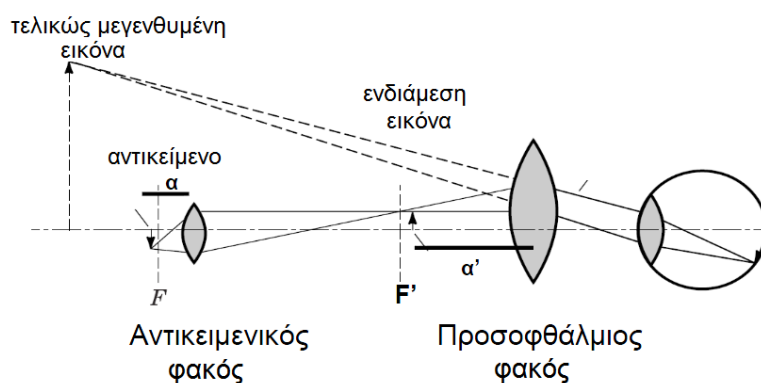
Η διεπιφανειακή μεταβατική ζώνη είναι η ασθενέστερη φάση και θεωρείται η φάση που καθορίζει την αντοχή του σκυροδέματος. Η ανάπτυξη και επέκταση των ρωγμών πραγματοποιούνται εύκολα, ενώ έχει παρατηρηθεί ότι για θλιπτικές τάσεις 40-70% της αντοχής του σκυροδέματος η ρηγμάτωση στη ζώνη αυτή είναι έντονη και οδηγεί σε μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού. Περαιτέρω αύξηση των τάσεων επιφέρει διάδοση των ρωγμών του τσιμεντοπολτού έως ότου αυτές ενωθούν με τις ρωγμές της μεταβατικής ζώνης, δημιουργήσουν ένα συνεχές δίκτυο ρωγμών και οδηγήσουν στην αστοχία [148].

Οι φάσεις της μικροδομής του σκυροδέματος δεν μπορούν να διακριθούν με εξέταση με γυμνό μάτι. Για το λόγο αυτό για τη διερεύνηση των ιδιοτήτων της πραγματοποιούνται δοκιμές με τη χρήση οπτική ή/και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας οι οποίες μπορούν να αποδώσουν μεγέθυνση της μικροδομής επί 1000 και 1000000 αντίστοιχα [189].

Οπτική μικροσκοπία

Η οπτική μικροσκοπία (ΟΜ, optical microscopy) είναι μια πολύ σημαντική μέθοδος παρατήρησης και ερμηνείας της μικροδομής των υλικών. Με το μικροσκόπιο, μικρά αντικείμενα, που με γυμνό μάτι είναι αόρατα (είναι δηλαδή μικρότερα του 0,1mm) γίνονται ορατά, οπότε μικρά αντικείμενα μεγέθους μέχρι $0,1\mu\text{m} = 0,0001\text{mm}$ μπορούν να μελετηθούν.

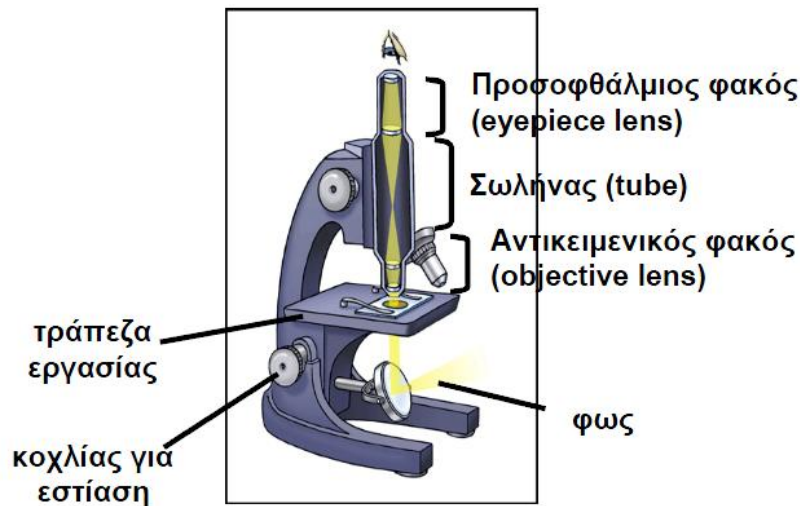
Το οπτικό μικροσκόπιο είναι ένα οπτικό σύστημα για την παρατήρηση αντικειμένων υπό μεγέθυνση, με τη βοήθεια του φωτός. Χρησιμοποιεί το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που είναι ορατό, δηλαδή από 380 - 760 nm [150]. Η παρατήρηση μπορεί να γίνεται είτε μέσω του ανακλώμενου είτε μέσω του διερχόμενου, από τα προς παρατήρηση αντικείμενα, φωτός.



Εικόνα 3.28 Λειτουργία αντικειμενικού και προσοφθάλμιου φακού [190].

Πρόκειται για ένα οπτικό όργανο που χρησιμοποιείται για την παρατήρηση, υπό μεγέθυνση (μέχρι και $\times 2000$), αντικειμένων που βρίσκονται κοντά στον παρατηρητή. Αποτελείται από τέσσερα βασικά στοιχεία: (α) μία πηγή φωτός, (β) έναν συγκεντρωτικό φακό, (γ) έναν αντικειμενικό φακό, και (δ) έναν προσοφθάλμιο φακό. Το αντικείμενο τοποθετείται πολύ κοντά σε ένα συγκλίνοντα φακό (τον αντικειμενικό ή αντοφθάλμιο φακό), πολύ μικρής εστιακής απόστασης, ο οποίος σχηματίζει ένα πραγματικό είδωλό του. Το είδωλο αυτό μεγεθύνεται από έναν άλλο συγκλίνοντα φακό (τον προσοφθάλμιο φακό), ο οποίος σχηματίζει ένα φανταστικό είδωλο σε μια απόσταση από το μάτι που βρίσκεται ανάμεσα στην ελάχιστη και τη μέγιστη απόσταση ευκρινούς οράσεως. Το μάτι παρατηρεί αυτό το είδωλο (εικόνα 3.28).

Το μήκος του σωλήνα του μικροσκοπίου είναι συνήθως σταθερό και με τον τρόπο αυτό η εστίαση γίνεται με μετακίνηση του όλου οπτικού συστήματος ως προς το παρατηρούμενο αντικείμενο, μέχρι να επιτευχθεί εστίαση για ευκρινή παρατήρηση.



Εικόνα 3.29 Σύνθετο μικροσκόπιο [190].

Το προς μελέτη αντικείμενο (δοκίμιο), μετά από την κατάλληλη προετοιμασία, τοποθετείται πάνω στην τράπεζα του μικροσκοπίου. Με τους κοχλίες εστίασης, τον μακρομετρικό για την ανεύρεση του αντικειμένου και τον μικρομετρικό για τη βελτίωση της εικόνας, εντοπίζεται το τμήμα του δοκιμίου προς έλεγχο και εξετάζεται η επιφάνειά του σε ανακλώμενο φως. Μια δέσμη φωτός που προέρχεται από την πηγή φωτός, ανακλάται σε ένα ημιδιαφανές κάτοπτρο και μέσω του αντικειμενικού φακού συγκεκριμένης μεγέθυνσης $M1$ προσπίπτει στην επιφάνεια του δοκιμίου. Η ανακλώμενη ακτινοβολία, αφού περάσει και πάλι από τον αντικειμενικό φακό, σχηματίζει την εικόνα της μελετώμενης επιφάνειας (είδωλο) μέσα από τον προσοφθάλμιο φακό μεγέθυνσης $M2$ (εικόνα 3.29).

Μεγέθυνση M (magnification) ονομάζεται ο λόγος των μεγεθών ειδώλου προς αντικείμενο. Η συνολική μεγέθυνση της εικόνας είναι ίση με το γινόμενο των μεγεθύνσεων $M1$ και $M2$. Συνήθως χρησιμοποιείται ένας προσοφθάλμιος μεγέθυνσης $X10$ και διάφοροι αντικειμενικοί φακοί π.χ. $X5$, $X10$, οπότε η αντίστοιχη συνολική μεγέθυνση είναι $X50$ ή $X100$.

Η φωτεινή ακτινοβολία κατά τη διαδρομή της περνάει μέσα από δύο διαφράγματα $\Delta1$ και $\Delta2$. Με το $\Delta1$ καθορίζεται το μέγεθος της περιοχής της επιφάνειας του δοκιμίου που φωτίζεται, ενώ με το $\Delta2$, το διάφραγμα πεδίου, ρυθμίζεται το άνοιγμα της φωτεινής δέσμης, ώστε το μέρος που εξετάζεται να φωτίζεται από ακτίνες που περνούν από το κεντρικό τμήμα του αντικειμενικού φακού που παρουσιάζει μικρότερα σφάλματα και επηρεάζεται λιγότερο από ανακλάσεις μέσα στο μικροσκόπιο.

Σημαντική παράμετρος του μικροσκοπίου είναι η διακριτική ικανότητα (resolution) του αντικειμενικού φακού, που εκφράζει την ελάχιστη απόσταση (d_{\min}) μεταξύ δύο σημείων, έτσι ώστε να είναι διακριτά με το μικροσκόπιο.

Τέλος, σημαντικό ρόλο παίζει το βάθος πεδίου ($DOF = \text{depth of field}$), που καθορίζει το μέγιστο μήκος της τρίτης διάστασης του δείγματος (βάθος) που παρέχει ευκρινές είδωλο. Όταν χρησιμοποιείται μεγάλη μεγέθυνση, οπότε το άνοιγμα πεδίου αυξάνεται, το βάθος πεδίου μειώνεται και δεν είναι δυνατή μια ευκρινής εικόνα, ιδίως όταν υπάρχουν επιφανειακές ανωμαλίες [150].

Στερεοσκόπιο

Αντίστοιχη είναι και η λειτουργία του στερεοσκοπίου (οπτικού). Το στερεοσκόπιο είναι ένα όργανο που χρησιμοποιείται για να παρατηρήσουμε σε μεγέθυνση την εξωτερική μορφολογία ενός αντικείμενου, δοκιμίου κλπ όταν χρησιμοποιείται προσπίπτων ή πλάγιος φωτισμός. Τα στερεοσκόπια είτε έχουν αντικειμενικούς φακούς σταθερής εστιακής απόστασης (μεγέθυνσης) είτε μεταβαλλόμενης (zoom). Συνήθως τα όργανα αυτά μπορούν να μεγεθύνουν μέχρι περίπου 80X, γιατί μεγαλύτερες μεγεθύνσεις έχουν πολύ μικρό βάθος εστίασης και επομένως οι εικόνες δε μπορούν πλέον να θεωρηθούν στερεοσκοπικές. Το δοκίμιο συνήθως δε χρειάζεται καμία προετοιμασία και μπορεί να παρατηρηθεί αρκεί να μπορεί να τοποθετηθεί στο οπτικό πεδίο του μικροσκοπίου. Στα στερεοσκόπια ο φωτισμός του παρασκευάσματος μπορεί να γίνει και από πάνω και από κάτω. Τα πιο σύγχρονα στερεοσκόπια διαθέτουν και σύστημα φωτισμού με υπεριώδη ακτινοβολία για μετατροπή τους σε μικροσκόπια φθορισμού [191].

Το στερεοσκόπιο δύναται να χρησιμοποιηθεί για την πετρογραφική εξέταση δειγμάτων των σκληρυμένου σκυροδέματος σύμφωνα με το αμερικανικό πρότυπο ASTM C 856. Ανάλογα με την προέλευση των δειγμάτων (εργαστήριο ή λήψη από κατασκευές) η μεθοδολογία αυτή βοηθά να προσδιοριστεί η φύση τυχούσας φθοράς ή ελαττωμάτων, να προσδιοριστεί ο βαθμός της βλάβης και να αξιολογηθεί κατά πόσο θα συνεχιστεί. Επιπλέον μπορούν να προσδιοριστούν για το δείγμα του σκυροδέματος: το περιεχόμενο αέρα και η κατανομή του στο μείγμα του σκυροδέματος, πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά των περιεχόμενων αδρανών, υπάρχουσες ρηγματώσεις και χημικές αντιδράσεις μεταξύ των συστατικών του σκυροδέματος.

Ανθεκτικότητα σκυροδέματος

Ο μεγάλος χρόνος ζωής μίας κατασκευής θεωρείται συνώνυμο της ανθεκτικότητας. Συνήθως ως ανθεκτικότητα του σκυροδέματος ορίζεται η δυνατότητά του να ανθίσταται στην φθοροποιό δράση, στη χημική προσβολή, στην απότριψη ή σε οποιαδήποτε άλλη διαδικασία φθοράς. Με άλλα λόγια, ένα ανθεκτικό σκυρόδεμα διατηρεί την αρχική του μορφή, την ποιότητα και τη λειτουργικότητα του όταν εκτίθεται στο περιβάλλον που πρόκειται να λειτουργήσει.

Το νερό σχετίζεται γενικά με κάθε μορφής φθορά, και στα πορώδη στερεά, η ευκολία της διείσδυση νερού μέσα στο στερεό καθορίζει συνήθως και το ρυθμό φθοράς του. Ως ένα όχημα μεταφοράς βλαπτικών ιόντων, το νερό μπορεί να είναι μια πηγή χημικών διαδικασιών αποσάθρωσης. Παράλληλα, τα φυσικοχημικά φαινόμενα που σχετίζονται με τη μεταφορά του νερού στα πορώδη στερεά ελέγχονται από τη διαπερατότητα του στερεού. Στην περίπτωση του σκυροδέματος, αφορά στην διαπερατότητα της τσιμεντόπαστας, των αδρανών και του σκυροδέματος ως σύνολο.

Στη χώρα μας το κύριο αν όχι το μοναδικό πρόβλημα του οπλισμένου σκυροδέματος από απόψεως ανθεκτικότητας σε διάρκεια είναι η διάβρωση των οπλισμών. Από αυτή προκαλείται ο σχηματισμός προϊόντων οξειδωσης τα οποία

λόγω της αύξησης του όγκου τους μπορεί να προκαλέσουν ρηγμάτωση. Η διάβρωση των οπλισμών μπορεί να γίνει είτε με την ενανθράκωση του σκυροδέματος είτε από την παρουσία χλωριόντων και θεικών [191]. Οι παράγοντες αυτοί δεν λειτουργούν με διαδικασίες ανεξάρτητες μεταξύ τους, αλλά πολλές φορές η ενανθράκωση προκαλεί ραγδαία επιτάχυνση στη διείδυση χλωριόντων. Το βασικότερο αποτέλεσμα των ανωτέρων είναι η διάβρωση των οπλισμών του οπλισμένου σκυροδέματος [192].

Επίδραση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα και τον οπλισμό

Η προσβολή από χλωριόντα ξεχωρίζει ως η κύρια αιτία διάβρωσης του σιδηροοπλισμού και από το γεγονός ότι μόνο λόγω των επιδράσεων της διάβρωσης αυτής προκύπτει καταστροφή του σκυροδέματος που τον περιβάλλει. Η διάβρωση του σιδηροοπλισμού είναι μια από τις κύριες αιτίες καταστροφής των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα [193].

Οι ράβδοι του οπλισμού προστατεύονται από τη διάβρωση μέσω ενός πολύ λεπτού επιφανειακού στρώματος ένυδρου οξειδίου του σιδήρου, που δημιουργείται λόγω της υψηλής αλκαλικότητας του σκυροδέματος που τις περιβάλλει (pH περί το 12,5). Όταν το pH πέσει σε τιμές κάτω από 9, τότε ο χάλυβας του οπλισμού αποπαθητικοποιείται και πραγματοποιείται διάβρωσή του. Στην πτώση αυτή οδηγούν δύο αλληλένδετες διαδικασίες, η ενανθράκωση και η επίδραση των χλωριόντων. Ειδικότερα, για την επίδραση των χλωριόντων, αυτά μπορούν να διατρήσουν τοπικά το προστατευτικό στρώμα οξειδίου αν η συγκέντρωσή τους υπερβεί το 0,4% έως 0,6% του βάρους του τσιμέντου.

Τα χλωριόντα μπορεί να προέρχονται είτε από το εσωτερικό του σκυροδέματος είτε από το εξωτερικό περιβάλλον που περικλείει το σκυρόδεμα. Τα χλωριόντα μπορεί να προέρχονται από το εσωτερικό του σκυροδέματος, εάν έχουν χρησιμοποιηθεί συλλεκτά αδρανή από παράλιες ή θαλάσσιο νερό για το σκυρόδεμα (όχι ασυνήθιστη πρακτική στη νησιωτική Ελλάδα), ή από προσθετά βελτιωτικά του σκυροδέματος που περιέχουν χλωριούχα άλατα.

Χλωριόντα από το εξωτερικό περιβάλλον είναι πολύ συνηθισμένα σε παραθαλάσσιες περιοχές, όπου και σε μεγάλες απόστασης από την ακτή ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει χλωριούχα άλατα, ιδίως αν οι επικρατούντες άνεμοι κατευθύνονται από τη θάλασσα προς τη ξηρά. Στις περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη χιονόπτωση, βασική πηγή χλωριόντων είναι τα χλωριούχα άλατα που ρίχνουν στους δρόμους για την τήξη του χιονιού. Χλωριόντα άλατα μπορεί να προέρχονται επίσης και από τα επιταχυντικά πήξης που χρησιμοποιούνται το χειμώνα επειδή το σκυρόδεμα πήζει αργά η καθόλου [194].

Ο μηχανισμός διάβρωσης του χάλυβα λόγω της επίδρασης χλωριόντων είναι διαφορετικός από τον μηχανισμό της γενικής διάβρωσης του χάλυβα. Ιδιαίτερα επικίνδυνη είναι η εναλλασσόμενη διαβροχή και ξήρανση της επιφάνειας του σκυροδέματος από νερό το οποίο περιέχει χλωριούχα άλατα. Κατά τη διάρκεια της διαβροχής, μεγάλες ποσότητες νερού με διαλυμένα άλατα διεισδύουν στο σκυρόδεμα. Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, το νερό εξατμίζεται ενώ τα άλατα παραμένουν στο

σκυρόδεμα. Όταν η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται, δημιουργούνται μεγάλες συγκεντρώσεις χλωριόντων στην περιοχή του σκυροδέματος που διαβρέχεται και ξηραίνεται.

Δοκιμή διαπερατότητας χλωριόντων-Rapid Chloride Permeability Test

Η δοκιμή αφορά στην εύρεση της αντίστασης διαπερατότητας του σκυροδέματος από χλωρίοντα και την εκτίμηση του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων, με την διερεύνηση της φύσης του πορώδους σε δείγματα σκυροδέματος. Η συσκευή PROOVE'it[®], χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της αντίστασης του σκυροδέματος στην διαπερατότητα χλωριόντων προσδιορίζοντας πόσο εύκολη είναι η εξαναγκασμένη δίοδος αυτών μέσω δείγματος κορεσμένου σκυροδέματος κατά την εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης στο δείγμα, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 1202. Αυτή η δοκιμή λέγεται Coulomb Test ή Rapid Chloride Permeability Test (RCPT) [195].

Το τεστ μετράει το ηλεκτρικό ρεύμα που περνά διαμέσου του σκυροδέματος για μια δεδομένη χρονική περίοδο και με συγκεκριμένη τάση. Το φορτίο που περνά από το σκυρόδεμα αποτελεί μια ένδειξη της ικανότητας του σκυροδέματος να αντιστέκεται στην διείσδυση χλωριόντων. Οι τιμές ηλεκτρικού φορτίου σε Coulomb για κατηγοριοποίηση του βαθμού διαπερατότητας του δοκιμίου δίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.8.

Πίνακας 3.8 Κατηγοριοποίηση του βαθμού διαπερατότητας βάσει των τιμών του ηλεκτρικού φορτίου [195].

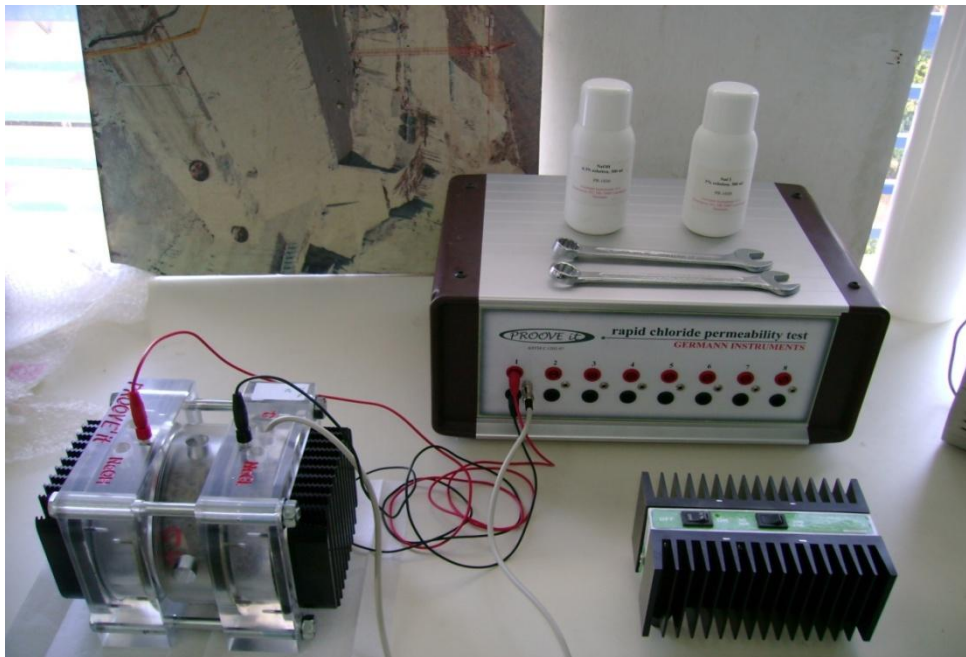
Coulombs	Διαπερατότητα
>4000	Υψηλή
4000 – 2000	Μέτρια
2000 – 1000	Χαμηλή
1000 – 100	Πολύ χαμηλή
<100	Αμελητέα

Το σύστημα PROOVE'it[®] (εικόνα 2.30), αποτελείται από:

1. Την μονάδα ρύθμισης με μικροεπεξεργαστή παροχής ηλεκτρικού ρεύματος PROOVE'it[®] η οποία έχει οκτώ υποδοχές, για πραγματοποίηση ταυτόχρονων μετρήσεων μέχρι και σε 8 κελιά.
2. Το κελί μέτρησης PROOVE'it[®] καθώς και 2 τσιμούχες εσωτερικής διαμέτρου 95mm και εξωτερικής διαμέτρου 126mm. (Στο λογισμικό του PROOVE'it[®], συστήνεται η διάμετρος του δοκιμίου να είναι 100mm και το πάχος 50mm μήκος, για να εξασφαλίσει την γρήγορη και χωρίς προβλήματα στεγανότητα του δοκιμίου στο κελί).
3. Τα καλώδια (κόκκινο και μαύρο) τα οποία συνδέουν το κελί με τη μονάδα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.
4. Το καλώδιο μέτρησης της θερμοκρασίας των διαλυμάτων, ένα για κάθε κελί.

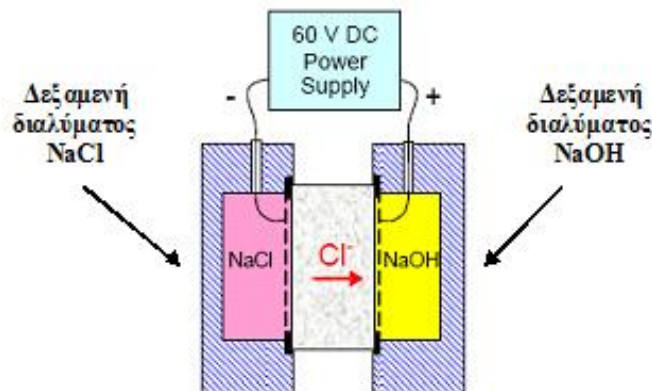
Το σύνολο των εξαρτημάτων του συστήματος PROOVE'it[®] αποτελείται ακόμα από δύο δοχεία με τα διαλύματα που βάζουμε στο κελί για την δημιουργία Cl⁻

(0.3% NaCl και 0.3N NaOH), 2 κλειδιά των 17mm για το σφίξιμο των κοχλιών του κελιού και μία μονάδα βαθμονόμησης (calibration) της μονάδας παροχής ηλεκτρικού ρεύματος.



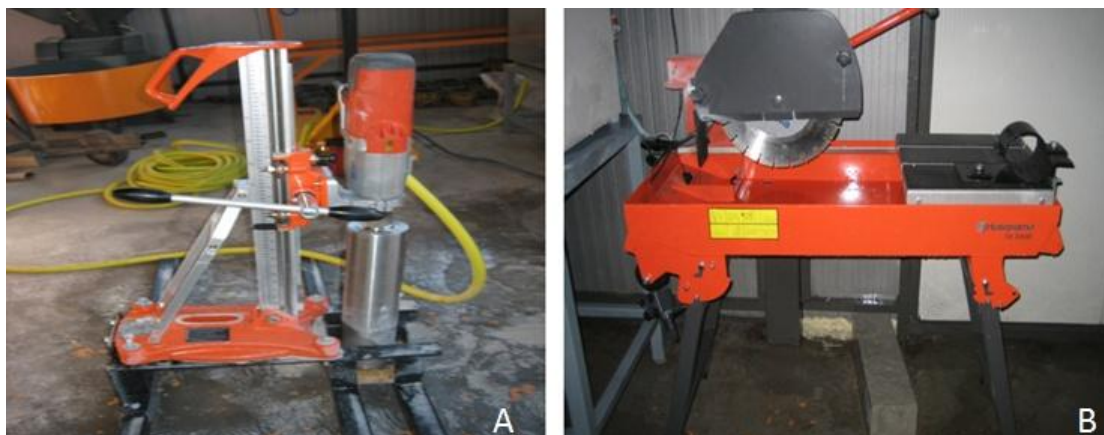
Εικόνα 3.30 Σύστημα PROOVE'it©.

Η αρχή λειτουργίας των κελιών συνοψίζεται επιγραμματικά στα ακόλουθα. Ένα βρεγμένο δοκίμιο σκυροδέματος τοποθετείται σε ένα κελί, που περιλαμβάνει δύο δεξαμενές υγρών διαλυμάτων. Γεμίζουμε τις δεξαμενές NaCl και NaOH με διάλυμα 3% NaCl και διάλυμα 0.3N NaOH αντίστοιχα. Ένα δυναμικό ηλεκτρικό φορτίο εφαρμόζεται κατά μήκος του κελιού. Ο αρνητικός πόλος συνδέεται με το ηλεκτρόδιο της δεξαμενής που περιέχει το διάλυμα NaCl και ο θετικός πόλος συνδέεται με το ηλεκτρόδιο της δεξαμενής που περιέχει το διάλυμα NaOH. Τα αρνητικά φορτισμένα χλωριόντα θα κινηθούν προς τον θετικό πόλο, περνώντας μέσα από το δοκίμιο σκυροδέματος. Όσο πιο διαπερατό είναι το σκυρόδεμα, τόσο περισσότερα χλωριόντα θα περάσουν μέσα από το δοκίμιο και υψηλότερο ρεύμα θα μετρηθεί. Η αρχή λειτουργίας του κελιού παρουσιάζεται στην εικόνα 3.31.



Εικόνα 3.31 Αρχή λειτουργίας κελιού

Για την προετοιμασία των δοκιμίων σκυροδέματος, λόγω της μη ύπαρξης καλουπιών για δοκίμια στις προαναφερθείσες διαστάσεις, δοκίμια διαφορετικής μορφής (στην παρούσα έρευνα κυβικά δοκίμια ακμής 150mm) πρέπει να κοπούν σε διάμετρο καλουπιού 95mm, ύψος 50mm (λήψη «καρότου»). Για την παροχή του «καρότου» χρησιμοποιείται συνήθως καροτέζα (εικόνα 3.32) με χρήση τρυπανιού με ελάχιστο βάθος καρότου 200mm.



Εικόνα 3.32 Καροτέζα – κόφτης για της διαμόρφωση των δοκιμίων.

Στη συνέχεια, το καρότο αποσπάται χρησιμοποιώντας ένα σφυρί και μια σφήνα. Το μήκος του δοκιμίου μειώνεται σε 50mm, με απόκλιση +/- 1mm, χρησιμοποιώντας τον κατάλληλο εξοπλισμό κοψίματος – κόφτης – (εικόνα 3.32), ο οποίος ευθυγραμμίζει το τελικό δοκίμιο. Η τελική μορφή των δοκιμίων φαίνεται στην εικόνα 3.33.

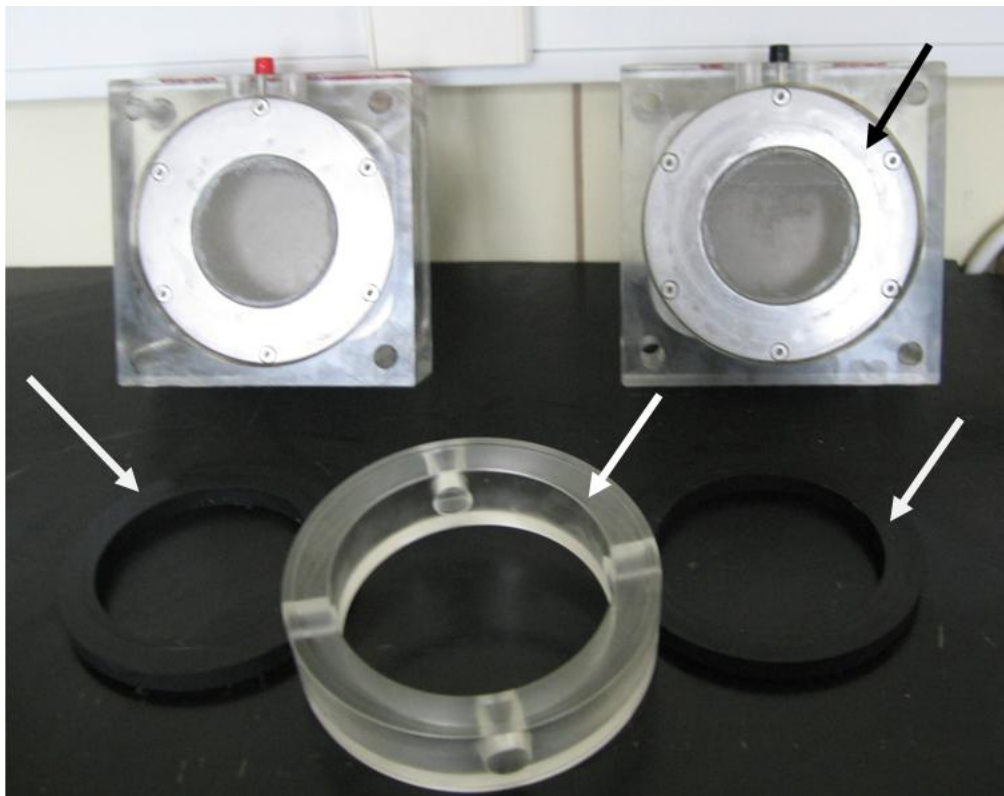


Εικόνα 3.33 Τελική μορφή δοκιμίων.

Έπειτα από την κοπή των δοκιμίων, ακολουθεί η τοποθέτησή τους σε κενό αέρα για τρεις ώρες, έτσι ώστε ο όποιος αέρας είχε απομείνει στους πόρους του σκυροδέματος να φύγει. Αυτό γίνεται με την βοήθεια ενός αποξηραντήρα. Τα δοκίμια τοποθετούνται στον αποξηραντήρα και για καλύτερη στεγανοποίησή του τοποθετείται βαζελίνη στην επαφή δοχείου – καπακιού. Μετά το πέρας των τριών ωρών η αντλία κενού παύει να λειτουργεί και καλύπτονται όλα τα δοκίμια με αποσταγμένο νερό. Επανατίθεται σε λειτουργία η αντλία κενού για μια ώρα και στη συνέχεια τα δοκίμια αφήνονται στο νερό για 18 ώρες.

Μετά την διαδικασία κενού των δοκιμίων, τα δοκίμια είναι έτοιμα για μέτρηση. Αρχικά προετοιμάζονται τα κελιά του PROOVE'it[©], καθαρίζονται οι επιφάνειες όπου θα έρθει σε επαφή το σκυρόδεμα με το διάλυμα, τοποθετείται ένα

στρώμα βαζελίνης πάνω στις επιφάνειες των τσιμουχών, στον υποδοχέα του δείγματος, αλλά και στο εσωτερικό του κελιού στις επιφάνειες που σημειώνονται με βέλη (εικόνα 3.34) γύρω από το πλέγμα των δεξαμενών κάθε κελιού. Η διαδικασία αυτή γίνεται για να επιτευχθεί η πλήρης στεγανότητα του κελιού και η μη διαρροή των διαλυμάτων.



Εικόνα 3.34 Κελιά PROOVE'it©.

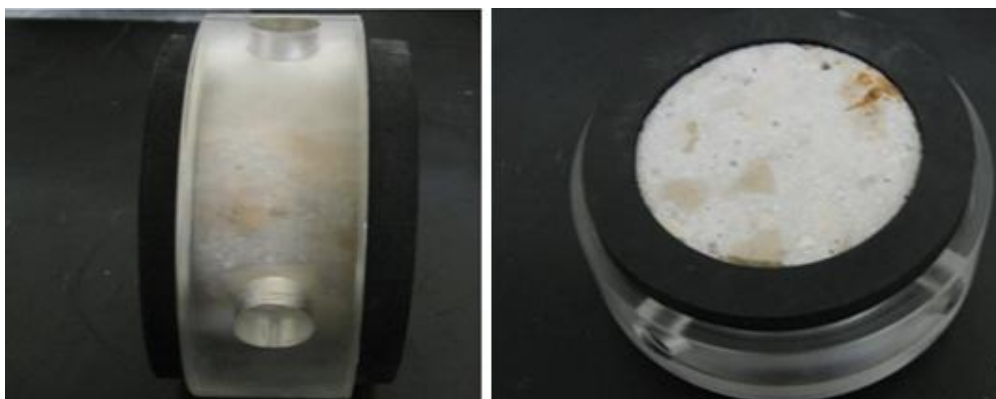
Στη συνέχεια, τοποθετούνται τα δοκίμια στον υποδοχέα (εικόνα 3.35), ακινητοποιούνται με τις τσιμούχες και προστίθενται τα διαλύματα (3,0% NaCl και 0,3N NaOH) στις αντίστοιχες δεξαμενές του κελιού. Συνδέεται το κάθε κελί με το αντίστοιχο κανάλι της μονάδας παροχής ηλεκτρικού ρεύματος, επίσης συνδέεται η μία άκρη του καλωδίου μέτρησης θερμοκρασίας κάθε κελιού με την μονάδα παροχής ρεύματος και η άλλη άκρη τοποθετείται προσεκτικά στην δεξαμενή που περιέχει το NaCl. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα κελιά, πραγματοποιείται βαθμονόμηση (calibration) της μονάδας παροχής ηλεκτρικού ρεύματος και το πρόγραμμα τίθενται σε λειτουργία.

Πριν την έναρξη της λειτουργίας, πραγματοποιούνται οι απαραίτητες ρυθμίσεις για κάθε ένα από τα κελιά. Οι ρυθμίσεις του κάθε κελιού για τη διεξαγωγή του πειράματος, βάσει ASTM C1202 είναι:

1. Φορτίο του ρεύματος: 60V
2. Χρόνος διεξαγωγής του πειράματος: 6h
3. Διάμετρος δοκιμίου: 95mm
4. Μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία των διαλυμάτων: 90°C.

Αφού πραγματοποιηθούν οι ρυθμίσεις, ξεκινάει το πείραμα. Τα αποτελέσματα τα οποία λαμβάνουμε είναι: (α) η ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου που πέρασε απ' το

κάθε δοκίμιο και (β) οι τιμές της έντασης του ρεύματος και της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια του πειράματος [196].



Εικόνα 3.35 Τοποθέτηση δοκιμίων στον υποδοχέα.

Υπολογισμός του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων

Η κίνηση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα (διάλυμα πόρων) υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου περιγράφεται από την εξίσωση Nernst-Planck

$$-J_i = D_i \frac{\partial C_i(x)}{\partial x} + \frac{z_i F}{RT} D_i C_i \frac{\partial E(x)}{\partial x} + C_i v_i(x)$$

- όπου J: η ροή των χλωριόντων
D: ο συντελεστής διάχυσης
C(x): η συγκέντρωση χλωριόντων στη θέση x
T: η θερμοκρασία
E(x): το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο στη θέση x
v(x): η ταχύτητα αγωγής
R: η σταθερά των αερίων
F: η σταθερά Faraday

Με τον τρόπο αυτό η μεταφορά των χλωριόντων στο σκυρόδεμα μπορεί να εκφρασθεί ως το άθροισμα των μεταφερομένων χλωριόντων με:

1. Καθαρή διάχυση λόγω διαφοράς συγκέντρωσης
2. Καθαρή ηλεκτρική μεταφορά λόγω του εφαρμοζόμενου πεδίου (διαφορά δυναμικού)
3. Καθαρή μεταφορά διαλύματος λόγω διαφοράς πίεσης.

Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας για την ταχεία εκτίμηση διείσδυσης χλωριόντων δεν υπάρχει διαφορά πίεσης ή υγρασίας και ως εκ τούτου ο τρίτος όρος της εξίσωσης είναι μηδενικός. Επίσης, λόγω της μικρής διάρκειας του πειράματος και της μικρής τιμής του συντελεστή διάχυσης σε σύγκριση με την μεταφορά χλωριόντων λόγω ηλεκτρικού πεδίου ο πρώτος όρος της εξίσωσης, δηλαδή η μεταφορά με καθαρή διάχυση λόγω διαφοράς συγκεντρώσεων, θεωρείται αμελητέος.

Έτσι η παραπάνω εξίσωση απλοποιείται στην παρακάτω μορφή:

$$J = \frac{z_i F D_i C_i}{RT} \frac{\partial E(x)}{\partial x}$$

στην οποία με μεγάλη ασφάλεια μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η πτώση τάσης του πεδίου κατά μήκος του δοκιμίου είναι γραμμική.

Θεωρώντας ότι η συγκέντρωση των χλωριόντων στην κάθοδο του κελιού είναι σταθερή και ότι κατά την διάρκεια του πειράματος έχει επιτευχθεί σταθερή κατάσταση μπορούμε να λύσουμε την παραπάνω εξίσωση ως προς τον συντελεστή διάχυσης. Η μεταφερθείσα ποσότητα χλωριόντων εκφράζεται με την τιμή του ρεύματος που διέρχεται από το κελί ή από την αντίστοιχη συνολική ποσότητα φορτίου. Εν τέλει, για τον υπολογισμό του συντελεστή διάχυσης, βάσει των ανωτέρω και της σχετικής βιβλιογραφίας [196-198] μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη εξίσωση:

$$D_{eff} = \frac{RT i t_n L}{n F^2 E A C Z}$$

Όπου:

- i: το διερχόμενο ρεύμα σε A
- L: το μήκος του δοκιμίου σε m
- A: η κάθετη επιφάνεια του δοκιμίου σε m²
- E: το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο σε V
- T: η απόλυτη θερμοκρασία σε °K
- t_n: ο αριθμός μεταφοράς των χλωριόντων
- Z: το ηλεκτρικό φορτίο των χλωριόντων
- n: το σθένος των χλωριόντων
- F: η σταθερά Faraday
- C: η συγκέντρωση χλωριόντων στο διάλυμα NaCl = 0.5 mol/l
- R: η σταθερά των αερίων

Προσβολή σκυροδέματος από θειικά ιόντα

Ο όρος προσβολή από θειικά ιόντα χρησιμοποιείται για να εκφράσει μια σειρά χημικών αντιδράσεων μεταξύ των θειικών ιόντων και των συστατικών της σκληρυμένης τσιμεντόπαστας που υπάρχει στο σκυρόδεμα, η οποία προκαλείται από την έκθεση του σκυροδέματος σε θειικά ιόντα και υγρασία. Όπως και στην περίπτωση άλλων επιθετικών ιόντων, τα θειικά ιόντα έχουν μεγαλύτερες αρνητικές επιπτώσεις για το σκυρόδεμα όταν βρίσκονται σε αέρια ή υγρή μορφή- η τελευταία μορφή είναι η πιο συνήθης- ενώ προσβολή από στερεά χημικά που περιέχουν θειικά όντα είναι σπάνια [193].

Νερό που περιέχει ενώσεις του θείου μερικές φορές απαντάτε στο έδαφος ή βρίσκεται διαλυμένο σε υπόγεια ύδατα [145]. Τα περισσότερα εδάφη περιέχουν κάποιο θειικό άλας υπό μορφή γύψου, αλλά η ποσότητα θεωρείται αβλαβής για το σκυρόδεμα. Η διαλυτότητα του γύψου σε συνήθεις θερμοκρασίες είναι μάλλον περιορισμένη. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις του θειικού άλατος στα υπόγεια νερά οφείλονται γενικά στην παρουσία μαγνησίου, νατρίου, και θειικών αλάτων καλίου. Το θειικό άλας αμμωνίου είναι συχνά παρόν σε γεωργικά εδάφη και νερά. Παράλληλα, τα απόβλητα από τους κλιβανούς και από τη χημική βιομηχανία μπορεί

να περιέχουν θειικό οξύ. Κατά συνέπεια, δεν είναι ασυνήθιστη η παρουσία επιβλαβών συγκεντρώσεων θειικών αλάτων στα φυσικά και βιομηχανικά νερά.

Πίνακας 3.9 Κατηγορίες έκθεσης σε περιβάλλον θειικών και λοιπών ιόντων βάσει του EN 206-1 [200].

Χημικός παράγοντας	Μέθοδος ελέγχου	XA1	XA2	XA3
Νερό εδάφους				
SO ₄ ²⁻ mg/l	EN 196-2	≥200 και ≤600	>600 και ≤3000	>3000 και ≤6000
pH	ISO 4316	≤6,5 και ≥5,5	<5.5 και ≥4,5	<4.5 και ≥4,0
CO ₂ mg/l	prEN 13577:1999	≥15 και ≤40	>40 και ≤100	>100 εως το σημείο κορεσμού
NH ₄ ⁺ mg/l	ISO 7150-1 ή ISO 7150-2	≥15 και ≤30	>30 και ≤60	>60 και ≤100
Mg ²⁺ mg/l	ISO 7980	≥300 και ≤1000	>1000 και ≤3000	>3000 εως το σημείο κορεσμού
Έδαφος				
SO ₄ ²⁻ mg/kg ^a	EN 196-2 ^b	≥2000 και ≤3000 ^c	>3000 ^c και ≤12000	>12000 και ≤24000
Βαθμός οξύτητας ml/kg	DIN 4030-2	>200 κατά τη μέθοδο Baumann Gully	Δεν συναντάται στην πράξη	
^a Αργιλικά εδάφη με περατότητα (permeability) μικρότερη από 10 ⁻⁵ m/s μετακινούνται στην αμέσως επόμενη λιγότερο δυσμενή κατηγορία ^b Η μέθοδος ελέγχου καθορίζει την αποβολή του SO ₄ ²⁻ με χρήση υδροχλωρικού οξέος. Εναλλακτικά επιτρέπεται η αποβολή με χρήση νερού αρκεί να υπάρχει η απαραίτητη εμπειρία. ^c Το όριο των 3000 mg/kg γίνεται 2000 mg/kg όταν υπάρχει κίνδυνος συσσώρευσης θειικών (sulfate) ιόντων εξαιτίας της εναλλαγής ξήρανσης-ύγρυνσης ή τριχοειδών ρωγμών (capillary suction)				

Η θειική προσβολή μπορεί να εκδηλωθεί υπό μορφή διαστολής και ρηγμάτωσης του σκυροδέματος. Όταν το σκυρόδεμα ρηγματώνεται, η διαπερατότητά του αυξάνεται και το διαβρωτικό νερό διεισδύει ευκολότερα στο εσωτερικό, επιταχύνοντας έτσι τη διαδικασία φθοράς. Η θειική προσβολή μπορεί επίσης να λάβει τη μορφή μιας προοδευτικής μείωσης στην αντοχή και απώλειας μάζας λόγω της έλλειψης συνεκτικότητας των προϊόντων ενυδάτωσης του τσιμέντου.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την θειική προσβολή είναι: (α) η ποσότητα και η φύση του θειικού άλατος, (β) το επίπεδο της στάθμης του νερού και η εποχική εναλλαγή του, (γ) η ροή του υπόγειου νερού και το πορώδες του εδάφους, (δ) η μορφή της κατασκευής και (ε) η ποιότητα του σκυροδέματος. Σε περίπτωση που το επιβαρυνόμενο με θειικά νερό δεν μπορεί να παρεμποδιστεί από το να φτάσει στο σκυρόδεμα, η μόνη άμυνα ενάντια στη θειική προσβολή βρίσκεται στην ποιότητα του σκυροδέματος. Επιπλέον, ο ρυθμός προσβολής σε μία κατασκευή από σκυρόδεμα σε όλες τις όψεις που εκτίθενται στο νερό θειικού άλατος είναι μικρότερος από την περίπτωση που η υγρασία χαθεί από εξάτμιση σε μία ή περισσότερες επιφάνειες [148].

Η εξωτερική προσβολή από θειικά ιόντα είναι μία από τις πιο κοινές και διαδεδομένες περιπτώσεις φθοράς που παρατηρούνται στο σκυρόδεμα. Τα υπόγεια

νερά και τα εδάφη μπορούν να ταξινομηθούν σε σχέση με το βαθμό επικινδυνότητας τους στο σκληρυμένο σκυρόδεμα, ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε θειικά ιόντα. Επίσης, μπορεί να περιέχουν διαφορετικούς τύπους και ποσότητες θεικών ιόντων, η σύνθεση των οποίων επηρεάζεται από τη ροή τους διαμέσου των εδαφών. Το ευρωπαϊκό πρότυπο για το σκυρόδεμα EN-206 ορίζει κατηγορίες έκθεσης και θέτει οριακές τιμές σε αυτές, για την έκθεση σε περιβάλλον θεικών αλλά και άλλων γενικότερα χημικών ενώσεων (πίνακας 3.9).

Οι δοκιμές για την πειραματική διερεύνηση της δράσης των θεικών συχνά επικεντρώνονται σε ένα συγκεκριμένο μηχανισμό υπό καθορισμένες συνθήκες, δηλαδή στην εσωτερική ή εξωτερική επίθεση κάτω από συνεχή, μερική ή και κυκλική έκθεση σε διάλυμα θεικών. Στην περίπτωση που διερευνάται η αξιολόγηση της ανθεκτικότητας σκυροδέματος έναντι θεικών, τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα πρότυπα είναι τα αμερικανικά πρότυπα ASTM C1012 και ASTM C452, τα οποία προσδιορίζουν την αντίσταση του κονιάματος σε προσβολή θεικών αντί της πραγματικής αντίστασης του σκυροδέματος [201]. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται δοκιμές οι οποίες προσδιορίζουν την μεταβολή των διαστάσεων δοκιμίων σκυροδέματος, μετά την έκθεσή τους σε υδατικά διαλύματα Na_2SO_4 , MgSO_4 ή συνδυασμού αυτών με διαλύματα χλωριόντων [202].

Κεφάλαιο 4

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ, ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ
ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ, ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η παρούσα έρευνα πραγματεύεται τις δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης απόβλητων εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ) στη χώρα μας και συγκεκριμένα, επεξεργάζεται τις δυνατότητες που υπάρχουν για τα απόβλητα αυτά να χρησιμοποιηθούν ως ανακυκλωμένα αδρανή για την παραγωγή σκυροδέματος. Στο πλαίσιο αυτής της διερεύνησης η πειραματική διαδικασία διακρίθηκε σε δύο φάσεις αλληλένδετες μεταξύ τους.

Η πρώτη φάση αφορά στον έλεγχο των ιδιοτήτων των ανακυκλωμένων αδρανών και συγκεκριμένα στις γεωμετρικές, φυσικές – μηχανικές και χημικές ιδιότητές τους. Αντικείμενο της έρευνας αποτέλεσε ο έλεγχος της ποιοτικής και ποσοτικής στοιχειακής ανάλυσης αυτών με τη μέθοδο της φασματοσκοπίας φθορισμού ακτίνων Χ. Η έρευνα επικεντρώθηκε στις ιδιότητες, οι οποίες επιδρούν στις ιδιότητες του σκυροδέματος. Παράλληλα, κατά την φάση αυτή, λόγω της μεγάλης ανομοιογένειας και της πληθώρας διαφορετικών υλικών τα οποία περιέχονται στα ΑΕΚΚ, πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός του ποσοστού συμμετοχής (παρουσίας) του κάθε υλικού στα ανακυκλωμένα αδρανή.

Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των αδρανών χρησιμοποιήθηκαν Ευρωπαϊκά ή Αμερικανικά πρότυπα, ανάλογα με τη συνήθη πρακτική στα εργαστήρια ποιοτικού ελέγχου αδρανών. Ο προσδιορισμός του ποσοστού συμμετοχής κάθε υλικού στα ανακυκλωμένα αδρανή έγινε χειρωνακτικά με οπτικό διαχωρισμό. Μετά την ολοκλήρωση των ελέγχων αυτών, τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με: τα αντίστοιχα αποτελέσματα θραυστών ασβεστολιθικών αδρανών, προερχόμενα από τοπικό λατομείο, τις απαιτήσεις των ισχυόντων κανονισμών για τα αδρανή σκυροδέματος και τη διεθνή βιβλιογραφία.

Η δεύτερη φάση αφορά στη μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος με τη χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών. Για τον καθορισμό της καταλληλότερης σύνθεσης πραγματοποιήθηκαν προκαταρτικοί έλεγχοι διαφόρων συνθέσεων, οι οποίοι περιελάμβαναν έλεγχο των ιδιοτήτων του παραγόμενου σκυροδέματος. Μετά τον καθορισμό αυτό, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση σχετικά με την απαίτηση προπαρασκευαστικής διεργασίας των ανακυκλωμένων αδρανών, προ της χρήσης τους για την παραγωγή σκυροδέματος. Η διεργασία αυτή περιελάμβανε την απομάκρυνση υλικών τα οποία βρίσκονται προσκολλημένα στην εξωτερική επιφάνεια των ανακυκλωμένων αδρανών (κυρίως χώμα και ακαθαρσιών) λόγω της αποθήκευσής τους σε εξωτερικό, μη σκεπασμένο χώρο στη μονάδα επεξεργασία τους.

Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε έλεγχος αναφορικά με την επίδραση που έχει η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών ως αδρανή σκυροδέματος, στην διατήρηση της εργασιμότητας του παραχθέντος νωπού σκυροδέματος. Σε επόμενο στάδιο, πραγματοποιήθηκαν συνθέσεις σκυροδέματος με διαφορετική κατά περίπτωση μεθοδολογία σύνθεσης, έτσι ώστε να επιλεγθεί η καταλληλότερη και να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια της έρευνας. Για το σκοπό αυτό για κάθε διαφορετική μεθοδολογία ελέγχθηκαν συγκεκριμένες ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος και η θλιπτική αντοχή δοκιμίων σκληρυμένου σκυροδέματος.

Κατόπιν, προσδιορίστηκε η επίδραση της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών στην διαπερατότητα χλωριόντων σε σκληρυμένο σκυρόδεμα. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ δοκιμίων σκυροδέματος από αποκλειστικά θραυστά αδρανή και δοκιμίων με πλήρη αντικατάσταση θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή.

Επόμενη πειραματική διαδικασία, αποτέλεσε η σύνθεση σκυροδέματος με μερική ή ολική αντικατάσταση θραυστών αδρανών από ανακυκλωμένα, στοχεύοντας στον προσδιορισμό του βέλτιστου ποσοστού αντικατάστασης. Ως βέλτιστο χαρακτηρίζεται το ποσοστό αντικατάστασης για το οποίο τα χαρακτηριστικά του παραγόμενου προϊόντος δεν το καθιστούν ακατάλληλο για χρήση. Η επιλογή του βέλτιστου ποσοστού αντικατάστασης στηρίχθηκε στα αποτελέσματα των ιδιοτήτων του νωπού και του σκληρυμένου σκυροδέματος.

Μετά τον καθορισμό του βέλτιστου ποσοστού αντικατάστασης, οι δοκιμές του σκληρυμένου σκυροδέματος επεκτάθηκαν σε λοιπές ιδιότητες, οι οποίες σχετίζονται με την ανθεκτικότητα του παραγόμενου σκυροδέματος. Μεταξύ αυτών ήταν η διαπερατότητα χλωριόντων, η επίδραση των θεικών ιόντων, η ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, καθώς και η πετρογραφική ανάλυση του σκληρυμένου σκυροδέματος. Σε όλες τις περιπτώσεις, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων για δοκίμια με αποκλειστικά θραυστά και αποκλειστικά ανακυκλωμένα αδρανή με δοκίμια με το βέλτιστο ποσοστό αντικατάστασης.

Ολοκληρώνοντας, τα ανακυκλωμένα αδρανή τροποποιήθηκαν με διάφορες μεθόδους, ούτως ώστε να ελεγχθεί εάν η τροποποίηση αυτή θα επιδράσει θετικά τις ιδιότητες των ανακυκλωμένων αδρανών και του παραγόμενου από αυτά σκυροδέματος.

Σε όλες τις περιπτώσεις, για τον έλεγχο των ιδιοτήτων τόσο του νωπού όσο και του σκληρυμένου σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν Ευρωπαϊκά ή/και Αμερικανικά πρότυπα. Τα μηχανήματα και ο εργαστηριακός εξοπλισμός, που απαιτήθηκαν ήταν πιστοποιημένα και σύμφωνα με τις εκάστοτε απαιτήσεις των κανονισμών. Σημείο αναφοράς για τις συνθέσεις σκυροδέματος αλλά και τις απαιτούμενες ιδιότητες του παραγόμενου σκυροδέματος αποτέλεσαν οι ισχύοντες κανονισμοί στη Ελλάδα κατά την περίοδο διεξαγωγής των πειραμάτων (2012 -2016) ήτοι ο Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος ΚΤΣ-97 και το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 206-1.

4.1 Ανακυκλωμένα αδρανή

Σε προηγούμενο κεφάλαιο, έχει παρουσιαστεί αναλυτικά η απαίτηση λειτουργίας συλλογικών συστημάτων διαχείρισης ΑΕΚΚ βάσει της ισχύουσας κοινοτικής νομοθεσίας. Τα συστήματα αυτά συνεργάζονται σε μεγάλο βαθμό με μονάδες επεξεργασίας αυτού του ρεύματος αποβλήτων, ήτοι με μονάδες οι οποίες συλλέγουν και μεταφέρουν στις εγκαταστάσεις τους τα απόβλητα, τα οποία εν συνεχεία ζυγίζονται, επιθεωρούνται και τοποθετούνται σε μια σειρά ξεχωριστών κατηγοριών πριν την τελική τους επεξεργασία.

Μεταξύ των μονάδων αυτών είναι η εταιρεία «Ανακύκλωση Αδρανών Μακεδονίας» η οποία συνεργάζεται με το ΣΣΕΔ Ανακύκλωση Αδρανών Βορείου Ελλάδος Α.Ε. (ΑΝ.Α.Β.Ε.) και τα προϊόντα της οποίας χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία της παρούσας έρευνας.

Η Ανακύκλωση Αδρανών Μακεδονίας (εικόνα 4.1) είναι επιχείρηση που διαθέτει μια πρότυπη αδειοδοτημένη μονάδα διαχείρισης ΑΕΚΚ (Έγκριση Περιβαλλοντικών Όρων 20/03/2006 με Α.Π.: 866), με κύριο αντικείμενο την επεξεργασία και ανακύκλωση προϊόντων από εκσκαφές, κατασκευές, ανακαινίσεις, κατεδαφίσεις, καθαιρέσεις και αποξηλώσεις ασφαλτοτάπητα. Η εταιρεία ιδρύθηκε το 2004 και οι εγκαταστάσεις της βρίσκονται στη δυτική περιφέρεια του νομού Θεσσαλονίκης, περιοχή Γέφυρα (Σίνδος), με δυναμικότητα 350 τόνους/ώρα [203].



Εικόνα 4.1 Ανακύκλωση Αδρανών Μακεδονίας [27]

Η μονάδα διαχειρίζεται τα ΑΕΚΚ όπως αυτά ορίζονται στο κεφάλαιο 17 του Ευρωπαϊκού Καταλόγου Αποβλήτων (Απόφαση 2001/118/Ε.Κ.) με εξαίρεση τα απόβλητα τα οποία περιέχουν επικίνδυνες ουσίες ή πιθανολογείται ότι έχουν μολυνθεί. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιεί σύγχρονο μηχανολογικό εξοπλισμό μεταξύ των οποίων περιλαμβάνεται εξοπλισμός διαλογής αδρανών, αεροδιαλογής, χειροδιαλογής, επεξεργασίας (περιστρεφόμενα κόσκινα, δονητικά κόσκινα και σπαστήρες) και μεταφορικές ταινίες. Η παραγωγική διαδικασία πραγματοποιείται σε τρία στάδια.

Το πρώτο στάδιο, το στάδιο της προδιαλογής, ξεκινά με την μεταφορά του υλικού από τους χώρους απόθεσης, όπου γίνεται μία αρχική διαδικασία διαλογής και γίνεται διαχωρισμός σε υλικά με πολλά ανομοιογενή πρόσμικτα και σε περισσότερο καθαρά, με οπτική κυρίως κατανομή των φορτίων. Επιπλέον, τα επιμήκη και ογκώδη τεμάχια διαχωρίζονται από ένα ραβδοκόσκινο και βγαίνουν από την παραγωγική διαδικασία. Το υλικό που παραμένει μεταφέρεται με ταινία μεταφοράς στο τύμπανο κοσκινίσματος όπου πραγματοποιείται η διαβάθμιση και κατηγοριοποιείται ανάλογα με το μέγεθος του.

Τα λεπτόκοκκα υλικά (διάστασης κόκκων 0-45 χιλιοστών) εξετάζονται μέσω μιας εξονυχιστικής διαδικασίας έτσι ώστε να αφαιρεθούν, ενώ το υπόλοιπο υλικό πάει σε μηχανήματα κρούσης και συντριβής. Στην συνέχεια, περνά από ένα μαγνητικό διαχωριστή για να αφαιρεθούν τα σιδηρούχα μέταλλα, τα οποία αποχωρίζονται και αποθηκεύονται ανάλογα με το μέγεθος τους. Το εναπόμειναν υλικό περνά με μεταφορικούς ιμάντες στην αεροδιαλογή όπου ξεχωρίζονται ανάλογα με το βάρος τους τα ελαφριά κομμάτια (ξύλα, πλαστικά). Τέλος, το υλικό καταλήγει σε μία στεγασμένη καμπίνα όπου χειροκίνητα γίνεται ο διαχωρισμός των υλικών (σε χαρτί, πλαστικό, ξύλο και λοιπά υλικά) και η απόθεση τους σε κάδους.

Στο δεύτερο στάδιο επεξεργασίας, το εξερχόμενο από τη χειροδιαλογή βαρύ υλικό, μεταφέρεται με ιμάντα μεταφοράς σε σπαστήρα, όπου διασπάται σε μικρότερα

κομμάτια και με την βοήθεια μαγνητών διαχωρίζονται τα εναπομείναντα τα μεταλλικά κομμάτια. Στο τρίτο και τελικό στάδιο της διαλογής, το υλικό εισέρχεται σ' ένα κόσκινο με τη βοήθεια του οποίου διαχωρίζεται σε κλάσματα σύμφωνα με το μέγεθος τους (πίνακας 4.1) [27].

Στο σημείο αυτό, ολοκληρώνεται παραγωγική διαδικασία με το τελικό προϊόν σχεδόν τελείως απαλλαγμένο από πρόσμικτα: γυαλί, πλαστικά, χαρτί, σίδηρο. Εν συνεχεία, το υλικό αποθηκεύεται σε εξωτερικό χώρο, σε σωρούς, το κάθε κλάσμα χωριστά. Το τελικό προϊόν περιέχει πληθώρα διαφορετικών υλικών μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται: σκυρόδεμα, αδρανή, άσφαλτος, μάρμαρο, τούβλα και κεραμικά πλακάκια. Αρχείο αναφορικά με την προέλευση των διαχειριζόμενων ΑΕΚΚ και τη σύστασή τους δεν τηρείται, ενώ παράλληλα το ποσοστό και η φύση του κάθε υλικού στο τελικώς παραγόμενο προϊόν διαφέρει ανάλογα με την πηγή προέλευσης. Ως αποτέλεσμα αυτών, είναι η μεγάλη ανομοιομορφία του προϊόντος.

Για τη διεξαγωγή της παρούσας έρευνας διατέθηκε από τη μονάδα Ανακύκλωσης Αδρανών Μακεδονίας, κατάλληλη ποσότητα προϊόντος από τα τέσσερα αυτά κλάσματα, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία ως ανακυκλωμένα αδρανή. Συγκεκριμένα, διατέθηκαν οι ποσότητες που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1 που ακολουθεί.

Πίνακας 4.1 Ποσότητα ανακυκλωμένων αδρανών ανά κλάσμα

Κλάσμα	Διαβάθμιση	Ποσότητα (kg)
άμμος	0mm - 5mm	1000
ψηφίδα	6mm - 11mm	1500
χαλίκι	12mm - 25mm	1500
σκύρα	26mm - 55mm	1000

4.1.1 Στατιστική ανάλυση περιεκτικότητας κάθε υλικού στα ανακυκλωμένα αδρανή

Σημαντικό ρόλο στις ιδιότητες των ανακυκλωμένων αδρανών διαδραματίζουν εκτός από τη μεθοδολογία διαχωρισμού, η οποία επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις γεωμετρικές τους ιδιότητες, η προέλευσή τους. Συγκεκριμένα, μεγάλη είναι η σημασία του τύπου, της ηλικίας και του όγκου του κτιρίου, το οποίο κατασκευάζεται, ανακαινίζεται ή κατεδαφίζεται, καθώς και της περιοχής στην οποία βρίσκεται το έργο. Είναι προφανές ότι ανάλογα με την ηλικία των κατασκευών μεταβάλλονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, η ποιότητά τους και η ποσότητά τους.

Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το ότι οι μονάδες διαχείρισης ΑΕΚΚ δεν έχουν τη δυνατότητα να διαχωρίζουν τα παραγόμενα προϊόντα σε ομάδες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά προέλευσής τους, συντελούν στην ετερογένεια των ανακυκλωμένων αδρανών. Η ετερογένεια αυτή προφανώς θα παρουσιάζεται αυξημένη σε περίπτωση σύγκρισης ανακυκλωμένων αδρανών από διαφορετικές χώρες ή περιοχές.

Για το λόγο αυτό κρίθηκε απαραίτητη, καταρχήν, η στατιστική ανάλυση της περιεκτικότητας του κάθε υλικού στα ανακυκλωμένα αδρανή. Το ποσοστό συμμετοχής του κάθε υλικού αναμένεται να επιδρά στις ιδιότητες των

ανακυκλωμένων αδρανών και κυρίως στην αντοχή και τη χημική σύσταση αυτών. Αντίστοιχη αναμένεται να είναι η επίδραση και στις ιδιότητες του παραγόμενου ανακυκλωμένου σκυροδέματος.

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε με χειρωνακτική διαλογή του κάθε υλικού κατόπιν οπτικού ελέγχου, σε αντιπροσωπευτικά δείγματα των δύο κλασμάτων με την μεγαλύτερη κοκκομετρία (χαλίκι και σκύρα). Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε μόνο σε αυτά τα δύο κλάσματα, διότι στα υπόλοιπα η διάκριση κάθε υλικού οπτικά ήταν αδύνατη, λόγω του μικρού μεγέθους των κόκκων των αδρανών.

Στο σημείο αυτό, πρέπει να σημειωθεί ότι η αποθήκευση των ανακυκλωμένων αδρανών, σε σωρούς ανά κλάσμα, σε εξωτερικό χώρο στη μονάδα διαχείρισής τους, οδήγησε στο να προσκολληθούν στην επιφάνειά τους ακαθαρσίες (ξένα υλικά - κυρίως χώμα). Οι ακαθαρσίες αυτές δεν αποτελούν προϊόν της επεξεργασίας των ΑΕΚΚ και δυσχεραίνουν τον οπτικό έλεγχο του διαχωρισμού τους στα επιμέρους υλικά. Για τον λόγο αυτό, πριν τον διαχωρισμό, πραγματοποιήθηκε στο επιλεγμένο δείγμα απομάκρυνση των προσκολληθέντων υλικών. Η απομάκρυνση επιτεύχθηκε με την έκπλυση των ανακυκλωμένων αδρανών με νερό υπό πίεση και με τη χρήση κόσκινου κατάλληλου ανοίγματος οπής.

Για την επιλογή αντιπροσωπευτικού δείγματος, ακολουθήθηκε η διαδικασία, η οποία καθορίζεται από το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 932-1 για την περίπτωση χειρωνακτικής επιλογής του δείγματος από σωρό με τη χρήση σέσουλας. Στη συνέχεια για περαιτέρω μείωση του δείγματος ακολουθήθηκε η μεθοδολογία του τετραμερισμού, όπως αυτή περιγράφεται στο πρότυπο EN 932 -2. Η ίδια διαδικασία προηγήθηκε όλων των ελέγχων ιδιοτήτων των ανακυκλωμένων αδρανών, για την επιλογή του απαιτούμενου κατά περίπτωση αντιπροσωπευτικού δείγματος.



Εικόνα 4.2 Ανακυκλωμένα αδρανή και περιεχόμενα σε αυτά υλικά.

Τα υλικά τα οποία περιέχονται στα ανακυκλωμένα αδρανή (εικόνα 4.2) ήταν κατά κύριο λόγο, κομμάτια από: σκυρόδεμα, αδρανή υλικά (φυσικά ή/και θραυστά),

ασφαλτομίγματα, μάρμαρο, τούβλα και κεραμικά πλακάκια. Υπήρχαν επίσης κομμάτια μωσαϊκού, γυαλιού, ξύλων, κόντρα πλακέ και ελαφρόπετρας (κίσηρης) καθώς και μικρή παρουσία (σε ποσοστό μικρότερο από 0,001%) άλλων συστατικών όπως κομμάτια από καλώδια, μεταλλικά αντικείμενα (βίδες, καρφιά) και πλαστικό. Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι εξεταζόμενες ποσότητες ανά κλάσμα χονδρόκοκκων αδρανών και το αντίστοιχο ποσοστό επί τις εκατό της περιεκτικότητας των ανακυκλωμένων αδρανών ανά υλικό.

Πίνακας 4.2 Περιεκτικότητα υλικών στη μάζα των ανακυκλωμένων αδρανών.

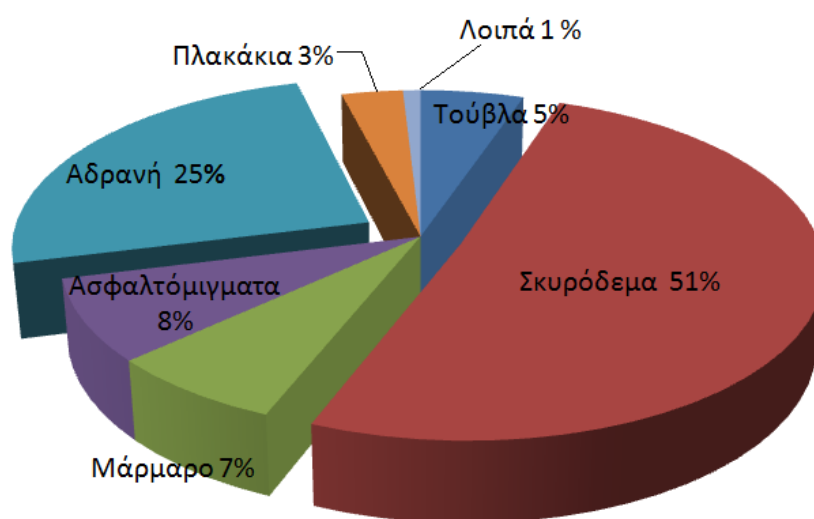
Υλικό	Κλάσμα 12-25 mm (Kg)	Κλάσμα 26-55 mm (Kg)	σύνολο (Kg)	Ποσοστό %
σκυρόδεμα	153,56	228,24	381,80	50,87
αδρανή υλικά	74,71	114,73	189,44	25,24
ασφαλτομίγματα	22,43	35,21	57,64	7,68
μάρμαρο	19,35	32,96	52,31	6,97
τούβλα	13,58	23,12	36,70	4,89
κεραμικά πλακίδια	9,82	15,47	25,29	3,37
μωσαϊκό	1,43	2,40	3,83	0,51
γυαλί	0,88	1,15	2,03	0,27
ελαφρόπετρας	0,33	0,57	0,90	0,12
ξύλο	0,15	0,38	0,53	0,07
κόντρα πλακέ	0,02	0,06	0,08	0,01
Σύνολο	296,26	454,28	750,54	100

Επιπλέον, στην εικόνα 4.3 ακολουθεί η διαγραμματική παρουσίαση της περιεκτικότητας κάθε υλικού. Παρατηρούμε ότι αυξημένη είναι η παρουσία του σκυροδέματος, ενδεικτική της συχνής χρήσης του κατασκευαστικού αυτού υλικού στη χώρα μας. Ακολουθούν τα αδρανή και σε μικρότερο ποσοστό η άσφαλτος, τα μάρμαρα, τα τούβλα και τα κεραμικά πλακίδια. Είναι προφανές ότι τα υλικά που βρίσκονται σε μεγαλύτερο ποσοστό στα ανακυκλωμένα αδρανή έχουν μεγαλύτερη επιρροή στις ιδιότητες των ανακυκλωμένων αδρανών αλλά και του παραγόμενου από αυτά σκυροδέματος. Η παρουσία των υλικών αυτών στα ανακυκλωμένα αδρανή αναμένεται να επηρεάσουν τις ιδιότητές τους με τον τρόπο που περιγράφεται αναλυτικά ακολούθως.

Καταρχήν, τα κομμάτια σκυροδέματος τα οποία περιέχονται στα ανακυκλωμένα αδρανή, προέρχονται από απόβλητα κατεδαφίσεων τα οποία δεν είναι γνωστής προελεύσεως. Οι ιδιότητές τους εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το είδος του έργου, την ηλικία του, τη χρήση του, την περιοχή στην οποία βρισκόταν και φυσικά την αρχική σύνθεση του σκυροδέματος.

Σημαντικό ρόλο στην αντοχή τους διαδραματίζει η υπάρχουσα διεπιφάνεια μεταξύ των αδρανών και της τσιμεντόπαστας του αρχικού σκυροδέματος. Η τσιμεντόπαστα αυτή αποτελεί σημείο αδυναμίας όταν τα ανακυκλωμένα αδρανή χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή σκυροδέματος, για το λόγο ότι αποτελείται από

πολύ μικρούς πόρους και ρωγμές. Αυτοί οι πόροι και οι ρωγμές απορροφούν μέρος του νερού κατά τη διάρκεια της ανάμιξης, με αποτέλεσμα λιγότερο διαθέσιμο νερό για την ενυδάτωση του τσιμέντου και άμεσο αντίκτυπο στην αντοχή του ανακυκλωμένου σκυροδέματος. Επιπλέον, το σκυρόδεμα προέλευσης, πιθανόν να έχει υποστεί ενανθράκωση ή λοιπές επιδράσεις στην ανθεκτικότητά του, κατά τη διάρκεια ζωής της κατασκευής προελεύσεως. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η αρνητική επίδραση των χλωριόντων σε παραθαλάσσιες κατασκευές. Για το λόγο αυτό, τα τμήματα παλιού σκυροδέματος έχουν αυξημένο πορώδες και υδροαπορροφητικότητα (συγκριτικά με το αρχικό υλικό), μειωμένη αντοχή και αντίστοιχα επηρεάζονται οι ιδιότητες του συνόλου των ανακυκλωμένων αδρανών.



Εικόνα 4.3 Διαγραμματική απεικόνιση της παρουσίας κάθε υλικού στα ανακυκλωμένα αδρανή.

Τα αδρανή επηρεάζουν την αντοχή και τις λοιπές ιδιότητες του σκυροδέματος, βάσει των δικών τους ιδιοτήτων, με τον ίδιο ακριβώς που λειτουργούν τα συνήθως χρησιμοποιούμενα αδρανή σκυροδέματος (θραυστά ή/και φυσικά). Οι ιδιότητες τους (γεωμετρικές, μηχανικές και χημικές) και ιδίως η αντοχή τους εξαρτώνται από τις ιδιότητες και την αντοχή του μητρικού πετρώματος. Στην περίπτωση των ανακυκλωμένων αδρανών, η προέλευση των αδρανών είναι άγνωστη και κατά συνέπεια αναμένεται μεγάλο εύρος στην αντοχή τους και ποικιλομορφία στα γεωμετρικά και λοιπά τους χαρακτηριστικά. Αναφορικά με τα αδρανή αυτά, μέρος τους προέρχεται από απόβλητα εκσκαφών και μέρος τους προέρχεται από βάσεις ή υποβάσεις οδικών αρτηριών. Κατά συνέπεια, υπάρχει πιθανότητα να έχουν ήδη δεχτεί αυξημένη καταπόνηση ή να έχουν έρθει σε επαφή με διαβρωτικές χημικές ουσίες, με αποτέλεσμα να έχουν μειωμένη αντοχή και ανθεκτικότητα.

Τα κομμάτια ασφαλτομιγμάτων, δεν προέρχονται από ανακύκλωση οδοστρωμάτων αλλά από τμήματά τους τα οποία ήταν προσκολλημένα σε ρείθρο πεζοδρομίου το οποίο καθαιρέθηκε, γεγονός που δικαιολογεί τη μειωμένη παρουσία τους στα ανακυκλωμένα αδρανή. Τα ασφαλτομίγματα, παρασκευάζονται από άσφαλτο και μείγμα αδρανών συγκεκριμένης κοκκομετρίας, στοχεύοντας στη δημιουργία οδοστρωμάτων ανθεκτικών στην ρηγμάτωση λόγω κόπωσης και στην αποφυγή παραμενουσών παραμορφώσεων, ενώ παράλληλα οφείλουν να είναι

αδιαπέραστα από το νερό για να προστατεύουν τις υποκείμενες στρώσεις. Η άσφαλτος που συνήθως χρησιμοποιείται προέρχεται από τη διύλιση αργού πετρελαίου και είναι ένα πολύπλοκο χημικό μείγμα οργανικών ενώσεων, το οποίο αποτελείται, κυρίως, από υδρογονάνθρακες, με ένα μικρό ποσοστό ετεροκυκλικών ενώσεων που περιέχουν στα ενεργά τους κέντρα θείο, άζωτο και οξυγόνο. Επίσης, περιέχει και ίχνη μετάλλων [204].

Η ύπαρξη οργανικών ουσιών στα ανακυκλωμένα αδρανή, στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν ως αδρανή σκυροδέματος και το ποσοστό παρουσίας τους είναι υψηλό, μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την πήξη και την σκλήρυνση του σκυροδέματος. Επιπλέον, η παρουσία τους μπορεί να προκαλέσει διόγκωση, αποχρωματισμό και ελλιπή ενυδάτωση του σκυροδέματος και κατά συνέπεια μειωμένη αντοχή αυτού. Επίσης, οι χημικές ενώσεις που περιέχουν τα ασφαλτομίγματα ενδέχεται να αντιδράσουν με τα συστατικά του τσιμέντου ή να ευνοήσουν την αποσάθρωση του παραγόμενου σκυροδέματος και του σιδηροπλισμού (για την περίπτωση οπλισμένου σκυροδέματος).

Τα μαρμάρια κομμάτια προέρχονται από επενδύσεις, επικαλύψεις εξωστών, δαπεδοστρώσεις και ποδιές παραθύρων, για το λόγο αυτό υπάρχει πιθανότητα ανάλογα με την χρήση τους να έχουν υποστεί αυξημένη φθορά λόγω της έκθεσής τους στα καιρικά φαινόμενα ή/και σε χημική διάβρωση, παρά το γεγονός ότι το μάρμαρο ως υλικό χαρακτηρίζεται από αυξημένη σκληρότητα και αντοχή. Ιδιαίτερη επίδραση στις ιδιότητες των ανακυκλωμένων αδρανών αναμένεται να έχει το σχήμα των τμημάτων αυτών, επηρεάζοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτών και ιδιαίτερος το δείκτη πλακοειδούς, καθιστώντας ενδεχομένων απαγορευτική τη χρήση τους ως αδρανή σκυροδέματος.

Όσον αφορά στην επίδραση που έχουν τα τούβλα ως αδρανή σκυροδέματος, αυτή αφορά καταρχήν στην μορφή τους και στην επίδρασή τους στις γεωμετρικές ιδιότητες των ανακυκλωμένων αδρανών διότι, όπως και στην περίπτωση των τμημάτων μάρμαρου, τα θραύσματα των τούβλων έχουν στην πλειοψηφία τους επίμηκες σχήμα. Επίσης, τα κομμάτια τούβλων έχουν υψηλή απορροφητικότητα [205-209], γεγονός που πιθανόν να αυξήσει την υδροαπορροφητικότητα των ανακυκλωμένων αδρανών και επιπλέον αναμένεται να προκαλέσει αυξημένη συστολή ξήρανσης, απώλεια εργασιμότητας και μειωμένη αντοχή στο παραγόμενο σκυρόδεμα.

Αναφορικά με τα κεραμικά πλακίδια, επίδραση αναμένεται κυρίως στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ανακυκλωμένων αδρανών, λόγω του σχήματός τους (θραύσματα επιμήκη και μικρού πάχους), καθώς και στην αντοχή τους. Χημικές επιδράσεις κατά τη σύνθεση του σκυροδέματος, δεν αναμένονται καθώς τα κεραμικά υλικά βάσει της σύνθεσής τους, είναι αδιάλυτα και αναλλοίωτα στην επαφή με το νερό, αλλά και με τις περισσότερες χημικές ουσίες.

Ολοκληρώνοντας, τα λοιπά υλικά τα οποία περιέχονται στα ανακυκλωμένα αδρανή, λόγω του μικρού ποσοστού παρουσίας τους σε αυτά, δεν αναμένεται να ασκήσουν μεγάλη επίδραση στο σύνολο των ιδιοτήτων των αδρανών και του παραγόμενου σκυροδέματος.

4.1.2 Ιδιότητες ανακυκλωμένων αδρανών

Για τον έλεγχο της καταλληλότητας των ανακυκλωμένων αδρανών ως αδρανή σκυροδέματος, πραγματοποιήθηκε σειρά δοκιμών για τον έλεγχο των ιδιοτήτων τους. Συγκεκριμένα, ελέγχθηκαν οι γεωμετρικές, φυσικές - μηχανικές και χημικές τους ιδιότητες, ενώ η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την κάθε δοκιμή ήταν σύμφωνη με το αντίστοιχο αμερικάνικο ή ευρωπαϊκό πρότυπο, όπως αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3. Αντίστοιχα, τα μηχανήματα και όλος ο εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία ήταν πιστοποιημένος και σύμφωνος με τις απαιτήσεις του προτύπου που ακολουθήθηκε.

Πίνακας 4.3 Χρησιμοποιηθέντα πρότυπα για τις ιδιότητες των αδρανών

A/A	ΙΔΙΟΤΗΤΑ – ΔΟΚΙΜΗ	ΠΡΟΤΥΠΟ
ΓΕΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ		
1	Μέθοδοι δειγματοληψίας	ASTM D75 EN 932-1
2	Μέθοδοι μείωσης εργαστηριακών δειγμάτων	ASTM C702 EN 932-2
ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ		
1	Κοκκομετρική διαβάθμιση	ASTM C-136 EN 933-1
2	Σχήμα χονδρόκοκκων αδρανών: Δείκτης πλακοειδούς	EN 933-3
3	Περιεκτικότητα σε χονδρόκοκκων αδρανών σε κελύφη	EN 933-7
4	Περιεκτικότητα σε παιπάλη	ASTM C-117 EN 933-1
5A	Ποιότητα λεπτόκοκκων: Ισοδύναμο Άμμου	ASTM D-2419
5B	Ποιότητα λεπτόκοκκων: Μπλε μεθυλενίου	EN 933-9
ΦΥΣΙΚΕΣ/ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ		
1	Αντοχή σε θρυμματισμό κατά Los Angeles	ASTM C 131
2	Ειδικό βάρος -Υδροαπορροφητικότητα	ASTM C127 ASTM C128
3	Ανθεκτικότητα στην αποσάθρωση (Υγεία πετρώματος)	AASHTO T 104-94
ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ		
1	Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε χλωριόντα	EN 1744-1 (άρθρα 7,8)
2A	Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε θειικά: Προσδιορισμός ολικού θείου	EN 1744-1 (άρθρο 11)
2B	Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε θειικά: Προσδιορισμός ευδιάλυτων σε οξέα SO ₃	EN 1744-1 (άρθρο 12)
3	Προσδιορισμός απώλειας κατά την πύρωση (στους 950 °C)	EN 196-2
4	Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε ανθρακικά άλατα	EN 196-21 (άρθρο 5)

Ακολουθώντας, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών, τα οποία παράλληλα συγκρίνονται με τις απαιτήσεις του ελληνικού προτύπου ΕΛΟΤ EN 408 για τα αδρανή σκυροδέματος, τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος ΚΤΣ-97 και το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN12620. Έλεγχος σε μέρος των ιδιοτήτων πραγματοποιήθηκε και για θραυστά αδρανή, προερχόμενα από τοπικό λατομείο, με σκοπό τη σύγκρισή τους με τα ανακυκλωμένα αδρανή. Τα θραυστά αυτά αδρανή χρησιμοποιήθηκαν στην πορεία της παρούσας έρευνας για την παρασκευή δοκιμών σκυροδέματος.

Τον προσδιορισμό της κάθε ιδιότητας προηγήθηκε η επιλογή του κατάλληλου κατά περίπτωση δείγματος, ούτως ώστε να είναι αντιπροσωπευτικό και να έχει το απαιτούμενο μέγεθος. Η επιλογή του δείγματος πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα πρότυπα EN 932-1 και EN 932-2, στην περίπτωση που ο έλεγχος της ιδιότητας ακολούθησε τα Ευρωπαϊκά πρότυπα, και σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM D75 και ASTM C702, στην περίπτωση που ο έλεγχος της ιδιότητας ακολούθησε τα Αμερικανικά πρότυπα.

Κοκκομετρική διαβάθμιση

Ο προσδιορισμός της κοκκομετρικής διαβάθμισης των ανακυκλωμένων αδρανών πραγματοποιήθηκε με βάση τόσο τα Αμερικανικά όσο και τα Ευρωπαϊκά πρότυπα. Στην πρώτη περίπτωση, ακολούθησε το πρότυπο ASTM C136 σε συνδυασμό με το πρότυπο ASTM C117 (για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε παιπάλη) με τη χρήση των κατάλληλων κατά περίπτωση κόσκινων. Τα κόσκινα επιλέχθηκαν συναρτήσει του μεγέθους του μέγιστου κόκκου των εξεταζόμενων αδρανών και σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Αμερικανικού προτύπου ASTM E11.

Καθορίστηκε η κοκκομετρική διαβάθμιση των τεσσάρων κλασμάτων ανακυκλωμένων αδρανών, τα οποία είχαν μέγεθος κόκκων: «0-5mm», «6-11mm», «12-25mm» και «26-55mm», καθώς και η κοκκομετρική διαβάθμιση για τρία κλάσματα θραυστών αδρανών με μέγεθος κόκκων: «0-5mm», «6-9,5mm» και «10-25mm», προερχόμενων από τοπικό λατομείο.

Στον πίνακα 4.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής διαβάθμισης των ανακυκλωμένων αδρανών, ως ο μέσος όρος τριών δοκιμών για το κάθε κλάσμα, που πληρούν τις προϋποθέσεις ακρίβειας του προτύπου, ενώ στο διάγραμμα 4.1 παρουσιάζονται οι κοκκομετρικές καμπύλες αυτών. Αντίστοιχα στον πίνακα 4.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής διαβάθμισης των θραυστών αδρανών και το διάγραμμα 4.2 οι κοκκομετρικές καμπύλες αυτών.

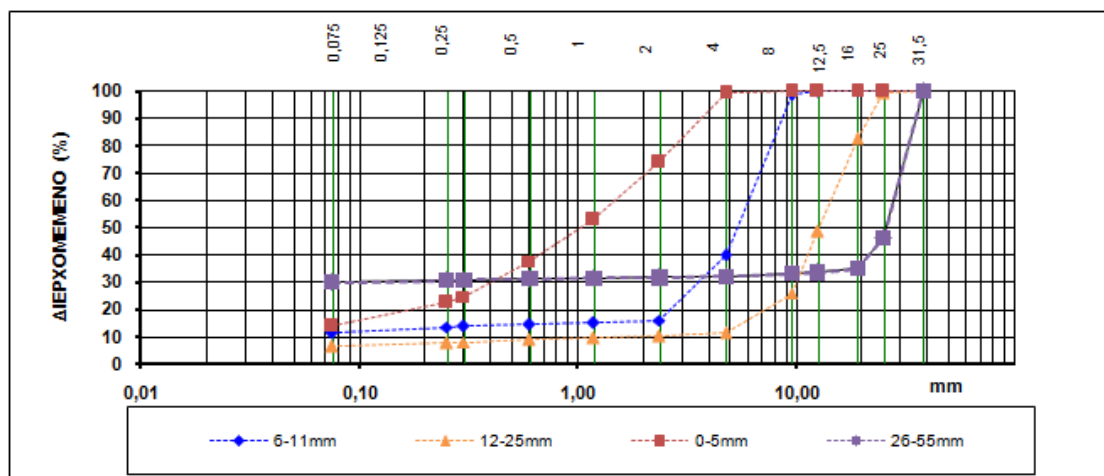
Συγκρίνοντας την κοκκομετρική ανάλυση κάθε κλάσματος ανακυκλωμένων αδρανών με αυτή του αντίστοιχου κλάσματος θραυστών αδρανών παρατηρούμε καταρχήν, ότι όσον αφορά στα λεπτόκοκκα κλάσματα οι κοκκομετρικές καμπύλες τους είναι όμοιες. Όσον αφορά στα χονδρόκοκκα αδρανή, παρατηρούμε ότι τα ανακυκλωμένα αδρανή περιέχουν αυξημένα ποσοστά λεπτόκοκκων, γεγονός το οποίο πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη χρήση τους για την παραγωγή σκυροδέματος. Το υψηλό ποσοστό λεπτόκοκκων οφείλεται στο υλικό (χώμα) το οποίο είναι

προσκολλημένο στα ανακυκλωμένα αδρανή, ως αποτέλεσμα της αποθήκευσής τους σε σωρούς σε εξωτερικό χώρο στην εταιρεία διαχείρισής τους.

Πίνακας 4.4 Κοκκομετρική ανάλυση ανακυκλωμένων αδρανών (κατά ASTM).

Αμερ. κόσκινα ASTM E11	Άνοιγμα βροχίδας (mm)	Λεπτόκοκκα	Χονδροκόκκα			
		ονομαστικό μέγεθος (mm)				
		0 - 5 mm	6 - 11 mm	12 - 25 mm	26 - 55mm	
		%διερχόμενο				
1 1/2"	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	
1"	25,0	100,00	100,00	99,40	46,40	
3/4"	19,0	100,00	100,00	82,80	35,00	
1/2"	12,5	100,00	100,00	48,70	33,60	
3/8"	9,50	100,00	98,90	26,10	33,20	
No 4	4,75	99,40	40,10	11,40	32,10	
No 8	2,36	74,20	16,20	10,30	31,80	
No 16	1,18	52,90	15,30	9,70	31,50	
No 30	0,60	37,80	14,60	9,00	31,30	
No 50	0,30	24,80	13,80	8,10	30,83	
No 60	0,25	22,60	13,50	7,80	30,70	
No 200	0,075	14,10	11,50	6,30	30,00	

Ενδεικτικά, συγκρίνοντας το κλάσμα με διαστάσεις κόκκων «12-25mm» των ανακυκλωμένων αδρανών, με το αντίστοιχο κλάσμα θραυστών (διαστάσεις κόκκων «10-25mm»), παρατηρούμε μια διαφορά στο διερχόμενο από το κόσκινο No30, 7,50% (9,00% τα ανακυκλωμένα αδρανή αντί 1,50% τα θραυστά αδρανή).



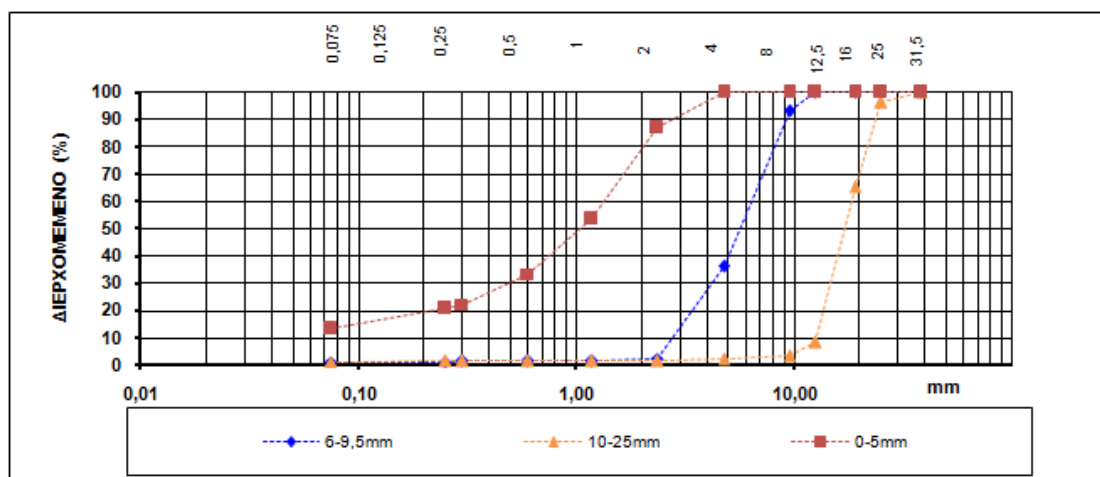
Διάγραμμα 4.1 Κοκκομετρική ανάλυση ανακυκλωμένων αδρανών (κατά ASTM).

Το μεγαλύτερο περιεχόμενο λεπτόκοκκων παρατηρείται εντούτοις στα ανακυκλωμένα σκύρα (κλάσμα διαστάσεων κόκκων «26-55mm») όπου το διερχόμενο ποσοστό των λεπτόκοκκων για τα κόσκινα No 16 – No 200 είναι της τάξεως του 30%.

Πίνακας 4.5 Κοκκομετρική ανάλυση θραυστών αδρανών (κατά ASTM).

Αμερ. Κόσκινα ASTM E11	Άνοιγμα βροχίδας (mm)	Λεπτόκοκκα	Χονδρόκοκκα	
		ονομαστικό μέγεθος (mm)		
		0 - 5 mm	6 – 9,5 mm	10 - 25mm
		%διερχόμενο		
1 1/2"	38,1	100,00	100,00	100,00
1"	25,0	100,00	100,00	96,20
3/4"	19,0	100,00	100,00	65,20
1/2"	12,5	100,00	100,00	8,30
3/8"	9,50	100,00	93,20	3,30
No 4	4,75	100,00	36,10	2,10
No 8	2,36	87,00	2,50	1,70
No 16	1,18	53,40	1,50	1,50
No 30	0,60	33,40	1,40	1,50
No 50	0,30	22,40	1,40	1,40
No 60	0,25	20,60	1,30	1,40
No 200	0,075	13,50	1,30	1,20

Στη συνέχεια, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής διαβάθμισης με τις απαιτήσεις του ΚΤΣ-97, ο οποίος ορίζει ότι για το επόμενο μετά την άμμο κλάσμα δεν επιτρέπεται να υπάρχει διερχόμενο από το κόσκινο No 8 σε ποσοστό μεγαλύτερο από 25%, όπως επίσης και υλικό διερχόμενο από το κόσκινο No 16 σε ποσοστό μεγαλύτερο από 2% [210]. Παρατηρείται ότι για την περίπτωση των ανακυκλωμένων αδρανών, ο δεύτερος περιορισμός δεν ικανοποιείται.



Διάγραμμα 4.2 Κοκκομετρική ανάλυση θραυστών αδρανών (κατά ASTM).

Αντίστοιχος περιορισμός υπάρχει και για την ποσότητα της παιπάλης, δηλαδή για το υλικό που διέρχεται από το κόσκινο No 200. Συγκεκριμένα, η παιπάλη της άμμου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 16% του ξερού βάρους της άμμου (ή το 20% για άοπλα σκυροδέματα χωρίς ειδικές απαιτήσεις) και για τα χονδρόκοκκα κλάσματα δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1% του ξερού βάρους τους [210]. Παρατηρείται ξανά ότι ο

δεύτερος περιορισμός δεν ικανοποιείται. Φυσικά οι περιορισμοί αυτοί αφορούν στην περίπτωση θραυστών ή φυσικών αδρανών και όχι ανακυκλωμένων, τα οποία χρήζουν ειδικής αντιμετώπισης και ενδεχομένως για τη χρήση τους ή μη στην παραγωγή σκυροδέματος πρέπει να καθοριστούν διαφορετικές προδιαγραφές.

Εντούτοις, λόγω των προαναφερθέντων περιορισμών, σε συνδυασμό με την μειωμένη αντοχή που παρουσιάζει το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα, στην περίπτωση χρήσης των αδρανών ως έχουν (η αντίστοιχη πειραματική διαδικασία θα παρουσιαστεί αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο), τα ανακυκλωμένα αδρανή τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνθεση δοκιμίων σκυροδέματος επεξεργάστηκαν για την απομάκρυνση των προσκολλημένων σε αυτά υλικών (χώμα). Η επεξεργασία περιελάμβανε την έκπλυσή τους με νερό υπό πίεση και την παράλληλη χρήση του κατάλληλου κόσκινου.

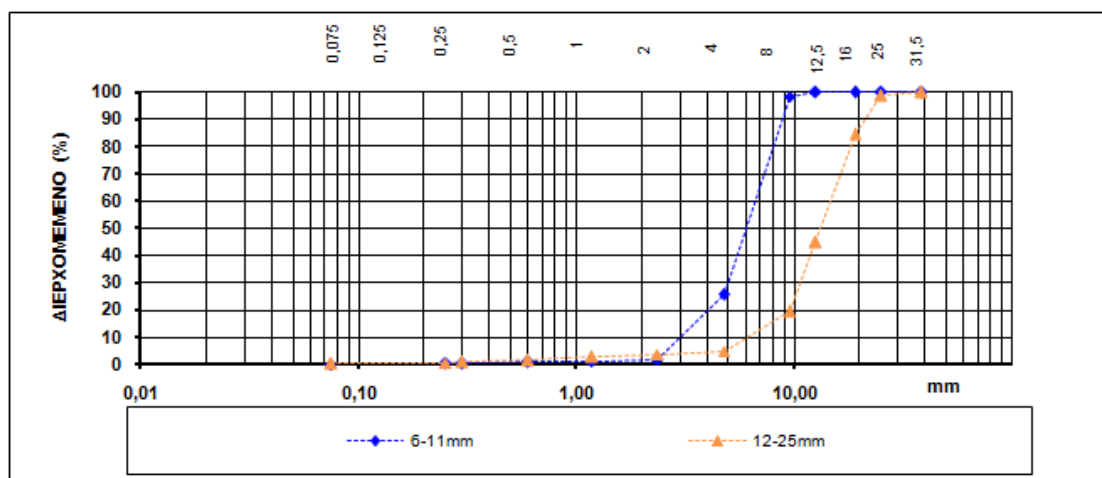
Η επεξεργασία πραγματοποιήθηκε μόνο για τα κλάσματα της ψηφίδας και του χαλικιού τα οποία επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή σκυροδέματος. Τα σκύρα λόγω του μεγάλου μεγέθους των κόκκων τους επιλέχθηκε να μην χρησιμοποιηθούν για τη παρασκευή σκυροδέματος και η άμμος απορρίφθηκε λόγω της χαμηλής της ποιότητας (βάσει των δοκιμών ισοδύναμου άμμου και μπλε του μεθυλενίου, οι οποίες θα παρουσιαστούν αναλυτικά σε ακόλουθο κεφάλαιο). Κατόπιν της επεξεργασίας, η κοκκομετρική τους ανάλυση τροποποιήθηκε όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 4.6 και το διάγραμμα 4.3 που ακολουθούν.

Πίνακας 4.6 Κοκκομετρική ανάλυση ανακυκλωμένων αδρανών κατόπιν επεξεργασίας (κατά ASTM).

Αμερ. κόσκινια ASTM E11	Άνοιγμα βροχίδας (mm)	Χονδρόκοκκα	
		ονομαστικό μέγεθος (mm)	
		6 - 11 mm	12 - 25 mm
		%διερχόμενο	
1 1/2"	38,1	100,00	100,00
1"	25,0	100,00	98,70
3/4"	19,0	100,00	84,40
1/2"	12,5	100,00	45,00
3/8"	9,50	98,50	19,30
No 4	4,75	25,80	5,10
No 8	2,36	1,80	3,60
No 16	1,18	1,30	2,70
No 30	0,60	0,80	1,70
No 50	0,30	0,30	0,70
No 60	0,25	0,30	0,60
No 200	0,075	0,10	0,30

Παράλληλα, Ο ΚΤΣ-97 δεν ορίζει ανώτατα και κατώτατα επιτρεπόμενα όρια για την κοκκομετρική διαβάθμιση κλάσματος αδρανών, παρά μόνο για μείγμα αδρανών. Για το λόγο αυτό, δημιουργήθηκε ένα θεωρητικό μείγμα ανακυκλωμένων

αδρανών (πίνακας 4.7 και διάγραμμα 4.4) με σκοπό τη σύγκρισή του με τα όρια που ορίζει ο ΚΤΣ-97. Το θεωρητικό μείγμα συγκρίθηκε με τα οριζόμενα βάσει ΚΤΣ-97 για την περίπτωση οπλισμένου σκυροδέματος, το οποίο είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο (υποζώνη Δ).



Διάγραμμα 4.3 Κοκκομετρική ανάλυση ανακυκλωμένων αδρανών κατόπιν επεξεργασίας (κατά ASTM).

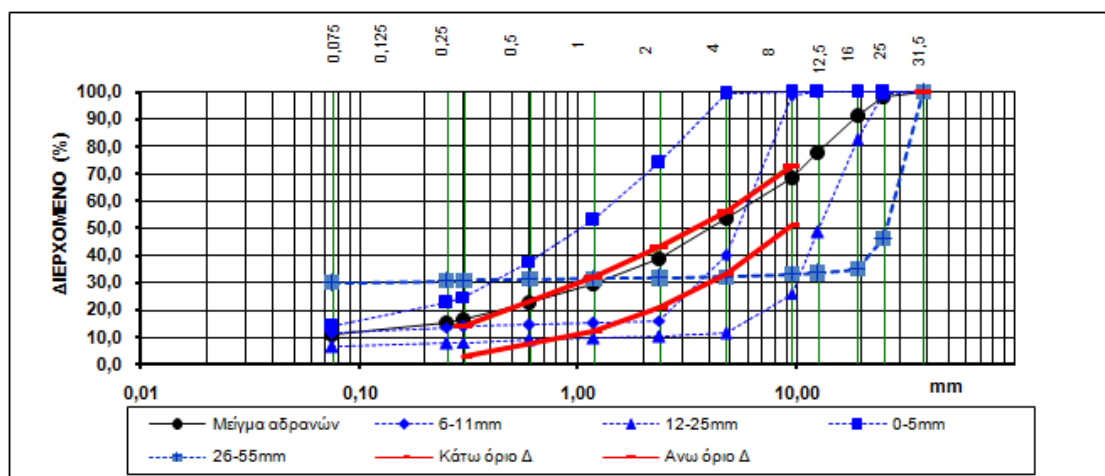
Παρατηρήθηκε ότι το κάθε κλάσμα ξεχωριστά είναι εκτός ορίων, γεγονός που δεν πρέπει να μας προβληματίζει, αφού ποτέ δεν χρησιμοποιείται στην σύνθεση σκυροδέματος αποκλειστικά ένα μόνο κλάσμα αδρανών. Αντίθετα, το θεωρητικό μείγμα αδρανών πληροί τις απαιτήσεις του ΚΤΣ-97 (με εξαίρεση τα διερχόμενα από τα κόσκινα Νο 50 και Νο 60 για τα οποία αναφερθήκαμε ήδη) και κατά συνέπεια επιτρέπει τη χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών στην παραγωγή σκυροδέματος.

Πίνακας 4.7 Κοκκομετρική ανάλυση θεωρητικού μείγματος αδρανών

Αμερ. κόσκινα ASTM E11	Ανοιγμα Βρογχίδας (mm)	Ποσοστό συμμετοχής στη σύνθεση				μείγμα αδρανών	ΚΤΣ -97	
		42,5%	15,0%	40,0%	2,5%		ΥΠΟΖΩΝΗ Δ	
		0-5mm	6-11mm	12-25mm	26-55mm		κάτω όριο	άνω όριο
1 1/2"	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,0	100	100
1"	25,0	100,00	100,00	99,40	46,40	98,4	95	100
3/4"	19,0	100,00	100,00	82,80	35,00	91,5		
1/2"	12,5	100,00	100,00	48,70	33,60	77,8	61	80
3/8"	9,50	100,00	98,90	26,10	33,20	68,6	51	73
No 4	4,75	99,40	40,10	11,40	32,10	53,6	33	56
No 8	2,36	74,20	16,20	10,30	31,80	38,9	21	43
No 16	1,18	52,90	15,30	9,70	31,50	29,4	12	32
No 30	0,60	37,80	14,60	9,00	31,30	22,7	6	23
No 50	0,30	24,80	13,80	8,10	30,80	16,6	3	14
No 60	0,25	22,60	13,50	7,80	30,70	15,5	2	13
No 200	0,075	14,10	11,50	6,30	30,00	11,0		

Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών προσδιορίστηκε παράλληλα και σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα. Στην περίπτωση αυτή, ακολουθήθηκε το

πρότυπο EN 933-1 (και για τον προσδιορισμό της ποσότητας της παιπάλης) με τη χρήση των κατάλληλων κατά περίπτωση κόσκινων. Τα κόσκινα επιλέχθηκαν συναρτήσει του μεγέθους του μέγιστου κόκκου των εξεταζόμενων αδρανών και σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Ευρωπαϊκού πρότυπου EN 933-2.



Διάγραμμα 4.4 Κοκκομετρική καμπύλη θεωρητικού μείγματος ανακυκλωμένων αδρανών.

Η κοκκομετρική ανάλυση παρουσιάζεται στους πίνακες 4.8 για τα ανακυκλωμένα αδρανή με επεξεργασία και χωρίς επεξεργασία, καθώς και στον πίνακα 4.9 για τα θραυστά αδρανή.

Πίνακας 4.8 Κοκκομετρική ανάλυση ανακυκλωμένων αδρανών, με επεξεργασία και χωρίς (κατά EN).

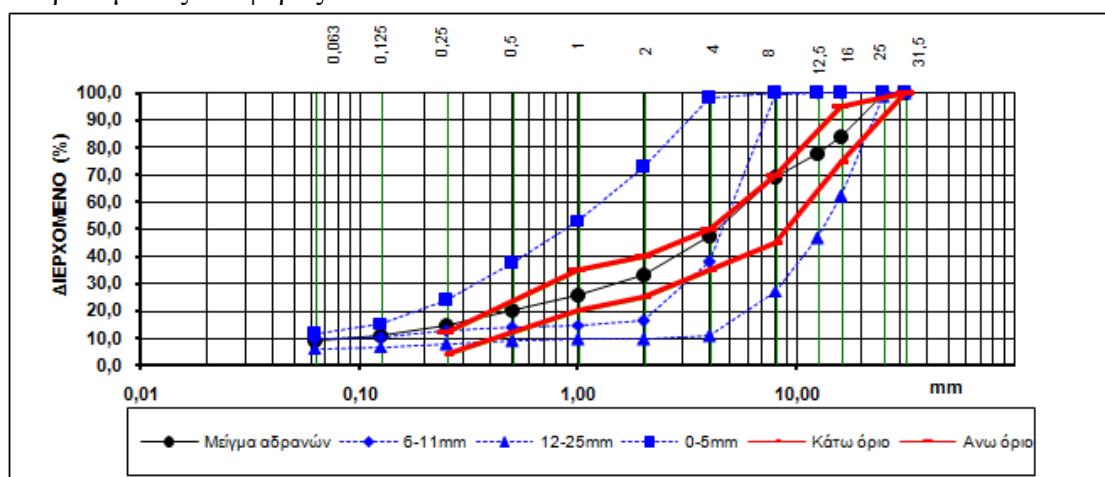
Ευρωπ. Κόσκινα EN 933-2 / Άνοιγμα βροχίδας (mm)	Χωρίς επεξεργασία			Με επεξεργασία	
	Λεπτόκοκκα	Χονδρόκοκκα		Χονδρόκοκκα	
	ονομαστικό μέγεθος (mm)				
	0 - 5 mm	6 - 11mm	12 - 25mm	6 - 11mm	12 - 25mm
	%διερχόμενο				
31,50	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
25,00	100,00	100,00	98,70	100,00	99,10
16,00	100,00	100,00	62,30	100,00	78,60
12,50	100,00	100,00	46,80	100,00	44,80
8,00	100,00	99,60	27,20	98,80	18,50
4,00	98,20	38,20	10,90	24,80	5,30
2,00	72,70	16,40	9,80	1,80	3,40
1,00	53,20	14,90	9,50	1,00	2,60
0,50	37,40	13,80	8,90	0,50	1,60
0,25	23,80	12,80	7,60	0,20	0,60
0,125	15,40	10,30	6,90	0,20	0,30
0,063	11,40	9,80	6,20	0,20	0,20

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο μεθοδολογιών παρατηρούμε την αντιστοιχία που υπάρχει μεταξύ τους, η οποία δεν διαφοροποιεί τα ήδη εξαχθέντα συμπεράσματα.

Πίνακας 4.9 Κοκκομετρική ανάλυση θραυστών αδρανών (κατά EN).

Ευρωπ. Κόσκινα EN 933-2 / Άνοιγμα βροχίδας (mm)	Λεπτόκοκκα	Χονδρόκοκκα	
	ονομαστικό μέγεθος (mm)		
	0 - 5 mm	6 – 9,5 mm	10 - 25mm
	%διερχόμενο		
31,50	100,00	100,00	100,00
25,00	100,00	100,00	94,30
16,00	100,00	100,00	59,70
12,50	100,00	100,00	8,10
8,00	100,00	91,60	3,10
4,00	99,50	36,40	2,50
2,00	72,30	2,70	1,60
1,00	38,40	1,60	1,40
0,50	32,40	1,60	1,30
0,25	20,00	1,50	1,30
0,125	16,60	1,30	1,20
0,063	12,80	1,20	1,20

Τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής διαβάθμισης των ανακυκλωμένων αδρανών συγκρίθηκε με τις απαιτήσεις του Ευρωπαϊκού προτύπου EN 12620 βάσει του οποίου καθορίζονται οι απαιτούμενες προδιαγραφές για τα αδρανή σκυροδέματος καθώς και με το EN 480-1, το οποίο καθορίζει προδιαγραφές για τη σύνθεση σκυροδέματος αναφοράς.



Διάγραμμα 4.5 Κοκκομετρική καμπύλη θεωρητικού μείγματος ανακυκλωμένων αδρανών κατά EN.

Βάσει του πρότυπου EN 12620, καθορίζονται κοκκομετρικές κατηγορίες για τα αδρανή, για τις οποίες ανάλογα με τις διαστάσεις των κόκκων καθορίζονται ανώτερα και κατώτερα όρια για την κοκκομετρική τους διαβάθμιση. Αντίστοιχα, το πρότυπο EN 480-1 καθορίζει ανώτερα και κατώτερα όρια για μείγμα αδρανών

κανονικού βάρους σε συμφωνία με τα καθοριζόμενα στο πρότυπο EN 12620, για τη σύνθεση σκυροδέματος αναφοράς. Στο διάγραμμα 4.5 και τον πίνακα 4.10 παρουσιάζεται η κοκκομετρική καμπύλη θεωρητικού μείγματος αδρανών σε συνδυασμό με τα ανώτερα και κατώτερα επιτρεπόμενα όρια κατά EN 480-1.

Πίνακας 4.10 Κοκκομετρική ανάλυση θεωρητικού μείγματος αδρανών κατά EN.

Ευρωπ. Κόσκινα EN 933-2 / Άνοιγμα βροχίδας (mm)	Ποσοστό συμμετοχής στη σύνθεση			μείγμα αδρανών	EN 480-1	
	35,0%	23,0%	42,0%		κάτω όριο	άνω όριο
	0-5mm	6-11mm	12-25mm			
31,50	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100
25,00	100,0	100,0	98,7	99,5		
16,00	100,0	100,0	62,3	84,2	75	95
12,50	100,0	100,0	46,8	77,7		
8,00	100,0	99,6	27,2	69,3	45	70
4,00	98,2	38,2	10,9	47,7	35	50
2,00	72,7	16,4	9,8	33,3	25	40
1,00	53,2	14,9	9,5	26,0	20	35
0,50	37,4	13,8	8,9	20,0	10	25
0,25	23,8	12,8	7,6	14,5	4	12
0,125	15,4	10,3	6,9	10,7	1	8
0,063	11,4	9,8	6,2	8,9		

Παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση ότι το κάθε κλάσμα ξεχωριστά είναι εκτός ορίων, ενώ το θεωρητικό μείγμα αδρανών πληροί τις απαιτήσεις του EN 480-1 (με εξαίρεση τα διερχόμενα από τα κόσκινα 0,25 και 0,125 κατ' αντιστοιχία με τα ισχύοντα για τα κόσκινα Νο 50 και Νο 60 για τα οποία αναφερθήκαμε ήδη) και κατά συνέπεια επιτρέπει τη χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών στην παραγωγή σκυροδέματος.

Εντούτοις, ειδικά για την περίπτωση των λεπτόκοκκων αδρανών το πρότυπο EN 12620 ορίζει ότι το περιεχόμενο της παιπάλης (ήτοι το διερχόμενο από το κόσκινο 0,063) δεν πρέπει να υπερβαίνει το 3%. Στην περίπτωση των ανακυκλωμένων λεπτόκοκκων αδρανών παρατηρείται ότι η συνθήκη αυτή δεν πληρείται και το διερχόμενο από συγκεκριμένο κόσκινο είναι 11,4%. Κατά συνέπεια, η χρήση των λεπτόκοκκων ανακυκλωμένων αδρανών ως αδρανή σκυροδέματος, κρίνεται ακατάλληλη βάση αυτού.

Σχήμα χονδρόκοκκων αδρανών

Ο έλεγχος του σχήματος των αδρανών απαιτείται μόνο για χονδρόκοκκα αδρανή (με μέγεθος κόκκων μεταξύ 4mm και 80mm) και υπολογίζεται μέσω του δείκτη πλακοειδούς (flakiness index) βάσει του EN 933-3. Στην παρούσα έρευνα, ο δείκτης πλακοειδούς προσδιορίστηκε για τα όλα τα κλάσματα πλην της άμμου και τα αποτελέσματά συγκρίθηκαν με τις απαιτήσεις του προτύπου EN 12620. Το πρότυπο αυτό δεν ορίζει ανώτερο ή κατώτερο επιτρεπτό όριο αλλά κατηγοριοποιεί τα αδρανή

ανάλογα με την τιμή του δείκτη αυτού. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 4.11.

Πίνακας 4.11 Δείκτης πλακοειδούς ανακυκλωμένων αδρανών.

Κλάσμα	Δείκτης Πλακοειδούς	Κατηγορία FI
6mm - 11mm	FI = 13 < 15	FI ₁₅
12mm - 25mm	FI = 10 < 15	FI ₁₅
26mm - 55mm	FI = 28 < 35	FI ₃₅

Παρατηρείται ότι υψηλότερος δείκτης πλακοειδούς παρουσιάζεται για το πιο χονδρόκοκκο κλάσμα των αδρανών (σκύρα). Υψηλός δείκτης πλακοειδούς καλό είναι να αποφεύγεται στα αδρανή σκυροδέματος διότι δηλώνει αδρανή επιμήκη, τα οποία πιθανόν να οδηγήσουν σε απόμιξη του σκυροδέματος λόγω της χαμηλής εργασιμότητας του μείγματος. Επιπλέον, τα επιμήκη αδρανή επηρεάζουν αρνητικά την αντοχή του σκυροδέματος και ειδικότερα την ανθεκτικότητα αυτού, επειδή ο δεσμός μεταξύ αδρανών και τσιμεντόπαστας επηρεάζεται αρνητικά.

Περιεκτικότητα σε κελύφη

Ο έλεγχος της περιεκτικότητας σε κελύφη απαιτείται αποκλειστικά για χονδρόκοκκα αδρανή (με μέγεθος κόκκων 4mm - 63mm) και προσδιορίζεται βάσει του προτύπου EN 933-7. Πραγματοποιείται χειρωνακτικός διαχωρισμός των κελυφών και των κομματιών από κελύφη από το δείγμα που ελέγχεται και το περιεχόμενο σε κελύφη (Shell content -SC) εκφράζεται ως ποσοστό % της μάζας του δείγματος.

Η δοκιμή αυτή απαιτείται για συλλεκτά αδρανή από παραθαλάσσιες περιοχές. Λόγω της άγνωστης προέλευσης των ανακυκλωμένων αδρανών πραγματοποιήθηκε και για αυτά, εντούτοις το περιεχόμενο σε κελύφη ισούται με το μηδέν (SC=0%). Ομοίως με το δείκτη πλακοειδούς, το πρότυπο EN 12620 δεν ορίζει ανώτερο ή κατώτερο επιτρεπτό όριο αλλά κατηγοριοποιεί τα αδρανή ανάλογα με την τιμή του SC. Όσον αφορά στα ανακυκλωμένα αδρανή, αυτά ανήκουν στην κατηγορία SC₁₀ (SC = 0% < 10).

Ποιότητα λεπτόκοκκων αδρανών: Ισοδύναμο άμμου

Για τον καθορισμό της ποιότητας των λεπτόκοκκων αδρανών (άμμου) και συγκεκριμένα δύναται να πραγματοποιηθούν δύο διαφορετικές δοκιμές: η δοκιμή καθορισμού ισοδύναμου άμμου και η δοκιμή μπλε του μεθυλενίου.

Η πρώτη δοκιμή εκτελείται με σκοπό το γρήγορο καθορισμό της σχετικής αναλογίας της λεπτότατης σκόνης αργιλώδους μορφής (παιπάλης) και της άμμου στα αδρανή. Η ύπαρξη χαμηλού ποσοστού ισοδυνάμου άμμου χαρακτηρίζει τα αδρανή ως μη «καθαρά» και αποτελεί μια ένδειξη της ύπαρξης επιβλαβούς ποσότητας αργίλου. Ο όρος ισοδύναμο άμμου (sand equivalent – SE) εκφράζει την έννοια ότι τα περισσότερα λεπτόκοκκα αδρανή είναι μείγματα των επιθυμητών: χονδρών κόκκων, άμμου και των ανεπιθύμητων: αργίλου και σκόνης.

Για τον προσδιορισμό του ισοδύναμου άμμου ακολουθήθηκε το Αμερικάνικο πρότυπο ASTM D2419, σύμφωνα με το οποίο το αποτέλεσμα ορίζεται ως ο μέσος όρος δύο δοκιμών που πρέπει να διαφέρουν μεταξύ τους το πολύ ± 3 μονάδες S.E.. Η τιμή ισοδύναμου άμμου των ανακυκλωμένων αδρανών (για το κλάσμα της άμμου) προσδιορίστηκε ίση με 59.

Οι χαμηλές τιμές SE (δηλαδή τιμές μικρότερες του 50), δηλώνουν υψηλό ποσοστό παιπάλης και κατά συνέπεια δηλώνουν απαγορευτική χρήση των αδρανών σε συνήθεις κατασκευές ή απαίτηση επεξεργασίας των αδρανών (απόπλυση) και χρήση τους σε έργα πολύ χαμηλών απαιτήσεων. Ειδικότερα, βάσει του ΚΤΣ-97, η άμμος κρίνεται κατάλληλη για συνήθεις κατασκευές (π.χ. κατοικίες) όταν η τιμή του ισοδύναμου άμμου είναι μεγαλύτερη του 65 ($SE \geq 65$), για έργα μεγάλων απαιτήσεων (π.χ. χώροι συνάθροισης κοινού) όταν η τιμή είναι μεγαλύτερη του 70 ($SE \geq 70$) και για έργα ακόμη μεγαλύτερων απαιτήσεων (π.χ. γέφυρες- φράγματα) πρέπει η τιμή να είναι μεγαλύτερη του 75 ($SE \geq 75$).

Κατά συνέπεια, βάσει των ανωτέρω, η τιμή ισοδύναμου άμμου των ανακυκλωμένων αδρανών ($SE=59$) είναι μικρότερη του κατώτερου ορίου που ορίζει ο ΚΤΣ-97 και κατά συνέπεια τα λεπτόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή δεν είναι κατάλληλα για παραγωγή σκυροδέματος, λόγω της υψηλής περιεκτικότητά τους σε παιπάλη. Βάσει αυτού, αποφασίστηκε να μην χρησιμοποιηθεί η ανακυκλωμένη άμμος στις συνθέσεις σκυροδέματος που πραγματοποιήθηκαν σε επόμενο στάδιο της παρούσας έρευνας.

Εναλλακτικά, για τον προσδιορισμό του ισοδύναμου άμμου, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 933-8 και να συγκριθούν τα αποτελέσματά της δοκιμής με τα καθοριζόμενα στο πρότυπο EN12620 για τα αδρανή σκυροδέματος. Σε αντίθεση όμως με τον ΚΤΣ-97, το πρότυπο EN 12620 αναφέρει μεν ότι η τιμή του ισοδύναμου άμμου πρέπει να μην υπερβαίνει ένα καθορισμένο ελάχιστο όριο, εντούτοις δεν προσδιορίζει το ελάχιστο αυτό όριο. Για το λόγο αυτό, δεν επιλέχθηκαν τα Ευρωπαϊκά πρότυπα.

Ποιότητα λεπτόκοκκων αδρανών: Μπλε του μεθυλενίου

Η δοκιμή του μπλε του μεθυλενίου (Methylene blue test - MB) αναφέρθηκε ήδη ως εναλλακτική μέθοδος για τον έλεγχο της ποιότητας των λεπτόκοκκων αδρανών. Συγκεκριμένα, η μέθοδος χρησιμοποιείται για την εξακρίβωση των ενεργών αργιλικών ορυκτών στα αδρανή, τα οποία σε αντίθεση με τα μη ενεργά, έχουν την τάση να διογκώνονται ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε νερό. Η διογκωση αυτή έχει καταστροφικές συνέπειες κατά τη χρήση του αδρανούς στη σύνθεση σκυροδέματος, αλλά και σε λοιπές χρήσεις.

Ο προσδιορισμός του μπλε του μεθυλενίου πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο EN 933-9 και η τιμή του ορίστηκε ως 2. Στη συνέχεια, απαιτήθηκε έλεγχος της καταλληλότητας του υλικού σύμφωνα με το πρότυπο EN 12620. Το πρότυπο αυτό (όπως και στην περίπτωση του ισοδύναμου άμμου) αναφέρει ότι η τιμή MB πρέπει να είναι μικρότερη από κάποιο συγκεκριμένο όριο, εντούτοις το όριο αυτό δεν

αναφέρεται. Φυσικά, μεγαλύτερη τιμή του δείκτη MB, υποδηλώνει χαμηλότερη ποιότητα λεπτόκοκκων αδρανών.

Με σκοπό την αξιοποίηση του αποτελέσματος της δοκιμής, αναζητήθηκαν επιτρεπτές τιμές του μπλε του μεθυλενίου σε λοιπές προδιαγραφές. Στον πίνακα 4.12, παρουσιάζονται οι επιτρεπτές τιμές του μπλε του μεθυλενίου, που συνιστώνται από τις Γαλλικές προδιαγραφές (NF XP P 18-540), το προσχέδιο των Ελληνικών προδιαγραφών για ασφαλικό σκυρόδεμα κλειστού τύπου (A-100), καθώς και άλλες διεθνείς προδιαγραφές, ανάλογα με την χρήση των αδρανών.

Πίνακας 4.12 Επιτρεπτές τιμές μπλε του μεθυλενίου σύμφωνα με διεθνείς προδιαγραφές [211].

Αδρανή υλικά για :	Επιτρεπτές τιμές μπλε του μεθυλενίου			
	Κατά NF XP P 18-540		Προσχέδια νέων Ελληνικών προδιαγραφών	
	MB	MB _F	MB	MB _F
Βάσεις και υποβάσεις, ή	≤2.0 όταν S.E.<60		-	-
	≤2.5 όταν S.E. <50	≤10	(≤3.0 ^(α))	(≤10 ^(α))
Ασφαλικές βάσεις, ή	≤3.0 όταν S.E.<40		-	≤10
Συνδετικές στρώσεις			-	<10
Επιφανειακές ασφαλικές στρώσεις	≤2	≤10	-	≤10
Σκυροδέματα	≤1	≤10	-	-
Σιδηροδρομικές γραμμές:				
Βάσεις έδρασης	1 ή 2	-	-	-
	Επιτρεπτές τιμές μπλε του μεθυλενίου ^(β)			
Ψυχρά ασφαλτομίγματα για μικρο-επιφανειακές στρώσεις		≤7, ή ≤8, ή ≤10		

α) Κατά Εγνατία Οδό Α.Ε., απόφαση 354/12/29.8.03

β) Σύμφωνα με προδιαγραφές άλλων χωρών

Βάσει του Γαλλικού προτύπου NF XP P 18-540 η τιμή μπλε του μεθυλενίου πρέπει να είναι μικρότερη από 1 για τη χρήση των αδρανών ως αδρανή σκυροδέματος (MB<1). Επιπλέον, ερευνητικά προγράμματα που διεξάχθηκαν στην Ελλάδα, καθορίζουν ότι η τιμή του δείκτη αυτού πρέπει να είναι χαμηλότερη από 1.2 (MB<1.2) [212]. Κατά συνέπεια, και από την τιμή του μπλε του μεθυλενίου οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι τα λεπτόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή δεν είναι κατάλληλα για παραγωγή σκυροδέματος.

Αντοχή σε θρυμματισμό

Η αντοχή σε θρυμματισμό των αδρανών υπολογίστηκε σύμφωνα με τη δοκιμή Los Angeles βάσει του προτύπου ASTM C131, αποκλειστικά για χονδρόκοκκα αδρανή με μέγιστο μέγεθος κόκκου μικρότερο από 37.5 mm (διερχόμενο από το κόσκινο 1 1/2). Το ποσοστό (L.A.) εκφράζει την αντοχή των αδρανών υλικών σε τριβή και κρούση, ενώ όσο μικρότερο είναι το ποσοστό αυτό, τόσο σκληρότερα και ανθεκτικότερα είναι τα αδρανή.

Κατά τη δοκιμή προσδιορίστηκε τιμή του δείκτη L.A. 43%. Η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή κατά ΚΤΣ-97 για χρήση ως αδρανή σκυροδέματος (L.A. <40%). Εντούτοις, την τιμή αυτή δεν μπορούμε να την

θεωρήσουμε απαγορευτική (τουλάχιστον σε πειραματικό στάδιο) γιατί αφενός η υπέρβαση του ορίου είναι μικρή (3%) και αφετέρου γιατί τα όρια αυτά έχουν καθοριστεί θραυστά ή/και φυσικά αδρανή, ενώ τα ανακυκλωμένα αδρανή χρήζουν διαφορετικής αντιμετώπισης. Αναμένεται ωστόσο, η χρήση των ανακυκλωμένων χονδρόκοκκων αδρανών, λόγω της μειωμένης αντοχής τους, να επηρεάσουν δυσμενώς την αντοχή του παραγόμενου σκυροδέματος.

Σε αντίθεση με τον ΚΤΣ-97 που ορίζει μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή για τον δείκτη Los Angeles, το πρότυπο EN12620 ορίζει κατηγορίες αδρανών βάσει του δείκτη αυτού, οι οποίες πρέπει να δηλώνονται προ της χρήσης των αδρανών για συγκεκριμένη χρήση. Εντούτοις, για τον προσδιορισμό του δείκτη Los Angeles ακολουθείται το πρότυπο EN 1097-2.

Ειδικό βάρος – Υδροαπορροφητικότητα

Ο προσδιορισμός του ειδικού βάρους και της υδροαπορροφητικότητας των ανακυκλωμένων αδρανών, πραγματοποιήθηκε για τα μεν χονδρόκοκκα αδρανή βάσει του αμερικανικού πρότυπου ASTM C127, για τα δε λεπτόκοκκα αδρανή βάσει του αμερικανικού πρότυπου ASTM C128. Για όλα τα κλάσματα ανακυκλωμένων αδρανών προσδιορίστηκαν τα: μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος κορεσμένου και επιφανειακά ξηρού υλικού (το οποίο απαιτείται για τη μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος), μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος και φαινόμενο ειδικό βάρος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 4.13.

Πίνακας 4.13 Ειδικό βάρος και υδροαπορροφητικότητα ανακυκλωμένων αδρανών.

Ιδιότητα	Ανακυκλωμένα Αδρανή			
	Λεπτόκοκκα	Χονδρόκοκκα		
	0 - 5 mm	6 - 11 mm	12 - 25 mm	26 - 55 mm
Υδροαπορροφητικότητα %	8,90	4,80	5,40	6,80
Μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος κορεσμένου και επιφανειακά στεγνού υλικού (tn/m ³)	2,25	2,44	2,39	2,34
Μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος (tn/m ³)	2,06	2,32	2,27	2,19
Φαινόμενο ειδικό βάρος (tn/m ³)	2,53	2,62	2,59	2,58

Τόσο ο ΚΤΣ-97 όσο και το πρότυπο EN 12620 δεν καθορίζουν ανώτερα ή κατώτερα επιτρεπόμενα όρια για το ειδικό βάρος και την υδροαπορροφητικότητα των αδρανών σκυροδέματος. Για το λόγο αυτό, αυτές οι ιδιότητες των ανακυκλωμένων αδρανών συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα των θραυστών αδρανών, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στον πίνακα 4.14.

Πίνακας 4.14 Ειδικό βάρος και υδροαπορροφητικότητα θραυστών αδρανών.

Ιδιότητα	Θραυστά Αδρανή		
	Λεπτόκοκκα	Χονδρόκοκκα	
	0 - 5 mm	6 – 9,5 mm	10 - 25 mm
Υδροαπορροφητικότητα %	2,60	1,35	1,40
Μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος κορεσμένου και επιφανειακά στεγνού υλικού (tn/m ³)	2,52	2,56	2,60
Μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος (tn/m ³)	2,46	2,53	2,56
Φαινόμενο ειδικό βάρος (tn/m ³)	2,62	2,62	2,66

Συγκρίνοντας τα χαρακτηριστικά των ανακυκλωμένων αδρανών με τα χαρακτηριστικά των θραυστών αδρανών αντίστοιχης κοκκομετρίας, παρατηρείται ότι τα ανακυκλωμένα αδρανή όλων των κλασμάτων παρουσιάζουν μικρότερο ειδικό βάρος. Η διαφορά αυτή είναι μικρή (σε ποσοστό 5% έως 10%) εντούτοις αναμένεται να επηρεάσει το ειδικό βάρος του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος (και τη μάζα των δοκιμών αυτών).

Όσον αφορά στην υδροαπορροφητικότητα οι τιμές των ανακυκλωμένων αδρανών είναι υψηλότερες και σχεδόν τετραπλάσιες από αυτές του αντίστοιχου κλάσματος θραυστών αδρανών. Η αυξημένη υδροαπορροφητικότητα των ανακυκλωμένων αδρανών πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό της μελέτης σύνθεσης σκυροδέματος. Αναμένεται τα ανακυκλωμένα αδρανή να απορροφήσουν περισσότερο νερό κατά την ανάμειξη, γεγονός που πρέπει να προβλεφθεί για να μην μειωθεί η συνάφεια στη διεπιφάνεια αδρανών τσιμεντόπαστας.

Ανθεκτικότητα σε αποσάθρωση (υγεία)

Η ανθεκτικότητα των αδρανών αφορά στη σταθερότητα του όγκου τους και τη μη απώλεια υλικού λόγω ύγρανσης, ξήρανσης, ψύξης – απόψυξης. Η ανθεκτικότητα προσδιορίζεται είτε με την επίδραση διαλυμάτων θεικών αλάτων (κατά ΚΤΣ-97 χρησιμοποιείται το NaSO₄ ή το MgSO₄ ενώ κατά EN12620 μόνο το MgSO₄) είτε με εναλλαγή σε κύκλους ψύξης - απόψυξης. Στην παρούσα έρευνα, η ανθεκτικότητα προσδιορίστηκε με επαναλαμβανόμενη εμβάπτιση σε κορεσμένα διαλύματα θεικού μαγνησίου (MgSO₄) που ακολουθείται από ξήρανση σε φούρνο, βάσει του αμερικανικού προτύπου AASHTO T 104.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών για κάθε κλάσμα αδρανών που ελέγχθηκε παρουσιάζονται στον πίνακα 4.15, ενώ παράλληλα γίνεται σύγκρισή τους με τα ανώτερα επιτρεπόμενα όρια, όπως αυτά ορίζονται από τον ΚΤΣ-97. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον ΚΤΣ-97, τα λεπτόκοκκα αδρανή δεν πρέπει να παρουσιάζουν απώλεια μάζας μεγαλύτερη από 10% και τα χονδρόκοκκα αδρανή μεγαλύτερη από

12%. Παρατηρείται ότι τα λεπτόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή, σε αντίθεση με τα χονδρόκοκκα, δεν πληρούν τις απαιτούμενες προδιαγραφές και κατά συνέπεια είναι ακατάλληλα για χρήση ως αδρανή σκυροδέματος.

Πίνακας 4.15 Ανθεκτικότητα σε αποσάθρωση ανακυκλωμένων αδρανών.

Κλάσμα	Αποτελέσματα δοκιμών %	Ανώτατα όρια βάσει ΚΤΣ-97 %
0mm - 5mm	19%	10%
6mm - 11mm	10%	12%
12mm - 25mm	9%	12%
26mm - 55mm	9%	12%

Το πρότυπο EN 12620 δεν ορίζει ανώτερα επιτρεπόμενα όρια αλλά κατηγοριοποιεί τα αδρανή βάσει της απώλειας μάζας στην δοκιμή υγείας με θειικό μαγνήσιο, η οποία πρέπει να είναι εντός των ορίων 0 - 35%. Εντούτοις, τα αποτελέσματα της δοκιμής που διεξάχθηκε δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατηγοριοποίηση των ανακυκλωμένων αδρανών βάσει του πρότυπου EN 12620, διότι απαιτείται η διεξαγωγή της δοκιμής βάσει του πρότυπου EN1744-1 το οποίο παρουσιάζει διαφορές πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε.

Χημικές ιδιότητες

Οι χημικές ιδιότητες προσδιορίστηκαν για όλα τα κλάσματα των ανακυκλωμένων αδρανών προ της επεξεργασίας τους για την απομάκρυνση των προσκολλημένων σε αυτά ακαθαρσιών. Ειδικότερα προσδιορίστηκαν βάσει του ευρωπαϊκού πρότυπου EN 1744-1 η περιεκτικότητα σε χλωριόντα και η περιεκτικότητα σε θειικά (ολικό θείο και ευδιάλυτων σε οξέα θεικών) και βάσει του EN 196-21 η περιεκτικότητα σε ανθρακικά άλατα.

Πίνακας 4.16 Χημικές ιδιότητες ανακυκλωμένων αδρανών χωρίς επεξεργασία.

Περιεκτικότητα σε (ποσοστό %)	Κλάσμα αδρανών			
	0-5mm	6-11mm	12-25mm	26-55mm
χλωριόντα	0,95	0,78	0,67	0,51
θειικά: ολικό θείο	0,15	0,12	0,07	0,12
θειικά: ευδιάλυτα σε οξέα	0,36	0,29	0,18	0,28
ανθρακικά	20,25	27,43	28,45	23,98

Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα των δοκιμών συγκρίθηκαν με τις απαιτήσεις του προτύπου EN 12620 το οποίο ορίζει ότι το ολικό θείο δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1% και τα θειικά ευδιάλυτα σε οξέα πρέπει να προσδιορίζονται και να δηλώνεται η σχετική κατηγορία στην οποία ανήκουν (Acid-soluble sulfate –AS) για ποσοστά 0-0,8%. Σχετικά με την παρουσία των χλωριόντων και των ανθρακικών δεν ορίζονται ανώτερα επιτρεπόμενα όρια, εντούτοις αναφέρεται ότι πρέπει να προσδιορίζεται το ποσοστό παρουσίας τους.

Παρατηρείται καταρχήν ότι το ολικό θείο είναι εντός ορίων για όλα τα κλάσματα ανακυκλωμένων αδρανών, ενώ βάσει των θεικών ευδιάλυτων σε οξέα όλα τα κλάσματα κατατάσσονται στην κατηγορία AS_{0,8} (θειικά σε ποσοστό <0,8%) με εξαίρεση το χαλίκι με διαστάσεις κόκκων 12-25mm που κατατάσσεται στην κατηγορία AS_{0,2} (θειικά σε ποσοστό <0,2%). Επιπλέον, τα χλωριόντα υπολογίστηκαν σε ποσοστό μικρότερο του 1% , για όλα τα κλάσματα των ανακυκλωμένων αδρανών και ως εκ τούτου δεν αναμένεται να έχουν αρνητική επίδραση στις ιδιότητες του παραγόμενου από αυτά σκυρόδεμα. Ολοκληρώνοντας παρατηρείται ότι το περιεχόμενο σε ανθρακικά άλατα κυμαίνεται μεταξύ 22 – 28%. Βάσει βιβλιογραφίας αναμένεται αδρανή με υψηλό περιεχόμενο ανθρακικών αλάτων να έχουν αυξημένη υδροαπορροφητικότητα και χαμηλότερο ειδικό βάρος [213], γεγονός που επιβεβαιώθηκε από την παρούσα ερεύνα.

Ποιοτική και ποσοτική στοιχειακή ανάλυση

Για τον προσδιορισμό της ποιοτικής και ποσοτικής στοιχειακής ανάλυσης των ανακυκλωμένων αδρανών χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος φασματοσκοπίας ακτίνων Χ φθορισμού (X-ray Fluorescence, XRF). Ο προσδιορισμός αυτός κρίθηκε απαραίτητος λόγω της ανομοιογένειας και της άγνωστης προέλευσης των ανακυκλωμένων αδρανών. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε για όλα τα κλάσματα αδρανών, πριν και μετά την επεξεργασία τους για την απομάκρυνση των προσκολλημένων σε αυτά ακαθαρσιών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους πίνακες 4.17 και 4.18.

Πίνακας 4.17 Στοιχειακή ανάλυση ανακυκλωμένων αδρανών χωρίς επεξεργασία.

Οξείδια (ποσοστό %)	Κλάσμα αδρανών			
	0-5mm	6-11mm	12-25mm	26-55mm
SiO ₂	44,24	23,32	22,01	29,97
Al ₂ O ₃	6,99	5,38	4,34	7,22
Fe ₂ O ₃	5,41	2,63	1,93	2,54
CaO	28,58	41,40	37,48	31,17
MgO	2,39	2,62	2,51	3,36
K ₂ O	0,85	0,66	0,57	0,78
Na ₂ O	0,80	0,91	0,96	1,38

Τα οξείδια τα οποία προσδιορίστηκαν είναι το διοξείδιο του πυριτίου (SiO₂), το οξείδιο του αργιλίου (Al₂O₃), το οξείδιο του σιδήρου (Fe₂O₃), το οξείδιο του ασβεστίου (CaO), το οξείδιο του μαγνησίου (MgO), οξείδιο του καλίου (K₂O) και το οξείδιο του νατρίου (Na₂O). Παρατηρείται ότι σε όλα τα κλάσματα των ανακυκλωμένων αδρανών υπάρχει αυξημένη παρουσία του διοξειδίου του πυριτίου και του οξειδίου του ασβεστίου. Επιπλέον, παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις παρουσιάζονται στα ανακυκλωμένα αδρανή πριν την επεξεργασία

τους. Αυτές οι αυξημένες συγκεντρώσεις πιθανόν να οφείλονται στο ξένο υλικό (χώμα) το οποίο βρίσκεται προσκολλημένο στα ανακυκλωμένα αδρανή.

Πίνακας 4.18 Στοιχειακή ανάλυση ανακυκλωμένων αδρανών με επεξεργασία.

Χημικό στοιχείο (ποσοστό %)	Κλάσμα αδρανών			
	0-5mm	6-11mm	12-25mm	26-55mm
SiO ₂	26,35	15,33	20,20	25,36
Al ₂ O ₃	4,38	2,74	3,51	5,25
Fe ₂ O ₃	2,79	1,49	1,68	2,42
CaO	20,89	32,96	35,41	28,29
MgO	2,28	2,43	2,29	2,07
K ₂ O	0,34	0,40	0,45	0,76
Na ₂ O	0,32	0,62	0,93	1,22

Αναφορικά με τις χημικές ενώσεις που συνθέτουν τα ανακυκλωμένα αδρανή, δεν πρέπει να περιέχονται ενώσεις οι οποίες επηρεάζουν δυσμενώς την πήξη, σκλήρυνση, αντοχή και σταθερότητα όγκου του σκυροδέματος, καθώς και την προστασία του οπλισμού από την διάβρωση.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, προβλήματα πιθανόν να δημιουργήσει το διοξείδιο του πυριτίου, το οποίο προσδιορίστηκε σε μεγάλο ποσοστό. Το διοξείδιο του πυριτίου, όπως και το οξείδιο του αργιλίου, δηλώνουν την παρουσία των τούβλων στα ανακυκλωμένα αδρανή [214]. Τα αδρανή τα οποία περιέχουν τη δραστική μορφή διοξειδίου του πυριτίου (άμορφη) δεν είναι αδρανή στο περιβάλλον ψηλού pH του σκυροδέματος, αλλά αντιδρούν με το υδροξείδιο του νατρίου και του καλίου που περιέχεται στην τσιμεντόπαστα. Αποτέλεσμα αυτής της αντίδρασης είναι η παραγωγή κολλοειδούς γέλης από πυριτικά αλκάλια γνωστής σαν αλκαλοπυριτικής γέλης, η οποία είναι δυνατόν λόγω διόγκωσης να οδηγήσει σε ρηγμάτωση των αδρανών και κατ' επέκταση του σκυροδέματος [215].

Επιπλέον, αρνητική επιρροή πιθανόν να έχει το υδροξείδιο του σιδήρου το οποίο εντούτοις παρουσιάζεται σε μικρή συγκέντρωση στα ανακυκλωμένα αδρανή για το λόγο ότι οι ενώσεις του σιδήρου ευθύνονται για την πρόκληση διόγκωσης και κηλίδων στο σκυρόδεμα [216]. Τέλος, η υψηλή περιεκτικότητα σε οξείδιο του ασβεστίου, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα ανακυκλωμένα αδρανή έχουν ασβεστολιθική προέλευση. Η προέλευση αυτή πιθανότατα αφορά στα αδρανή που περιέχονται στη μάζα των ανακυκλωμένων και αποτελούν προϊόντα εκσκαφών. Το οξείδιο του ασβεστίου πιθανόν να δημιουργήσει προβλήματα μόνο όταν είναι στη μορφή παιπάλης, διότι στην περίπτωση αυτή μειώνει το επίπεδο πρόσφυσης μεταξύ αδρανών και σκυροδέματος και δρα αρνητικά στην αντοχή του σκυροδέματος.

Τα υπόλοιπα στοιχεία τα οποία περιέχονται στα ανακυκλωμένα αδρανή δεν αναμένεται να έχουν δυσμενείς επιπτώσεις στο παραγόμενο με αυτά σκυρόδεμα, λόγω του μικρού ποσοστού παρουσίας τους.

4.2 Ανακυκλωμένο σκυρόδεμα

Τον έλεγχο των ιδιοτήτων των ανακυκλωμένων αδρανών σχετικά με την καταλληλότητά τους για χρήση ως αδρανή σκυροδέματος, ακολούθησε η παρασκευή δοκιμίων σκυροδέματος με μερική ή ολική αντικατάσταση των θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή και ο έλεγχος των ιδιοτήτων του νωπού ή/και του σκληρυμένου σκυροδέματος.

Για τη σύνθεση ανακυκλωμένου σκυροδέματος δεν χρησιμοποιήθηκαν τα λεπτόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή, διότι όπως προέκυψε από τον έλεγχο των ιδιοτήτων αυτών, είναι χαμηλής ποιότητας και κατά συνέπεια ακατάλληλα για χρήση στο σκυρόδεμα. Ειδικότερα, στο συμπέρασμα αυτό οδηγηθήκαμε λόγω των αποτελεσμάτων των δοκιμών ελέγχου της ποιότητας της άμμου: ισοδύναμο άμμου και μπλε του μεθυλενίου, καθώς και της δοκιμής ελέγχου της ανθεκτικότητας των αδρανών σε αποσάθρωση (υγεία), τα οποία ήταν εκτός των επιτρεπόμενων ορίων που καθορίζουν οι κανονισμοί για τα αδρανή σκυροδέματος.

Ως εκ τούτου, στις συνθέσεις σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά τα χονδρόκοκκα αδρανή. Για το λόγο ότι κατά τη συνήθη πρακτική, για τη παραγωγή σκυροδέματος, δεν χρησιμοποιούνται αδρανή με διάμετρο κόκκων μεγαλύτερη των 26mm, τα ανακυκλωμένα σκύρα δεν χρησιμοποιήθηκαν. Έτσι, για τη σύνθεση του ανακυκλωμένου σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν τα κλάσματα: ψηφίδα (6-11mm) και χαλίκι (12-25mm).

Για τη διερεύνηση της επίδρασης των ανακυκλωμένων αδρανών στις ιδιότητες του σκυροδέματος, όπως ήδη αναφέρθηκε πραγματοποιήθηκαν συνθέσεις ανακυκλωμένου σκυροδέματος με αντικατάσταση θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή. Η αντικατάσταση πραγματοποιήθηκε σε διαφορετικό κατά περίπτωση ποσοστό αντικατάστασης (μερική ή ολική). Στο σημείο αυτό, πρέπει να διευκρινιστεί ότι ο όρος «ποσοστό αντικατάστασης» θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή, αφορά στο σύνολο των αδρανών κατ' όγκο, ήτοι, για παράδειγμα σε ποσοστό 50% αντικατάστασης γίνεται συνολικά 50% αντικατάσταση χονδρόκοκκων αδρανών. Δηλαδή 50% αντικατάσταση της θραυστής ψηφίδας από ανακυκλωμένη και 50% αντικατάσταση του θραυστού χαλικιού από ανακυκλωμένο. Αντίστοιχα είναι τα ισχύοντα για τα λοιπά ποσοστά αντικατάστασης που ελέγχθηκαν.

Επιπλέον, κατά τη διεξαγωγή κάθε δοκιμής, παρασκευάζονταν δοκίμια από αποκλειστικά θραυστά αδρανή (σκυρόδεμα αναφοράς) για να πραγματοποιείται, μέσω της σύγκρισης με αυτά, έλεγχος της επιρροής των ανακυκλωμένων αδρανών στην εκάστοτε ελεγχόμενη ιδιότητα.

Για τις συνθέσεις σκυροδέματος, χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Portland II 42,5N, θραυστά αδρανή προερχόμενα από τοπικό λατομείο (λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα), ανακυκλωμένα αδρανή (χονδρόκοκκα) και υπερρευστοποιητής, με σκοπό την σύνθεση σκυροδέματος αντοχής C20/25. Για τον προσδιορισμό της μελέτης σύνθεσης σκυροδέματος κάθε μείγματος, ακολούθηθηκε η μέθοδος των απόλυτων όγκων σύμφωνα με τα οριζόμενα στο αμερικανικό πρότυπο ACI 211.1 (προσδιορισμός αναλογίας νερού, τσιμέντου, λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων αδρανών για την παρασκευή 1m³ συμπακνωμένου σκυροδέματος). Η απαιτούμενη

ποσότητα του νερού και της μάζας του κάθε αδρανούς στη σύνθεση, στηρίχτηκε στον προσδιορισμό της κοκκομετρικής ανάλυσης, της περιεκτικότητας σε παιπάλη, του ειδικού βάρους και της υδροαπορροφητικότητας λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων αδρανών, που πραγματοποιήθηκε σε προηγούμενο στάδιο.

Η διαδικασία της ανάμιξης κάθε σύνθεσης πραγματοποιήθηκε σε αναμκτήρα σκυροδέματος χωρητικότητας 100lt, το οποίο παρουσιάζεται στην εικόνα 4.4. Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές, είχαν ξηρανθεί προ της χρήσης τους σε φούρνο ούτως ώστε να μην έχουν καθόλου περιεχόμενη υγρασία και πριν την ανάμιξη είχαν αφεθεί εκτός αυτού μέχρι να αποκτήσουν θερμοκρασία δωματίου.



Εικόνα 4.4 Αναμκτήρας σκυροδέματος χωρητικότητας 100lt.

Ειδικότερα, η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την ανάμιξη ήταν η ακόλουθη:

- α) τοποθέτηση χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων αδρανών (θραυστών και ανακυκλωμένων) στον αναμκτήρα και ανάδευση αυτών για δύο (2) λεπτά,
- β) προσθήκη της ποσότητας νερού που απαιτείται για τον κορεσμό των αδρανών (ώστε να είναι κορεσμένα και επιφανειακά στεγνά) και ανάδευση αυτών για δύο (2) λεπτά,
- γ) παραμονή πέντε (5) λεπτών των αδρανών σε ηρεμία εντός του αναμκτήρα (χωρίς ανάδευση),
- δ) μετά το πέρας των πέντε (5) λεπτών ηρεμίας, ανάδευση των αδρανών για τρία (3) λεπτά,
- ε) προσθήκη του τσιμέντου, της υπόλοιπης ποσότητας νερού (απαιτούμενη για την ενυδάτωση του τσιμέντου) και του υπερρευστοποιητή. Ανάδευση του μείγματος για δύο (2) λεπτά μέχρι να ομογενοποιηθεί. Η χρονική στιγμή που έρχεται σε επαφή το νερό και το τσιμέντο θεωρείται η χρονική στιγμή $t=0$ και από εκείνη την στιγμή υπολογίζεται πλέον η ηλικία του σκυροδέματός.

Τη σύνθεση του μείγματος ακολουθούσε η επιλογή αντιπροσωπευτικού και κατάλληλου μεγέθους δείγματος, βάσει είτε του ευρωπαϊκού πρότυπου EN 12350-1 είτε του αμερικάνικου ASTM C172, για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του νωπού σκυροδέματος. Η επιλογή του πρότυπου δειγματοληψίας νωπού σκυροδέματος

εξαρτήθηκε από τις απαιτήσεις του εκάστοτε προτύπου για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του νωπού σκυροδέματος. Οι ιδιότητες που ελέγχθηκαν κατά περίπτωση ήταν:

- η εργασιμότητα, μέσω της δοκιμής κάθισης (βάσει του ASTM C143)
- η εργασιμότητα, μέσω της δοκιμής εξάπλωσης (βάσει του EN12350-5)
- η πυκνότητα νωπού σκυροδέματος (βάσει του EN 12350-6) και
- ο περιεχόμενος αέρας σε ποσοστό % (βάσει του ASTM C231).

Για τη διεξαγωγή όλων των δοκιμών, ο εξοπλισμός εργαστηρίου που χρησιμοποιήθηκε ήταν πιστοποιημένος και σύμφωνα με τις προδιαγραφές που όριζε το εκάστοτε πρότυπο.

Την διεξαγωγή των δοκιμών ελέγχου του νωπού σκυροδέματος ακολούθησε η έγχυση του μείγματος σε καλούπια (μήτρες) από χυτοσίδηρο, πιστοποιημένα βάσει του πρότυπου EN 12390-1. Οι διαστάσεις των δοκιμίων τα οποία παρασκευάζονταν ανά δοκιμή καθορίζονταν από το πρότυπο που ακολουθήθηκε. Την χύτευση των δοκιμίων ακολουθούσε η δόνησή τους σε τράπεζα δόνησης (εικόνα 4.5) κατά τα οριζόμενα στο πρότυπο EN 12390-2. Κατά τη διαδικασία της δόνησης απαιτήθηκε ιδιαίτερη προσοχή, διότι παρατεταμένη δόνηση του σκυροδέματος μπορεί να προκαλέσει το διαχωρισμό του μείγματος σε στρώματα δηλαδή την απόμιξή του.



Εικόνα 4.5 Τράπεζα δόνησης και καλούπια σκυροδέματος.

Μετά την σκυροδέτηση, τα δοκίμια παρέμεναν στα καλούπια για 24 περίπου ώρες, σε θερμοκρασία $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ανεξάρτητα από την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος. Μετά το πέρας των 24 ωρών, τα σκληρυμένα δοκίμια αφαιρούνταν από τα καλούπια και τοποθετούνταν σε ειδικές δεξαμενές με νερό σε θερμοκρασία $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ έως τη χρονική στιγμή διεξαγωγής των πειραμάτων (7 ή 28 ημέρες). Στις δεξαμενές αυτές εκτός από νερό περιέχονταν και υδροξείδιο του ασβεστίου σε συγκεκριμένη αναλογία κατ' όγκον, έτσι ώστε να αποτραπεί η έκπλυση υδροξειδίου του ασβεστίου από τα δοκίμια σκυροδέματος κατά τη διάρκεια της συντήρησής τους (σύμφωνα με τα οριζόμενα στο πρότυπο ASTM C511).

Οι ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος που ελέγχθηκαν ήταν:

- η πυκνότητα (βάσει του EN 12390-7),

- η θλιπτική αντοχή (βάσει του EN 12390-3)
- η καμπτική αντοχή (βάσει του EN 12390-5)
- η ταχύτητα υπερήχων και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (βάσει του ASTM C597)
- η ηλεκτρική αγωγιμότητα
- οι θερμικές ιδιότητες
- η πετρογραφική ανάλυση του σκυροδέματος (βάσει του ASTM C856)
- η διαπερατότητα χλωριόντων (βάσει του ASTM C1202)
- η ανθεκτικότητα σε θειικά ιόντα.

Οι ιδιότητες αυτές δεν ελέγχθηκαν σε όλα τα στάδια της παρούσας έρευνας, αλλά επιλέχθηκαν κάθε φορά, μόνο εκείνες οι οποίες εξυπηρετούσαν τον επιδιωκόμενο ανά στάδιο στόχο.

4.2.1 Διερεύνηση αναγκαιότητας επεξεργασίας των ανακυκλωμένων αδρανών

Τα ανακυκλωμένα αδρανή τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, προέρχονται από απόβλητα εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων. Η εταιρεία η οποία διαχειρίζεται τα ανακυκλωμένα αυτά αδρανή, προ της διάθεσής τους στους τελικούς καταναλωτές, τα αποθηκεύει σε εξωτερικό, μη στεγασμένο χώρο. Ως αποτέλεσμα, στην εξωτερική επιφάνεια των ανακυκλωμένων αδρανών βρίσκονται προσκολλημένες ξένες ύλες - ακαθαρσίες (κυρίως χώμα), προερχόμενες από το χώρο των εγκαταστάσεων.

Στο στάδιο αυτό της πειραματικής διαδικασίας διερευνήθηκε η επίδραση αυτών των ξένων υλών στις ιδιότητες του νωπού και του σκληρυμένου σκυροδέματος. Σκοπός ήταν η διαπίστωση, εάν απαιτείται, προ της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών, επεξεργασία τους για την απομάκρυνση αυτών των ακαθαρσιών. Λόγω της φύσης του προσκολλημένου υλικού και για το λόγο ότι βρισκόταν προσκολλημένο στην εξωτερική επιφάνεια των ανακυκλωμένων αδρανών, για την απομάκρυνσή του αρκούσε η χειρωνακτική πλύση των ανακυκλωμένων αδρανών με τη χρήση νερού υπό πίεση.

Για τη διερεύνηση αυτή, μελετήθηκαν δοκίμια από τρεις διαφορετικές συνθέσεις σκυροδέματος. Η πρώτη σύνθεση αποτελούνταν αποκλειστικά από θραυστά αδρανή (σκυρόδεμα αναφοράς), η δεύτερη αποκλειστικά από ανακυκλωμένα αδρανή χωρίς επεξεργασία και η τρίτη αποκλειστικά από ανακυκλωμένα αδρανή κατόπιν επεξεργασίας, ήτοι συνθέσεις με ποσοστά αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή: 0%, 100% - με επεξεργασία και 100% - χωρίς επεξεργασία.

Στο σύνολο των συνθέσεων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Portland II 42,5N, ικανό να προσδώσει στο σκυρόδεμα υψηλές αντοχές και ρευστότητα μεγάλης διάρκειας, υπερρευστοποιητής GLENIUM C347 της εταιρείας BASF, θραυστά αδρανή από τοπικό λατομείο (λεπτόκοκκα – χονδρόκοκκα) και ανακυκλωμένα αδρανή, από την Ανακύκλωση Αδρανών Μακεδονίας. Για λόγους που έχουν

ανωτέρω αναλυθεί, στις συνθέσεις σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν μόνο χονδρόκοκκα κλάσματα ανακυκλωμένων αδρανών.

Σε όλες τις συνθέσεις διατηρήθηκαν σταθερά: η ποσότητα του τσιμέντου, του υπερρευστοποιητή, των λεπτόκοκκων αδρανών και ο ενεργός λόγος νερού προς τσιμέντο (N/T). Συγκεκριμένα, ο ενεργός λόγος νερού προς τσιμέντο ισούταν με 0,55 ενώ ο ολικός λόγος νερού προς τσιμέντο κυμάνθηκε σε ένα εύρος τιμών μεταξύ 0,68 και 1,22 (πίνακας 4.19).

Πίνακας 4.19 Ενεργός και ολικός λόγος νερού προς τσιμέντο ανά σύνθεση.

Λόγος N/T	Ποσοστό αντικατάστασης		
	0%	100% (με επεξεργασία)	100% (χωρίς επεξεργασία)
ολικός	0,68	0,80	1,22
ενεργός	0,55	0,55	0,55

Για τη μελέτη σύνθεσης αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των ιδιοτήτων των ανακυκλωμένων αδρανών, όπως αυτά είχαν υπολογιστεί σε προγενέστερο στάδιο. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν οι: κοκκομετρική ανάλυση, περιεκτικότητα παιπάλης, ειδικό βάρος και υδροαπορροφητικότητα των θραυστών και ανακυκλωμένων αδρανών. Όπως αναλύθηκε ήδη, η επεξεργασία των ανακυκλωμένων αδρανών είχε επίδραση στην κοκκομετρική διαβάθμισή τους και λήφθηκε υπόψη κατά το σχεδιασμό των συνθέσεων. Όσον αφορά στο ειδικό βάρος, για τις συνθέσεις απαιτούνταν το μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος κορεσμένου και επιφανειακά στεγνού υλικού. Όπου αναφέρεται ακολούθως ο όρος ειδικό βάρος, εννοείται το μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος κορεσμένου και επιφανειακά στεγνού υλικού.

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτήθηκε εντούτοις για τον προσδιορισμό της υδροαπορροφητικότητας και του ειδικού βάρους των ανακυκλωμένων αδρανών που δεν έχουν υποστεί επεξεργασία. Ο λόγος είναι ότι το πρότυπο ASTM C127 που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων αυτών, απαιτεί την πλύση των αδρανών στο κόσκινο No4 και κατά συνέπεια οι ξένες ύλες που είναι προσκολλημένες στα αδρανή απομακρύνονται. Επομένως, ακολουθώντας το πρότυπο αυτό, υπάρχει δυνατότητα προσδιορισμού της υδροαπορροφητικότητας μόνο των επεξεργασμένων ανακυκλωμένων αδρανών, ενώ για τα μη επεξεργασμένα έπρεπε να ακολουθηθεί άλλη μεθοδολογία.

Για τον προσδιορισμό της υδροαπορροφητικότητας των μη επεξεργασμένων ανακυκλωμένων αδρανών βασιστήκαμε στο γεγονός ότι αφού οι συνθέσεις σκυροδέματος είναι όμοιες, θα πρέπει η εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος για επεξεργασμένα και μη επεξεργασμένα ανακυκλωμένα αδρανή να είναι ίση. Κατά συνέπεια, η υδροαπορροφητικότητα προσδιορίστηκε έμμεσα, με την προσθήκη του απαιτούμενου νερού στην ανάμιξη έως ότου η κάθιση να είναι ίση με την αναμενόμενη. Ο συνολικός όγκος νερού που απαιτήθηκε, σημειώθηκε και βάσει αυτού προσδιορίστηκε η υδροαπορροφητικότητα του κάθε κλάσματος. Στον πίνακα 4.20 παρουσιάζονται το ειδικό βάρος και η υδροαπορροφητικότητα των ανακυκλωμένων αδρανών.

Πίνακας 4.20 Ειδικό βάρος και υδροαπορροφητικότητα των ανακυκλωμένων αδρανών.

Αδρανή	Ειδικό βάρος (tn/m^3)	Υδροαπορροφητικότητα (%)
άμμος θραυστή (0-5mm)	2,52	2,60
ψηφίδα θραυστή (6-9,5mm)	2,56	1,35
ψηφίδα ανακυκλωμένη επεξεργασμένη (6-11mm)	2,44	4,80
ψηφίδα ανακυκλωμένη μη επεξεργασμένη (6-11mm)	2,44	26,90
χαλίκι θραυστό (10-25mm)	2,60	1,40
χαλίκι ανακυκλωμένο επεξεργασμένο (12-25mm)	2,39	5,40
χαλίκι ανακυκλωμένο μη επεξεργασμένο (12-25mm)	2,39	14,70

Τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των αδρανών, ακολούθησε η μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις και εν συνεχεία η διαδικασία της ανάμιξης και εκτέλεσης των δοκιμών νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος. Οι αναλογίες του αναμίγματος για κάθε σύνθεση κατά μέρη βάρους kg/m^3 παρουσιάζονται στον πίνακα 4.21.

Πίνακας 4.21 Αναλογίες αναμιγμάτων.

Υλικά παρασκευής	Ποσοστό αντικατάστασης		
	0%	100% (με επεξεργασία)	100% (χωρίς επεξεργασία)
τσιμέντο	280	280	280
νερό	191	223	341
υπερρευστοποιητής	2	2	2
άμμος θραυστή	913	913	913
ψηφίδα θραυστή	287	0	0
ψηφίδα ανακυκλωμένη (επεξεργασμένη)	0	0	274
ψηφίδα ανακυκλωμένη (μη επεξεργασμένη)	0	274	0
χαλίκι θραυστό	662	0	0
χαλίκι ανακυκλωμένο (επεξεργασμένο)	0	0	608
χαλίκι ανακυκλωμένο (μη επεξεργασμένο)	0	608	0

Οι ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος που προσδιορίστηκαν ήταν η εργασιμότητα μέσω της δοκιμής της κάθισης, η πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος και η περιεκτικότητα σε αέρα. Η διερεύνηση της επιρροής των ξένων υλών στο παραγόμενο σκυρόδεμα προσδιορίστηκε μέσω της επίδρασης στην θλιπτική αντοχή του σκληρυμένου σκυροδέματος, σε δοκίμια ηλικίας 7 και 28 ημερών.

Για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής απαιτήθηκε η χύτευση κυβικών δοκιμίων διαστάσεων 150x150x150mm. Για την διεξαγωγή της δοκιμής θλίψης χρησιμοποιήθηκε η υδραυλική μηχανή Toni Technik με μέγιστο φορτίο 3000kN (εικόνα 4.6).



Εικόνα 4.6 Υδραυλική μηχανή Toni Technik για τον έλεγχο της θλιπτικής αντοχής.

Οι δοκιμές θλίψης πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τις προδιαγραφές του πρότυπου EN 12390-3 και η ταχύτητα της δοκιμής ήταν 0,50 MPa/s. Ο έλεγχος για όλα τα κυβικά δοκίμια πραγματοποιήθηκε κάθετα προς τη διεύθυνση της έγχυσης (όταν παρασκευάζονται οι κύβοι), ενώ στο τέλος του ελέγχου, εκτιμήθηκε ο τύπος της θραύσης και το αποτέλεσμα έγινε δεκτό εφόσον ο τύπος της θραύσης δεν ήταν ασυνήθιστος (εικόνα 4.7).



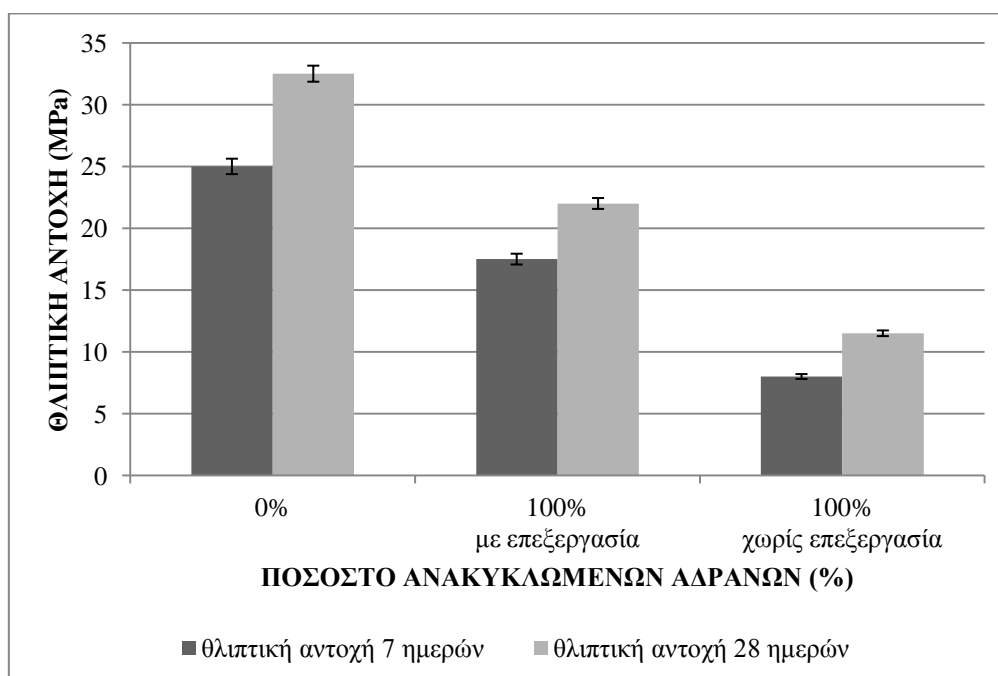
Εικόνα 4.7 Δοκίμιο μετά τη δοκιμή θλιπτικής αντοχής (δύο όψεις).

Τα αποτελέσματα των δοκιμών που διεξάχθηκαν σε αυτό το στάδιο της πειραματικής διαδικασίας παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 4.22. Οι δοκιμές νωπού σκυροδέματος πραγματοποιήθηκαν μία φορά για κάθε σύνθεση, σύμφωνα με τη συνήθη πρακτική, ενώ για την εξέταση της θλιπτικής αντοχής ελέγχθηκαν για κάθε σύνθεση και κάθε ηλικία τρία κυβικά δοκίμια και υπολογίστηκε ο μέσος όρος της θλιπτικής αντοχής αυτών.

Πίνακας 4.22 Αποτελέσματα δοκιμών.

Ιδιότητα	Ποσοστό αντικατάστασης		
	0%	100% (με επεξεργασία)	100% (χωρίς επεξεργασία)
εργασιμότητα μέσω κάθισης (cm)	22,00	19,50	20,10
περιεκτικότητα σε αέρα (%)	1,80	2,00	1,90
πυκνότητα νωπού σκυροδέματος (Kg/m ³)	2420	2220	2090
θλιπτική αντοχή 7 ημερών (MPa)	25,00	17,50	8,00
θλιπτική αντοχή 28 ημερών (MPa)	32,50	22,00	11,50

Παρατηρήθηκε ότι όσον αφορά στις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος (εργασιμότητα, περιεκτικότητα αέρα και πυκνότητα), δεν υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις, γεγονός το οποίο αναμενόταν αφού η μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος παρουσιάζει τα ίδια γενικά χαρακτηριστικά και στις τρεις περιπτώσεις. Εντούτοις, η εργασιμότητα παρουσιάζεται μειωμένη κατά 1,5 cm (11,40%) όταν χρησιμοποιούνται τα επεξεργασμένα ανακυκλωμένα αδρανή, γεγονός το οποίο οφείλεται πιθανότατα στο σχήμα των ανακυκλωμένων αδρανών, τα οποία είναι γωνιώδη και έχουν υψηλό δείκτη πλακοειδούς.

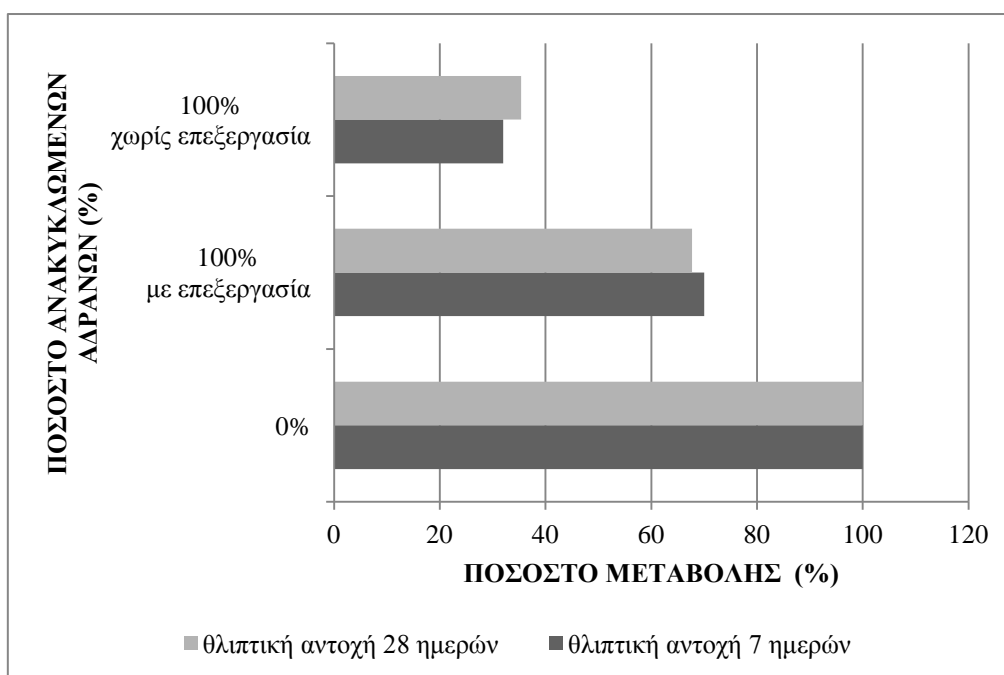


Διάγραμμα 4.6 Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής 7 και 28 ημερών.

Επιπλέον, παρατηρείται ότι η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών οδηγεί στη σύνθεση σκυροδέματος με μειωμένη πυκνότητα στη νωπή φάση (σε ποσοστό περί το 8%). Με δεδομένο ότι η πυκνότητα εξαρτάται από την αναλογία ανάμιξης

των πρώτων υλών του, τον περιεχόμενο αέρα και τα ειδικά βάρη των αδρανών, η μείωση αυτή οφείλεται στο χαμηλότερο ειδικό βάρος των ανακυκλωμένων αδρανών.

Αναφορικά με τη θλιπτική αντοχή παρατηρείται ότι η χρήση τόσο των επεξεργασμένων όσο και των μη επεξεργασμένων ανακυκλωμένων αδρανών οδηγεί σε μείωση αυτής, για οποιαδήποτε ηλικία δοκιμίων. Εντούτοις, διαπιστώνουμε ότι η μείωση της θλιπτικής αντοχής για την περίπτωση χρήσης των μη επεξεργασμένων ανακυκλωμένων αδρανών είναι πολύ μεγαλύτερη, σε ποσοστό σχεδόν διπλάσιο από αυτό για την περίπτωση χρήσης επεξεργασμένων ανακυκλωμένων αδρανών. Αναλυτικά τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής παρουσιάζονται στα διαγράμματα 4.6 και 4.7.



Διάγραμμα 4.7 Ποσοστό μείωσης της θλιπτικής αντοχής συγκριτικά με το σκυρόδεμα αναφοράς για δοκίμια ηλικίας 7 και 28 ημερών.

Συγκρίνοντας τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος αναφοράς (ποσοστό αντικατάστασης 0%) με τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος από μη επεξεργασμένα ανακυκλωμένα αδρανή, διαπιστώνουμε ότι η χρήση τους οδηγεί σε μείωση της θλιπτικής αντοχής σε ποσοστό 68% και 65% για δοκίμια ηλικίας 7 και 28 ημερών αντίστοιχα. Αντίστοιχα, συγκρίνοντας τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος αναφοράς με τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος από επεξεργασμένα ανακυκλωμένα αδρανή, διαπιστώνουμε ότι η χρήση τους οδηγεί σε μείωση της θλιπτικής αντοχής σε ποσοστό 30% και 32% για δοκίμια ηλικίας 7 και 28 ημερών αντίστοιχα, ήτοι σχεδόν στο μισό.

Κατά συνέπεια, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι τη χρήση ανακυκλωμένων αδρανών στο σκυρόδεμα πρέπει να προηγηθεί η κατάλληλη επεξεργασία τους για την απομάκρυνση των ακαθαρσιών που βρίσκονται προσκολλημένες σε αυτά. Αναφορικά με την καταλληλότητα της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών για την σύνθεση σκυροδέματος, παρατηρείται μεν μείωση της αντοχής του παραγόμενου υλικού, εντούτοις το παραγόμενο σκυρόδεμα αντιστοιχεί σε κατηγορία σκυροδέματος C16/20

που θα μπορούσε να αξιοποιηθεί σε κατασκευές με μειωμένες απαιτήσεις αντοχής. Φυσικά, η καταλληλότητα των ανακυκλωμένων αδρανών απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση.

4.2.2 Διατήρηση εργασιμότητας

Σε περιπτώσεις εφαρμογών σκυροδέτησης όπου απαιτείται η μεταφορά έτοιμου σκυροδέματος σε μεγάλες αποστάσεις, σε περιπτώσεις σκυροδέτησης υπό υψηλές θερμοκρασίες ή όπου είναι επιθυμητή η αποφυγή αρμών εργασίας κατά τη σκυροδέτηση, επιβάλλεται να λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα, ώστε να επιβραδύνεται η πήξη του σκυροδέματος και να διατηρείται η εργασιμότητά του. Συνήθως, στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιείται το κατάλληλο πρόσμικτο. Εντούτοις, είναι ιδιαίτερα σημαντικό το μείγμα του σκυροδέματος να διατηρεί το εργάσιμό του για κάποιο επαρκές χρονικό διάστημα. Επιπλέον, ο συνολικός χρόνος μεταξύ του χρόνου φόρτωσης και του χρόνου πέρατος εκφόρτωσης, προτείνεται να μην υπερβαίνει την 1 ώρα και 30 λεπτά ή 1 ώρα και 50 λεπτά, εάν έχει προστεθεί επιβραδυντικό [217].

Για το λόγο ότι η διατήρηση της εργασιμότητας αποτελεί μία επιθυμητή ιδιότητα του σκυροδέματος, στο παρόν στάδιο της πειραματικής διαδικασίας ελέγχθηκε η επίδραση της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών στη διατήρηση της εργασιμότητας του σκυροδέματος.

Για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκαν τρεις διαφορετικές συνθέσεις σκυροδέματος. Η πρώτη σύνθεση αποτελούνταν αποκλειστικά από θραυστά αδρανή (100% θραυστά αδρανή), η δεύτερη σύνθεση από μείγμα θραυστών και ανακυκλωμένων αδρανών (50% θραυστά αδρανή και 50% ανακυκλωμένα αδρανή) και η τρίτη αποκλειστικά από ανακυκλωμένα αδρανή (100% ανακυκλωμένα αδρανή), ήτοι τρεις συνθέσεις με ποσοστά αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή: 0%, 50% και 100%.

Στο σύνολο των συνθέσεων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Portland II 42,5N, υπερρευστοποιητής GLENIUM C347 της εταιρείας BASF, θραυστά αδρανή από τοπικό λατομείο (λεπτόκοκκα – χονδρόκοκκα) και ανακυκλωμένα αδρανή, από την Ανακύκλωση Αδρανών Μακεδονίας. Για λόγους που έχουν αναλυθεί ήδη, στις συνθέσεις σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν μόνο χονδρόκοκκα κλάσματα ανακυκλωμένων αδρανών, τα οποία προηγούμενων είχαν υποστεί επεξεργασία (πλύση με νερό υπό πίεση) για την απομάκρυνση από αυτά ακαθαρσιών οι οποίες βρίσκονται προσκολλημένες στην εξωτερική επιφάνεια των αδρανών. Στον πίνακα 4.23 περιγράφονται οι αναλογίες του αναμίγματος για κάθε μια από τις τρεις συνθέσεις, κατά μέρη βάρους kg/m^3 .

Όπως διακρίνεται από τα δεδομένα του πίνακα 4.23, σε όλες τις συνθέσεις διατηρήθηκαν σταθερά: η ποσότητα του τσιμέντου, του υπερρευστοποιητή, των λεπτόκοκκων αδρανών και ο ενεργός λόγος νερού προς τσιμέντο (N/T), ο οποίος ήταν ίσος με 0,55. Για τον καθορισμό της κάθε μελέτης σύνθεσης αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των ιδιοτήτων των ανακυκλωμένων και θραυστών αδρανών, όπως αυτά υπολογίστηκαν σε προγενέστερο στάδιο.

Πίνακας 4.23 Αναλογίες αναμιγμάτων.

Υλικά παρασκευής	Ποσοστό αντικατάστασης		
	0%	50%	100%
τσιμέντο	280	280	280
νερό	191	208	341
υπερρευστοποιητής	2	2	2
άμμος θραυστή	913	913	913
ψηφίδα θραυστή	287	137	0
ψηφίδα ανακυκλωμένη	0	144	274
χαλίκι θραυστό	662	331	0
χαλίκι ανακυκλωμένο	0	304	608
ενεργός λόγος N/T	0,55	0,55	0,55
ολικός λόγος N/T	0,68	0,74	0,80

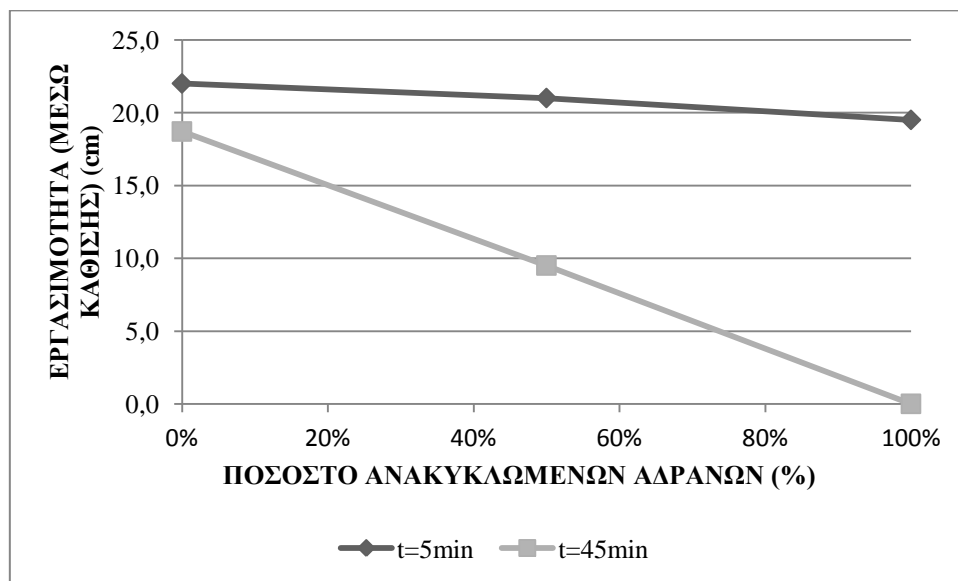
Για τον έλεγχο της διατήρησης της εργασιμότητας των μειγμάτων, πραγματοποιήθηκε κατόπιν της ανάμιξης, έλεγχος της εργασιμότητας του νωπού σκυροδέματος σε δύο χρονικές στιγμές. Η εργασιμότητα προσδιορίστηκε μέσω της δοκιμής της κάθισης, βάσει του ASTM C143. Η πρώτη δοκιμή κάθισης πραγματοποιήθηκε 5 λεπτά μετά από την χρονική στιγμή ($t = 0 \text{ min}$) της επαφής του νερού με το τσιμέντο κατά τη διάρκεια της ανάμιξης (χρονική στιγμή $t=5\text{min}$) και η δεύτερη δοκιμή κάθισης πραγματοποιήθηκε 45 λεπτά μετά από την χρονική στιγμή $t = 0 \text{ min}$ (χρονική στιγμή $t=45\text{min}$). Μετά την πραγματοποίηση της πρώτης δοκιμής, το σκυρόδεμα επανατοποθετείται στον αναμικτήρα, αναδεύεται για ένα λεπτό και αφήνεται σε ηρεμία έως την πραγματοποίηση της δεύτερης δοκιμής. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών παρουσιάζονται στον πίνακα 4.24 και στα διαγράμματα 4.8 και 4.9.

Πίνακας 4.24 Αποτελέσματα δοκιμών.

Ιδιότητα	Ποσοστό αντικατάστασης		
	0%	50%	100%
εργασιμότητα μέσω κάθισης (cm) $t=5\text{min}$	22,0	21,0	19,5
εργασιμότητα μέσω κάθισης (cm) $t=45\text{min}$	18,7	9,5	0,0

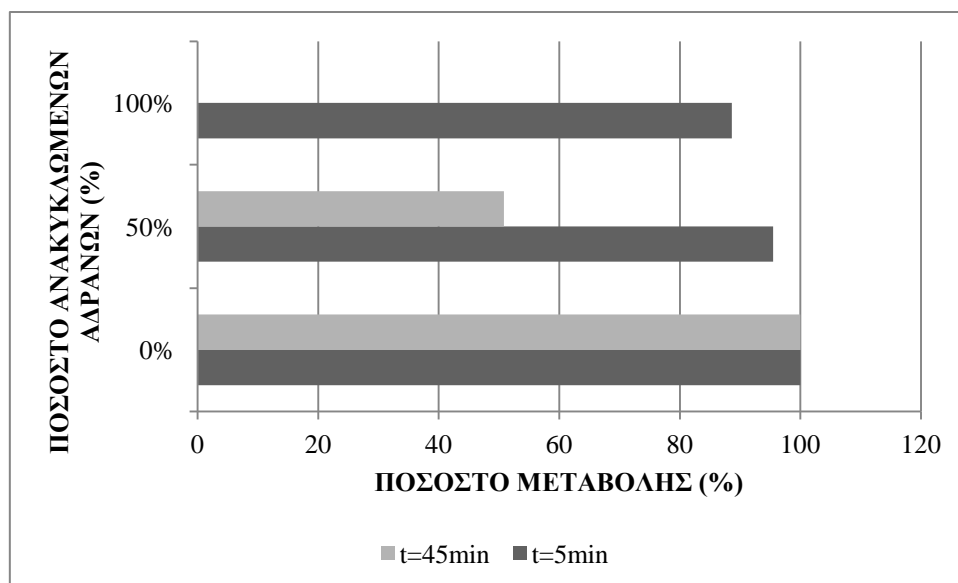
Από τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών, παρατηρούμε αρχικά ότι η εργασιμότητα, αμέσως μετά την ανάμιξη, μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών στο μείγμα του σκυροδέματος. Αναλυτικότερα, για ποσοστό αντικατάστασης 50% η εργασιμότητα μειώνεται κατά 1,0cm (ποσοστό 5%) και για ποσοστό αντικατάστασης 100% παρουσιάζεται μείωση 1,5cm (ποσοστό 11%). Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, η μείωση αυτή δικαιολογείται από το σχήμα των ανακυκλωμένων αδρανών, το οποίο

είναι γωνιώδες καθώς και τον υψηλότερο δείκτη πλακοειδούς, λόγω της παρουσίας των κεραμιδιών και των κεραμικών πλακιδίων.



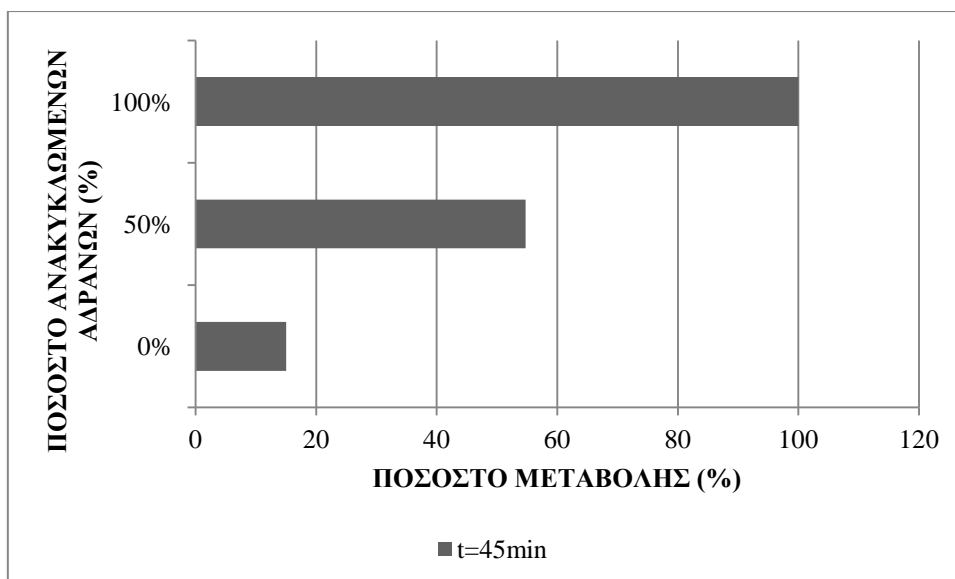
Διάγραμμα 4.8 Αποτελέσματα εργασιμότητας για τις χρονικές στιγμές t=5min και t=45 min.

Αναφορικά με τη διατήρηση της εργασιμότητας, για χρονικό διάστημα 45 min από την ανάμιξη, παρατηρείται ότι η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών οδηγεί σε σημαντική μείωση αυτής και συγκεκριμένα η μείωση είναι ανάλογη της αύξησης του ποσοστού αντικατάστασης των θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή.



Διάγραμμα 4.9 Ποσοστό μείωσης της εργασιμότητας συγκριτικά με το σκυρόδεμα αναφοράς για τις χρονικές στιγμές t=5min και t=45 min.

Ειδικότερα, συγκρινόμενο με την εργασιμότητα του σκυροδέματος αναφοράς για τη χρονική στιγμή t=45min, για ποσοστό αντικατάστασης 50% η εργασιμότητα μειώνεται κατά 9,2cm (ποσοστό 49%) και για ποσοστό αντικατάστασης 100% παρουσιάζεται μείωση 18,7cm (ποσοστό 100%).



Διάγραμμα 4.10 Ποσοστό μείωσης της εργασιμότητας μετά από 45 min συγκριτικά με την εργασιμότητα κάθε ποσοστού αντικατάστασης για t=5min.

Επιπλέον, αναφορικά με τη διατήρηση της εργασιμότητας για την κάθε σύνθεση ξεχωριστά παρατηρούνται τα ακόλουθα (διάγραμμα 4.10):

- Για τη σύνθεση με τη χρήση αποκλειστικά θραυστών αδρανών (ποσοστό αντικατάστασης 0%), η εργασιμότητα, μετρούμενη μέσω της κάθισης, σε χρονικό διάστημα 45 λεπτών μειώνεται από 22,0cm σε 18,7cm, ήτοι σε ποσοστό 15%.
- Για την σύνθεση με ποσοστό αντικατάστασης 50%, η εργασιμότητα (μέσω της κάθισης) μειώνεται κατά 11,50 cm, ήτοι σε ποσοστό 55%.
- Για την σύνθεση με αποκλειστικά ανακυκλωμένα αδρανή, η εργασιμότητα μηδενίζεται (η κάθιση ισούται με 0cm), κατά συνέπεια έχουμε απώλεια εργασιμότητας 100%.

Τα αποτελέσματα αυτά υποδηλώνουν ότι η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών για την παραγωγή σκυροδέματος, οδηγεί στην παραγωγή μείγματος με ασυνήθιστα μεγάλη απώλεια εργασιμότητας (κάθισης). Επιπλέον, η απώλεια της εργασιμότητας είναι ανάλογη του ποσοστού αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή. Κατά συνέπεια, στην περίπτωση που τα ανακυκλωμένα αδρανή χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή σκυροδέματος, πρέπει να ληφθεί ιδιαίτερη μέριμνα κατά την αξιοποίησή του ούτως ώστε να ξεπεραστούν τα προβλήματα κατά την μεταφορά, τοποθέτηση και συμπύκνωσή του.

Για το λόγο ότι οι τρεις συνθέσεις σκυροδέματος έχουν τα ίδια γενικά χαρακτηριστικά (ποιότητα και ποσότητα τσιμέντου, ενεργό λόγο νερού προς τσιμέντο, θραυστή άμμο), μπορούμε να οδηγηθούμε στο συμπέρασμα ότι αιτία της απώλειας εργασιμότητας είναι η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών. Σημαντικό ρόλο σε αυτό παίζει η μεγάλη υδροαπορροφητικότητά τους αλλά και η ανομοιομορφία τους και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά αυτών.

4.2.3 Διαπερατότητα χλωριόντων – Δοκιμή PROOVE'it©

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει όσον αφορά στις ιδιότητες του σκυροδέματος η ανθεκτικότητά του, όπως έχει παρουσιαστεί αναλυτικά στο θεωρητικό υπόβαθρο της παρούσας έρευνας. Όταν αναφερόμαστε στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, σημαντική είναι η προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση για την περίπτωση του οπλισμένου σκυροδέματος, που είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο στη χώρα μας. Στην προστασία του οπλισμού σπουδαίο ρόλο έχει η διάβρωσή του λόγω της παρουσίας χλωριόντων, τα οποία προέρχονται συνήθως από το εξωτερικό περιβάλλον. Κατά συνέπεια, ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαπερατότητα των χλωριόντων στο σκληρυμένο σκυρόδεμα, η οποία είναι επιθυμητό να είναι μικρή.

Για το λόγο αυτό, στο παρόν στάδιο της πειραματικής διαδικασίας, επιδιώχθηκε ο προσδιορισμός της επίδρασης της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών στην διαπερατότητα από χλωρίοντα του σκληρυμένου σκυροδέματος. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού μελετήθηκαν δύο συνθέσεις σκυροδέματος. Η πρώτη σύνθεση αποτελούνταν αποκλειστικά από θραυστά αδρανή (0% ποσοστό αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα) και η δεύτερη σύνθεση αποκλειστικά από ανακυκλωμένα αδρανή (100% ποσοστό αντικατάστασης).

Για την κάθε σύνθεση, προσδιορίστηκαν για το νωπό σκυρόδεμα: η εργασιμότητα (μέσω της κάθισης), η περιεκτικότητα σε αέρα και η πυκνότητα, ενώ για το σκληρυμένο σκυρόδεμα: η θλιπτική αντοχή και η διαπερατότητα χλωριόντων (μέσω της δοκιμής PROOVE'it©) για δοκίμια ηλικίας 28 ημερών. Στον πίνακα 4.25 περιγράφονται οι αναλογίες του αναμίγματος για την κάθε σύνθεση, κατά μέρη βάρους kg/m³.

Πίνακας 4.25 Αναλογίες αναμιγμάτων.

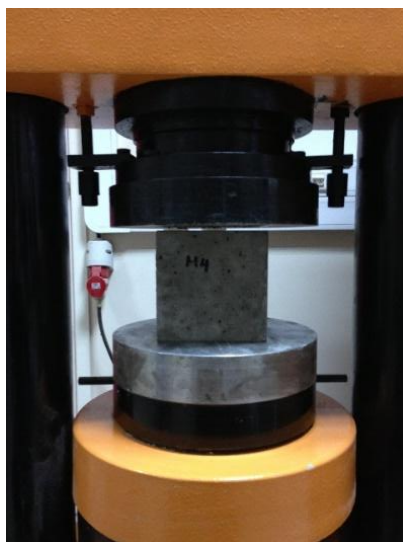
Υλικά παρασκευής	Ποσοστό αντικατάστασης	
	0%	100%
τσιμέντο	280	280
νερό	178	211
υπερρυστοποιητής	1,70	1,70
άμμος θραυστή	931	931
ψηφίδα θραυστή	293	0
ψηφίδα ανακυκλωμένη	0	279
χαλίκι θραυστό	675	0
χαλίκι ανακυκλωμένο	0	620
ενεργός λόγος N/T	0,50	0,50
ολικός λόγος N/T	0,63	0,75

Στο σύνολο των συνθέσεων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Portland II 42,5N, υπερρυστοποιητής GLENIUM C347 της εταιρείας BASF, θραυστά αδρανή από τοπικό λατομείο (λεπτόκοκκα – χονδρόκοκκα) και ανακυκλωμένα αδρανή, αποκλειστικά χονδρόκοκκα, κατόπιν επεξεργασίας τους, ήτοι πλύσης με νερό υπό

πίεση, για την απομάκρυνση των ακαθαρσιών που είναι προσκολλημένες στην εξωτερική επιφάνεια των αδρανών.

Στις δύο συνθέσεις διατηρήθηκαν σταθερά: η ποσότητα του τσιμέντου, του υπερρευστοποιητή, των λεπτόκοκκων αδρανών και ο ενεργός λόγος νερού προς τσιμέντο (N/T). Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα ελέγχου των ιδιοτήτων ανακυκλωμένων και θραυστών αδρανών: η κοκκομετρική ανάλυση, η περιεκτικότητα παιπάλης, το ειδικό βάρος (μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος κορεσμένου και επιφανειακά στεγνού υλικού) και η υδροαπορροφητικότητα αυτών.

Οι ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος προσδιορίστηκαν, μετά την ολοκλήρωση της ανάμιξης, σύμφωνα με τα οριζόμενα στο εκάστοτε πρότυπο δοκιμής που ακολουθήθηκε, μία φορά για κάθε σύνθεση, σύμφωνα με τη συνήθη πρακτική. Όσον αφορά στις ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος, για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής των 28 ημερών παρασκευάστηκαν κυβικά δοκίμια διαστάσεων 150x150x150mm και χρησιμοποιήθηκε η υδραυλική μηχανή Toni Technik με ταχύτητα δοκιμής 0,50 MPa/s. Για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής ελέγχθηκαν τρία κυβικά δοκίμια από κάθε σύνθεση (εικόνα 4.8) και υπολογίστηκε ο μέσος όρος της θλιπτικής αντοχής αυτών.



Εικόνα 4.8 Κυβικό δοκίμιο προ της δοκιμής θλιπτικής αντοχής.

Για την εύρεση της αντίστασης διαπερατότητας του σκυροδέματος από χλωριόντα, χρησιμοποιήθηκε η συσκευή PROOVE'it[®], βάσει της οποίας εκτιμάται η αντίσταση του σκυροδέματος στην διαπερατότητα χλωριόντων προσδιορίζοντας πόσο εύκολη είναι η εξαναγκασμένη διόδος αυτών μέσω δείγματος κορεσμένου σκυροδέματος κατά την εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης στο δείγμα, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C1202 (Coulomb Test ή Rapid Chloride Permeability Test - RCPT).

Για την πραγματοποίηση του πειράματος απαιτούνται κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 95mm και πάχους 50mm. Λόγω έλλειψης καλουπιών των συγκεκριμένων διαστάσεων, αρχικά παρασκευάστηκαν δοκίμια κυβικά (όμοια με αυτά του προσδιορισμού της θλιπτικής αντοχής), τα οποία με τη χρήση καροτέζας και κόφτη έλαβαν την επιθυμητή μορφή. Για κάθε σύνθεση απαιτήθηκαν τρία δοκίμια και ως

αποτέλεσμα της δοκιμής υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τριών δοκιμίων. Η τελική μορφή των δοκιμίων παρουσιάζεται στην εικόνα 4.9.



Εικόνα 4.9 Τελική μορφή δοκιμίων για τη διεξαγωγή της δοκιμής PROOVE'it©.

Το πείραμα μετράει το ηλεκτρικό ρεύμα που περνά διαμέσου του σκυροδέματος, για μια δεδομένη χρονική περίοδο, με συγκεκριμένη τάση και μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία. Βάσει του ASTM C1202, οι ρυθμίσεις του κάθε κελιού (εικόνα 4.10) για τη διεξαγωγή του πειράματος, ορίζονται ως:

5. φορτίο του ρεύματος: 60V
6. χρόνος διεξαγωγής του πειράματος: 6h
7. διάμετρος δοκιμίου: 95mm
8. μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία των διαλυμάτων: 90°C

και ρυθμίζονται πριν την έναρξη λειτουργίας του κάθε κελιού. Η απαιτούμενη προετοιμασία των δοκιμίων, η διαδικασία που ακολουθήθηκε και ο τρόπος λειτουργίας του πειράματος περιγράφονται αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 4.10 Ένα πλήρες κελί έτοιμο προς μέτρηση.

Μετά το πέρας του πειράματος ελήφθησαν τα αποτελέσματα, δηλαδή η ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου που πέρασε απ' το δοκίμιο, το οποίο φορτίο αποτελεί ένδειξη της ικανότητας του σκυροδέματος να αντιστέκεται στην διείσδυση των χλωριόντων. Ειδικότερα, βάσει των τιμών του ηλεκτρικού φορτίου σε Coulomb,

κατηγοριοποιείται ο βαθμός διαπερατότητας του δοκιμίου, σύμφωνα με τον πίνακα 4.26.

Πίνακας 4.26 Κατηγοριοποίηση του βαθμού διαπερατότητας βάσει των τιμών του ηλεκτρικού φορτίου.

Ηλεκτρικό φορτίο (Coulomb)	Διαπερατότητα
>4000	Υψηλή
4000 – 2000	Μέτρια
2000 – 1000	Χαμηλή
1000 – 100	Πολύ χαμηλή
<100	Αμελητέα

Τα αποτελέσματα των δοκιμών του νωπού και του σκληρυμένου σκυροδέματος παρουσιάζονται στον πίνακα 4.27 που ακολουθεί.

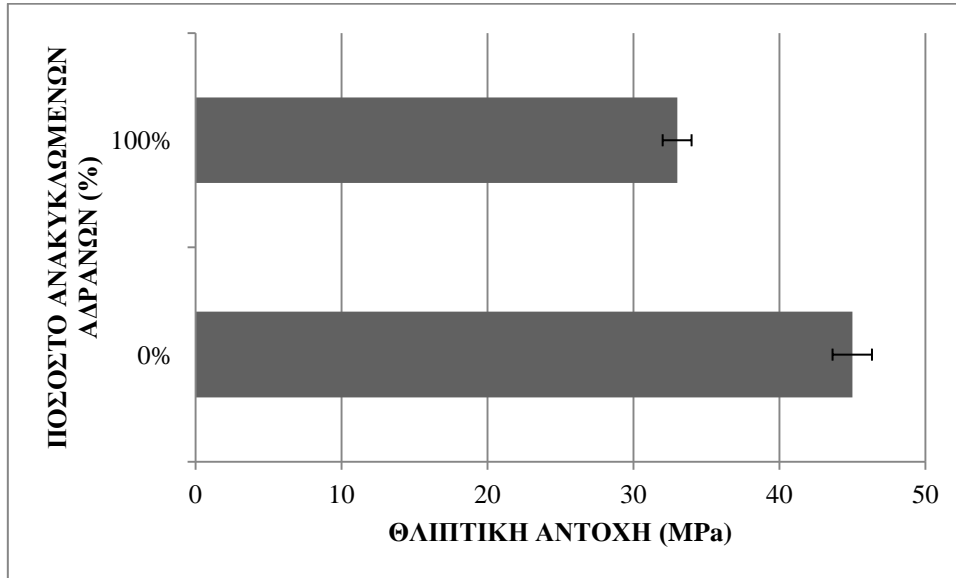
Πίνακας 4.27 Αποτελέσματα δοκιμών.

Ιδιότητα	Ποσοστό αντικατάστασης	
	0%	100%
εργασιμότητα μέσω κάθισης (cm)	8,0	7,7
περιεκτικότητα σε αέρα (%)	1,9	2,1
πυκνότητα νωπού σκυροδέματος (Kg/m ³)	2420	2140
θλιπτική αντοχή 28 ημερών (MPa)	45,0	33,0
ηλεκτρικό φορτίο (Cb)	3140	3810
διαπερατότητα χλωριόντων	μέτρια	μέτρια

Όσον αφορά στις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος, παρατηρούμε ότι σε γενικές γραμμές δεν παρουσιάζονται μεγάλες διακυμάνσεις στις τιμές αυτών. Εντούτοις, παρατηρούμε ότι η εργασιμότητα του σκυροδέματος με 100% ανακυκλωμένα αδρανή είναι μικρότερη της αντίστοιχης του σκυροδέματος αναφοράς (0,30 cm – ποσοστό μείωσης 3%) το οποίο όπως έχει αναφερθεί ανωτέρω οφείλεται στο σχήμα των ανακυκλωμένων αδρανών. Στην παρούσα περίπτωση, η διαφορά είναι μικρή για το λόγο ότι η εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος και στις δύο συνθέσεις είναι ιδιαίτερος χαμηλή (διαφορετική ποσότητα υπερρευστοποιητή και λόγου νερού προς τσιμέντο συγκριτικά με τις προηγούμενες συνθέσεις).

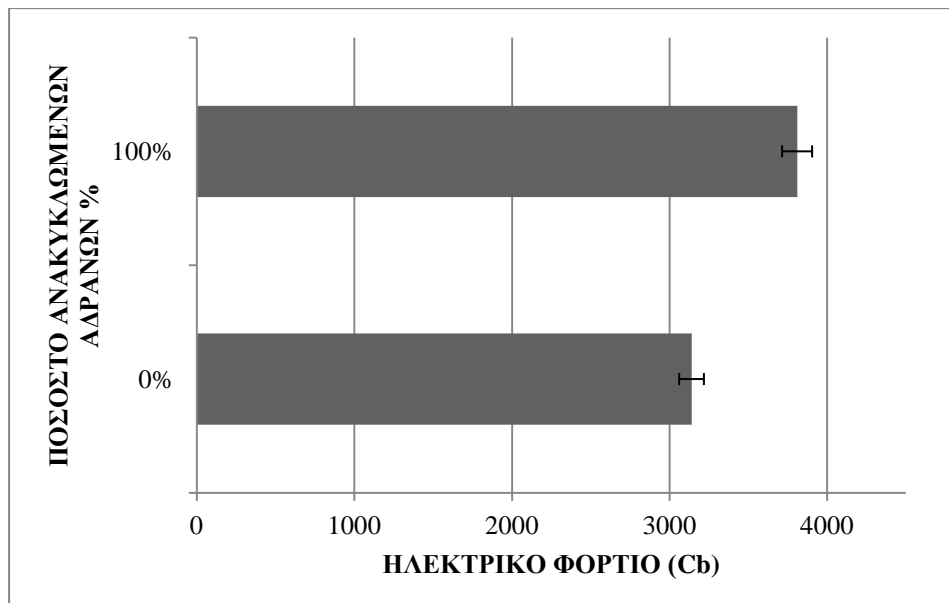
Η περιεκτικότητα αέρα του ανακυκλωμένου σκυροδέματος παρουσιάζεται αυξημένη κατά 0,2% (σε ποσοστό δηλαδή 9,5%) συγκριτικά με το σκυρόδεμα αναφοράς. Η περιεκτικότητα αέρα επηρεάζεται κατ' αντιστοιχία με την εργασιμότητα του ανακυκλωμένου σκυροδέματος από το σχήμα των ανακυκλωμένων αδρανών (γωνιώδη και επιμήκη) καθώς και από το υψηλό πορώδες αυτών.

Τέλος, η πυκνότητα του ανακυκλωμένου σκυροδέματος είναι σε ποσοστό 11,60% μικρότερη από την πυκνότητα του σκυροδέματος αναφοράς. Η μείωση αυτή είναι αναμενόμενη λόγω του μικρότερου ειδικού βάρους των ανακυκλωμένων αδρανών καθώς και του αυξημένου περιεχόμενου αέρα στο μίγμα.



Διάγραμμα 4.11 Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής.

Σύγκριση της θλιπτικής αντοχής των δύο συνθέσεων σκυροδέματος οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η χρήση ανακυκλωμένων αδρανών οδηγεί σε μείωση της θλιπτικής αντοχής 26,67% σε σχέση με τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος αναφοράς. Το αποτέλεσμα αυτό έρχεται σε συμφωνία με το αυξημένο ποσοστό του περιεχόμενου αέρα του αναμίγματος, το οποίο επηρεάζει την αντοχή και ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Εντούτοις, παρατηρείται ότι παρά τη μειωμένη του αντοχή, το παραχθέν ανακυκλωμένο σκυρόδεμα αντιστοιχεί σε σκυρόδεμα κατηγορίας C25/30. Κατά συνέπεια, από τα αποτελέσματα αυτά, δεν οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών είναι απαγορευτική για την παραγωγή σκυροδέματος, ωστόσο απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση προς την κατεύθυνση αυτή.



Διάγραμμα 4.12 Αποτελέσματα δοκιμής PROOVE'it©.

Τέλος, σχετικά με τη διαπερατότητα των χλωριόντων στα δοκίμια σκυροδέματος, παρατηρήθηκε αυξημένη διαπερατότητα για την περίπτωση του ανακυκλωμένου σκυροδέματος. Το διερχόμενο ηλεκτρικό φορτίο είναι αυξημένο για τα δοκίμια των ανακυκλωμένων αδρανών, συγκεκριμένα σε ποσοστό 21% συγκρινόμενο με το σκυρόδεμα αναφοράς. Παρά τη διαφορά αυτή, οι δύο τύποι σκυροδέματος κατατάσσονται στην ίδια κατηγορία διαπερατότητας σε χλωριόντα: στην κατηγορία σκυροδέματος μέτριας διαπερατότητας σε χλωριόντα, γεγονός που συνηγορεί στο ότι η χρήση ανακυκλωμένων αδρανών για την παραγωγή σκυροδέματος δεν είναι απαγορευτική.

4.2.4 Επίδραση της χρήσης ανακυκλωμένων αδρανών στις ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος.

Στα προηγούμενα υποκεφάλαια, πραγματοποιήθηκε ο προσδιορισμός συγκεκριμένων ιδιοτήτων του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος, στο πλαίσιο των προκαταρκτικών δοκιμών που ήταν απαραίτητες για την συνέχεια της πειραματικής διαδικασίας. Όπως αναλύθηκε, η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών μπορεί να επιτραπεί μετά την κατάλληλη επεξεργασία τους, ήτοι την πλύση τους με νερό υπό πίεση, για την απομάκρυνση των ξένων υλών, οι οποίες βρίσκονται προσκολλημένες στην εξωτερική τους επιφάνεια. Επιπλέον, η σύγκριση των ιδιοτήτων του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος για δύο συνθέσεις: με αποκλειστικά θραυστά χονδρόκοκκα αδρανή και με αποκλειστικά ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών οδηγεί σε σκυρόδεμα με απομειωμένες ιδιότητες.

Φυσικά, για την διατύπωση ενός ασφαλούς συμπεράσματος σχετικά με τη χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών απαιτήθηκε η επέκταση της έρευνας. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της επίδρασης της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών στις ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος για διαφορετικά ποσοστά αντικατάστασης των θραυστών χονδρόκοκκων αδρανών από ανακυκλωμένα. Οι ιδιότητες του σκυροδέματος που ελέγχθηκαν ήταν διευρυμένες σε σχέση εκείνες που πραγματοποιήθηκαν στις προκαταρκτικές δοκιμές και για τον προσδιορισμό τους αξιοποιήθηκαν καταστροφικές και μη καταστροφικές δοκιμές.

Αναλυτικότερα, για την επίτευξη του σκοπού αυτού απαιτήθηκαν έξι συνθέσεις σκυροδέματος με διαφορετικό ποσοστό αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή η κάθε μία. Τα ποσοστά τα οποία εξετάστηκαν ήταν τα ακόλουθα: 0%, 15%, 25%, 35%, 50%, 100%. Στο σύνολο των συνθέσεων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Portland II 42,5N, υπερρευστοποιητής Chemium 274 της εταιρείας Domylco, θραυστά αδρανή προερχόμενα από τοπικό λατομείο (λεπτόκοκκα – χονδρόκοκκα) και ανακυκλωμένα αδρανή προερχόμενα από την Ανακύκλωση Αδρανών Μακεδονίας. Μόνο χονδρόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή χρησιμοποιήθηκαν, κατόπιν επεξεργασίας τους για την απομάκρυνση των ακαθαρσιών που βρίσκονται προσκολλημένες στην εξωτερική τους επιφάνεια.

Για τον προσδιορισμό της μελέτης σύνθεσης του κάθε ποσοστού, αξιοποιήθηκε ο προσδιορισμός σε προγενέστερο στάδιο των: κοκκομετρική ανάλυση (ASTM C136), περιεκτικότητα παιπάλης (ASTM C117), ειδικό βάρος (μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος κορεσμένου και επιφανειακά στεγνού υλικού) και υδροαπορροφητικότητα (ASTM C128 και ASTM C127) των θραυστών και ανακυκλωμένων αδρανών. Για όλα τα ποσοστά επιδιώχθηκε η παρασκευή σκυροδέματος αντοχής C20/25. Σε όλες τις συνθέσεις διατηρήθηκαν σταθερά: η ποσότητα του τσιμέντου, του υπερρυστοποιητή, των λεπτόκοκκων αδρανών, ο ενεργός λόγος νερού προς τσιμέντο (N/T), καθώς και η αναλογία χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων αδρανών στο μείγμα των αδρανών η οποία ήταν: 50% λεπτόκοκκα αδρανή και 50% χονδρόκοκκα αδρανή (15% ψηφίδα και 35% χαλίκι). Στον πίνακα 4.28 που ακολουθεί περιγράφονται οι αναλογίες του αναμίγματος για την κάθε σύνθεση, κατά μέρη βάρους kg/m^3 , καθώς και ο ολικός – ενεργός λόγος νερού προς τσιμέντο.

Πίνακας 4.28 Αναλογίες αναμιγμάτων.

Υλικά παρασκευής	Ποσοστό αντικατάστασης					
	0%	15%	25%	35%	50%	100%
τσιμέντο	280	280	280	280	280	280
νερό	178	183	186	190	195	211
υπερρυστοποιητής	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85
άμμος θραυστή	935	935	935	935	935	935
ψηφίδα θραυστή	285	242	214	185	143	0
ψηφίδα ανακυκλωμένη	0	41	68	95	136	272
χαλίκι θραυστό	675	574	507	439	338	0
χαλίκι ανακυκλωμένο	0	93	155	217	310	621
ενεργός λόγος N/T	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
ολικός λόγος N/T	0,63	0,65	0,67	0,68	0,70	0,75

Σε όλες τις περιπτώσεις, κριτήριο για την επιλογή του ποσοστού συμμετοχής κάθε κλάσματος αδρανών στο μείγμα των αδρανών ήταν η επιδίωξη η κοκκομετρική διαβάθμιση του μείγματος να βρίσκεται εντός των ορίων που ορίζει ο ΚΤΣ-97 (άνω – κάτω όριο Δ) για την περίπτωση οπλισμένου σκυροδέματος. Η επιλογή των ορίων αυτών έγινε διότι η χρήση του οπλισμένου σκυροδέματος είναι συνηθέστερη στις κατασκευές.

Μετά τον προσδιορισμό της μελέτης σύνθεσης για κάθε ποσοστό, ξεκίνησε η παρασκευή των αναμιγμάτων. Η ανάμιξη όλων των συνθέσεων πραγματοποιήθηκε σε αναμικτήρα σκυροδέματος κατάλληλης χωρητικότητας (100lt) ενώ τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν είχαν προηγουμένως ξηρανθεί σε φούρνο ούτως ώστε να απομακρυνθεί όλη η τυχούσα περιεχόμενη υγρασία. Πριν την ανάμιξη είχαν αφεθεί εκτός φούρνου ούτως ώστε να αποκτήσουν θερμοκρασία δωματίου.

Ακολούθησαν οι εργαστηριακές δοκιμές του νωπού σκυροδέματος, οι οποίες περιελάμβαναν τον προσδιορισμό των: εργασιμότητα μέσω της δοκιμής κάθισης (ASTM C143) και μέσω της δοκιμής εξάπλωσης (EN12350-5), πυκνότητα (EN

12350-6) και περιεκτικότητα αέρα (ASTM C231). Οι ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος προσδιορίστηκαν, βάσει των οριζόμενων στο εκάστοτε πρότυπο δοκιμής που ακολουθήθηκε, μία φορά για κάθε σύνθεση σύμφωνα με τη συνήθη πρακτική.

Εν συνεχεία, παρασκευάστηκαν δοκίμια σκληρυμένου σκυροδέματος ανάλογα με τις απαιτήσεις των δοκιμών που επρόκειτο να εξεταστούν. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες δοκιμές: θλιπτική αντοχή σε δοκίμια ηλικίας 28 ημερών (EN 12390-3), καμπτική αντοχή (EN 12390-5) με παράλληλη παρακολούθηση της θραύσης μέσω ακουστικής εκπομπής σε δοκίμια ηλικίας 28 ημερών και πυκνότητα σε δοκίμια ηλικίας 7 και 28 ημερών.

Για την κάθε ιδιότητα του σκληρυμένου σκυροδέματος ελέγχθηκαν τρία δοκίμια από κάθε σύνθεση και προσδιορίστηκε ο μέσος όρος αυτών. Ειδικότερα, απαιτήθηκαν: τρία κυβικά δοκίμια διαστάσεων 150x150x150mm (για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής) και τρία πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 100x100x400mm (για τον υπολογισμό της καμπτικής αντοχής) για κάθε σύνθεση. Για τον προσδιορισμό της πυκνότητας σκληρυμένου σκυροδέματος και του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας (μέσω της δοκιμής των υπερήχων) χρησιμοποιήθηκαν τα πρισματικά δοκίμια και δεν απαιτήθηκε η παρασκευή επιπλέον δοκιμών, αφού οι δοκιμές αυτές είναι μη καταστροφικές.

Για την παρασκευή των δοκιμών πραγματοποιήθηκε έγχυση του μείγματος, μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών νωπού σκυροδέματος, σε πιστοποιημένες μήτρες κατάλληλων διαστάσεων (βάσει EN 12390-1) που στη συνέχεια τοποθετήθηκαν στην τράπεζα δόνησης, όπου συμπυκνώθηκαν. Μετά την σκυροδέτηση, τα δοκίμια παρέμειναν στις μήτρες για 24 περίπου ώρες. Κατόπιν, έγινε η αφαίρεση των σκληρυμένων δοκιμών από τις μήτρες και η τοποθέτησή τους σε ειδικές δεξαμενές με νερό σε θερμοκρασία $20 \pm 2^\circ\text{C}$ έως τη χρονική στιγμή της κάθε δοκιμής.

Η πυκνότητα του σκληρυμένου σκυροδέματος προσδιορίστηκε βάσει του προτύπου EN 12390-7, κατόπιν του προσδιορισμού της μάζας και του όγκου των πρισματικών δοκιμών για κάθε δοκίμιο σε ηλικία 7 και 28 ημερών. Ο προσδιορισμός της πυκνότητας δεν προκαλεί φθορά στα δοκίμια, ούτως ώστε να επηρεάζονται οι μετέπειτα προσδιοριζόμενες ιδιότητες για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα δοκίμια που προορίζονταν για τον προσδιορισμό της καμπτικής αντοχής.

Η δοκιμή προσδιορισμού της θλιπτικής αντοχής, πραγματοποιήθηκε στα κυβικά δοκίμια βάσει των οριζόμενων στο πρότυπο EN 12390-03, με τη χρήση της υδραυλικής μηχανής Toni Technik με μέγιστο φορτίο 3000kN. Η ταχύτητα της δοκιμής καθορίστηκε στα 0,50 MPa/s. Τα δοκίμια ελέγχθηκαν κάθετα προς τη διεύθυνση της έγχυσής τους και σε ηλικία 28 ημερών, ενώ στο τέλος κάθε δοκιμής εκτιμήθηκε ο τύπος της θραύσης και το αποτέλεσμα έγινε δεκτό εφόσον ο τύπος της θραύσης δεν ήταν ασυνήθιστος.

Η δοκιμή προσδιορισμού της καμπτικής αντοχής, πραγματοποιήθηκε στα πρισματικά δοκίμια βάσει των οριζόμενων στο πρότυπο EN 12390-5 για την κάμψη τεσσάρων σημείων. Για την διεξαγωγή της δοκιμής κάμψης χρησιμοποιήθηκε η σέρβο - υδραυλική μηχανή INSTRON με μέγιστο φορτίο 30kN (εικόνα 4.11). Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, το ασκούμενο φορτίο αυξανόταν με σταθερό ρυθμό τάσης

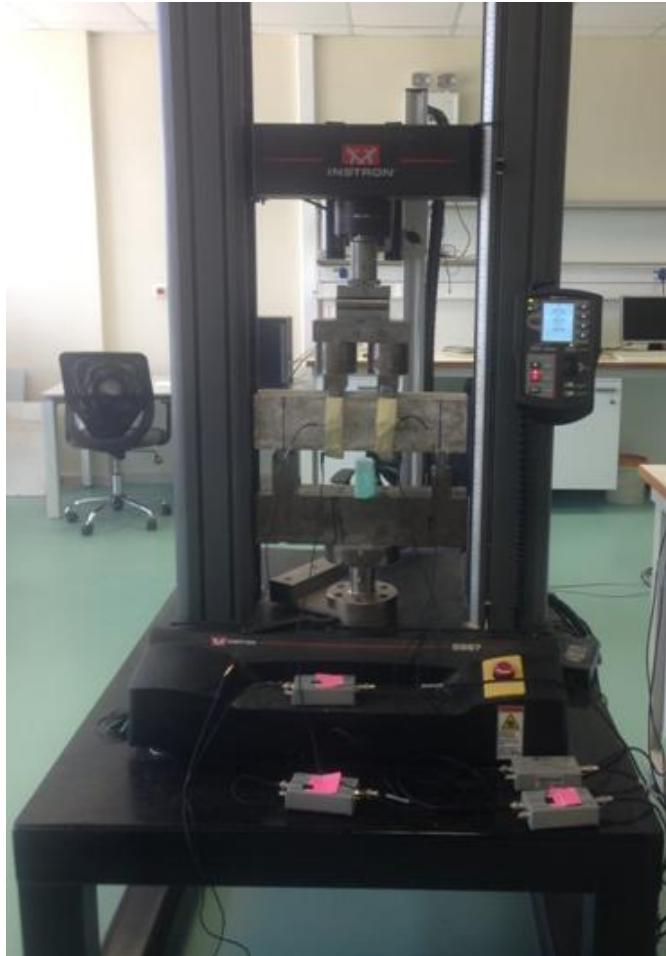
0.05 MPa/s έως την θραύση οπότε τερματίζονται αυτόματα η δοκιμή. Το δοκίμιο τοποθετείται σύμφωνα με τη διάταξη που παρουσιάζεται στην εικόνα 4.12 εις τρόπον ώστε τα άνω και κάτω ανοίγματα μεταξύ των σημείων όπου ασκείται η πίεση να είναι 100 mm και 300 mm αντίστοιχα. Για να ληφθεί υπόψη το αποτέλεσμα της δοκιμής έπρεπε η θραύση των δοκιμίων να πραγματοποιηθεί με μια κεντρική ρωγμή στο εφελκόμενο κάτω μέρος του δοκιμίου και περί το μέσο αυτού.



Εικόνα 4.11 Σερβο-υδραυλική μηχανή INSTRON.

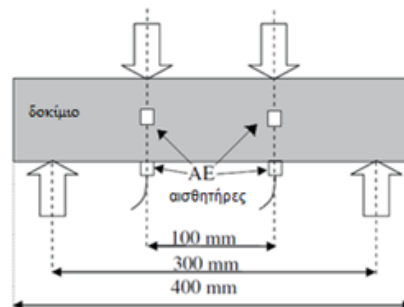
Η ακουστική εκπομπή αξιολογήθηκε κατά τη διάρκεια των δοκιμών καμπτικής αντοχής. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις αισθητήρες (R15, PAC) με μέγιστη ευαισθησία περί τα 150kHz και διάμετρο 15mm. Δύο από αυτούς τοποθετήθηκαν στην μπροστινή πλευρά του δοκιμίου (εικόνα 4.12), ενώ οι άλλοι δύο τοποθετήθηκαν στην κάτω εφελκόμενη πλευρά του δοκιμίου. Για την αποφυγή μικρομετακινήσεων των αισθητήρων χρησιμοποιήθηκε κολλητική ταινία κατά τη διάρκεια του πειράματος. Η οριζόντια απόσταση μεταξύ των αισθητήρων ήταν 100 mm και ο πρώτος αισθητήρας τοποθετήθηκε σε οριζόντια απόσταση 50 χιλιοστών από το κέντρο του δοκιμίου, όπου αναμενόταν η ρωγμή. Οι πρώτοι δύο αισθητήρες είναι αυτοί που λαμβάνουν τις απαιτούμενες τιμές AE, ενώ οι άλλοι δύο εντοπίζουν τη θέση της ρωγμής. Τα σήματα καταγράφηκαν σε έναν πίνακα παρακολούθησης τεσσάρων καναλιών PCI-2, PAC με ρυθμό καταγραφής 10 MHz, ενώ το όριο καταγραφής ορίστηκε στα 40 dB, προκειμένου να αποφευχθεί η καταγραφή του θορύβου περιβάλλοντος.

Η συνολική δραστηριότητα AE (πόσα σήματα καταγράφηκαν) είναι ενδεικτική της έκτασης της βλάβης ή του αριθμού των ρωγμών και είναι το πιο σημαντικό δεδομένο, αφού σχετίζεται άμεσα με την ύπαρξη και διάδοση βλάβης. Επιπρόσθετα, το σχήμα της καταγεγραμμένης κυματομορφής προσφέρει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την πηγή του σήματος. Ως εκ τούτου, πολλές παράμετροι χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών της κυματομορφής.



Εικόνα 4.12 Διάταξη δοκιμής κάμψης και θέσης αισθητήρων ακουστικής εκπομπής.

Βασικό στοιχείο του πειράματος είναι μία παράμετρος που σχετίζεται με την ένταση του φαινομένου: το εύρος (Amplitude, A), που είναι η τάση του υψηλότερου σημείου της κυματομορφής. Επιπλέον, η ενέργεια (MARSE, measured area under the rectified signal envelope) που λαμβάνει υπόψη το περιεχόμενο ολόκληρης της κυματομορφής και ο χρόνος ανύψωσης (Rise Time, RT) ήτοι ο χρόνος μεταξύ της πρώτης υπέρβασης κατωφλίου και του χρόνου της μέγιστης κορυφής. Σημαντική είναι η καταγραφή της διάρκειας (duration, Dur), ήτοι ο χρόνος μεταξύ της πρώτης και της τελευταίας υπέρβασης κατωφλίου και η μέση συχνότητα (average frequency, AF), η οποία υπολογίζεται στο πεδίο του χρόνου ως ο λόγος του συνολικού αριθμού των υπερβάσεων κατωφλίου (counts) προς τη διάρκεια της κυματομορφής σε kHz.



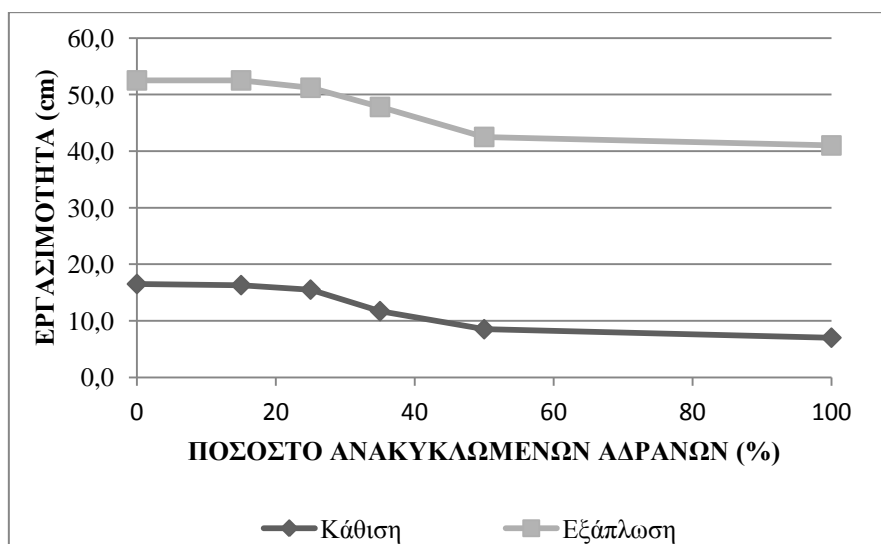
Εικόνα 4.13 Σχηματική απεικόνιση δοκιμής κάμψης τεσσάρων σημείων με την παρακολούθηση ΑΕ.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών, εκτός των δοκιμών των υπερήχων και της ακουστικής εκπομπής, παρουσιάζονται ανά ποσοστό αντικατάστασης στον πίνακα 4.29 που ακολουθεί.

Πίνακας 4.29 Αποτελέσματα δοκιμών.

Ιδιότητα	Ποσοστό αντικατάστασης					
	0%	15%	25%	35%	50%	100%
εργασιμότητα μέσω κάθισης (cm)	16,5	16,3	15,5	11,7	8,5	7,0
εργασιμότητα μέσω εξάπλωσης (cm)	52,5	52,5	51,2	47,8	42,5	41,0
πυκνότητα νωπού (Kg/m ³)	2320	2240	2210	2200	2160	2070
περιεκτικότητα σε αέρα (%)	1,8	2,1	2,0	2,1	1,9	2,2
πυκνότητα σκληρυμένου (7 ημερών) (Kg/m ³)	2320	2250	2250	2230	2190	2110
πυκνότητα σκληρυμένου (28 ημερών) (Kg/m ³)	2340	2270	2260	2260	2200	2150
θλιπτική αντοχή (28 ημερών) (MPa)	35,0	33,5	27,5	30,5	33,0	26,0
καμπτική αντοχή (28 ημερών) (MPa)	5,2	4,9	3,6	4,5	4,6	3,4

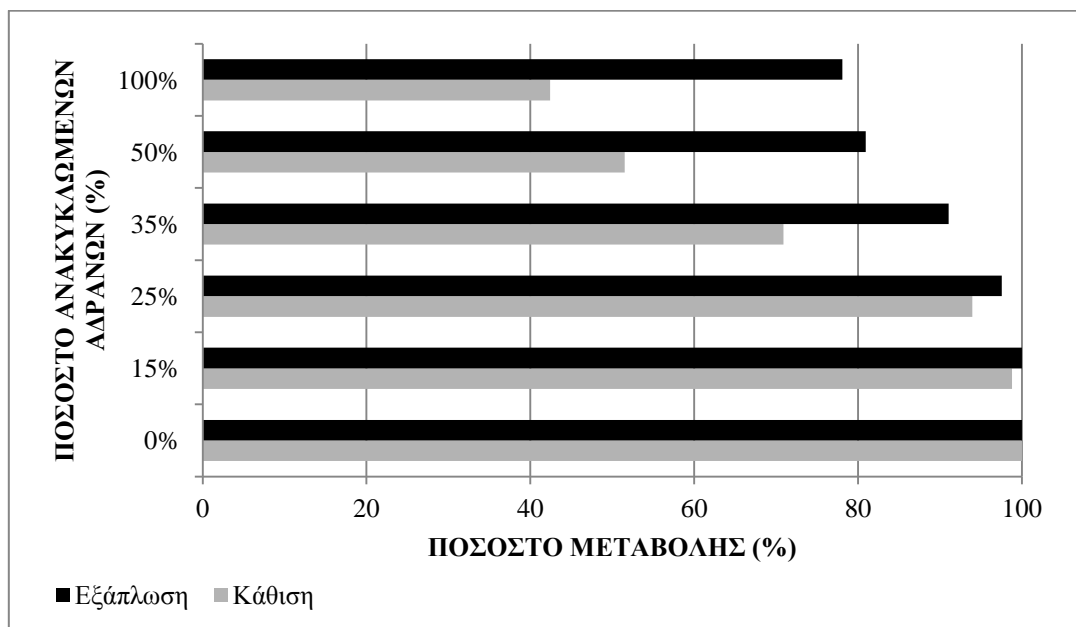
Τα αποτελέσματα των δοκιμών της εργασιμότητας του νωπού σκυροδέματος (κάθιση και εξάπλωση), διαπιστώνουμε συμφωνούν μεταξύ τους όπως και αναμενόταν, παρουσιάζοντας την ίδια πτωτική τάση. Επιπλέον, σε συμφωνία με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των προκαταρκτικών δοκιμών, η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών οδηγεί στην μείωση της εργασιμότητας του νωπού σκυροδέματος, ανάλογη με το ποσοστό συμμετοχής τους στο μείγμα των αδρανών.



Διάγραμμα 4.13 Αποτελέσματα εργασιμότητας νωπού σκυροδέματος δοκιμών κάθισης και εξάπλωσης.

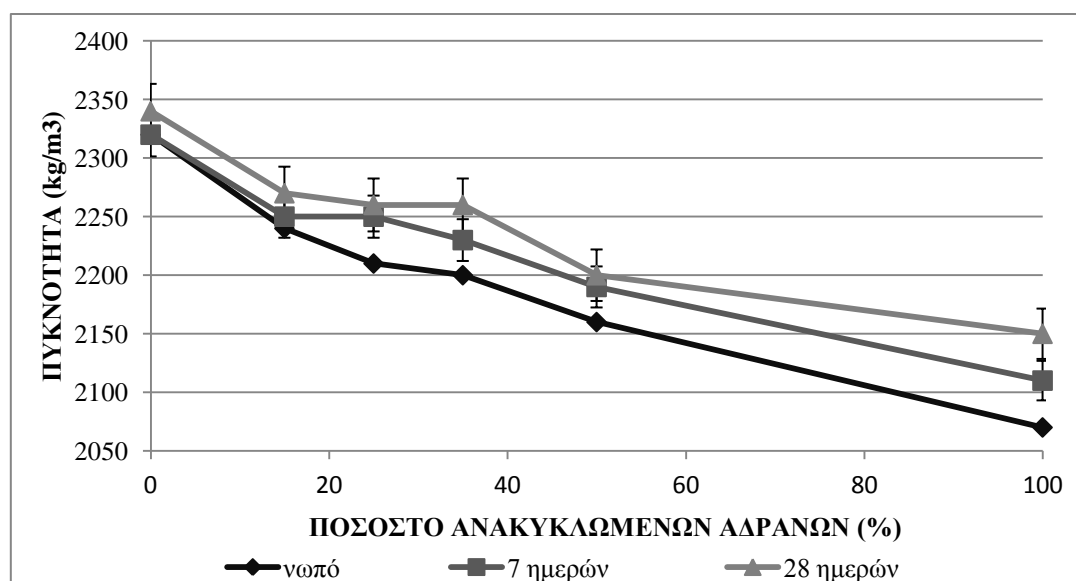
Τα αποτελέσματα της εργασιμότητας παρουσιάζονται στο διάγραμμα 4.13. Παρατηρείται εντούτοις ότι η μείωση της εργασιμότητας είναι αυξημένη ιδίως για ποσοστό αντικατάστασης θραυστών αδρανών μεγαλύτερο από 35%. Στο διάγραμμα 4.14 παρουσιάζεται το ποσοστό μείωσης της εργασιμότητας συγκριτικά με την

εργασιμότητα του σκυροδέματος αναφοράς. Παρατηρείται η ίδια πτωτική τάση στα αποτελέσματα και των δύο δοκιμών, με την δοκιμή της κάθισης να παρουσιάζει μεγαλύτερα ποσοστά μείωσης. Όπως έχει αναφερθεί ήδη αυτή η διακύμανση οφείλεται στην ιδιαιτερότητα των ανακυκλωμένων αδρανών και συγκεκριμένα στην αυξημένη υδροαπορροφητικότητά τους σε συνδυασμό με την υφή και το επίμηκες - γωνιώδες σχήμα τους.



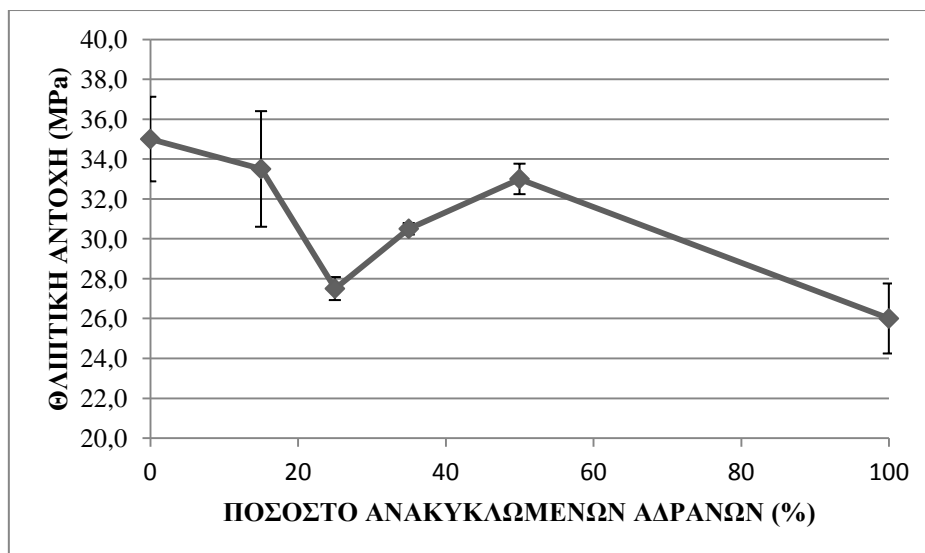
Διάγραμμα 4.14 Ποσοστό μείωσης της εργασιμότητας συγκριτικά με το σκυροδέμα αναφοράς.

Το ποσοστό του περιεχόμενου αέρα παρουσιάζει διακυμάνσεις με τιμές που κυμαίνονται σε $2 \pm 0,2\%$ για το σύνολο των ποσοστών αντικατάστασης. Οι μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζονται στις συνθέσεις με τα ανακυκλωμένα αδρανή, όμως, η μη αναλογική με το ποσοστό αντικατάστασης συμπεριφορά της περιεκτικότητας σε αέρα, δεν μας οδηγεί σε κάποιο συμπέρασμα.



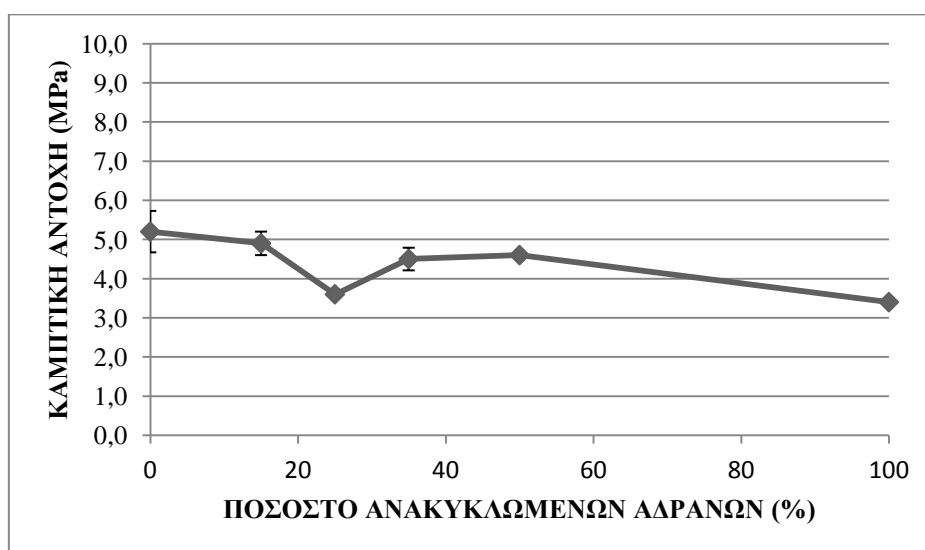
Διάγραμμα 4.15 Αποτελέσματα πυκνότητας νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος.

Αναφορικά με την πυκνότητα τόσο του νωπού όσο και του σκληρυμένου σκυροδέματος, αναμενόταν η αναλογική μείωση της πυκνότητας με την αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης των θραυστών αδρανών λόγω του μικρότερου ειδικού βάρους που έχουν τα ανακυκλωμένα αδρανή (διάγραμμα 4.15). Η μέγιστη μείωση της πυκνότητας παρουσιάζεται για το σκυρόδεμα από αποκλειστικά ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή και αντιστοιχεί σε ποσοστά 12%, 9% και 8% για πυκνότητα νωπού και σκληρυμένου 7 και 28 ημερών αντίστοιχα.



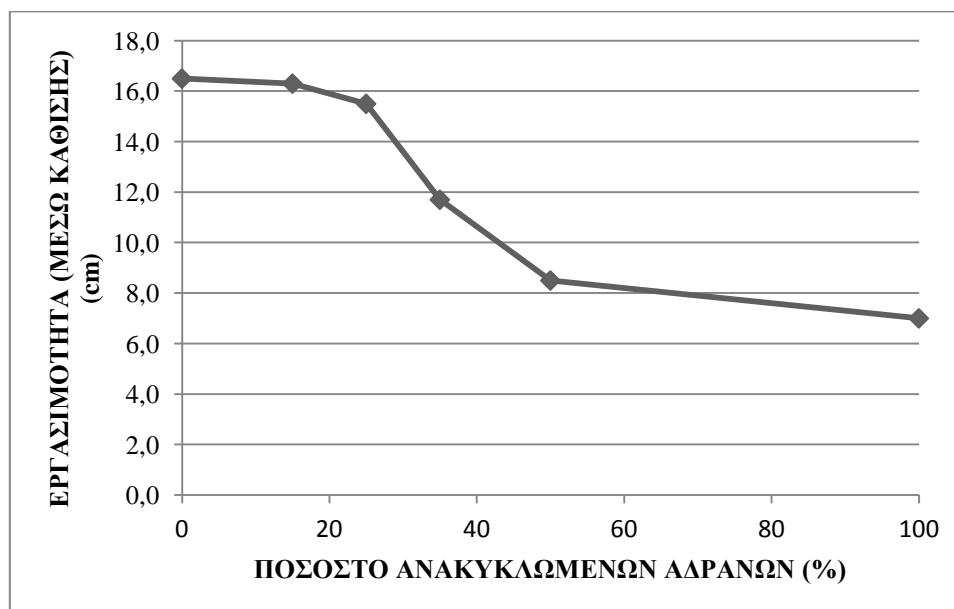
Διάγραμμα 4.16 Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος.

Στηριζόμενοι στα αποτελέσματα των προκαταρκτικών δοκιμών, αλλά και στα αποτελέσματα της διεθνούς βιβλιογραφίας, αναμενόταν η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών να επιδρά δυσμενώς στην αντοχή του παραγόμενου σκυροδέματος. Επιπλέον, αναμενόταν η αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή να προκαλεί μεγαλύτερη επίπτωση στην αντοχή. Εντούτοις, παρατηρώντας τα αποτελέσματα της θλιπτικής και καμπτικής αντοχής διακρίνουμε ότι αυτά παρουσιάζουν μια μήτε αναμενόμενη μήτε αναλογική συμπεριφορά (διαγράμματα 4.16, 4.17).



Διάγραμμα 4.17 Αποτελέσματα καμπτικής αντοχής σκυροδέματος.

Συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι για ποσοστό έως και 25% η θλιπτική αντοχή (και κατά αντιστοιχία η καμπτική αντοχή) μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή, στη συνέχεια αυξάνεται για τα ποσοστά 35% και 50% και τέλος μειώνεται για πλήρη αντικατάσταση των θραυστών αδρανών (100% ποσοστό).

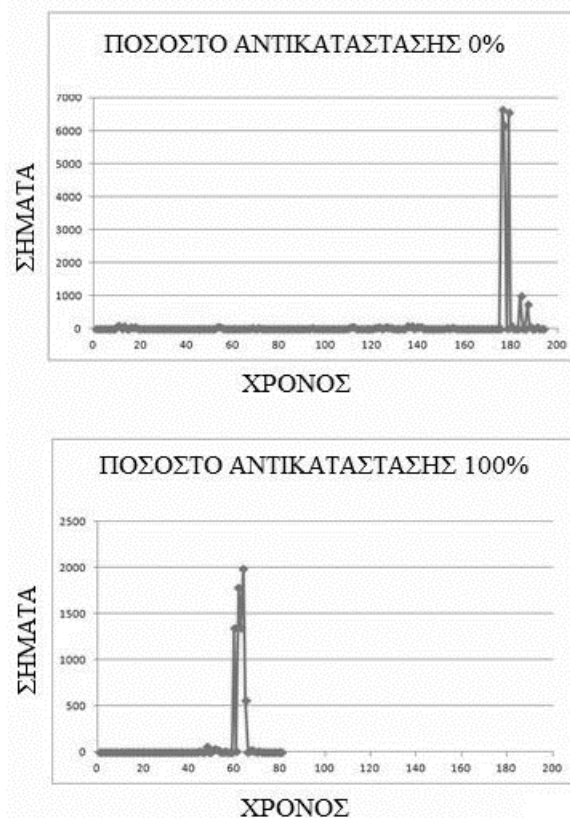


Διάγραμμα 4.18 Αποτελέσματα εργασιμότητας (κάθιση) σκυροδέματος.

Παρατηρείται εντούτοις μία συσχέτιση των αυξομειώσεων της θλιπτικής και καμπτικής αντοχής με την τιμή της εργασιμότητας του νωπού σκυροδέματος. Η συσχέτιση αυτή είναι εμφανής κατά τη σύγκριση των διαγραμμάτων 4.16 και 4.17 με το διάγραμμα 4.18. Συγκεκριμένα, η αύξηση της θλιπτικής και καμπτικής αντοχής παρουσιάζεται για τα ποσοστά στα οποία μειώνεται η εργασιμότητα, με εξαίρεση τη σύνθεση με αποκλειστικά ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή.

Παρά το γεγονός ότι το εργάσιμο σε συνδυασμό με την περιεκτικότητα του αέρα του αναμίγματος είναι γνωστό ότι επηρεάζει τις ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος και συγκεκριμένα αύξηση της εργασιμότητας οδηγεί σε μειωμένη θλιπτική αντοχή, αυτά τα μη αναμενόμενα – ανορθόδοξα αποτελέσματα της αντοχής επιδιώχθηκε να επαναληφθούν ούτως ώστε να αποκλειστεί η πρόκλησή τους από κάποιο λάθος της πειραματικής διαδικασίας. Για το λόγο αυτό επαναλήφθηκαν σε μεταγενέστερο χρόνο, ακολουθώντας την ίδια μελέτη σύνθεσης και τα ίδια πρότυπα.

Αναφορικά με τα αποτελέσματα της ακουστικής εκπομπής (ΑΕ), για το λόγο ότι τα αποτελέσματα της καμπτικής αντοχής παρουσιάζουν την προαναφερθείσα ιδιαιτερότητα και για το λόγο ότι τα αποτελέσματα της ακουστικής εκπομπής είναι άμεσα συνδεδεμένα με αυτά, δεν κρίθηκε απαραίτητο να παρουσιαστούν στο σημείο αυτό τα αποτελέσματα του συνόλου των δοκιμών. Παρουσιάζονται ενδεικτικά τα διαγράμματα της συνολικής δραστηριότητας ΑΕ (σήματα) σε σχέση με το χρόνο για τις δύο ακραίες περιπτώσεις, δηλαδή για τα δοκίμια με αποκλειστικά θραυστά και αποκλειστικά ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή (διάγραμμα 4.19).



Διάγραμμα 4.19 Συνολική δραστηριότητα ακουστικής εκπομπής (σήματα) για ποσοστά αντικατάστασης 0% και 100%.

Οι τιμές των διαγραμμάτων προέρχονται και για τις δύο περιπτώσεις από τους πρόσθιους αισθητήρες που βρίσκονται σε απόσταση 50 mm από το μέσο του δοκιμίου (δηλ. την αναμενόμενη θέση της ρωγμής). Παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις, ο αριθμός των σημάτων αυξάνει σταδιακά έως τη στιγμή της αστοχίας, όταν παρατηρείται και ο μέγιστος αριθμός σημάτων. Η κύρια διαφορά των δύο διαγραμμάτων είναι η διάρκεια του φαινομένου, η οποία είναι μικρότερη για την περίπτωση των δοκιμών με αποκλειστικά ανακυκλωμένα αδρανή και ο μέγιστος αριθμός σημάτων κατά τη θραύση, που είναι αυξημένος για την περίπτωση του σκυροδέματος αναφοράς. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στην μικρότερη καμπτική αντοχή του ανακυκλωμένου σκυροδέματος που έχει ως αποτέλεσμα να οδηγείται συντομότερα και ευκολότερα στην θραύση.

Αναφέρθηκε παραπάνω ότι για λόγους επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε σειρά συνθέσεων σκυροδέματος με τα ίδια γενικά χαρακτηριστικά, σε μεταγενέστερο χρόνο. Εντούτοις, για το λόγο ότι αυτή η σειρά πειραμάτων πραγματοποιήθηκε για επιβεβαίωση αυτών, για εξοικονόμηση χρόνου και υλικών, δεν επεκτάθηκε στο σύνολο των ιδιοτήτων του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος, αλλά μελετήθηκαν για κάθε σύνθεση: η εργασιμότητα, μέσω της δοκιμής της κάθισης και η θλιπτική αντοχή για δοκίμια ηλικίας 28 ημερών, ούτως ώστε να επιβεβαιωθεί η σχέση μεταξύ εργασιμότητας και θλιπτικής αντοχής.

Για να υπάρχει μία πληρέστερη παρακολούθηση της επίδρασης των ανακυκλωμένων αδρανών στις προαναφερθείσες ιδιότητες, μελετήθηκαν επιπλέον συνθέσεις εκτός των αρχικών έξι συνθέσεων, οι οποίες αφορούσαν σε ποσοστά

αντικατάστασης: 20%, 30%, 40% και 70%. Οι αναλογίες του αναμίγματος για τις αρχικές συνθέσεις διατηρήθηκαν ίδιες με αυτές που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.28, ενώ στον πίνακα 4.30 που ακολουθεί περιγράφονται οι αναλογίες του αναμίγματος για τις νέες συνθέσεις, κατά μέρη βάρους kg/m³.

Πίνακας 4.30 Αναλογίες αναμιγμάτων.

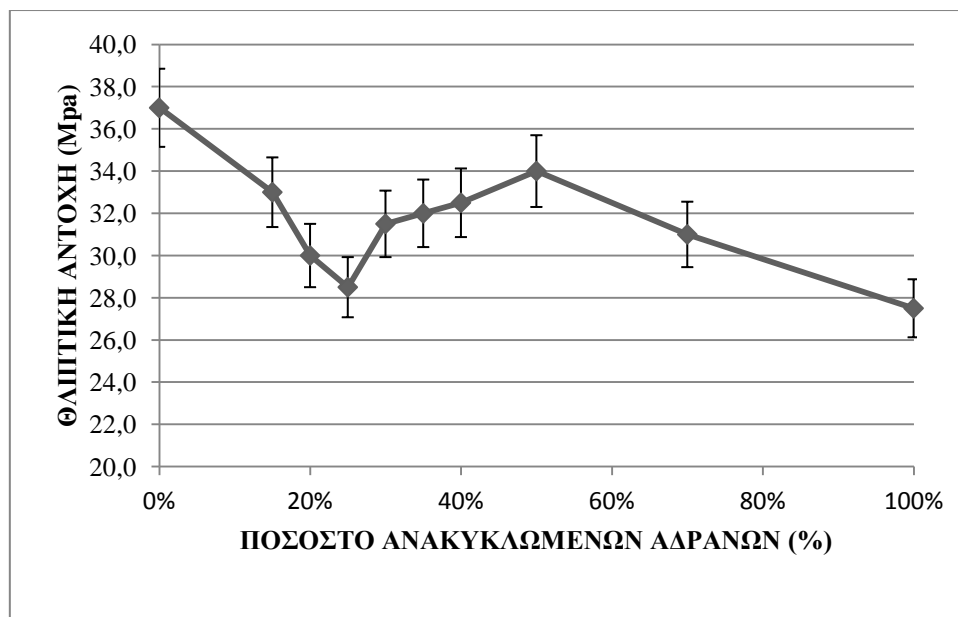
Υλικά παρασκευής	Ποσοστό αντικατάστασης			
	20%	30%	40%	70%
τσιμέντο	280	280	280	280
νερό	185	188	191	201
υπερρευστοποιητής	2,85	2,85	2,85	2,85
άμμος θραυστή	935	935	935	935
ψηφίδα θραυστή	228	200	171	190
ψηφίδα ανακυκλωμένη	54	81	109	86
χαλίκι θραυστό	540	473	405	203
χαλίκι ανακυκλωμένο	124	186	248	435
ενεργός λόγος N/T	0,50	0,50	0,50	0,50
ολικός λόγος N/T	0,66	0,67	0,68	0,72

Σε όλες τις συνθέσεις χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Portland II 42,5N, υπερρευστοποιητής Chemium 274 της εταιρείας Domylo, θραυστά λεπτόκοκκα - χονδρόκοκκα αδρανή και ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή, ενώ διατηρήθηκαν σταθερά: η ποσότητα του τσιμέντου, του υπερρευστοποιητή, των λεπτόκοκκων αδρανών, ο ενεργός λόγος νερού προς τσιμέντο (N/T), καθώς και η αναλογία χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων αδρανών στο μείγμα των αδρανών η οποία ήταν: 50% λεπτόκοκκα αδρανή και 50% χονδρόκοκκα αδρανή (15% ψηφίδα και 35% χαλίκι). Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών παρουσιάζονται στον πίνακα 4.31 που ακολουθεί.

Πίνακας 4.31 Αποτελέσματα επαναληπτικών δοκιμών.

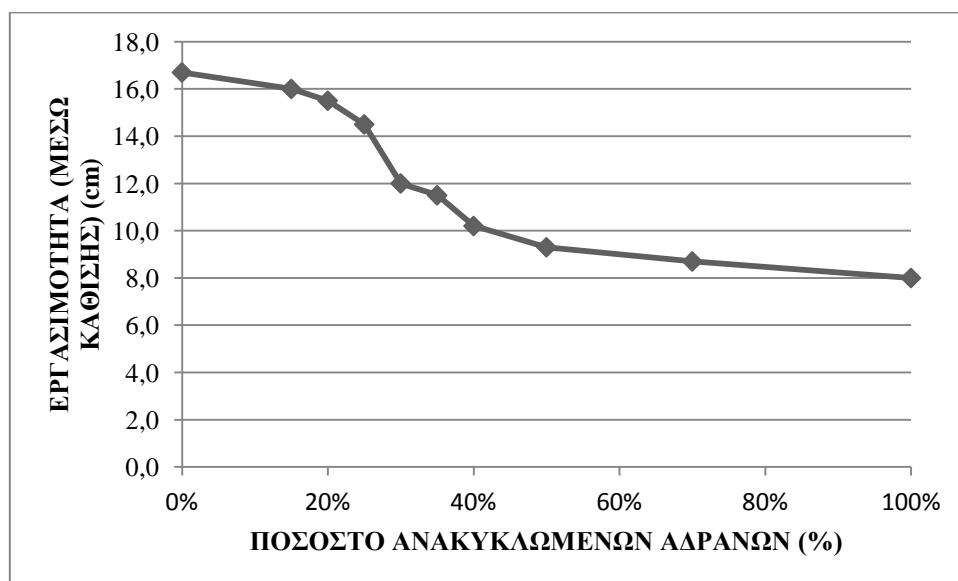
Ποσοστό αντικατάστασης (%)	Ιδιότητα	
	εργασιμότητα μέσω κάθισης (cm)	θλιπτική αντοχή 28 ημερών (MPa)
0%	16,7	37,0
15%	16,0	33,0
20%	15,5	30,0
25%	14,5	28,5
30%	12,0	31,5
35%	11,5	32,0
40%	10,2	32,5
50%	9,3	34,0
70%	8,7	31,0
100%	8,0	27,5

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα 4.20 και 4.21 στα οποία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των επαναληπτικών δοκιμών για τη θλιπτική αντοχή και την εργασιμότητα αντίστοιχα, παρατηρούμε ότι ακολουθείται η ίδια τάση με τις αρχικές δοκιμές.



Διάγραμμα 4.20 Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος.

Δηλαδή, η εργασιμότητα μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών στη σύνθεση, ενώ η θλιπτική αντοχή αρχικά μειώνεται και στη συνέχεια (σε ποσοστό 30%) αρχίζει να αυξάνεται προσωρινά παράλληλα με τη μείωση της εργασιμότητας, ενώ ακόμη μεγαλύτερη αύξηση του ποσοστού των ανακυκλωμένων αδρανών (ποσοστά 70% και 100%) οδηγεί σε μείωση της θλιπτικής αντοχής.



Διάγραμμα 4.21 Αποτελέσματα εργασιμότητας (κάθιση) σκυροδέματος.

Αυτή η ιδιαιτερότητα που παρατηρείται στα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών, δεν μας επιτρέπει να οδηγηθούμε σε ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με την

επίδραση των ανακυκλωμένων αδρανών στην αντοχή του παραγόμενου από αυτά σκυροδέματος. Ο λόγος είναι η στενή σχέση που φαίνεται να υπάρχει μεταξύ της εργασιμότητας και της αντοχής (θλιπτικής και καμπτικής). Για το λόγο αυτό, τα παραπάνω αποτελέσματα δεν αξιοποιήθηκαν για την εξαγωγή συμπερασμάτων, αλλά εντούτοις αποδείχθηκαν ιδιαίτερα χρήσιμα για το λόγο ότι οδήγησαν στη διαμόρφωση ενός διαφορετικού τρόπου προσέγγισης της μελέτης του ανακυκλωμένου σκυροδέματος.

Συγκεκριμένα, όπως θα παρουσιαστεί αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 4.2.5 για να αποφευχθεί η επίδραση της εργασιμότητας στην αντοχή του παραγόμενου σκυροδέματος, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της επίδρασης που έχει η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών στην αντοχή, για συνθέσεις κατά τις οποίες η εργασιμότητα του αναμίγματος διατηρείται σταθερή. Για τη διατήρηση σταθερής εργασιμότητας τροποποιήθηκε είτε η ποσότητα του χρησιμοποιούμενου υπερρευστοποιητή είτε ο ενεργός λόγος νερού προς τσιμέντο. Επιλέχθηκε εν συνεχεία η καταλληλότερη μεθοδολογία η οποία και αξιοποιήθηκε στο υπόλοιπο της πειραματικής διαδικασίας.

4.2.5 Επιλογή μεθοδολογίας για τον προσδιορισμό της μελέτης σύνθεσης σκυροδέματος με τη χρήση ανακυκλωμένων αδρανών.

Στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, παρουσιάστηκε εκτενώς η πειραματική διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό της επίδρασης της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών στις ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος. Διαπιστώθηκε ότι η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών επιδρά μειωτικά στην εργασιμότητα του παραγόμενου σκυροδέματος, η οποία επίδραση με τη σειρά της επηρεάζει την αντοχή του σκυροδέματος, αποδίδοντας ανορθόδοξα αποτελέσματα, τα οποία δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή ασφαλών αποτελεσμάτων σχετικά με την επιρροή των ανακυκλωμένων αδρανών.

Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε για να μπορούν τα αποτελέσματα να είναι ανεξάρτητα της εργασιμότητας του παραγόμενου αναμίγματος να τροποποιηθεί η εκάστοτε μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος και να ακολουθεί μεθοδολογία η οποία να διατηρεί σταθερή την εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος για όλα τα ποσοστά αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν δύο διαφορετικές μεθοδολογίες: η πρώτη μεθοδολογία αφορούσε στην τροποποίηση της ποσότητας του υπερρευστοποιητή που χρησιμοποιείται και η δεύτερη μεθοδολογία αφορούσε στην τροποποίηση του ενεργού λόγου νερού προς τσιμέντο.

Στις δύο περιπτώσεις, για να είναι τα αποτελέσματα συγκρίσιμα μεταξύ τους επιδιώχθηκε η εργασιμότητα να είναι ίδια και συγκεκριμένα η εργασιμότητα όλων των αναμιγμάτων, μετρούμενη μέσω της δοκιμής της κάθισης να λαμβάνει τιμή $10 \pm 0,50 \text{cm}$. Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε, τα εξαγόμενα συμπεράσματα και η επιλογή της καταλληλότερης μεθοδολογίας παρουσιάζονται εκτενώς στα δύο ακόλουθα υποκεφάλαια.

Μεθοδολογία διατήρησης σταθερής εργασιμότητας με τροποποίηση της ποσότητας του υπερρυστοποιητή.

Η πρώτη μεθοδολογία διατήρησης σταθερής της εργασιμότητας η οποία μελετήθηκε ήταν η μελέτη σύνθεσης με τροποποίηση της ποσότητας του χρησιμοποιούμενου υπερρυστοποιητή. Για το σκοπό αυτό μελετήθηκαν δέκα συνθέσεις σκυροδέματος με διαφορετικά ποσοστά αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή: 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 50%, 100%. Επιπλέον, για το λόγο ότι σκοπός ήταν πέραν της διατήρησης της εργασιμότητας ο προσδιορισμός της επίδρασης αυτής στην αντοχή του σκυροδέματος μελετήθηκε για κάθε ποσοστό η θλιπτική αντοχή δοκιμίων σκυροδέματος ηλικίας 28 ημερών.

Στο σύνολο των συνθέσεων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Portland II 42,5N, υπερρυστοποιητής Chemium 274 της εταιρείας Domylo, θραυστά αδρανή προερχόμενα από τοπικό λατομείο (λεπτόκοκκα – χονδρόκοκκα) και ανακυκλωμένα αδρανή προερχόμενα από την Ανακύκλωση Αδρανών Μακεδονίας (χονδρόκοκκα). Τα ανακυκλωμένα αδρανή χρησιμοποιήθηκαν, κατόπιν επεξεργασίας τους για την απομάκρυνση των ακαθαρσιών που βρίσκονται προσκολλημένες στην εξωτερική τους επιφάνεια, ήτοι κατόπιν πλύσης τους χειρονακτικά με νερό υπό πίεση.

Σε όλες τις συνθέσεις διατηρήθηκαν σταθερά: η ποσότητα του τσιμέντου και ο ενεργός λόγος νερού προς τσιμέντο (N/T), ο οποίος ήταν ίσος με 0,50. Επιδιώχθηκε η εργασιμότητα όλων των αναμιγμάτων να λαμβάνει τιμές $10 \pm 0,50 \text{ cm}$, με τροποποίηση της ποσότητας του χρησιμοποιούμενου υπερρυστοποιητή. Ως εκ τούτου ο υπερρυστοποιητής έλαβε τιμές μεταξύ: $1,23 - 2,12 \text{ kg/m}^3$. Στον πίνακα 4.33 περιγράφονται οι αναλογίες του αναμίγματος για το κάθε ποσοστό αντικατάστασης, κατά μέρη βάρους kg/m^3 .

Πίνακας 4.33 Αναλογίες αναμιγμάτων.

Υλικά παρασκευής	Ποσοστό αντικατάστασης %									
	0	5	10	15	20	25	30	35	50	100
τσιμέντο	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280
νερό	178	180	181	183	185	186	188	190	195	211
υπερρυστοποιητής	1,58	1,23	1,56	2,12	1,77	1,78	1,59	1,41	1,82	2,20
άμμος θραυστή	937	937	937	936	937	937	937	937	937	936
ψηφίδα θραυστή	286	271	257	243	228	214	219	186	143	0
ψηφίδα ανακυκλωμένη	0	14	27	41	54	68	82	95	136	272
χαλίκι θραυστό	677	643	609	575	540	507	474	440	338	0
χαλίκι ανακυκλωμένο	0	31	62	93	124	155	187	218	311	621
ενεργός λόγος N/T	0,63	0,64	0,65	0,65	0,66	0,67	0,67	0,68	0,70	0,75
ολικός λόγος N/T	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

Για τον καθορισμό της κάθε μελέτης σύνθεσης χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα ελέγχου των ιδιοτήτων των ανακυκλωμένων και θραυστών αδρανών: κοκκομετρική ανάλυση, περιεκτικότητα σε παιπάλη, ειδικό βάρος (μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος κορεσμένου και επιφανειακά στεγνού υλικού) και υδροαπορροφητικότητα.

Μετά τον προσδιορισμό της μελέτης σύνθεσης για κάθε ποσοστό, ξεκίνησε η παρασκευή των αναμιγμάτων. Όλα τα αδρανή (θραυστά και ανακυκλωμένα) χρησιμοποιήθηκαν κατόπιν ξήρανσής τους για την απομάκρυνση της περιεχόμενης σε αυτά υγρασίας. Η εργασιμότητα προσδιορίστηκε μέσω της δοκιμής κάθισης, βάσει των προδιαγραφών που ορίζονται στο πρότυπο ASTM C143, μία φορά για κάθε ποσοστό κατά τη συνήθη πρακτική.

Ακολούθησε η παρασκευή κυβικών δοκιμίων διαστάσεων 150x150x150mm για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής σε ηλικία 28 ημερών. Για κάθε ποσοστό παρασκευάστηκαν τρία δοκίμια και η θλιπτική αντοχή προσδιορίστηκε ως ο μέσος όρος αυτών. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε βάσει των οριζόμενων στο πρότυπο EN 12390-03, με τη χρήση της υδραυλικής μηχανής Toni Technik, η ταχύτητα της οποίας καθορίστηκε στα 0,50 MPa/s.

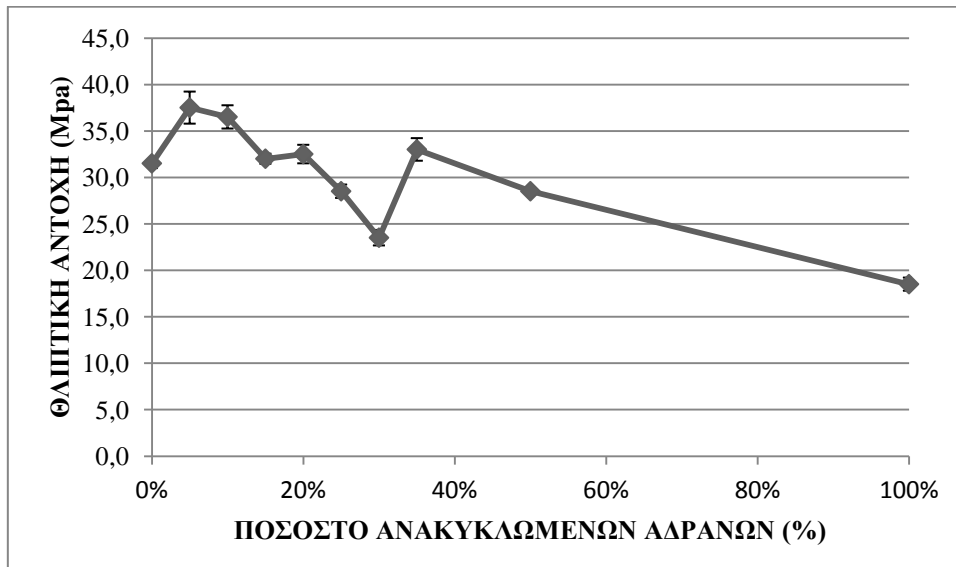
Ο πίνακας 4.34 περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της εργασιμότητας και της θλιπτικής αντοχής ανά ποσοστό αντικατάστασης. Επιπλέον, στο διάγραμμα 4.24 παρουσιάζεται διαγραμματικά η διακύμανση της θλιπτικής αντοχής συναρτήσει του ποσοστού αντικατάστασης των αδρανών.

Για όλα τα ποσοστά αντικατάστασης, η εργασιμότητα λαμβάνει τιμή (μετρούμενη μέσω κάθισης) $10 \pm 0,50$ cm, σε συμφωνία με τα χαρακτηριστικά του σχεδιασμού των αναμιγμάτων. Ωστόσο, οι τιμές της θλιπτικής αντοχής δεν παρουσιάζουν μήτε αναμενόμενη συμπεριφορά μήτε κάποια εμφανή συσχέτιση με το ποσοστό αντικατάστασης.

Πίνακας 4.34 Αποτελέσματα δοκιμών εργασιμότητας – θλιπτικής αντοχής.

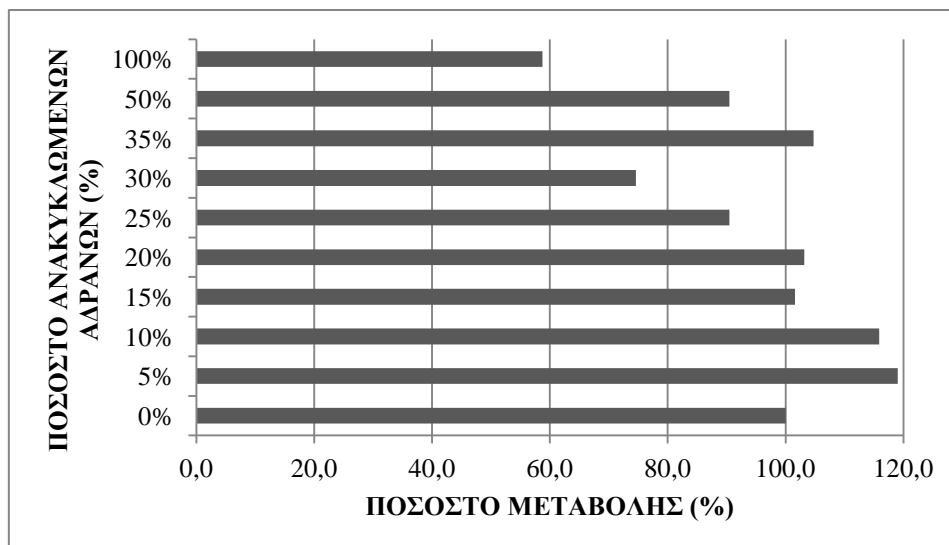
Ποσοστό αντικατάστασης	Ιδιότητα	
	εργασιμότητα μέσω κάθισης (cm)	θλιπτική αντοχή 28 ημερών (MPa)
0%	9,5	31,5
5%	10,5	37,5
10%	9,5	36,5
15%	9,8	32,0
20%	9,5	32,5
25%	9,5	28,5
30%	10,0	23,5
35%	10,0	33,0
50%	10,0	28,5
100%	9,5	18,5

Συγκεκριμένα, αναμενόταν βάσει των αποτελεσμάτων των προκαταρκτικών μελετών καθώς και των χαρακτηριστικών των ανακυκλωμένων αδρανών, η αύξηση του ποσοστού συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών στο μείγμα να οδηγεί σε μείωση της θλιπτικής αντοχής του παραγόμενου σκυροδέματος. Εντούτοις, η θλιπτική αντοχή δεν παρουσιάζει κάποια εμφανή τάση (μειωτική ή αυξητική) η οποία να σχετίζεται με το ποσοστό χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών.



Διάγραμμα 4.22 Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής.

Ειδικότερα, η θλιπτική αντοχή για μικρές τιμές του ποσοστού αντικατάστασης των θραυστών αδρανών παρουσιάζεται αυξημένη συγκριτικά με την αντοχή του σκυροδέματος αναφοράς, σε ποσοστό έως 19% (για ποσοστό 5%), στη συνέχεια για ποσοστό αντικατάστασης 25% είναι μειωμένη (μείωση 10%), κατόπιν αυξάνεται ξανά για ποσοστό 35% (αύξηση 5%) και τελικά για ποσοστά αντικατάστασης 50% και 100% μειώνεται (μείωση 10% και 41% αντίστοιχα).



Διάγραμμα 4.23 Ποσοστό μεταβολής της θλιπτικής αντοχής συγκριτικά με το σκυρόδεμα αναφοράς.

Αυτές οι διακυμάνσεις της θλιπτικής αντοχής δεν μπορούν να συσχετιστούν με την εργασιμότητα του μίγματος ούτε να συσχετιστούν με το ποσοστό συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών στη σύνθεση. Κατά συνέπεια, η μεθοδολογία αυτή η οποία αφορά στην τροποποίηση της ποσότητας του υπερρευστοποιητή που χρησιμοποιείται, κρίνεται ακατάλληλη για χρήση στον προσδιορισμό της επίδρασης των ανακυκλωμένων αδρανών στο παραγόμενο σκυρόδεμα.

Μεθοδολογία διατήρησης σταθερής εργασιμότητας με τροποποίηση του ενεργού λόγου νερού προς τσιμέντο.

Η δεύτερη μεθοδολογία για τη διατήρηση σταθερής της εργασιμότητας ήταν η μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος με τροποποίηση του ενεργού λόγου νερού προς τσιμέντο. Κατά αντιστοιχία με την πρώτη μεθοδολογία, μελετήθηκαν δέκα συνθέσεις σκυροδέματος με τα ακόλουθα ποσοστά αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή: 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 50%, 100%.

Στο σύνολο των συνθέσεων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Portland II 42,5N, υπερρευστοποιητής Chemium 274 της εταιρείας Domylco, θραυστά αδρανή προερχόμενα από τοπικό λατομείο (λεπτόκοκκα – χονδρόκοκκα) και ανακυκλωμένα αδρανή προερχόμενα από την Ανακύκλωση Αδρανών Μακεδονίας (χονδρόκοκκα). Τα ανακυκλωμένα αδρανή χρησιμοποιήθηκαν, κατόπιν επεξεργασίας τους για την απομάκρυνση των ακαθαρσιών που βρίσκονται προσκολλημένες στην εξωτερική τους επιφάνεια, ήτοι κατόπιν πλύσης τους χειρονακτικά με νερό υπό πίεση.

Σε όλες τις συνθέσεις διατηρήθηκαν σταθερά: η ποσότητα του τσιμέντου και του υπερρευστοποιητή. Επιδιώχθηκε η εργασιμότητα όλων των αναμιγμάτων να λαμβάνει τιμές $10 \pm 0,50$ cm, κατόπιν τροποποίησης του ενεργού λόγου νερού προς τσιμέντο στη σύνθεση. Ως αποτέλεσμα ο λόγος αυτός κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών: 0,47 - 0,53. Στον πίνακα 4.35 περιγράφονται οι αναλογίες του αναμίγματος για το κάθε ποσοστό αντικατάστασης, κατά μέρη βάρους kg/m^3 .

Πίνακας 4.35 Αναλογίες αναμιγμάτων.

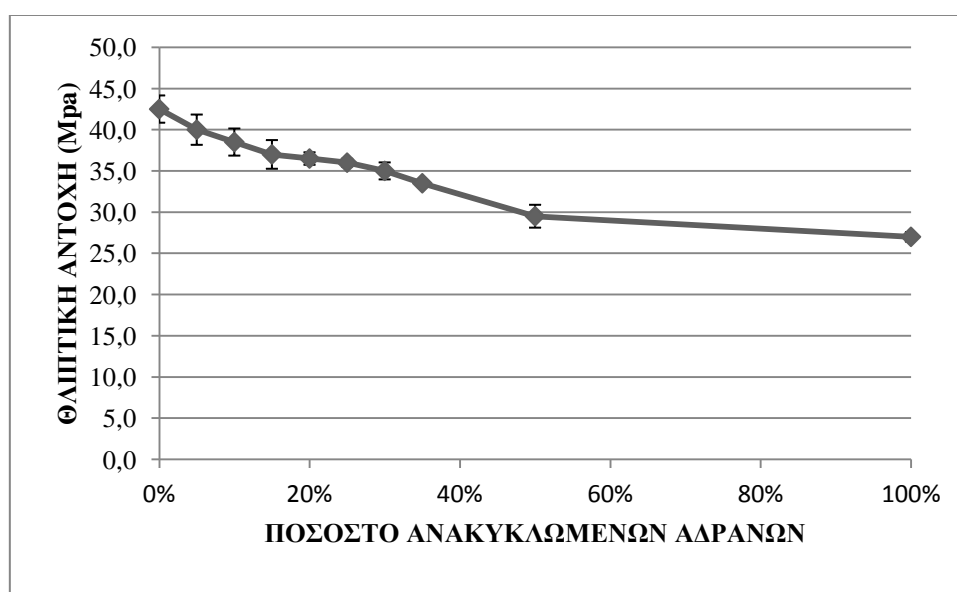
Υλικά παρασκευής	Ποσοστό αντικατάστασης %									
	0	5	10	15	20	25	30	35	50	100
τσιμέντο	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280
νερό	170	171	171	178	177	181	183	187	200	219
υπερρευστοποιητής	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85
άμμος θραυστή	946	946	949	942	946	942	942	939	928	925
ψηφίδα θραυστή	288	274	260	244	231	215	220	186	141	0
ψηφίδα ανακυκλωμένη	0	14	28	41	55	68	82	95	135	269
χαλίκι θραυστό	683	649	617	578	546	510	476	441	335	0
χαλίκι ανακυκλωμένο	0	31	63	94	126	156	188	218	308	614
ενεργός λόγος N/T	0,61	0,61	0,61	0,63	0,63	0,65	0,65	0,67	0,71	0,78
ολικός λόγος N/T	0,47	0,47	0,46	0,48	0,47	0,48	0,48	0,49	0,52	0,53

Μετά τον προσδιορισμό της μελέτης σύνθεσης για κάθε ποσοστό, στην οποία αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των δοκιμών των αδρανών, ξεκίνησε η παρασκευή των αναμιγμάτων. Όλα τα αδρανή χρησιμοποιήθηκαν, αφού πρώτα ξηράθηκαν σε φούρνο για την απομάκρυνση της περιεχόμενης σε αυτά υγρασίας. Η εργασιμότητα προσδιορίστηκε μέσω της δοκιμής κάθισης, βάσει του προτύπου ASTM C143, μία φορά για κάθε ποσοστό κατά τη συνήθη πρακτική.

Πίνακας 4.36 Αποτελέσματα δοκιμών εργασιμότητας – θλιπτικής αντοχής.

Ποσοστό αντικατάστασης	Ιδιότητα	
	εργασιμότητα μέσω κάθισης (cm)	θλιπτική αντοχή 28 ημερών (MPa)
0%	10,5	42,5
5%	10,5	40,0
10%	10,0	38,5
15%	10,5	37,0
20%	10,5	36,5
25%	10,0	36,0
30%	10,5	35,0
35%	10,5	33,5
50%	10,0	29,5
100%	9,5	27,0

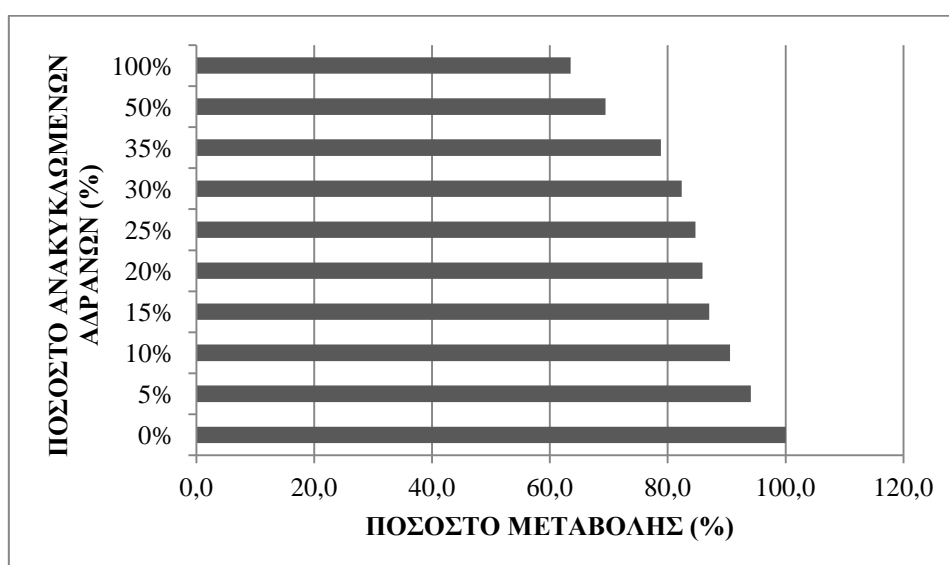
Για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής σε ηλικία 28 ημερών παρασκευάστηκαν κυβικά δοκίμια διαστάσεων 150x150x150mm, τρία ανά ποσοστό και η θλιπτική αντοχή προσδιορίστηκε ως ο μέσος όρος αυτών. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε βάσει των οριζόμενων στο πρότυπο EN 12390-03, με τη χρήση της υδραυλικής μηχανής Toni Technik, η ταχύτητα της οποίας καθορίστηκε στα 0,50 MPa/s.



Διάγραμμα 4.24 Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής.

Ο πίνακας 4.36 περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της εργασιμότητας και της θλιπτικής αντοχής ανά ποσοστό αντικατάστασης. Για όλα τα ποσοστά αντικατάστασης, η εργασιμότητα λαμβάνει τιμή υπολογιζόμενη μέσω της δοκιμής της κάθισης $10\pm 0,50\text{cm}$, σε συμφωνία με το σχεδιασμό των αναμιγμάτων. Κατά συνέπεια, οποιαδήποτε μεταβολή της θλιπτικής αντοχής θα είναι ανεξάρτητη από το εργάσιμο του αναμίγματος.

Παρατηρώντας τις τιμές της θλιπτικής αντοχής, συμπεραίνουμε ότι αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή οδηγεί σε μείωση της θλιπτικής αντοχής του παραγόμενου σκυροδέματος. Αυτή η μειωτική τάση παρουσιάζεται στο διάγραμμα 4.24. Παράλληλα στο διάγραμμα 4.25 παρουσιάζεται το ποσοστό μείωσης της θλιπτικής αντοχής συγκριτικά με το σκυρόδεμα αναφοράς ανά ποσοστό αντικατάστασης.

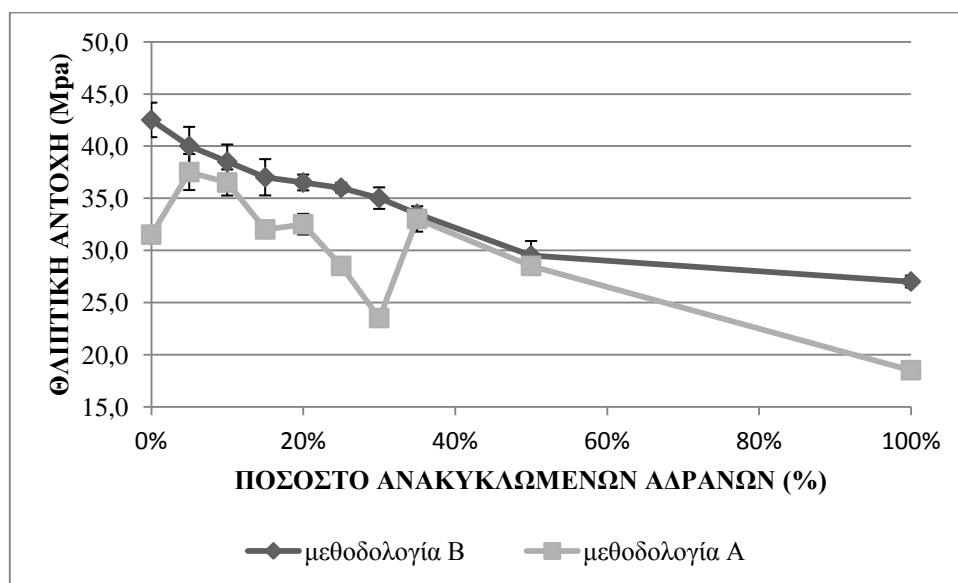


Διάγραμμα 4.25 Ποσοστό μεταβολής της θλιπτικής αντοχής συγκριτικά με το σκυρόδεμα αναφοράς.

Παρατηρείται ότι για μικρά ποσοστά συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών στο μείγμα, έως και 25%, το ποσοστό μείωσης της θλιπτικής αντοχής είναι μικρότερο του 15%. Για μεγαλύτερα ποσοστά αντικατάστασης, το ποσοστό μείωσης αυξάνεται, έως την περίπτωση του σκυροδέματος με αποκλειστικά ανακυκλωμένα αδρανή που παρουσιάζει μείωση της αντοχής του σε ποσοστό 36%. Εντούτοις, παρά τη μεγάλη μείωση της θλιπτικής αντοχής, το παραγόμενο σκυρόδεμα παρουσιάζει θλιπτική αντοχή η οποία δυνητικά το κατατάσσει σε σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25 για την περίπτωση του σκυροδέματος με αποκλειστικά ανακυκλωμένα αδρανή (θλιπτική αντοχή ίση με 27 MPa) ή μεγαλύτερη.

Από τη φάση αυτή της πειραματικής διαδικασίας καταλήγουμε καταρχήν στο συμπέρασμα ότι η παρούσα μεθοδολογία, ήτοι η διατήρηση σταθερής της εργασιμότητας με τροποποίηση του ενεργού λόγου νερού προς τσιμέντο, μηδενίζει την επίδραση της εργασιμότητας στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και κατ' επέκταση και στις λοιπές ιδιότητες του ανακυκλωμένου σκυροδέματος. Για το λόγο αυτό θεωρήθηκε κατάλληλη για να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια της παρούσας

έρευνας, στην περαιτέρω διερεύνηση των ιδιοτήτων του ανακυκλωμένου σκυροδέματος.



Διάγραμμα 4.26 Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής βάσει των μεθοδολογιών Α και Β.

Στο διάγραμμα 4.26 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής όπως αυτά υπολογίστηκαν για τις δύο μεθοδολογίες. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων εκτός από τα ανορθόδοξα αποτελέσματα της πρώτης μεθοδολογίας, παρατηρείται επιπλέον ότι η μεθοδολογία αυτή οδηγεί στην παραγωγή σκυροδέματος με μικρότερη θλιπτική αντοχή, η οποία σε κάποια ποσοστά μπορεί να είναι της τάξης του 30% (για το ποσοστό 30% διαφορά θλιπτικής αντοχής: 23,5 MPa για μεθοδολογία Α και 35,0 MPa για μεθοδολογία Β). Αυτός αποτελεί έναν ακόμη λόγο για τη μη καταλληλότητά της για χρήση στο υπόλοιπο της παρούσας έρευνας.

Επόμενο συμπέρασμα που προέκυψε είναι η αρνητική επίδραση που έχει η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών στην παρασκευή του σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα έχει απομειωμένη αντοχή συγκρινόμενο με το σκυρόδεμα αναφοράς. Επιπλέον, αυτή η απομείωση είναι μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών στο μείγμα.

Φυσικά, για το λόγο ότι τα ανακυκλωμένα αδρανή παρουσιάζουν μειονεκτήματα σε σχέση με τα συνήθως χρησιμοποιούμενα θραυστά και φυσικά αδρανή και ειδικότερα αυξημένη υδροαπορροφητικότητα, γωνιώδες και επίμηκες σχήμα, μεγάλη ανομοιομορφία ως προς τα υλικά τα οποία περιέχουν κ.λ.π., δεν αποτελεί έκπληξη η δυσμενής τους επίδραση στο παραγόμενο σκυρόδεμα.

4.2.6 Επίδραση της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.

Κατόπιν της επιλογής της κατάλληλης μεθοδολογίας για την εξάλειψη της σχέσης μεταξύ εργασιμότητας του ανακυκλωμένου σκυροδέματος και ποσοστού συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών στη σύνθεση, επιδιώχθηκε η διερεύνηση της επίδρασης των ανακυκλωμένων αδρανών στο σκυρόδεμα. Στο προηγούμενο

στάδιο της πειραματικής διαδικασίας παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του ποσοστού συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών οδηγεί στη μείωση της θλιπτικής αντοχής.

Τα ανακυκλωμένα αδρανή εξαιτίας της μεγάλης ετερογένειά τους και των λοιπών τους χαρακτηριστικών είναι πιθανόν να παρουσιάζουν ασυνήθιστη συμπεριφορά κατά τη χρήση τους στην παραγωγή σκυροδέματος. Για το λόγο αυτό, επιδιώκοντας την περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης των ανακυκλωμένων αδρανών στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, πραγματοποιήθηκε σειρά πειραμάτων στα οποία προσδιορίστηκε εκτός της θλιπτικής αντοχής δοκιμίων ηλικίας 28 ημερών και η θλιπτική αντοχή δοκιμίων 7 ημερών. Σκοπός ήταν ο προσδιορισμός εάν η θλιπτική αντοχή του ανακυκλωμένου σκυροδέματος σε ηλικία 7 ημερών ακολουθεί την ίδια πτωτική πορεία συναρτήσεως του ποσοστού συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών και εάν η μείωση αυτή είναι αυξημένη ή μειωμένη συγκρινόμενη με την αντίστοιχη μείωση σε δοκίμια ηλικίας 28 ημερών.

Επιπλέον, σε περίπτωση που η θλιπτική αντοχή των 7 ημερών ήταν υψηλότερη από την αναμενόμενη, πιθανόν να αποτελούσε μία ένδειξη για αυξημένες πρώιμες αντοχές του ανακυκλωμένου σκυροδέματος και να απαιτούνταν διερεύνηση προς την κατεύθυνση αυτή.

Για την επίτευξη του σκοπού αυτού πραγματοποιήθηκαν δοκιμές θλιπτικής αντοχής σε δοκίμια ηλικίας 7 και 28 ημερών για έξι συνθέσεις σκυροδέματος με τα ακόλουθα ποσοστά αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή: 0%, 15%, 25%, 35%, 50%, 100%. Στο σύνολο των συνθέσεων επιδιώχθηκε η εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος να είναι όμοια, τροποποιώντας κατάλληλα τον ενεργό λόγο νερού προς τσιμέντο.

Πίνακας 4.37 Αναλογίες αναμιγμάτων.

Υλικά παρασκευής	Ποσοστό αντικατάστασης					
	0%	15%	25%	35%	50%	100%
τσιμέντο	280	280	280	280	280	280
νερό	178	183	186	195	208	229
υπερρευστοποιητής	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85
άμμος θραυστή	935	935	935	928	918	911
ψηφίδα θραυστή	285	242	214	184	140	0
ψηφίδα ανακυκλωμένη	0	41	68	94	133	264
χαλίκι θραυστό	675	574	507	436	331	0
χαλίκι ανακυκλωμένο	0	93	155	216	305	604
ενεργός λόγος N/T	0,50	0,50	0,50	0,52	0,55	0,57
ολικός λόγος N/T	0,63	0,65	0,67	0,70	0,70	0,82

Σε όλες τις συνθέσεις χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Portland II 42,5N, υπερρευστοποιητής Chemium 274 της εταιρείας Domylco, θραυστά ασβεστολιθικά αδρανή (λεπτόκοκκα – χονδρόκοκκα) και ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή, κατόπιν επεξεργασίας τους για την απομάκρυνση των προσκολλημένων σε αυτά ακαθαρσιών. Οι αναλογίες του αναμίγματος κατά μέρη βάρους kg/m^3 , καθώς και ο

ολικός – ενεργός λόγος νερού προς τσιμέντο για την κάθε σύνθεση παρουσιάζονται στον πίνακα 4.37.

Ο ενεργός λόγος νερού προς τσιμέντο επιλέχθηκε εις τρόπον ώστε η εργασιμότητα του παραγόμενου νωπού σκυροδέματος να ισούται με $16 \pm 0,50$ (μετρούμενη μέσω της δοκιμής της κάθισης). Κατά συνέπεια κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών 0,50-0,57, με τις μεγαλύτερες τιμές να αντιστοιχούν στα υψηλότερα ποσοστά αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή.

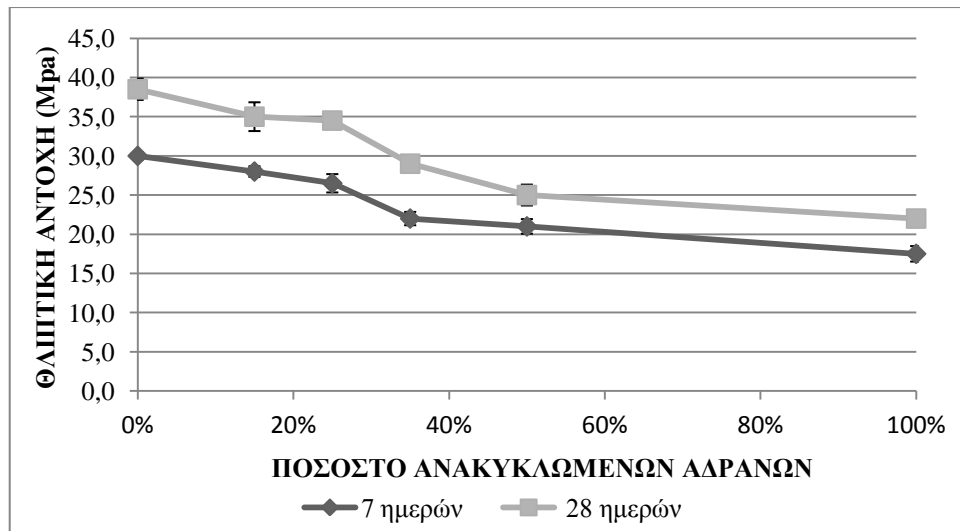
Μετά τον προσδιορισμό της μελέτης σύνθεσης για κάθε ποσοστό, πραγματοποιήθηκε η ανάμιξη της κάθε σύνθεσης. Όλα τα αδρανή χρησιμοποιήθηκαν, αφού πρώτα ξηράθηκαν σε φούρνο για την απομάκρυνση της περιεχόμενης σε αυτά υγρασίας. Στη συνέχεια, προσδιορίστηκε η εργασιμότητα μέσω της δοκιμής κάθισης, για να επιβεβαιωθεί ότι βρίσκεται εντός των επιθυμητών τιμών. Η εργασιμότητα προσδιορίστηκε σε όλες τις περιπτώσεις βάσει των οριζόμενων στο πρότυπο ASTM C143.

Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, σκοπός ήταν ο προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής σε ηλικίες δοκιμών 7 και 28 ημερών. Κατά συνέπεια απαιτήθηκαν έξι κυβικά δοκίμια ανά ποσοστό (διαστάσεων 150x150x150mm), ούτως ώστε να ελεγχθούν τρία δοκίμια ανά ηλικία και να προσδιοριστεί η θλιπτική αντοχή ως ο μέσος όρος αυτών. Μετά την σκυροδέτηση, τα δοκίμια παρέμειναν στις μήτρες για 24 περίπου ώρες. Κατόπιν, έγινε αφαίρεση των σκληρυμένων δοκιμών από τις μήτρες και τοποθέτησή τους σε ειδικές δεξαμενές με νερό σε θερμοκρασία $20 \pm 2^\circ\text{C}$ έως τη χρονική στιγμή της κάθε δοκιμής. Η δοκιμή προσδιορισμού της θλιπτικής αντοχής πραγματοποιήθηκε βάσει των οριζόμενων στο πρότυπο EN 12390-03, με τη χρήση της υδραυλικής μηχανής Topi Technik, με ταχύτητα δοκιμής που καθορίστηκε στα 0,50 MPa/s.

Πίνακας 4.38 Αποτελέσματα δοκιμών.

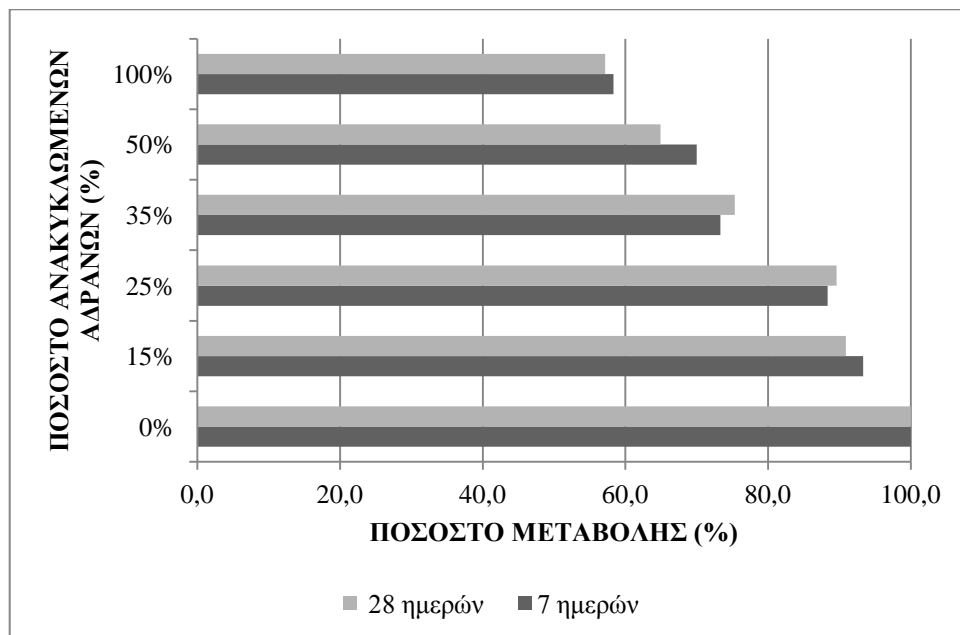
Ιδιότητα	Ποσοστό αντικατάστασης					
	0%	15%	25%	35%	50%	100%
εργασιμότητα μέσω κάθισης (cm)	16,0	16,3	15,5	15,5	16,0	16,5
θλιπτική αντοχή (7 ημερών) (MPa)	30,0	28,0	26,5	22,0	21,0	17,5
θλιπτική αντοχή (28 ημερών) (MPa)	38,5	36,0	34,5	29,0	25,0	22,0

Στον πίνακα 4.38 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης για δοκίμια ηλικίας 7 και 28 ημερών, ενώ το διάγραμμα 4.27 περιλαμβάνει την γραμμική τους απεικόνιση. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής για τις δύο ηλικίες δοκιμών, επιβεβαιώνεται καταρχήν η μείωση που προκαλεί στην αντοχή του σκυροδέματος η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών. Επιπλέον, η μείωση αυτή της θλιπτικής αντοχής είναι ανάλογη της αύξησης του ποσοστού συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών στο μίγμα. Παράλληλα, παρατηρείται ότι μέχρι το ποσοστό αντικατάστασης 25% η μείωση στη θλιπτική αντοχή θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ανεκτή, αφού η μείωση είναι περί το 10% συγκριτικά με την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος αναφοράς (διάγραμμα 4.28).



Διάγραμμα 4.27 Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής 7 και 28 ημερών.

Παρατηρείται επίσης, ότι η μείωση της θλιπτικής αντοχής με την αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης είναι αντίστοιχη για τα δοκίμια των δύο ηλικιών και ως εκ τούτου δεν παρατηρείται κάποια ιδιαιτερότητα στην συμπεριφορά των ανακυκλωμένων αδρανών.



Διάγραμμα 4.28 Ποσοστό μεταβολής της θλιπτικής αντοχής συγκριτικά με το σκυρόδεμα αναφοράς.

Συγκεκριμένα, δεν παρατηρείται αυξημένη θλιπτική αντοχή 7 ημερών σε σχέση με το αναμενόμενο, ήτοι δεν παρατηρείται μικρότερο ποσοστό μείωσης της θλιπτικής αντοχής σε σχέση με το σκυρόδεμα αναφοράς, η οποία να καθιστούσε πιθανή την ύπαρξη αυξημένων πρώιμων αντοχών στο ανακυκλωμένο σκυρόδεμα και να δικαιολογούσε την περαιτέρω έρευνα προς την κατεύθυνση αυτή. Αντιθέτως, η σχέση μεταξύ της θλιπτικής αντοχής των 7 και των 28 ημερών συμφωνεί με τη σχετική βιβλιογραφία αναφορικά με τις ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος και συγκεκριμένα με το γεγονός ότι το σκυρόδεμα αποκτά περί το 70-75% της τελικής

του αντοχής σε ηλικία 7 ημερών και περί το 90% της τελικής του αντοχής σε ηλικία 28 ημερών.

4.2.7 Προσδιορισμός του βέλτιστου ποσοστού αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή για την παρασκευή σκυροδέματος.

Στο προηγούμενο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας προσδιορίστηκε η επίδραση της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών στην θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Αποδείχθηκε ότι η αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης επιδρά μειωτικά στη θλιπτική αντοχή και συγκεκριμένα η επίδραση είναι ανάλογη του ποσοστού συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών στη σύνθεση. Εντούτοις, όπως προαναφέρθηκε η μείωση της θλιπτικής αντοχής θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ανεκτή για μικρά ποσοστά συμμετοχής και ενδεχομένως να αντισταθμίζεται από τα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη που έχει η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών.

Για το λόγο αυτό παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ο προσδιορισμός του βέλτιστου ποσοστού αντικατάστασης των θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή. Πρόκειται για το ποσοστό εκείνο στο οποίο οι αρνητικές επιπτώσεις που έχει η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών δεν καθιστούν τη χρήση του παραγόμενου σκυροδέματος απαγορευτική. Φυσικά, για τον καθορισμό του βέλτιστου ποσοστού αντικατάστασης δεν αρκεί η διερεύνηση της επίδρασης των ανακυκλωμένων αδρανών στην αντοχή του σκυροδέματος αλλά είναι επιθυμητός ο έλεγχος περισσότερων ιδιοτήτων του νωπού και του σκληρυμένου σκυροδέματος.

Για την επίτευξη του σκοπού αυτού εξετάστηκε η επίδραση της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών σε ιδιότητες του νωπού και του σκληρυμένου σκυροδέματος για διαφορετικά ποσοστά αντικατάστασης των θραυστών χονδρόκοκκων αδρανών από ανακυκλωμένα. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν συνθέσεις σκυροδέματος με τα ακόλουθα δέκα ποσοστά: 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 50%, 100%. Η επιλογή των ποσοστών αυτών έγινε στηριζόμενη στα αποτελέσματα των προηγούμενων φάσεων της πειραματικής διαδικασίας, κατά τις οποίες παρατηρήθηκε ότι οι μικρότερες επιπτώσεις παρουσιάζονταν σε ποσοστά αντικατάστασης μικρότερα του 35%. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε έως το ποσοστό των 35%, να πραγματοποιείται έλεγχος ανά ποσοστό 5%, διότι το βέλτιστο ποσοστό εικάζόταν ότι βρίσκεται μεταξύ αυτών των τιμών.

Στο σύνολο των συνθέσεων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Portland II 42,5N, υπερρευστοποιητής Chemium 274 της εταιρείας Domylco, θραυστά ασβεστολιθικά αδρανή (λεπτόκοκκα – χονδρόκοκκα) και ανακυκλωμένα αδρανή προερχόμενα από την Ανακύκλωση Αδρανών Μακεδονίας. Ανακυκλωμένα αδρανή χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά χονδρόκοκκα, κατόπιν επεξεργασίας τους, ήτοι χειρωνακτική πλύση με νερό υπό πίεση, για την απομάκρυνση των ξένων υλών που βρίσκονται προσκολλημένες στην εξωτερική τους επιφάνεια.

Για τον προσδιορισμό της μελέτης σύνθεσης του κάθε ποσοστού, αξιοποιήθηκε ο προσδιορισμός σε προγενέστερο στάδιο των ιδιοτήτων: κοκκομετρική ανάλυση (ASTM C136), περιεκτικότητα παιπάλης (ASTM C117),

ειδικό βάρος (μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος κορεσμένου και επιφανειακά στεγνού υλικού) και υδροαπορροφητικότητα (ASTM C128 και ASTM C127) των θραυστών και ανακυκλωμένων αδρανών.

Σε όλες τις συνθέσεις διατηρήθηκαν σταθερά: η ποσότητα του τσιμέντου, του ρευστοποιητή καθώς και η αναλογία χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων αδρανών στο μείγμα των αδρανών η οποία ήταν: 50% λεπτόκοκκα αδρανή και 50% χονδρόκοκκα αδρανή (15% ψηφίδα και 35% χαλίκι).

Για λόγους που έχουν ήδη αναλυθεί, επιδιώχθηκε τα αποτελέσματα των δοκιμών να είναι ανεξάρτητα από την εργασιμότητα του αναμίγματος. Επιδιώχθηκε το σύνολο των αναμιγμάτων να παρουσιάζει εργασιμότητα μετρούμενη μέσω της δοκιμής της κάθισης ίση με $11 \pm 0,50 \text{ cm}$. Ως εκ τούτου ο ενεργός λόγος νερού προς τσιμέντο έλαβε τιμές μεταξύ 0,47 – 0,55, με τις μεγαλύτερες τιμές να αντιστοιχούν σε μεγαλύτερα ποσοστά συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών. Αντίστοιχα ο ολικός λόγος νερού προς τσιμέντο, που εξαρτάται από τον ενεργό λόγο νερού προς τσιμέντο, την υδροαπορροφητικότητα και την ποσότητα των χρησιμοποιούμενων αδρανών έλαβε τιμές μεταξύ 0,61 - 0,80, όπου οι μεγαλύτερες τιμές αντιστοιχούν στα μεγαλύτερα ποσοστά συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών.

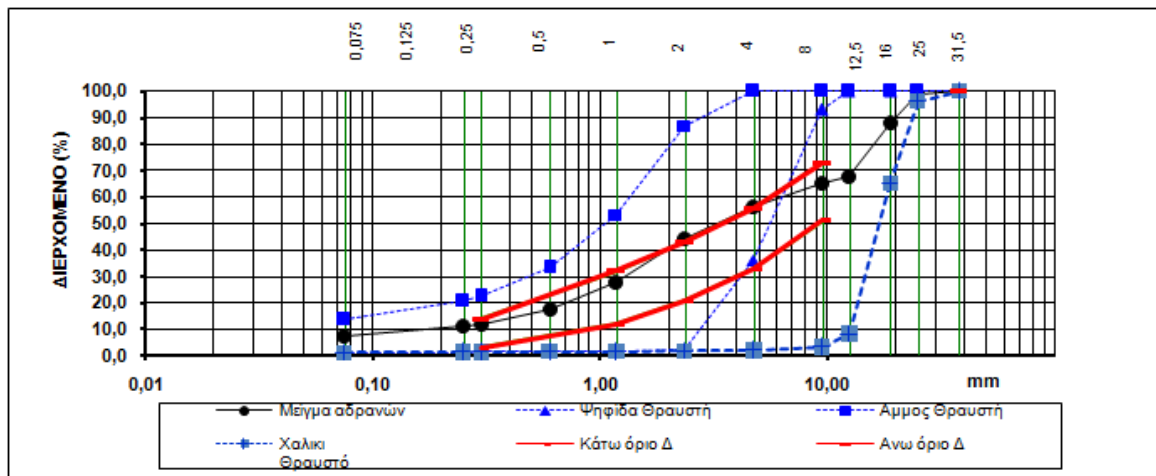
Στον πίνακα 4.39 που ακολουθεί περιγράφονται οι αναλογίες του αναμίγματος για την κάθε σύνθεση, κατά μέρη βάρους kg/m^3 , καθώς και ο ολικός – ενεργός λόγος νερού προς τσιμέντο.

Πίνακας 4.39 Αναλογίες αναμιγμάτων.

Υλικά παρασκευής	Ποσοστό αντικατάστασης %									
	0	5	10	15	20	25	30	35	50	100
τσιμέντο	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280
νερό	170	171	173	177	179	184	185	190	203	224
υπερρευστοποιητής	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85
άμμος θραυστή	946	946	946	943	942	939	939	935	925	918
ψηφίδα θραυστή	288	274	259	244	230	215	200	185	141	0
ψηφίδα ανακυκλωμένη	0	14	27	41	55	68	82	95	134	267
χαλίκι θραυστό	683	649	615	579	544	508	475	439	334	0
χαλίκι ανακυκλωμένο	0	31	63	94	124	156	187	217	307	609
ενεργός λόγος N/T	0,61	0,61	0,62	0,63	0,64	0,66	0,66	0,68	0,72	0,80
ολικός λόγος N/T	0,47	0,47	0,47	0,48	0,48	0,49	0,49	0,50	0,53	0,55

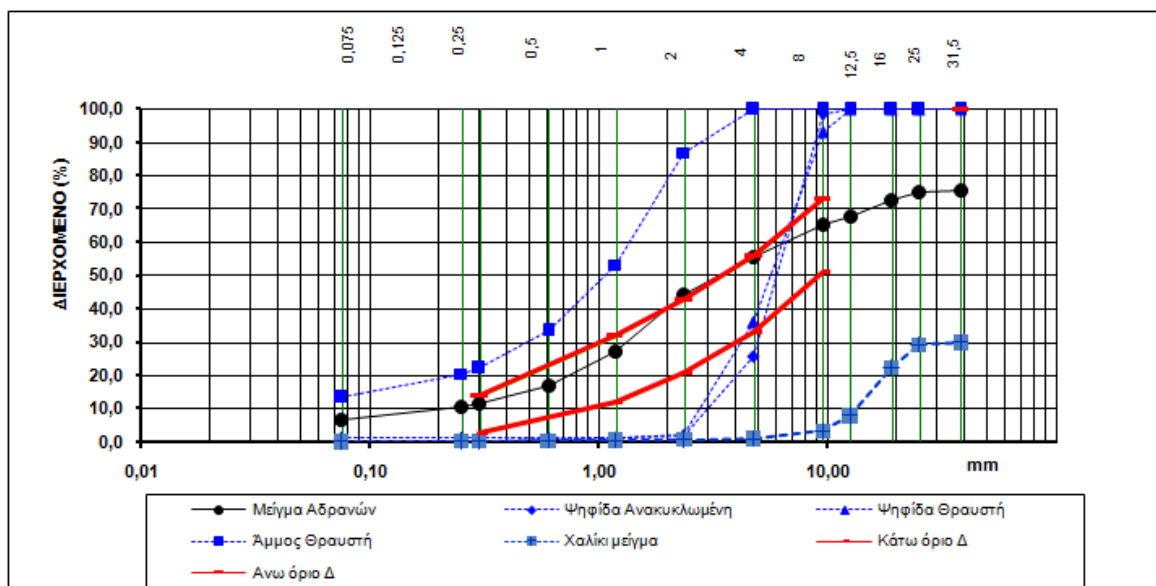
Σε όλες τις περιπτώσεις, κριτήριο για την επιλογή του ποσοστού συμμετοχής κάθε κλάσματος αδρανών στο μείγμα των αδρανών ήταν η επιδίωξη η κοκκομετρική διαβάθμιση του μείγματος να βρίσκεται εντός των ορίων που ορίζει ο ΚΤΣ-97 (άνω – κάτω όριο Δ) για την περίπτωση οπλισμένου σκυροδέματος. Η επιλογή των ορίων αυτών έγινε διότι η χρήση του οπλισμένου σκυροδέματος είναι συνηθέστερη στις κατασκευές. Στα διαγράμματα 4.29, 4.30 και 4.31 που ακολουθούν, παρουσιάζονται ενδεικτικά οι κοκκομετρικές καμπύλες του μείγματος αδρανών σε σχέση με τα όρια

του ΚΤΣ-97 για τις συνθέσεις των ποσοστών 0%, 25% και 100%. Αντίστοιχες είναι οι κοκκομετρικές καμπύλες για τις συνθέσεις των λοιπών ποσοστών αντικατάστασης.



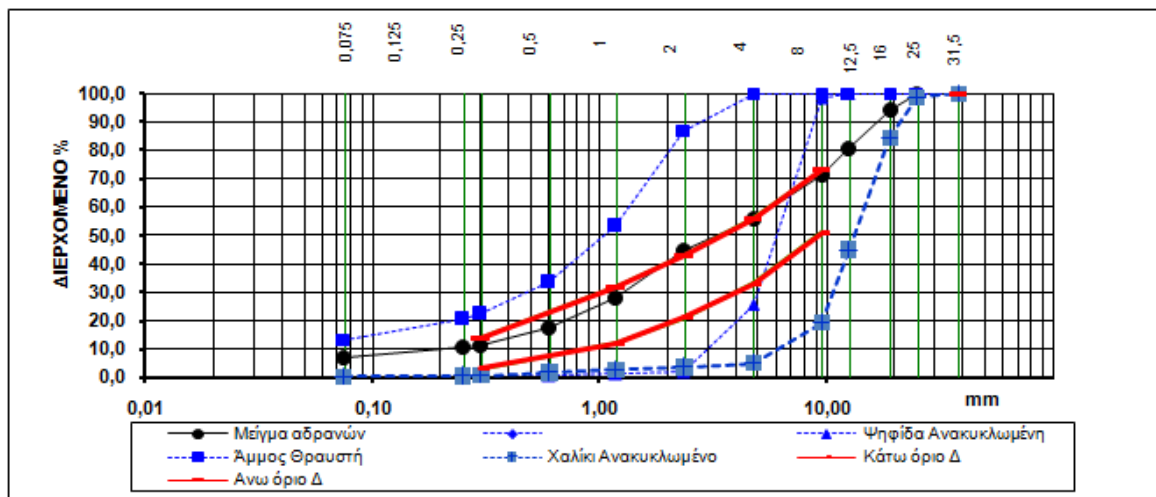
Διάγραμμα 4.29 Κοκκομετρική καμπύλη μείγματος αδρανών για ποσοστό αντικατάστασης 0%.

Μετά τον προσδιορισμό της μελέτης σύνθεσης για κάθε ποσοστό, ξεκίνησε η παρασκευή των αναμιγμάτων. Η ανάμιξη όλων των συνθέσεων πραγματοποιήθηκε σε αναμκτήρα σκυροδέματος κατάλληλης χωρητικότητας ενώ τα αδρανή χρησιμοποιήθηκαν αφού προηγουμένως είχαν ξηρανθεί σε φούρνο ούτως ώστε να απομακρυνθεί όλη η τυχούσα περιεχόμενη υγρασία. Πριν την ανάμιξη είχαν αφαιρεθεί εκτός φούρνου ούτως ώστε να αποκτήσουν θερμοκρασία δωματίου.



Διάγραμμα 4.30 Κοκκομετρική καμπύλη μείγματος αδρανών για ποσοστό αντικατάστασης 25%.

Ακολούθησαν οι εργαστηριακές δοκιμές του νωπού σκυροδέματος, οι οποίες περιελάμβαναν τον προσδιορισμό των: εργασιμότητα μέσω της δοκιμής κάθισης (ASTM C143) και μέσω της δοκιμής εξάπλωσης (EN12350-5), πυκνότητα (EN 12350-6) και περιεκτικότητα αέρα (ASTM C231). Οι ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος προσδιορίστηκαν, βάσει των οριζόμενων στο εκάστοτε πρότυπο δοκιμής που ακολουθήθηκε, μία φορά για κάθε σύνθεση σύμφωνα με τη συνήθη πρακτική.



Διάγραμμα 4.31 Κοκκομετρική καμπύλη μείγματος αδρανών για ποσοστό αντικατάστασης 100%.

Εν συνεχεία, παρασκευάστηκαν δοκίμια σκληρυμένου σκυροδέματος ανάλογα με τις απαιτήσεις των δοκιμών που επρόκειτο να εξεταστούν. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες δοκιμές: θλιπτική αντοχή σε δοκίμια ηλικίας 28 ημερών (EN 12390-3), καμπτική αντοχή (EN 12390-5) και παράλληλη παρακολούθηση της θραύσης με τη χρήση ακουστικής εκπομπής σε δοκίμια ηλικίας 28 ημερών, πυκνότητα σε δοκίμια ηλικίας 7 και 28 ημερών και έλεγχος δοκιμίων με τη χρήση υπερήχων με ταυτόχρονο προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας σε ηλικίες 7 και 28 ημερών.

Για την κάθε ιδιότητα του σκληρυμένου σκυροδέματος ελέγχθηκαν τρία δοκίμια από κάθε σύνθεση και προσδιορίστηκε ο μέσος όρος αυτών. Ειδικότερα, απαιτήθηκαν: τρία κυβικά δοκίμια διαστάσεων 150x150x150mm (για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής) και τρία πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 100x100x400mm (για τον υπολογισμό της καμπτικής αντοχής) για κάθε σύνθεση. Για τον προσδιορισμό της πυκνότητας του σκληρυμένου σκυροδέματος και του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας (μέσω της δοκιμής των υπερήχων) χρησιμοποιήθηκαν τα πρισματικά δοκίμια και δεν απαιτήθηκε η παρασκευή επιπλέον δοκιμίων, αφού οι δοκιμές αυτές είναι μη καταστροφικές.

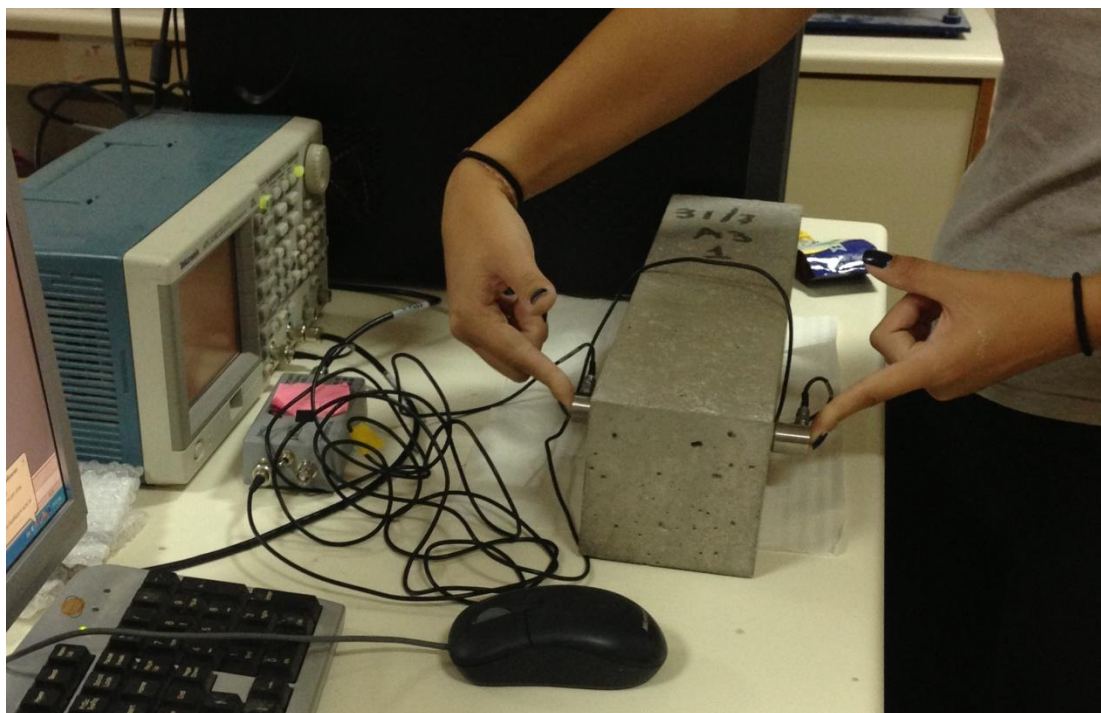
Για την παρασκευή των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε έγχυση του μείγματος, μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών νεπού σκυροδέματος, σε πιστοποιημένες μήτρες κατάλληλων διαστάσεων (βάσει EN 12390-1) που στη συνέχεια τοποθετήθηκαν στην τράπεζα δόνησης, όπου συμπυκνώθηκαν. Μετά την σκυροδέτηση, τα δοκίμια παρέμειναν στις μήτρες για 24 περίπου ώρες. Κατόπιν, έγινε αφαίρεση των σκληρυμένων δοκιμίων από τις μήτρες και τοποθέτησή τους σε ειδικές δεξαμενές με νερό σε θερμοκρασία $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ έως τη χρονική στιγμή διεξαγωγής της κάθε δοκιμής.

Η πυκνότητα του σκληρυμένου σκυροδέματος προσδιορίστηκε βάσει του προτύπου EN 12390-7, κατόπιν του προσδιορισμού της μάζας και του όγκου των πρισματικών δοκιμίων για κάθε δοκίμιο σε ηλικία 7 και 28 ημερών. Ο προσδιορισμός της πυκνότητας δεν προκαλεί φθορά στα δοκίμια, ούτως ώστε να επηρεάζονται οι μετέπειτα προσδιοριζόμενες ιδιότητες και επιπλέον απαιτεί προαπαιτούμενο

δεδομένο για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας βάσει της ταχύτητας υπερήχων.

Η δοκιμή των υπερήχων είναι μία μη καταστροφική δοκιμή που βασίζεται στον προσδιορισμό της ταχύτητας των υπερήχων που μεταδίδονται διαμέσου δοκιμίων σκυροδέματος. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στα πρισματικά δοκίμια σε ηλικία 7 και 28 ημερών, προκειμένου να προσδιοριστούν τυχούσες αλλαγές με την πάροδο του χρόνου. Για το λόγο αυτό, οι θέσεις στις οποίες πραγματοποιήθηκε η δοκιμή σε κάθε δοκίμιο, σε ηλικία 7 ημερών, επισημάνθηκαν για να διασφαλιστεί ότι η δοκιμή θα επαναλαμβάνονται στην ίδια ακριβώς θέση σε ηλικία 28 ημερών.

Σκοπός της δοκιμής ήταν ο προσδιορισμός του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος καθώς και ο έλεγχος της επίδρασης του ποσοστού αντικατάστασης των θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή στην μετρούμενη ταχύτητα των υπερήχων, που αποτελεί έναν έμμεσο τρόπο υπολογισμού της αντοχής του σκυροδέματος. Η πειραματική διάταξη αποτελείται από ένα μέσο το οποίο παράγει και μεταδίδει τους υπερήχους στο σκυρόδεμα (πομπός) και από ένα μέσο το οποίο αντιλαμβάνεται την άφιξη του παλμού (δέκτης) και μετρά με ακρίβεια το χρόνο που χρειάστηκε ο παλμός για να ταξιδέψει διαμέσου του υλικού. Στην παρούσα έρευνα οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν τοποθετώντας τους αισθητήρες (πομπός-δέκτης) σε δύο αντικριστές πλευρές του προς εξέταση δοκιμίου (άμεση μετάδοση), όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 4.14.

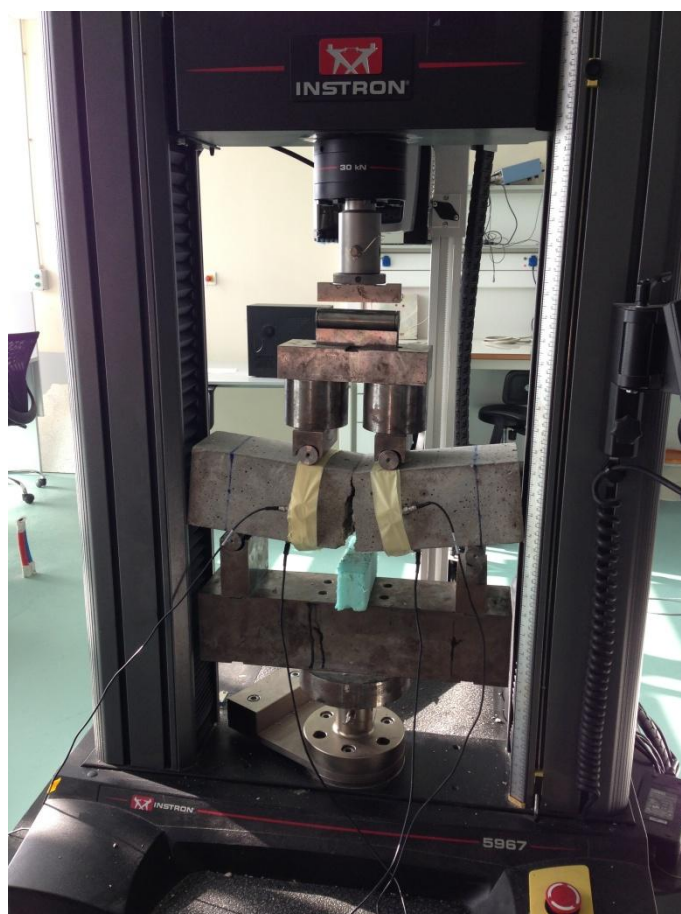


Εικόνα 4.14 Πειραματική διάταξη δοκιμής υπερήχων.

Οι μετρήσεις διενεργήθηκαν από αισθητήρες (R15, PAC) οι οποίοι εμφανίζουν μέγιστη ευαισθησία περίπου 150 kHz και έχουν διάμετρο 15 mm. Για την εξέταση των διαμήκων κυμάτων, οι υπέρηχοι τροφοδοτούν τον μετατροπέα σε κύκλους των 150 kHz, ενώ το λαμβανόμενο σήμα προενισχύθηκε με 40 dB και ψηφιοποιήθηκε με ένα ρυθμό δειγματοληψίας τουλάχιστον 10 MHz. Ως λιπαντική

ουσία, για την καλύτερη επαφή των αισθητήρων στα δοκίμια, χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη ποσότητα μελιού. Πριν από κάθε μέτρηση της ταχύτητας των υπερήχων ελέγχθηκε η ένδειξη του οργάνου, λαμβάνοντας υπόψη ότι για άμεση επαφή πομπού και δέκτη, η ένδειξη πρέπει να είναι μηδέν. Το επίπεδο θορύβου ήταν χαμηλό και ως εκ τούτου, η ταχύτητα υπερήχων μετρήθηκε με την πρώτη ανιχνεύσιμη διατάραξη της κυματομορφής (έναρξη). Η ταχύτητα παλμού για κάθε δείγμα και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας υπολογίστηκαν λαμβάνοντας υπόψη τα οριζόμενα στο αμερικανικό πρότυπο ASTM C597.

Η δοκιμή προσδιορισμού της θλιπτικής αντοχής, πραγματοποιήθηκε στα κυβικά δοκίμια βάσει των οριζόμενων στο πρότυπο EN 12390-03, με τη χρήση της υδραυλικής μηχανής Toni Technik με μέγιστο φορτίο 3000kN. Η ταχύτητα της δοκιμής καθορίστηκε στα 0,50 MPa/s. Τα δοκίμια ελέγχθηκαν κάθετα προς τη διεύθυνση της έγχυσής τους και σε ηλικία 28 ημερών, ενώ στο τέλος κάθε δοκιμής εκτιμήθηκε ο τύπος της θραύσης και το αποτέλεσμα έγινε δεκτό εφόσον ο τύπος της θραύσης δεν ήταν ασυνήθιστος.



Εικόνα 4.15 Διάταξη δοκιμής κάμψης και θέσης αισθητήρων ακουστικής εκπομπής – δοκίμιο κάμψης μετά τη θραύση.

Η δοκιμή προσδιορισμού της καμπτικής αντοχής, πραγματοποιήθηκε στα πρισματικά δοκίμια βάσει των οριζόμενων στο πρότυπο EN 12390-5 για την κάμψη τεσσάρων σημείων. Για την διεξαγωγή της δοκιμής κάμψης χρησιμοποιήθηκε η σέρβο - υδραυλική μηχανή INSTRON με μέγιστο φορτίο 30kN. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, το ασκούμενο φορτίο αυξανόταν με σταθερό ρυθμό τάσης 0,05 MPa/s έως

την θραύση οπότε τερματιζόταν αυτόματα η δοκιμή. Το δοκίμιο τοποθετείται εις τρόπον ώστε τα άνω και κάτω ανοίγματα μεταξύ των σημείων όπου ασκείται η πίεση να είναι 100 mm και 300 mm αντίστοιχα. Για να ληφθεί υπόψη το αποτέλεσμα της δοκιμής έπρεπε η θραύση των δοκιμίων να πραγματοποιηθεί με μια κεντρική ρωγμή στο εφελκυόμενο κάτω μέρος του δοκιμίου και περί το μέσο αυτού (εικόνα 4.15).

Η ακουστική εκπομπή αξιοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των δοκιμών καμπτικής αντοχής. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις αισθητήρες (R15, PAC) με μέγιστη ευαισθησία περί τα 150kHz και διάμετρο 15mm. Δύο από αυτούς τοποθετήθηκαν στην μπροστινή πλευρά του δοκιμίου (εικόνα 4.15), ενώ οι άλλοι δύο τοποθετήθηκαν στην κάτω εφελκυόμενη πλευρά του δοκιμίου. Για την αποφυγή μικρομετακινήσεων των αισθητήρων χρησιμοποιήθηκε κολλητική ταινία κατά τη διάρκεια του πειράματος. Η οριζόντια απόσταση μεταξύ των αισθητήρων ήταν 100 mm και ο πρώτος αισθητήρας τοποθετήθηκε σε οριζόντια απόσταση 50 χιλιοστών από το κέντρο του δοκιμίου, όπου αναμενόταν η ρωγμή. Οι πρώτοι δύο αισθητήρες είναι αυτοί που λαμβάνουν τις απαιτούμενες τιμές AE, ενώ οι άλλοι δύο εντοπίζουν τη θέση της ρωγμής. Τα σήματα καταγράφηκαν σε έναν πίνακα παρακολούθησης τεσσάρων καναλιών PCI-2, PAC με ρυθμό καταγραφής 10 MHz, ενώ το όριο καταγραφής ορίστηκε στα 40 dB, προκειμένου να αποφευχθεί η καταγραφή του θορύβου περιβάλλοντος.

Η συνολική δραστηριότητα AE (πόσα σήματα καταγράφηκαν) είναι ενδεικτική της έκτασης της βλάβης ή του αριθμού των ρωγμών και είναι το πιο σημαντικό δεδομένο, αφού σχετίζεται άμεσα με την ύπαρξη και διάδοση βλάβης. Επιπρόσθετα, το σχήμα της καταγεγραμμένης κυματομορφής προσφέρει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την πηγή του σήματος. Εκτός αυτών υπάρχουν πολλές παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών της κυματομορφής, μέρος αυτών χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των πειραμάτων της ακουστικής εκπομπής και παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος, εκτός των δοκιμών των υπερήχων και της ακουστικής εκπομπής, παρουσιάζονται ανά ποσοστό αντικατάστασης στον πίνακα 4.40 που ακολουθεί.

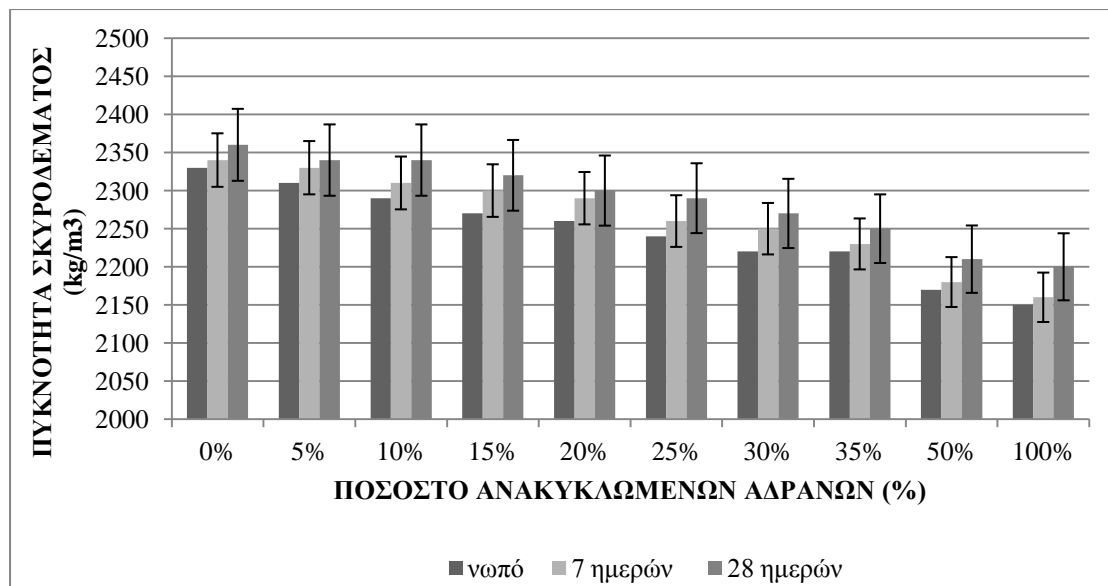
Τα αποτελέσματα των δοκιμών της εργασιμότητας συμβαδίζουν με τις απαιτήσεις του σχεδιασμού όλων των συνθέσεων και διατηρούνται σχεδόν σταθερά για όλα τα ποσοστά αντικατάστασης των θραυστών αδρανών. Συγκεκριμένα, η εργασιμότητα μετρούμενη μέσω της κάθισης λαμβάνει τιμές $11 \pm 0,5$ cm και μετρούμενη μέσω της εξάπλωσης λαμβάνει τιμές μεταξύ 46,5 – 48,5 cm. Η δοκιμή της εξάπλωσης αξιοποιήθηκε κυρίως για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων της δοκιμής της κάθισης, ούτως ώστε να αποφευχθεί τυχούσα επίδραση της εργασιμότητας στις ιδιότητες του παραγόμενου σκυροδέματος.

Πίνακας 4.40 Αποτελέσματα δοκιμών.

Ιδιότητα	Ποσοστό αντικατάστασης									
	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	50%	100%
εργασιμότητα μέσω κάθισης (cm)	10,5	10,5	11,0	10,5	11,0	11,0	11,0	11,5	11,5	10,5
εργασιμότητα μέσω εξάπλωσης (cm)	46,5	47,0	47,0	47,5	47,5	47,0	46,5	48,0	48,5	47,5
πυκνότητα νωπού (Kg/m ³)	2330	2310	2290	2270	2260	2240	2220	2220	2170	2150
περιεκτικότητα σε αέρα (%)	2,0	2,1	2,1	2,2	2,0	2,1	2,2	2,2	2,4	2,4
πυκνότητα σκληρυμένου (7 ημερών) (Kg/m ³)	2340	2330	2310	2300	2290	2260	2250	2230	2180	2160
πυκνότητα σκληρυμένου (28 ημερών) (Kg/m ³)	2360	2340	2340	2320	2300	2290	2270	2250	2210	2200
θλιπτική αντοχή (28 ημερών) (MPa)	44,5	43,0	41,5	39,0	37,5	37,0	35,0	33,0	29,0	26,5
καμπτική αντοχή (28 ημερών) (MPa)	5,7	5,5	5,3	5,1	5,0	4,9	4,7	4,5	4,3	3,9

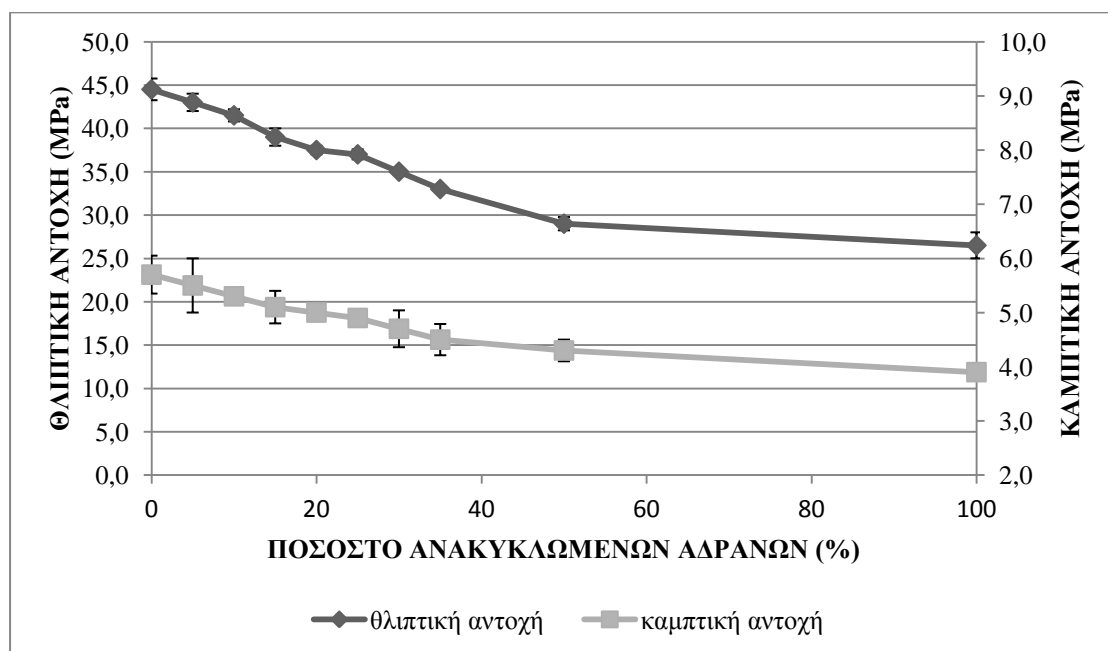
Το ποσοστό του περιεχόμενου αέρα στο νωπό σκυρόδεμα κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 2 – 2,4% για το σύνολο των ποσοστών αντικατάστασης. Το υψηλότερο ποσοστό περιεχόμενου αέρα (2,4%) αντιστοιχεί στις συνθέσεις με τα μεγαλύτερα ποσοστά συμμετοχής ανακυκλωμένων αδρανών, ήτοι στα ποσοστά 50% και 100%. Η αύξηση αυτή ενδεχομένως να οφείλεται στο αυξημένο πορώδες που έχουν τα ανακυκλωμένα αδρανή. Εντούτοις λόγω της μικρής διαφοράς περιεχόμενου αέρα μεταξύ των συνθέσεων, δεν οδηγούμαστε σε κάποιο σχετικό συμπέρασμα και επιπλέον, δεν αναμένεται ιδιαίτερη επίδραση στις ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος.

Στο διάγραμμα 4.32 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πυκνότητας του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος (7 και 28 ημερών). Παρατηρούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις η αύξηση της συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών οδηγεί σε μείωση της πυκνότητας. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο και οφείλεται στο μικρότερο ειδικό βάρος των ανακυκλωμένων αδρανών. Εντούτοις, η μείωση αυτή είναι μικρή ήτοι για σκυρόδεμα με αποκλειστικά ανακυκλωμένα αδρανή η πυκνότητα μειώνεται σε ποσοστό περί το 8% συγκριτικά με την πυκνότητα του σκυροδέματος αναφοράς, ενώ σε μικρότερα ποσοστά είναι της τάξης του 3-4% (ενδεικτική τιμή για ποσοστό αντικατάστασης 25%). Φυσικά, παρά τη μείωση αυτή το παραγόμενο ανακυκλωμένο σκυρόδεμα αποτελεί σκυρόδεμα συνήθους φαινομένου βάρους ομοίως με το σκυρόδεμα αναφοράς.



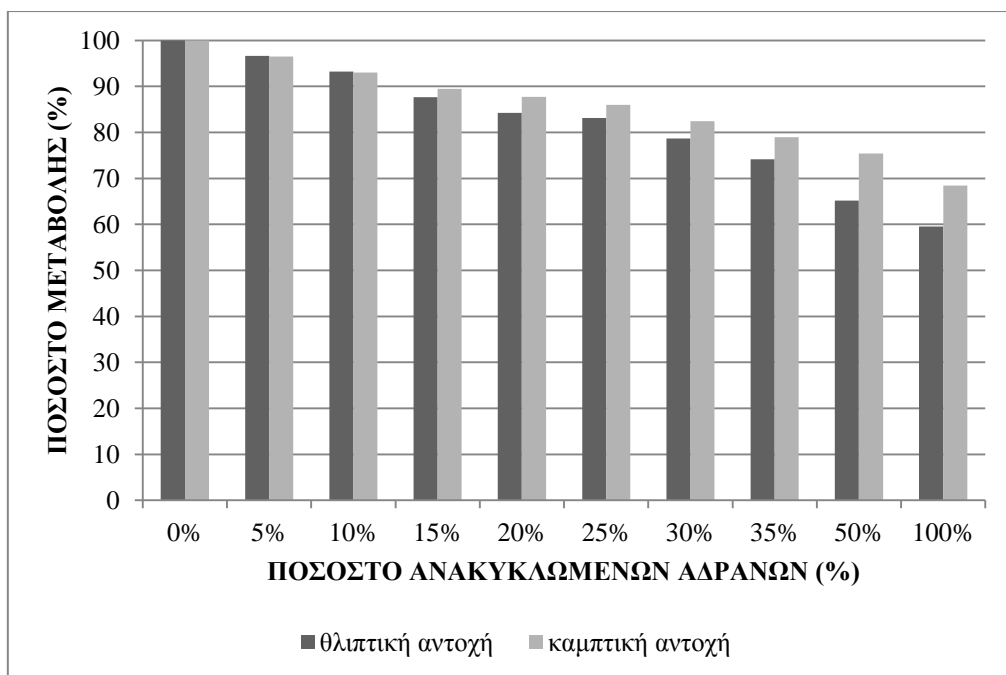
Διάγραμμα 4.32 Αποτελέσματα πυκνότητας νοπού και σκληρυμένου σκυροδέματος.

Η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών επιδρά δυσμενώς στην αντοχή του σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι το ποσοστό συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών στη σύνθεση έχει άμεση σχέση με τη μείωση της αντοχής του παραγόμενου σκυροδέματος. Αυτό παρατηρείται τόσο για την θλιπτική όσο και την καμπτική αντοχή. Αναφορικά με τη θλιπτική αντοχή, επιβεβαιώνονται τα αποτελέσματα των προηγούμενων πειραματικών φάσεων.



Διάγραμμα 4.33 Αποτελέσματα θλιπτικής και καμπτικής αντοχής σκυροδέματος.

Στο διάγραμμα 4.33 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης και κάμψης για τα ποσοστά αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή που εξετάστηκαν, ενώ στο διάγραμμα 4.34 παρουσιάζεται το ποσοστό της μείωσης της αντοχής συγκρινόμενο με την αντοχή του σκυροδέματος αναφοράς.



Διάγραμμα 4.34 Ποσοστό μείωσης της θλιπτικής και καμπτικής αντοχής συγκριτικά με το σκυρόδεμα αναφοράς.

Η μείωση της αντοχής είναι ανάλογη με το ποσοστό συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών στο μείγμα των αδρανών και για την περίπτωση χρήσης αποκλειστικά ανακυκλωμένων χονδρόκοκκων αδρανών φτάνει σε ποσοστό 40% για τη θλιπτική αντοχή και 32% για την καμπτική αντοχή. Εντούτοις, παρατηρείται ότι για μικρότερα ποσοστά αντικατάστασης, η μείωση της αντοχής είναι μικρότερη και παρά την απομείωση της αντοχής του παραγόμενου προϊόντος αυτό εξακολουθεί να διατηρεί μία σχετικά υψηλή αντοχή, η οποία επιτρέπει την τυχούσα χρήση του σε κατασκευές.

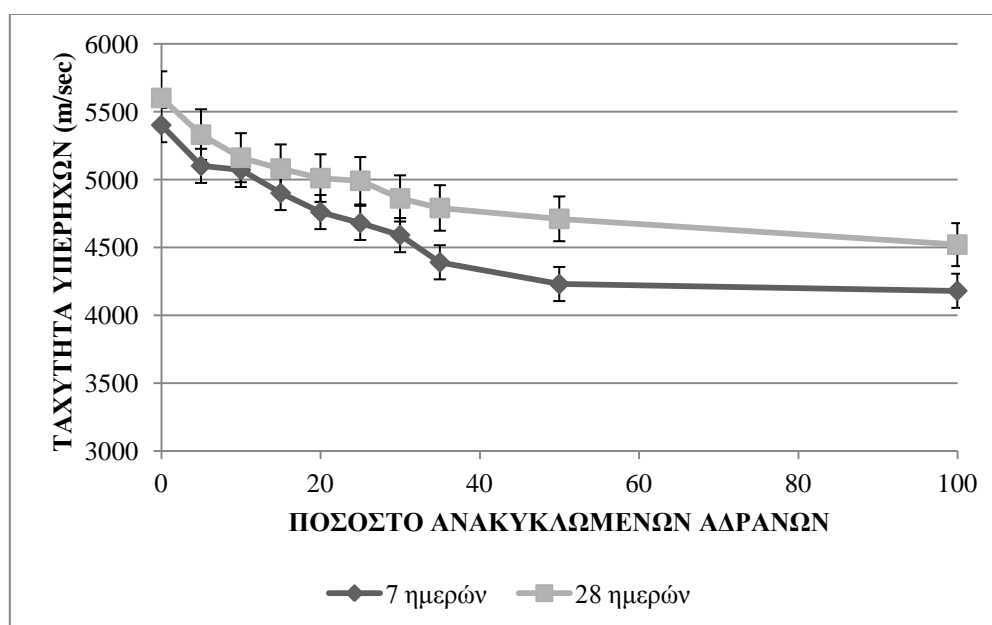
Εκτός των καταστροφικών δοκιμών προσδιορισμού της θλιπτικής και καμπτικής αντοχής αξιοποιήθηκε η μέθοδος των υπερήχων ως μία έμμεση μέθοδος ελέγχου της αντοχής του σκληρυμένου σκυροδέματος. Όπως έχει αναφερθεί ανωτέρω ο προσδιορισμός της ταχύτητας των υπερήχων πραγματοποιήθηκε στα πρισματικά δοκίμια σε ηλικία 7 και 28 ημερών, τα οποία εν συνεχεία χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της καμπτικής αντοχής. Η ταχύτητα των υπερήχων ανά δοκίμιο προσδιορίστηκε ως ο μέσος όρος τριών ελέγχων, σε τρεις διαφορετικές θέσεις. Επίσης, λόγω της συμβατικής συντήρησης των δοκιμίων η μετρούμενη ταχύτητα δεν επηρεαζόταν από την υγρασία και κατά επέκταση δεν απαιτήθηκε διόρθωση αυτής. Επιπλέον, βάσει των αποτελεσμάτων της ταχύτητας των υπερήχων και της πυκνότητας προσδιορίστηκε το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας ανά ποσοστό και ηλικία δοκιμίων.

Στον πίνακα 4.41 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ταχύτητας των υπερήχων και του προσδιορισμού του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας για δοκίμια ηλικίας 7 και 28 ημερών, ενώ στα διαγράμματα 4.35 και 4.36 παρουσιάζεται η διαγραμματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων αυτών, συναρτήσει του ποσοστού αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή.

Πίνακας 4.41 Αποτελέσματα ταχύτητας υπερήχων και δυναμικού μέτρου ελαστικότητας.

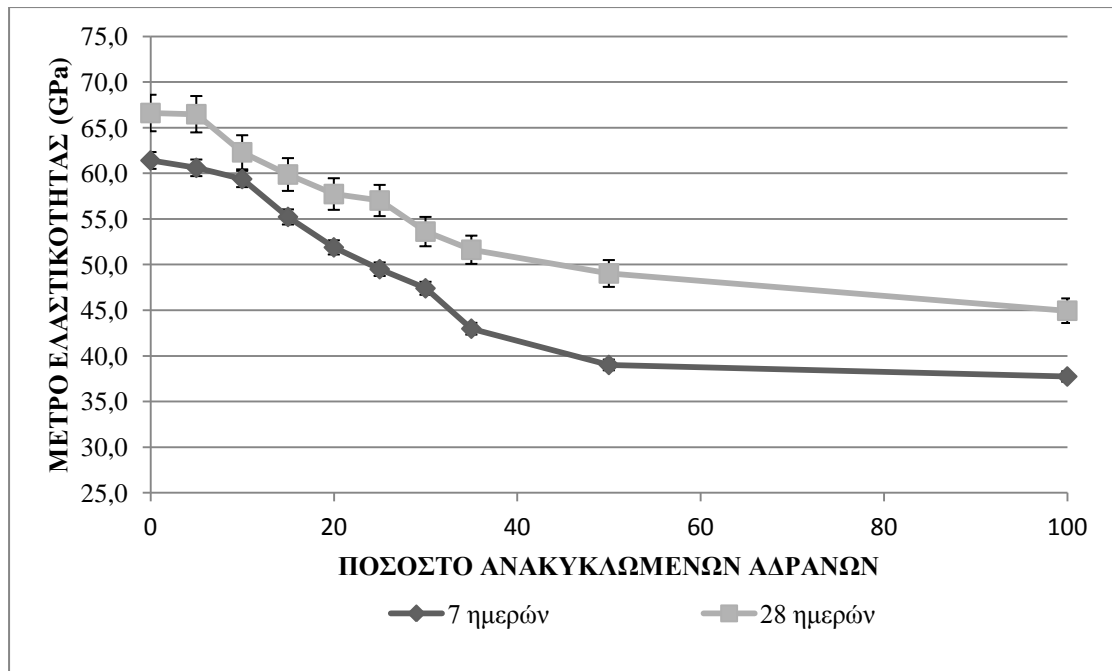
Ιδιότητα	Ποσοστό αντικατάστασης									
	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	50%	100%
ταχύτητα υπερήχων (7 ημερών) (m/s)	5400	5100	5070	4900	4760	4680	4590	4390	4230	4180
πυκνότητα σκληρυμένου (7 ημερών) (Kg/m ³)	2340	2330	2310	2300	2290	2260	2250	2230	2180	2160
δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (7 ημερών) (GPa)	61,4	60,6	59,4	55,2	51,9	49,5	47,4	43,0	39,0	37,7
ταχύτητα υπερήχων (28 ημερών) (m/s)	5600	5330	5160	5080	5010	4990	4860	4790	4710	4520
πυκνότητα σκληρυμένου (28 ημερών) (Kg/m ³)	2360	2340	2340	2320	2300	2290	2270	2250	2210	2200
δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (28 ημερών) (GPa)	66,6	66,5	62,3	59,9	57,7	57,0	53,6	51,6	49,0	44,9

Παρατηρήθηκε ότι αύξηση του ποσοστού συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών, οδηγεί σε μείωση της ταχύτητας των υπερήχων, ανεξάρτητα από την ηλικία των δοκιμίων. Παράλληλα, για όλα τα ποσοστά η ταχύτητα των υπερήχων είναι αυξημένα για δοκίμια ηλικίας 28 ημερών.



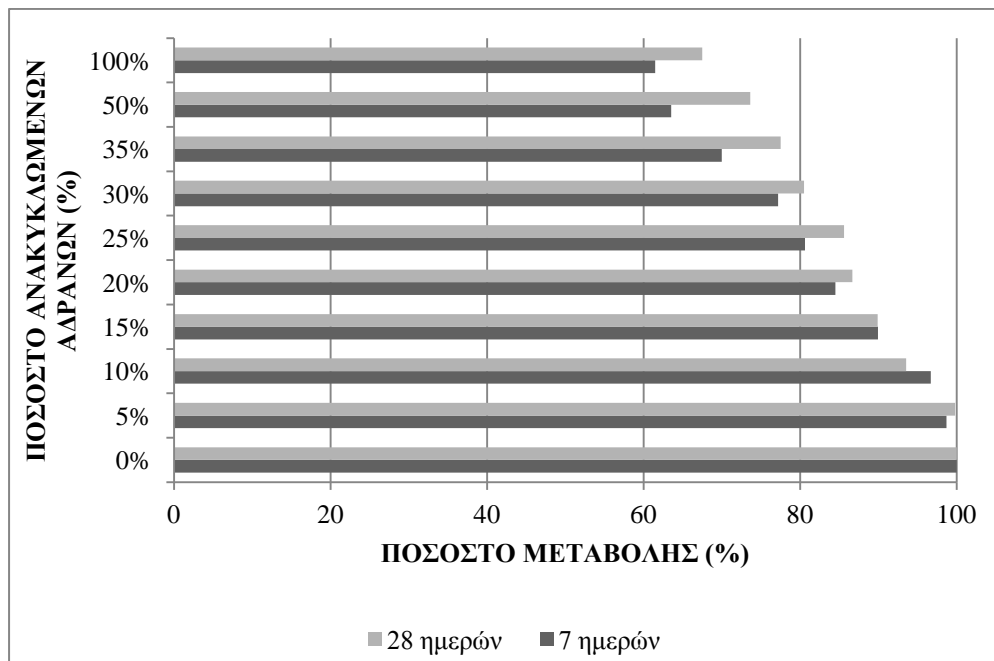
Διάγραμμα 4.35 Αποτελέσματα ταχύτητας υπερήχων για δοκίμια ηλικίας 7 και 28 ημερών.

Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο, αφού βάσει βιβλιογραφίας, υπάρχει συσχέτιση μεταξύ ταχύτητας υπερήχων και θλιπτικής αντοχής. Συγκεκριμένα, μείωση της ταχύτητας των υπερήχων αποτελεί μία ένδειξη της μείωσης της θλιπτικής αντοχής.



Διάγραμμα 4.36 Αποτελέσματα δυναμικού μέτρου ελαστικότητας για δοκίμια ηλικίας 7 και 28 ημερών.

Αντίστοιχη μείωση με την αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης των θραυστών αδρανών παρουσιάστηκε και στην περίπτωση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας. Σε αντιστοιχία με την ταχύτητα των υπερήχων και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας επηρεάζεται από τη θλιπτική αντοχή, εντούτοις η σχέση δεν είναι αποκλειστική αφού το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας επηρεάζεται μεταξύ άλλων και από την πυκνότητα του σκληρυμένου σκυροδέματος.



Διάγραμμα 4.37 Ποσοστό μείωσης του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας συγκριτικά με το σκυρόδεμα αναφοράς.

Η μείωση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας για πληρη αντικατάσταση θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή μπορεί να φτάσει σε ποσοστό 39% και 33%

για δοκίμια ηλικίας 7 και 28 ημερών αντίστοιχα. Η μείωση αυτή υποδηλώνει ότι το παραγόμενο ανακυκλωμένο σκυρόδεμα αποτελεί υλικό περισσότερο όλκιμο, ήτοι περισσότερο παραμορφώσιμο. Εντούτοις, για μικρά ποσοστά συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών το ποσοστό μείωσης είναι μικρό.

Αναφορικά με τα αποτελέσματα της ακουστικής εκπομπής, αυτά δεν οδήγησαν σε κάποιο συμπέρασμα το οποίο να συσχετίζει τη χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών με τις ιδιότητες του παραγόμενου σκυροδέματος. Σε όλες τις περιπτώσεις, ο αριθμός των σημάτων αυξάνει σταδιακά έως τη στιγμή της αστοχίας, όταν παρατηρείται και ο μέγιστος αριθμός σημάτων. Οι μόνες διαφορές είναι η διάρκεια του φαινομένου, η οποία μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή και ο μέγιστος αριθμός σημάτων κατά τη θραύση, που είναι αυξημένος για την περίπτωση του σκυροδέματος αναφοράς. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στην μικρότερη καμπτική αντοχή του ανακυκλωμένου σκυροδέματος που έχει ως αποτέλεσμα να οδηγείται συντομότερα και ευκολότερα στην θραύση.

Ολοκληρώνοντας, για τον προσδιορισμό του βέλτιστου ποσοστού αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή στη σύνθεση σκυροδέματος, αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της θλιπτικής και καμπτικής αντοχής. Βάσει αυτών, βέλτιστο μπορεί να θεωρηθεί το ποσοστό αντικατάστασης των 25%, διότι στο ποσοστό αυτό η μείωση της θλιπτικής αντοχής συγκριτικά με το σκυρόδεμα αναφοράς ισούται με 17% και αντίστοιχα η μείωση της καμπτικής αντοχής με ποσοστό 14%, δηλαδή και στις δύο περιπτώσεις η μείωση είναι της τάξης των 15%. Αντίστοιχα συμπεράσματα εξήχθησαν και σε προηγούμενες φάσεις της πειραματικής διαδικασίας (υποκεφάλαια 4.2.5.2 και 4.2.6) ήτοι για ποσοστό αντικατάστασης 25%, το ποσοστό μείωσης συγκριτικά με το σκυρόδεμα αναφοράς ήταν της τάξης των 15% (12% και 15% αντίστοιχα).

Επιπλέον, για το ποσοστό αυτό, η θλιπτική αντοχή των 28 ημερών ισούται με 37MPa και κατά συνέπεια το παραγόμενο σκυρόδεμα κατατάσσεται οριακά σε κατηγορία C30/37 η οποία από άποψη τελικής αντοχής είναι κατάλληλη για χρήση σε συνήθεις κατασκευές (η ελάχιστη απαίτηση βάσει του Ευρωκώδικα 2: για κατασκευές από σκυρόδεμα είναι η κατηγορία C25/30).

4.2.8 Διερεύνηση της επίδρασης των ανακυκλωμένων αδρανών στην ανθεκτικότητα και την αγωγιμότητα του σκυροδέματος.

Κατόπιν του προσδιορισμού του βέλτιστου ποσοστού αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή, ο οποίος έγινε παράλληλα με τον προσδιορισμό της επίδρασης της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών στις ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος για διάφορα ποσοστά αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή, επιδιώχθηκε η επέκταση της παρούσας έρευνας σε επιπλέον ιδιότητες του παραγόμενου σκυροδέματος. Ειδικότερα, επιδιώχθηκε ο προσδιορισμός της επίδρασης των ανακυκλωμένων αδρανών στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος έναντι χλωριόντων και θεικών ιόντων, στην δομή του σκυροδέματος και την διεπιφάνεια μεταξύ τσιμεντόπαστας και αδρανών, καθώς και στην ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα.

Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, εξετάστηκαν δοκίμια με αποκλειστικά θραυστά χονδρόκοκκα αδρανή, με αντικατάσταση θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή σε ποσοστό ίσο με το βέλτιστο ποσοστό αντικατάστασης (25%) και με αποκλειστικά ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή, ήτοι εξετάστηκαν συνθέσεις σκυροδέματος με τα ακόλουθα τρία ποσοστά αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή: 0%, 25% και 100%.

Στο σύνολο των συνθέσεων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Portland II 42,5N, υπερρυστοποιητής Chemium 274 της εταιρείας Domylco, θραυστά ασβεστολιθικά αδρανή (λεπτόκοκκα – χονδρόκοκκα) και ανακυκλωμένα αδρανή, αποκλειστικά χονδρόκοκκα. Τα ανακυκλωμένα αδρανή χρησιμοποιήθηκαν κατόπιν επεξεργασίας τους, η οποία περιελάμβανε την πλύση τους με νερό υπό πίεση χειρωνακτικά, για την απομάκρυνση των ξένων υλών που βρίσκονται προσκολλημένες στην εξωτερική τους επιφάνεια.

Παράλληλα, για τον προσδιορισμό της μελέτης σύνθεσης του κάθε ποσοστού, αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των ιδιοτήτων: κοκκομετρική ανάλυση (ASTM C136), περιεκτικότητα παιπάλης (ASTM C117), ειδικό βάρος (μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος κορεσμένου και επιφανειακά στεγνού υλικού) και υδροαπορροφητικότητα (ASTM C128 και ASTM C127) των θραυστών και ανακυκλωμένων αδρανών, όπως αυτά προσδιορίστηκαν σε προηγούμενο στάδιο. Επιπλέον, σε όλες τις συνθέσεις διατηρήθηκαν σταθερά: η ποσότητα του τσιμέντου, του ρυστοποιητή καθώς και η αναλογία χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων αδρανών στο μείγμα των αδρανών η οποία ήταν: 50% λεπτόκοκκα αδρανή και 50% χονδρόκοκκα αδρανή (15% ψηφίδα και 35% χαλίκι).

Όπως έχει ήδη αναλυθεί, ήταν επιθυμητό τα αποτελέσματα των δοκιμών να είναι ανεξάρτητα από την εργασιμότητα του αναμίγματος. Ως εκ τούτου, επιδιώχθηκε το σύνολο των αναμιγμάτων να παρουσιάζει εργασιμότητα μετρούμενη μέσω της δοκιμής της κάθισης ίση με $11 \pm 0,50$ cm, με αποτέλεσμα ο ενεργός λόγος νερού προς τσιμέντο να λαμβάνει τις τιμές: 0,47, 0,49 και 0,55. Ο ενεργός λόγος του νερού προς τσιμέντο αυξανόταν με την αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή.

Στον πίνακα 4.42 που ακολουθεί περιγράφονται οι αναλογίες του αναμίγματος για την κάθε σύνθεση, κατά μέρη βάρους kg/m^3 , καθώς και ο ολικός – ενεργός λόγος νερού προς τσιμέντο.

Πίνακας 4.42 Αναλογίες αναμιγμάτων.

Υλικά παρασκευής	Ποσοστό αντικατάστασης		
	0%	25%	100%
τσιμέντο	280	280	280
νερό	170	184	224
υπερρευστοποιητής	2,85	2,85	2,85
άμμος θραυστή	946	939	918
ψηφίδα θραυστή	288	215	0
ψηφίδα ανακυκλωμένη	0	68	267
χαλίκι θραυστό	683	508	0
χαλίκι ανακυκλωμένο	0	156	609
ενεργός λόγος N/T	0,61	0,66	0,80
ολικός λόγος N/T	0,47	0,49	0,55

Τον προσδιορισμό της μελέτης σύνθεσης για το κάθε ποσοστό, ακολούθησε η παρασκευή των αναμιγμάτων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε αναμικτήρας σκυροδέματος κατάλληλης χωρητικότητας, ενώ τα αδρανή χρησιμοποιήθηκαν αφού είχαν προηγουμένως ξηρανθεί σε φούρνο για την απομάκρυνση της περιεχόμενης υγρασίας.

Για κάθε σύνθεση πραγματοποιήθηκε αρχικά εργαστηριακός έλεγχος των ιδιοτήτων του νωπού σκυροδέματος. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονταν οι: εργασιμότητα μέσω της δοκιμής κάθισης (ASTM C143), πυκνότητα (EN 12350-6) και περιεκτικότητα αέρα (ASTM C231). Σύμφωνα με τη συνήθη πρακτική οι ιδιότητες αυτές προσδιορίστηκαν μία φορά για κάθε σύνθεση.

Στη συνέχεια, παρασκευάστηκαν δοκίμια σκληρυμένου σκυροδέματος ανάλογα με τις απαιτήσεις των δοκιμών που επρόκειτο να εξεταστούν. Συγκεκριμένα απαιτήθηκαν ανά σύνθεση: (α) εννιά (9) κυβικά δοκίμια διαστάσεων $150 \times 150 \times 150 \text{mm}$, εκ των οποίων τρία (3) χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής, τρία (3) χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή κυλινδρικών δοκιμίων διαμέτρου 95mm και πάχους 50mm με τη χρήση καροτέζας και κόφτη για τον προσδιορισμό της διαπερατότητας χλωριόντων με τη δοκιμή PROOVE'it[®] (λόγω έλλειψης καλουπιών) και τρία (3) χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή κυλινδρικών δοκιμίων διαμέτρου 95mm και πάχους 50mm με τη χρήση καροτέζας και κόφτη, για τον έλεγχο της διεπιφάνειας τσιμεντόπαστας – αδρανών σκυροδέματος με τη χρήση οπτικού μικροσκοπίου, (β) έξι (6) κυβικά δοκίμια διαστάσεων $100 \times 100 \times 100 \text{mm}$, για τον προσδιορισμό της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των δοκιμίων, κατόπιν ξήρανσης τους σε φούρνο (τρία δοκίμια) είτε κατόπιν ξήρανσης στον αέρα (τρία δοκίμια) και (γ) δώδεκα (15) πρισματικά δοκίμια διαστάσεων $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$, εκ των οποίων τρία (3) για τον προσδιορισμό της θερμικής αγωγιμότητας, τρία (3) για τον

προσδιορισμό της καμπτικής αντοχής και εννιά (9) για τον προσδιορισμό της επίδρασης των θεικών ιόντων στο σκυρόδεμα. Όλα τα δοκίμια ελέγχθηκαν σε ηλικία 28 ημερών, εκτός από την περίπτωση του ελέγχου της επίδρασης των θεικών ιόντων που η πειραματική διαδικασία διήρκησε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Η δοκιμή προσδιορισμού της θλιπτικής αντοχής, πραγματοποιήθηκε βάσει του πρότυπου EN 12390-03, με τη χρήση της υδραυλικής μηχανής Toni Technik με μέγιστο φορτίο 3000kN και ταχύτητα δοκιμής τα 0,50 MPa/s. Αντίστοιχα, η δοκιμή προσδιορισμού της καμπτικής αντοχής, πραγματοποιήθηκε στα πρισματικά δοκίμια βάσει των οριζόμενων στο πρότυπο EN 12390-5 για την κάμψη τεσσάρων σημείων. Χρησιμοποιήθηκε η σέρβο - υδραυλική μηχανή INSTRON με μέγιστο φορτίο 30kN, με ασκούμενο φορτίο το οποίο αυξανόταν με σταθερό ρυθμό τάσης 0,05 MPa/s έως την θραύση οπότε τερματιζόταν αυτόματα η δοκιμή.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών του νωπού σκυροδέματος καθώς και της θλιπτικής και καμπτικής αντοχής, παρουσιάζονται ανά ποσοστό αντικατάστασης στον πίνακα 4.43 που ακολουθεί. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και τα αποτελέσματα των λοιπών ιδιοτήτων που προσδιορίστηκαν περιγράφονται αναλυτικά στα ακόλουθα υποκεφάλαια.

Πίνακας 4.43 Αποτελέσματα δοκιμών.

Ιδιότητα	Ποσοστό αντικατάστασης		
	0%	25%	100%
εργασιμότητα μέσω κάθισης (cm)	11,0	11,5	11,0
πυκνότητα νωπού (Kg/m ³)	2320	2260	2200
περιεκτικότητα σε αέρα (%)	2,1	2,1	2,3
θλιπτική αντοχή (28 ημερών) (MPa)	44,0	37,5	26,0
καμπτική αντοχή (28 ημερών) (MPa)	5,5	4,6	4,0

Τα αποτελέσματα των δοκιμών του νωπού σκυροδέματος και της αντοχής αυτού συμβαδίζουν με τα όσα προσδιορίστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Συγκεκριμένα, η εργασιμότητα προσδιορισμένη μέσω της δοκιμής της κάθισης, διατηρείται σχεδόν σταθερή και για τα τρία ποσοστά αντικατάστασης, συμβαδίζοντας με τις απαιτήσεις του σχεδιασμού της μελέτης σύνθεσης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η αποφυγή τυχούσας επίδρασης της εργασιμότητας στις ιδιότητες του παραγόμενου σκυροδέματος.

Το ποσοστό του περιεχόμενου αέρα στο νωπό σκυρόδεμα κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 2,1 – 2,3% για το σύνολο των ποσοστών αντικατάστασης, με το υψηλότερο ποσοστό περιεχόμενου αέρα (2,3%) να αντιστοιχεί στη σύνθεση με τα αποκλειστικά ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή. Αυτή η μικρή διαφορά στην τιμή του περιεχόμενου αέρα, δεν αναμένεται να επιδρά στις ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος. Επιπλέον, όπως αναμενόταν η αύξηση του ποσοστού συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών οδηγεί σε μείωση της πυκνότητας του νωπού

σκυροδέματος, η οποία οφείλεται στο μικρότερο ειδικό βάρος των ανακυκλωμένων αδρανών. Εντούτοις, η μείωση αυτή είναι μικρή ήτοι της τάξεως του 5%.

Όπως έχει αναλυθεί εκτενώς, η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών επιδρά δυσμενώς στην αντοχή του σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, στην παρούσα πειραματική διαδικασία επιβεβαιώνεται ότι το ποσοστό συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών στη σύνθεση έχει άμεση σχέση με τη μείωση της αντοχής του παραγόμενου σκυροδέματος, τόσο για την θλιπτική όσο και την καμπτική αντοχή.

Στα ακόλουθα υποκεφάλαια παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των λοιπών ιδιοτήτων του σκληρυμένου σκυροδέματος που προσδιορίστηκαν παράλληλα με τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε.

Διαπερατότητα χλωριόντων – Δοκιμή PROOVE'it©

Στα πλαίσια προσδιορισμού της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος, ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει η αντίστασή του στη διαπερατότητα των χλωριόντων. Οι λόγοι έχουν αναλυθεί εκτενώς και σχετίζονται με την προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση για την περίπτωση του οπλισμένου σκυροδέματος, που είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο στη χώρα μας. Η διάβρωση του οπλισμού οφείλεται στην παρουσία χλωριόντων, τα οποία προέρχονται από το εξωτερικό περιβάλλον. Κατά συνέπεια, η διαπερατότητα των χλωριόντων στο σκληρυμένο σκυροδέμα είναι επιθυμητό να είναι περιορισμένη.

Για τον προσδιορισμό της αντίστασης διαπερατότητας του σκυροδέματος από χλωριόντα, χρησιμοποιήθηκε η συσκευή PROOVE'it©, βάσει της οποίας εκτιμάται η αντίσταση του σκυροδέματος στην διαπερατότητα χλωριόντων προσδιορίζοντας πόσο εύκολη είναι η εξαναγκασμένη δίοδος αυτών μέσω δείγματος κορεσμένου σκυροδέματος κατά την εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης στο δείγμα, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C1202.

Για την πραγματοποίηση του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν τα κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 95mm και πάχους 50mm, τα οποία έλαβαν την επιθυμητή μορφή με τη χρήση καροτέζας και κόφτη, από κυβικά διαστάσεων 150x150x150mm. Για κάθε σύνθεση ελέγχθηκαν τρία δοκίμια σε ηλικία 28 ημερών και το αποτέλεσμα της δοκιμής υπολογίστηκε βάσει του μέσου όρου αυτών.

Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος μετράτε το ηλεκτρικό ρεύμα που περνά διαμέσου του σκυροδέματος, για μια δεδομένη χρονική περίοδο, με συγκεκριμένη τάση και μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία. Βάσει του ASTM C1202, οι ρυθμίσεις του κάθε κελιού για τη διεξαγωγή του πειράματος, ορίζονται ως:

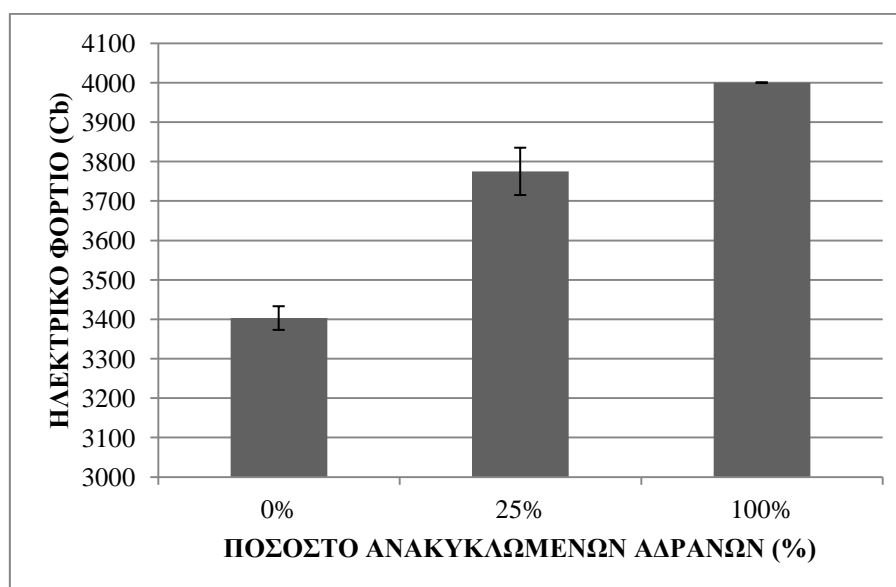
1. φορτίο του ρεύματος: 60V
2. χρόνος διεξαγωγής του πειράματος: 6h
3. διάμετρος δοκιμίου: 95mm
4. μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία των διαλυμάτων: 90°C

και ρυθμίζονται πριν την έναρξη λειτουργίας του κάθε κελιού. Σε περίπτωση υπέρβασης της μέγιστης επιτρεπόμενης θερμοκρασίας σε κάποιο κελί το πείραμα διακόπτεται αυτόματα (για το κελί αυτό).

Πίνακας 4.44 Αποτελέσματα δοκιμών.

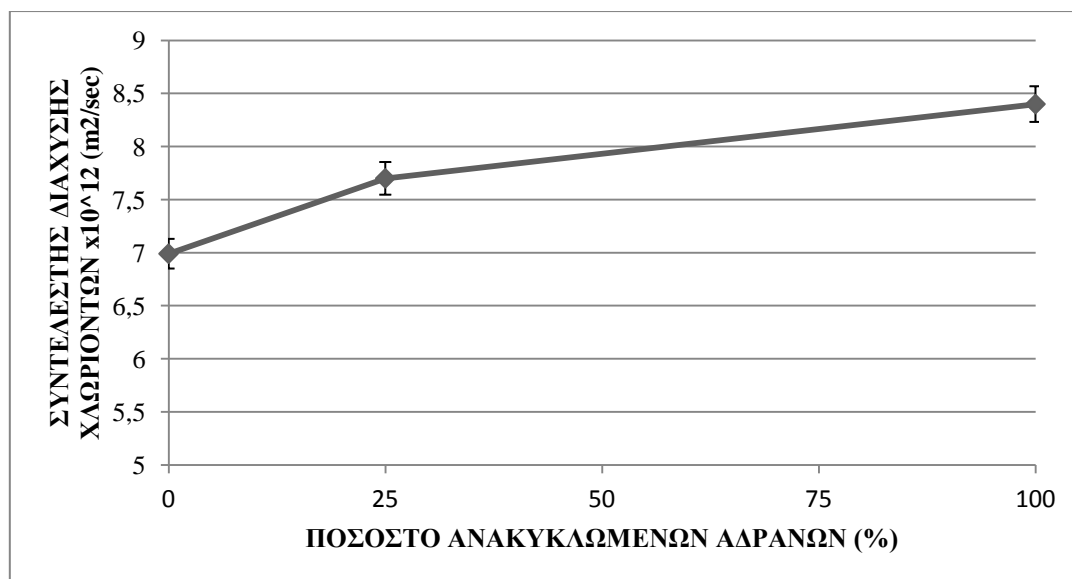
Ιδιότητα	Ποσοστό αντικατάστασης		
	0%	25%	100%
ηλεκτρικό φορτίο (Cb)	3403	3775	4000
διαπερατότητα χλωριόντων	μέτρια	μέτρια	μέτρια
συντελεστής διάχυσης ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	6,99	7,70	8,40

Μετά το πέρας των έξι ωρών, ελήφθησαν τα αποτελέσματα του πειράματος, δηλαδή η ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου που πέρασε απ' το δοκίμιο, το οποίο φορτίο αποτελεί ένδειξη της ικανότητας του σκυροδέματος να αντιστέκεται στην διείσδυση των χλωριόντων. Ειδικότερα, βάσει των τιμών του ηλεκτρικού φορτίου σε Coulomb, κατηγοριοποιείται ο βαθμός διαπερατότητας του δοκιμίου, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στον πίνακα 4.44 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής και η αντίστοιχη κατηγοριοποίηση του σκυροδέματος.



Διάγραμμα 4.38 Διερχόμενο ηλεκτρικό φορτίο.

Παρατηρείται ότι το διερχόμενο ηλεκτρικό φορτίο αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης των ανακυκλωμένων αδρανών, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι το σκυρόδεμα με ανακυκλωμένα αδρανή έχει αυξημένη διαπερατότητα σε χλωριόντα. Το διερχόμενο ηλεκτρικό φορτίο αυξάνει σε ποσοστό 11% για το σκυρόδεμα με το βέλτιστο ποσοστό αντικατάστασης και σε ποσοστό 18% για το σκυρόδεμα με πλήρη αντικατάσταση. Σε όλες τις περιπτώσεις το σκυρόδεμα κατατάσσεται στην κατηγορία του σκυροδέματος μέτριας διαπερατότητας σε χλωριόντα. Εν τούτοις το σκυρόδεμα με αποκλειστικά ανακυκλωμένα αδρανή παρουσιάζει τιμή διερχόμενου φορτίου ίση με το άνω όριο της κατηγορίας, ήτοι 4000Cb και για το λόγο αυτό παρά το χαρακτηρισμό του ως μέτριας διαπερατότητας η χρήση τους πρέπει να γίνεται με προσοχή.



Διάγραμμα 4.39 Συντελεστής διάχυσης χλωριόντων συναρτήσει του ποσοστού αντικατάστασης.

Επιπλέον, όσον αφορά στο συντελεστή διάχυσης των χλωριόντων παρατηρείται αύξηση της τιμής αυτού συναρτήσει της αύξησης του ποσοστού αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή. Η αύξηση αυτή είναι σε συμφωνία με την αύξηση της διαπερατότητας σε χλωριόντα των μεγαλύτερων ποσοστών αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα, αφού αύξηση του συντελεστή διάχυσης συμβαδίζει με την αύξηση της διαπερατότητας των χλωριόντων.

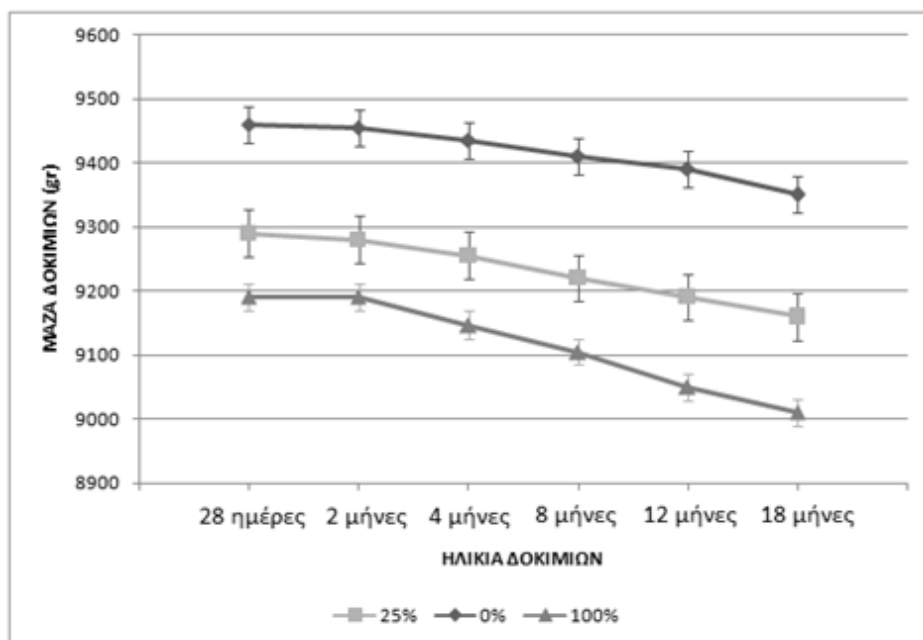
Χημική επίδραση θεικών ιόντων στο σκυρόδεμα

Εκτός από τα χλωριόντα, αρνητική επίδραση στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος έχει και η παρουσία θεικών ιόντων τα οποία προκαλούν φθορά στις κατασκευές από σκυρόδεμα εξαιτίας της χημικής προσβολής του. Στο σκληρυμένο σκυρόδεμα, τα θεικά ιόντα αντιδρούν με αυτό με αποτέλεσμα τη δημιουργία ετρινγκίτη ή ταουμασίτη, οδηγώντας σε απώλεια μηχανικής αντοχής, διόγκωση, αποκοπή των επιφανειακών στρωμάτων και τέλος στην κατάρρευση, εξέλιξη η οποία μπορεί να είναι ταχύτατη και αιφνιδιαστική [218-219].

Για τον προσδιορισμό της επίδρασης των ανακυκλωμένων αδρανών στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος έναντι θεικών ιόντων παρασκευάστηκε κατάλληλος αριθμός πρισματικών δοκιμίων διαστάσεων 100x100x400mm, τα οποία εμβαπτίστηκαν σε διάλυμα θεικού νατρίου (Na₂SO₄ 5% κ.β.) και διάλυμα θεικού νατρίου και χλωριούχου νατρίου (Na₂SO₄ 5% κ.β. και NaCl 5% κ.β.). Για κάθε διάλυμα εμβάπτιση χρησιμοποιήθηκαν τρία δοκίμια.

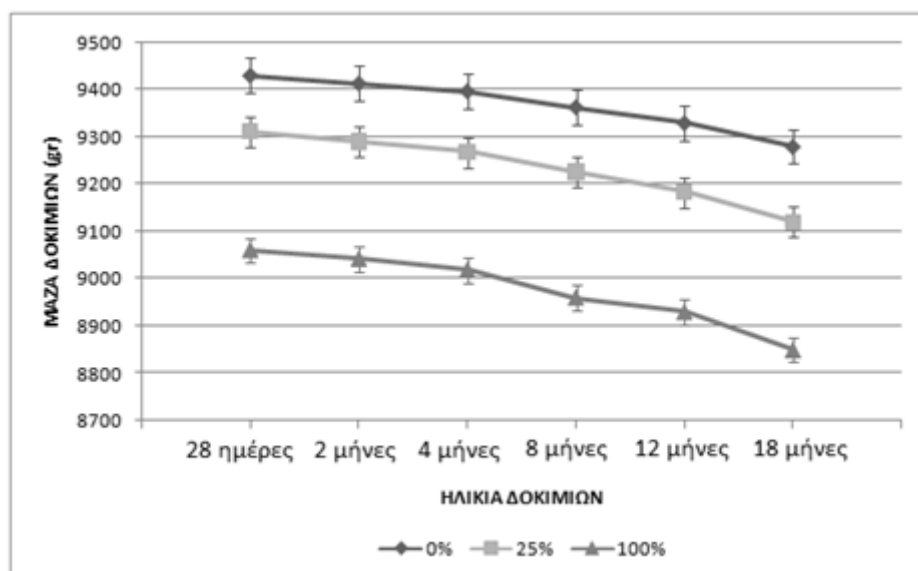
Το σύνολο των δοκιμίων συντηρήθηκαν σε δεξαμενές με νερό κατάλληλης θερμοκρασίας έως την ηλικία των 28 ημερών και εν συνεχεία εμβαπτίστηκαν στα διαλύματα όπου και παρέμειναν για χρονικό διάστημα 18 μηνών. Τα διαλύματα αντικαθίσταντο κάθε δύο μήνες για να μην μειωθεί η δραστηριότητά τους, ενώ παράλληλα γινόταν έλεγχος τα δοκίμια να διατηρούνται εμβαπτισμένα σε αυτά. Η

επίδραση των θεικών ιόντων προσδιορίστηκε βάσει των μεταβολών στη μάζα των δοκιμίων.



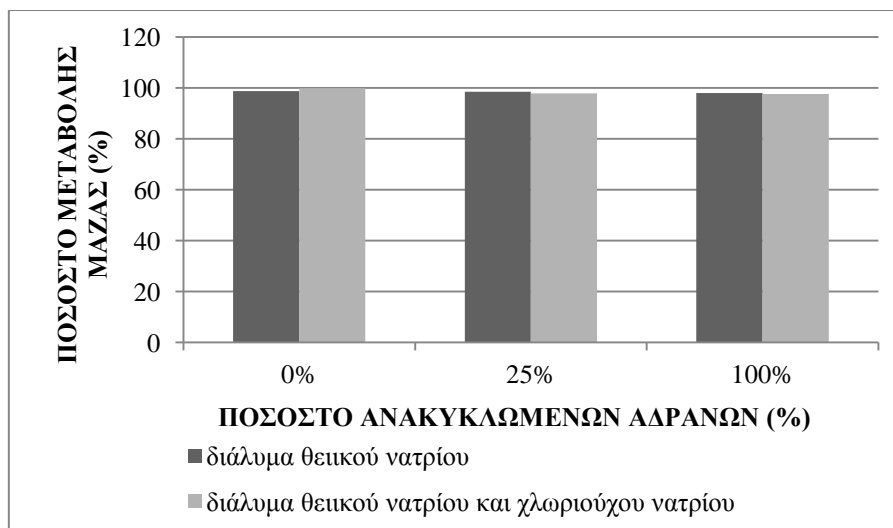
Διάγραμμα 4.40 Απώλεια μάζας δοκιμίων για εμβάπτιση δοκιμίων σε διάλυμα θεικού νατρίου (Na₂SO₄ 5% κ.β.).

Στα διαγράμματα 4.40 και 4.41 παρουσιάζεται η απώλεια μάζας για τα δοκίμια που ήταν εμβαπτισμένα σε διάλυμα σε διάλυμα θεικού νατρίου (Na₂SO₄ 5% κ.β.) και διάλυμα θεικού νατρίου και χλωριούχου νατρίου (Na₂SO₄ 5% κ.β. και NaCl 5% κ.β.) αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις η εμβάπτιση των δοκιμίων στα διαλύματα θεικών είχε ως αποτέλεσμα την απώλεια μάζας τους, η οποία είναι ενδεικτική της φθοράς η οποία προκαλείται από τα θεικά ιόντα στο σκληρυμένο σκυρόδεμα.



Διάγραμμα 4.41 Απώλεια μάζας δοκιμίων για εμβάπτιση δοκιμίων σε διάλυμα θεικού νατρίου και χλωριούχου νατρίου (Na₂SO₄ 5% κ.β. και NaCl 5% κ.β.).

Παράλληλα, και για τα δύο διαλύματα το δοκίμιο με αποκλειστικά ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή παρουσιάζει τη μεγαλύτερη απώλεια μάζας, σε ποσοστό 2,0% και 2,3% για το διάλυμα θεικού νατρίου και θεικού νατρίου – χλωριούχου νατρίου αντίστοιχα, μετά το πέρας 20 μηνών. Η παρατήρηση αυτή είναι σε αντιστοιχία με τις απομειωμένες ιδιότητες που παρουσιάζει το σκυρόδεμα με ανακυκλωμένα αδρανή και την αυξημένη διαπερατότητα σε χλωριόντα η οποία προδικάζει την αυξημένη διαπερατότητα και σε λοιπά ιόντα.



Διάγραμμα 4.42 Ποσοστό απώλειας μάζας για δοκίμια ηλικίας 20 μηνών σε διάλυμα θεικού νατρίου και θεικού νατρίου - χλωριούχου νατρίου ανά ποσοστό αντικατάστασης.

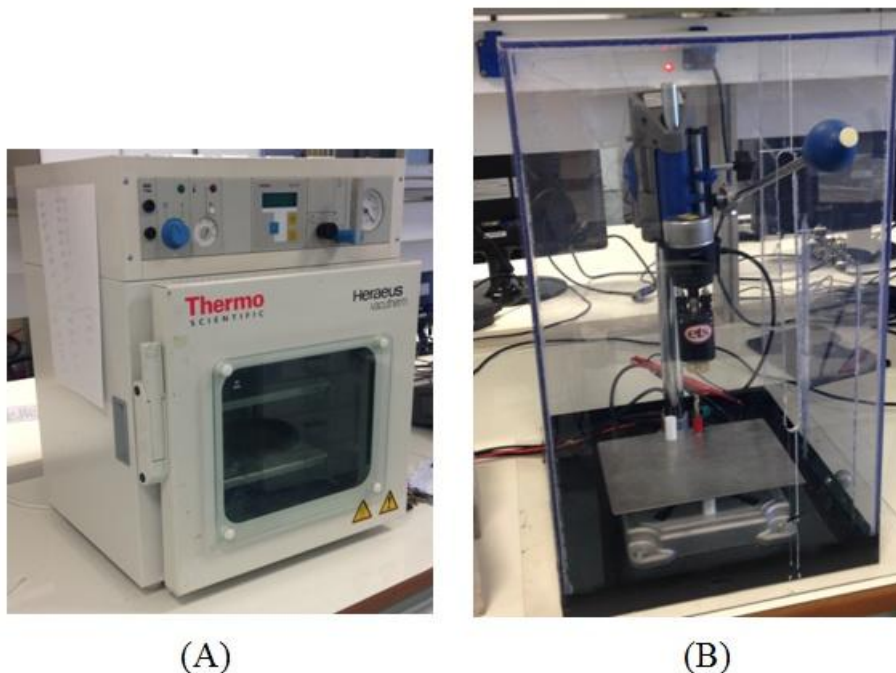
Ολοκληρώνοντας, πρέπει να σημειωθεί ότι η απώλεια μάζας των δοκιμίων είναι αυξημένη για το διάλυμα θεικού νατρίου - χλωριούχου νατρίου σε όλα τα ποσοστά αντικατάστασης, λόγω της συνδυαστικής δράσης των θεικών ιόντων με τα χλωριόντα. Η απώλεια μάζας είναι στην περίπτωση αυτή αυξημένη με ποσοστό 0,3 – 0,6%.

Ηλεκτρική αντίσταση σκυροδέματος

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του σκυροδέματος, μέσω της οποίας εκφράζεται η ευκολία με την οποία διέρχεται το ηλεκτρικό ρεύμα διάμεσου του σκυροδέματος αποτελεί ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα ιδιότητα, συνήθως δε εκφράζεται μέσω της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, η οποία είναι το αντίστροφο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Ο λόγος είναι διότι η ηλεκτρική ειδική αντίσταση αποτελεί έναν έμμεσο τρόπο προσδιορισμού της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος [220-221]. Συγκεκριμένα, η ειδική αντίσταση έχει συσχετιστεί με την ενανθράκωση του σκυροδέματος, την διαπερατότητά του σε χλωριόντα και λοιπά ιόντα καθώς και με την πιθανότητα διάβρωσης του περιεχόμενου σε αυτό οπλισμού.

Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε ο προσδιορισμός της επίδρασης της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών στην ηλεκτρική αντίσταση του παραγόμενου σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, η επίδραση αυτή προσδιορίστηκε μέσω του υπολογισμού της επιφανειακής ηλεκτρικής αντίστασης, σε κυβικά δοκίμια διαστάσεων 100x100x100mm και ηλικίας 28 ημερών. Για κάθε σύνθεση

μελετήθηκαν έξι δοκίμια, τα οποία κατόπιν της αφαίρεσής τους από τις μήτρες όπου παρασκευάστηκαν, είχαν τοποθετηθεί σε δεξαμενές με νερό σε θερμοκρασία $20\pm 2^{\circ}\text{C}$. Για το λόγο ότι η ηλεκτρική αντίσταση επηρεάζεται από την παρουσία του νερού μεταξύ των πόρων του σκυροδέματος, προ της διεξαγωγής των πειραμάτων προσδιορισμού της ηλεκτρικής αντίστασης το δοκίμιο έπρεπε να ξηρανθούν. Επιλέχτηκε τρία από αυτά να ξηρανθούν στον αέρα (για 5 ημέρες) και τρία με τη χρήση φούρνου κατάλληλης δυναμικότητας (για 5 ημέρες) (εικόνα 4.16).

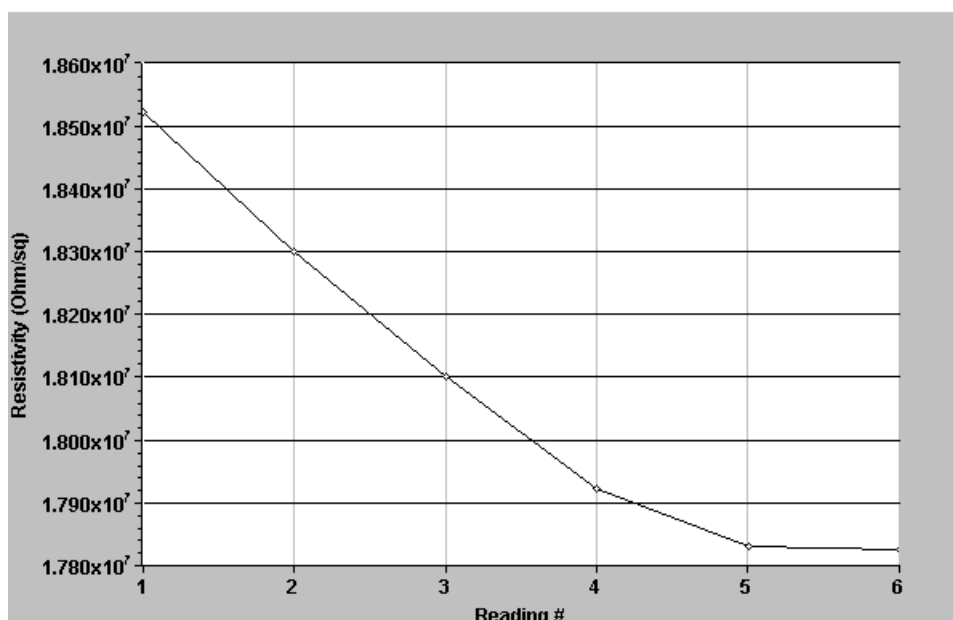
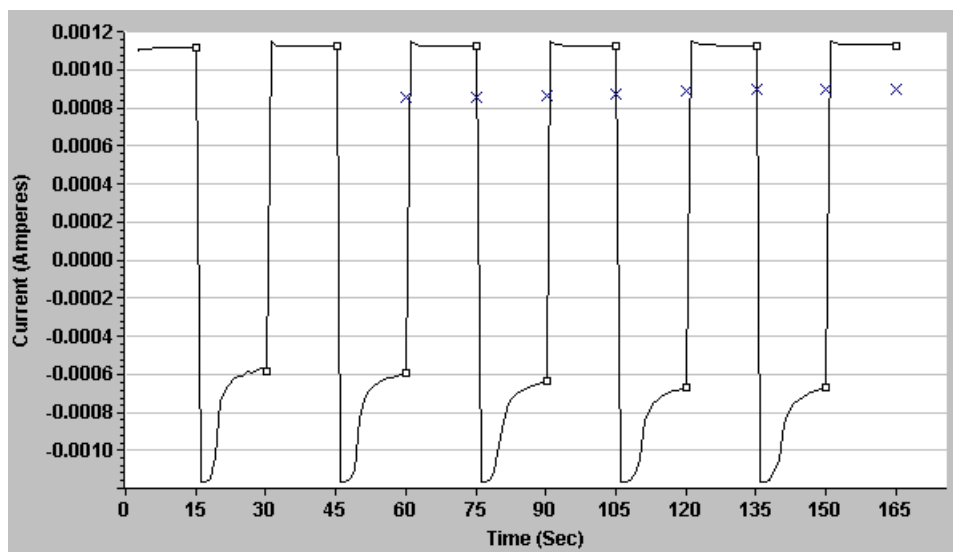


Εικόνα 4.16 (Α) Φούρνος ξήρανσης δοκιμίων (Β) ανιχνευτής ηλεκτρικής αντίστασης.

Ο προσδιορισμός της επίδρασης των ανακυκλωμένων αδρανών στην επιφανειακή ηλεκτρική αντίσταση διερευνήθηκε μέσω των ηλεκτρικών μετρήσεων συνεχούς ρεύματος, οι οποίες διεξάχθηκαν σε ένα ειδικά κατασκευασμένο ανιχνευτή ηλεκτρικής αντίστασης συνδεδεμένο με ένα υψηλής ακρίβειας ψηφιακό ηλεκτρόμετρο (της εταιρείας Keithley 6517B, Tektronix) κατάλληλο για τη μέτρηση ηλεκτρικών αντιστάσεων έως $10^{18}\Omega$ με ανάλυση μέτρησης ρεύματος $10\times 10^{18}\text{A}$. Ο ανιχνευτής συνίστατο από μια κυκλική κεφαλή αποτελούμενη από 22 ομόκεντρα τοποθετημένα ηλεκτρόδια με αγώγιμα άκρα από καουτσούκ για τη βέλτιστη επαφή αυτών στην περίπτωση μη επίπεδων επιφανειών. Η κεφαλή αυτή έχει τη δυνατότητα να μετακινείται ούτως ώστε να έρθει σε επαφή με το δοκίμιο υπό την άσκηση ενός σταθερού φορτίου μέσω ενός μοχλού (εικόνα 4.16). Επιπλέον, τα δοκίμια σκυροδέματος τοποθετήθηκαν πάνω στη πλάκα βάσης της συσκευής πάνω από ένα μονωτικό φύλλο ούτως ώστε να αποφευχθεί η διαρροή ρεύματος.

Η επιφανειακή αντίσταση προσδιορίστηκε σύμφωνα με το νόμο του Ohm, μετρώντας το ρεύμα που διήλθε του δοκιμίου ως αποτέλεσμα της εφαρμογής μιας διαφοράς τάσης στην επιφάνειά του. Τα αποτελέσματα που συλλέχθηκαν είχαν τη μορφή που παρουσιάζεται στο διάγραμμα 4.43 και αφορούσαν: (α) στο ηλεκτρικό ρεύμα (Α) συναρτήσεως του χρόνου της δοκιμής σε δευτερόλεπτα και (β) στην επιφανειακή ειδική αντίσταση (Ohm/sq) συναρτήσεως των αναγνώσεων που

μετρήθηκαν στην καθορισμένη τάση. Η τιμή της ειδικής επιφανειακής αντίστασης για κάθε δοκίμιο προσδιορίστηκε ως ο μέσος όρος έξι διαδοχικών αναγνώσεων.



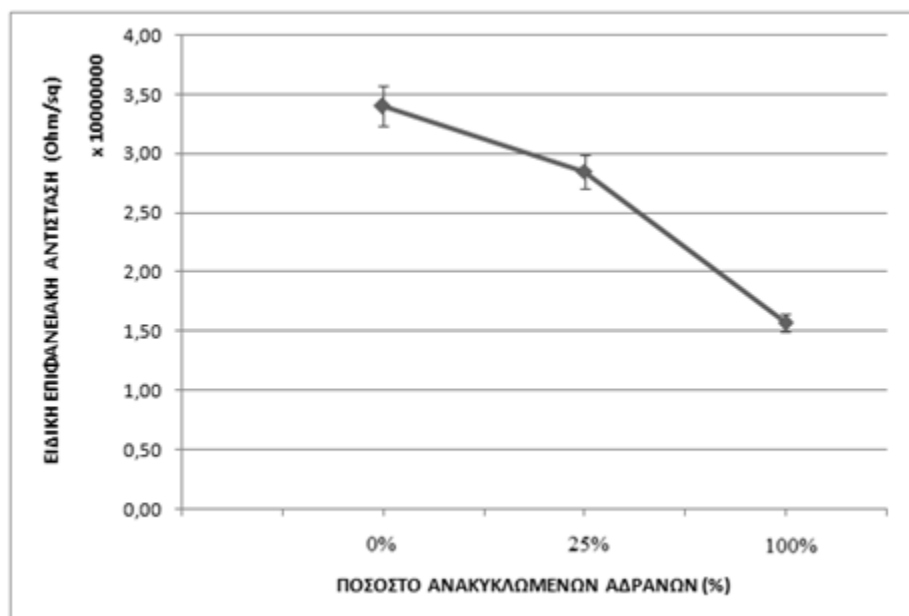
Διαγραμμα 4.43 Μορφή αποτελεσμάτων ηλεκτρικής αντίστασης.

Στον πίνακα 4.45 που ακολουθεί παρουσιάζεται η επιφανειακή ειδική αντίσταση ανά ποσοστό αντικατάστασης για την περίπτωση δοκιμίων που έχουν ξηρανθεί στον αέρα ή σε φούρνο.

Πίνακας 4.45 Επιφανειακή ηλεκτρική αντίσταση ανά ποσοστό αντικατάστασης.

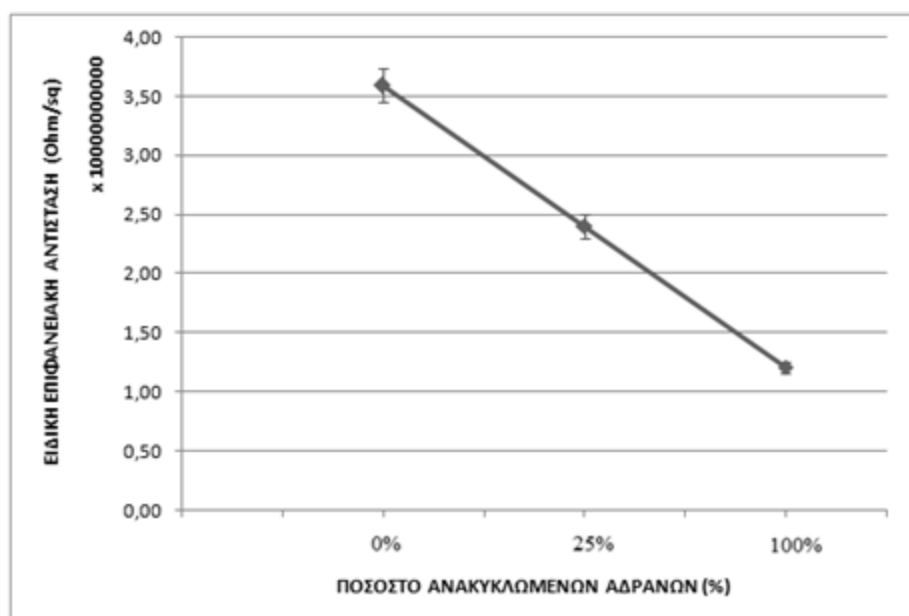
Επιφανειακή ηλεκτρική αντίσταση (Ohm/sq)	Ποσοστό αντικατάστασης		
	0%	25%	100%
ξηρανση στον αέρα	$3,40 \times 10^7$	$2,85 \times 10^7$	$1,57 \times 10^7$
ξηρανση σε φούρνο	$3,59 \times 10^{10}$	$2,40 \times 10^{10}$	$1,21 \times 10^{10}$

Παρατηρείται καταρχήν ότι σε όλα τα ποσοστά αντικατάστασης η επιφανειακή αντίσταση είναι αυξημένη για τα δοκίμια που έχουν ξηρανθεί με τη χρήση φούρνου. Συμπεραίνουμε εκ τούτου ότι οι πέντε ημέρες δεν είναι επαρκές χρονικό διάστημα για την ξήρανση των δοκιμίων στον αέρα και η μειωμένη ηλεκτρική αντίσταση των δοκιμίων οφείλεται στο νερό το οποίο περιέχεται στους πόρους του σκυροδέματος. Η διαφορά είναι της τάξεως των 10^3 Ohm/sq.



Διαγραμμα 4.44 Ειδική επιφανειακή ηλεκτρική αντίσταση για δοκίμια ξηραμένα στον αέρα.

Εντούτοις, στις δύο περιπτώσεις η επιφανειακή ηλεκτρική αντίσταση μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης των ανακυκλωμένων αδρανών, όπως παρουσιάζεται στα διαγράμματα 4.44 και 4.45.



Διαγραμμα 4.45 Ειδική επιφανειακή ηλεκτρική αντίσταση για δοκίμια ξηραμένα σε φούρνο.

Για δοκίμια που ξηράθηκαν στο φούρνο, η μείωση για το βέλτιστο ποσοστό αντικατάστασης ανέρχεται σε 33% και για πλήρη αντικατάσταση σε ποσοστό 66%. Η

μείωση αυτή είναι σε αντιστοιχία με την μειωμένη ανθεκτικότητα του σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή (όπως αυτή παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια).

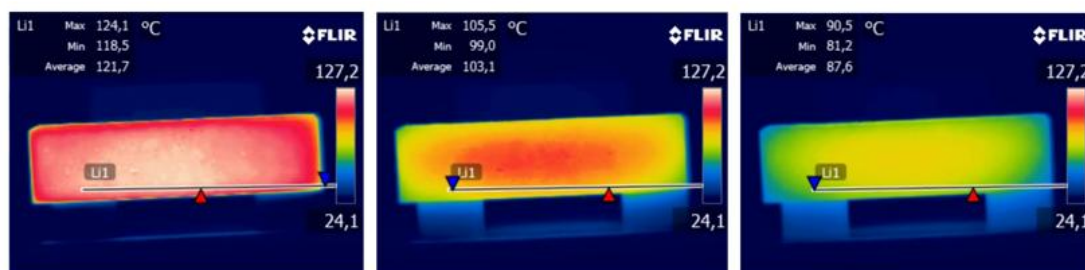
Θερμικές ιδιότητες σκυροδέματος – υπέρυθρη θερμογραφία

Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας αξιοποιήθηκε η μέθοδος της υπέρυθρης θερμογραφίας για να διερευνηθεί τυχούσα επίδραση της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών στο παραγόμενο σκυρόδεμα. Συγκεκριμένα, αξιοποιήθηκε η μέθοδος της ενεργητικής υπέρυθρης θερμογραφίας. Στην παρούσα πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν τρία πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 100x100x400mm, από κάθε σύνθεση. Επιπλέον, για την ανάπτυξη της μη καταστροφικής μεθοδολογίας χρησιμοποιήθηκαν μια υπέρυθρη κάμερα και ένας φούρνος. Η υπέρυθρη (IR) κάμερα είναι η T360 FLIR και τα κύρια χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον πίνακα 4.46. Ο φούρνος χρησιμοποιήθηκε ως πηγή ενέργειας για τη θέρμανση των δοκιμίων και είχε εύρος θερμοκρασίας 20 - 200°C.

Πίνακας 4.46 Χαρακτηριστικά υπέρυθρης κάμερας Flir T360.

Χαρακτηριστικά FLIR T360	
Φασματικό εύρος	7,5 - 13 μm
Τύπος αισθητήρα	Μη ψυχώμενος με μικροβολόμετρο
Ανάλυση υπέρυθρων	320x240 εικονοστοιχεία
Ρυθμός αποτύπωσης εικόνων	30 Hz
Θερμική ευαισθησία/θόρυβο-ισοδύναμη θερμοκρασιακή διαφορά	< 60 mK
Εστιακό μήκος	18 mm
Πεδίο εστίασης	25° x 19°
Χωρική ανάλυση	1,36 mRad
Εύρος θερμοκρασιών	5°C – 120°C

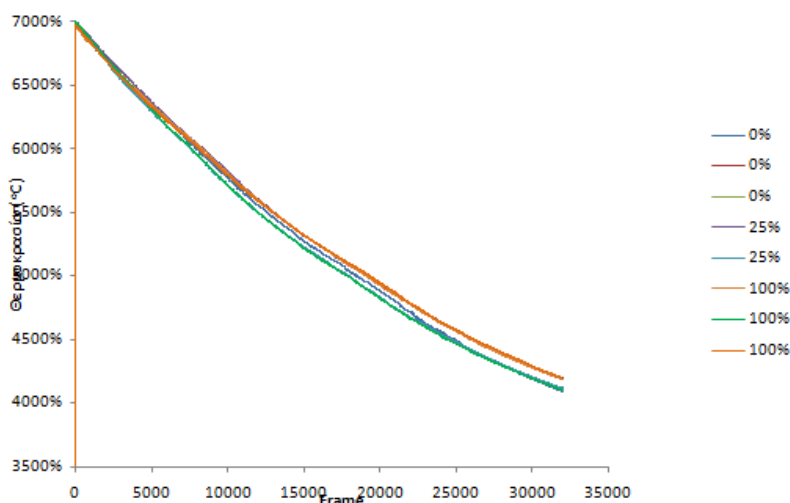
Τα δοκίμια όλων των συνθέσεων θερμάνθηκαν στο φούρνο για 3 ώρες σε θερμοκρασία 150°C. Η υπέρυθρη κάμερα τοποθετήθηκε σε απόσταση περί τα 3,0m από τα δοκίμια. Ως συντελεστής εκπομπής «ε» του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε η τιμή 0,97. Τα πειράματα διεξήχθησαν υπό σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας αέρα 25,5°C και σχετικής υγρασίας 43%.



Εικόνα 4.17 Στάδια θερμογραφήματος δοκιμίου καθώς αυτό ψύχεται.

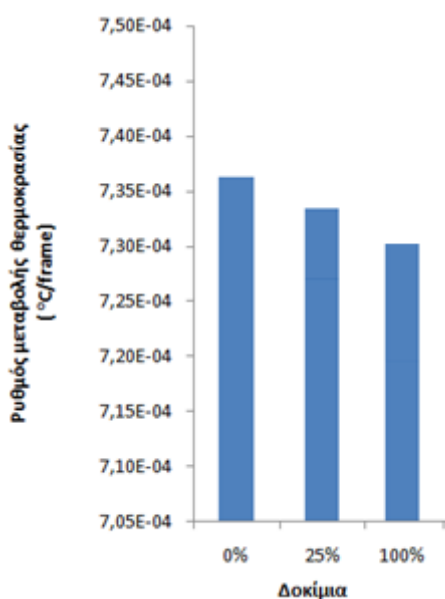
Κατά τον θερμογραφικό έλεγχο, καταγράφηκαν θερμογραφήματα καθ' όλη τη διάρκεια της αποθέρμανσης κάθε 5 min, ενώ η όλη διαδικασία καταγράφηκε σε

βίντεο. Η διαδικασία ακολουθήθηκε αρχικά για τα δοκίμια τα οποία δεν περιείχαν ανακυκλωμένα αδρανή, για να αποτελέσουν δοκίμια αναφοράς. Στην εικόνα 4.17 απεικονίζονται διάφορα στάδια από το θερμογράφημα ενός δοκιμίου όπως αυτό ψύχεται. Παράλληλα στα διαγράμματα 4.46 και 4.47 παρουσιάζονται οι καμπύλες αποθέρμανσης για το σύνολο των δοκιμίων και ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας αυτών αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4.46 Καμπύλες αποθέρμανσης δοκιμίων.

Παρατηρείται ότι ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας, παρά τις διακυμάνσεις που παρουσιάζονται ανά δοκίμιο, είναι σχεδόν ίδιος για το σύνολο των δοκιμίων ανεξάρτητα από την παρουσία σε αυτά ανακυκλωμένων αδρανών. Αντίστοιχα και οι καμπύλες αποθέρμανσης έχουν όμοια μορφή για όλα τα δοκίμια. Για το λόγο αυτό οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η αντικατάσταση θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή, δεν επηρεάζει τις θερμικές ιδιότητες του παραγόμενου σκυροδέματος.



Διάγραμμα 4.47 Ρυθμός μεταβολής θερμοκρασίας δοκιμίων.

Πετρογραφική ανάλυση σκυροδέματος με τη χρήση στερεοσκοπίου

Μετά τον έλεγχο της επίδρασης των ανακυκλωμένων αδρανών σε ιδιότητες σχετικά με την ανθεκτικότητα του σκληρυμένου σκυροδέματος επιδιώχθηκε ο προσδιορισμός τυχουσών διαφορών στην μικροδομή του σκυροδέματος λόγω της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε η πετρογραφική ανάλυση δοκιμίων σκυροδέματος σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C856.

Για το σκοπό αυτό εξετάστηκαν από κάθε σύνθεση σκυροδέματος τρία κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 95mm και πάχους 50mm, τα οποία προήλθαν από κυβικά δοκίμια διαστάσεων 150x150x150mm και έλαβαν την επιθυμητή μορφή με τη χρήση καροτέζας και κόφτη. Τα δοκίμια εξετάστηκαν σε ηλικία 28 ημερών. Για τον έλεγχο χρησιμοποιήθηκε το αυτόματο τριοφθάλμιο στερεοσκόπιο Leica DM-4000M (εικόνα 4.18) το οποίο είναι κατάλληλο για μικροσκόπηση δειγμάτων σε φωτεινό πεδίο και τεχνική πόλωσης. Το στερεοσκόπιο παρέχει τη δυνατότητα μεγέθυνσης των δειγμάτων 1,25x έως 100x, ενώ παράλληλα συνδέεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή ο οποίος έχει σύστημα ανάλυσης εικόνας και δίνει τη δυνατότητα καταγραφής των εικόνων.



Εικόνα 4.18 Στερεοσκόπιο Leica DM-4000M.

Κατά την εξέταση των δοκιμίων, επιδιώχθηκε ο προσδιορισμός διαφορών στην δομή του σκυροδέματος, οι οποίες να προέρχονταν από τη χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη συνάφεια των ανακυκλωμένων αδρανών και της τσιμεντόπαστας. Κατά τον έλεγχο συντάχθηκε ο ακόλουθος πίνακας 4.47, βάσει των χαρακτηριστικών του σκυροδέματος, τα οποία ελέγχθηκαν, σε συναρτήσε τα οριζόμενα στο αντίστοιχο πρότυπο.

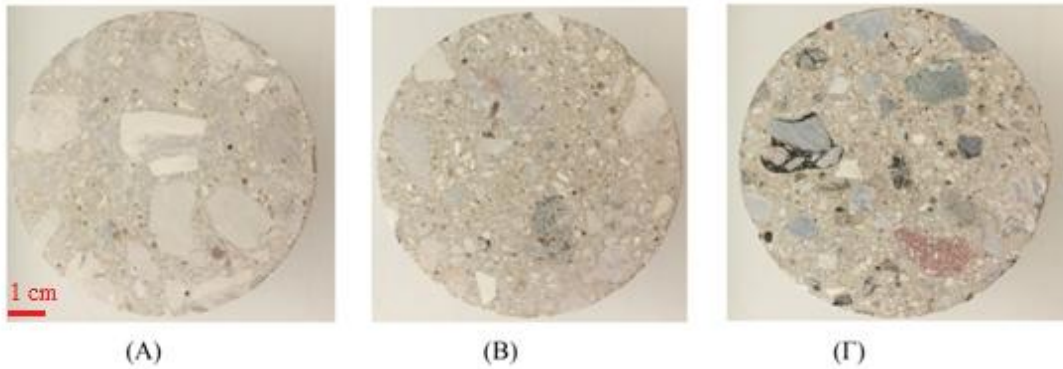
Πίνακας 4.47 Χαρακτηριστικά σκυροδέματος.

Ιδιότητα	Ποσοστό αντικατάστασης		
	0%	25%	100%
<i>αδρανή</i>			
σχήμα	-	-	εμφανής η ύπαρξη επιμηκών αδρανών
διαβάθμιση	όμοια χαρακτηριστικά		
διασπορά	όμοια χαρακτηριστικά		
υφή	-	-	εμφανής στην τομή η ύπαρξη των κομματιών παλιού σκυροδέματος
τύπος αδρανών	ανάλογος του ποσοστού αντικατάστασης		
εσωτερικές μικρορηγματώσεις	δεν παρατηρήθηκαν		
<i>σκυρόδεμα</i>			
ύπαρξη εγκλωβισμένου αέρα	δεν παρατηρήθηκε		
κενά αέρα - σχήμα	όμοια χαρακτηριστικά		
κενά αέρα - μέγεθος	όμοια χαρακτηριστικά		
κενά αέρα - διασπορά	όμοια χαρακτηριστικά		
εξίδρωση	δεν παρατηρήθηκε		
απόμιξη	δεν παρατηρήθηκε		
δεσμός αδρανών - τσιμεντόπαστας	-	-	εμφανής η ύπαρξη παλιάς διεπιφάνειας μεταξύ αδρανών και τσιμεντόπαστας
<i>τσιμεντόπαστα</i>			
χρώμα	όμοια χαρακτηριστικά		
σκληρότητα	όμοια χαρακτηριστικά		
πορώδες	όμοια χαρακτηριστικά		
ενανθράκωση	δεν παρατηρήθηκε		
υποκατάστατα τσιμέντου	δεν χρησιμοποιήθηκαν		

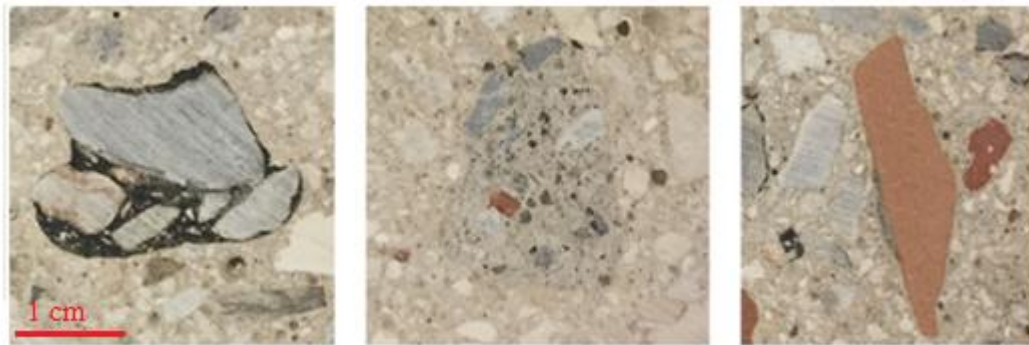
Είναι εμφανές από τα στοιχεία που παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα ότι, κατά τον έλεγχο των δοκιμίων με τη χρήση του στερεοσκοπίου δεν παρατηρήθηκαν διαφορές στην δομή του παραγόμενου σκυροδέματος οι οποίες να πηγάζουν από την χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών. Συγκεκριμένα, τα αδρανή, η τσιμεντόπαστα και το σκυρόδεμα ως σύνολο παρουσίαζαν τα ίδια χαρακτηριστικά, με μόνη διαφορά την παρουσία των ανακυκλωμένων αδρανών η οποία ήταν ανάλογη του ποσοστού αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα.

Εντούτοις, λόγω της μορφής των δοκιμίων και συγκεκριμένα λόγω του γεγονότος ότι προήλθαν από την κοπή κυβικών δοκιμίων είναι εμφανής για την περίπτωση των ανακυκλωμένων αδρανών η παρουσία αδρανών τα οποία έχουν επίμηκες σχήμα. Παράλληλα, στις περιπτώσεις όπου τμήθηκαν αδρανή από κομμάτια παλιού σκυροδέματος είναι εμφανής η ύπαρξη της διεπιφάνειας μεταξύ της παλιάς

τσιμεντόπαστας και των παλιών αδρανών. Στις εικόνες 4.19 και 4.20 που ακολουθούν παρουσιάζονται δοκίμια των τριών ποσοστών αντικατάστασης καθώς και λεπτομέρεια από δοκίμιο με αποκλειστικά ανακυκλωμένα αδρανή.



Εικόνα 4.19 Δοκίμια σκυροδέματος με ποσοστά αντικατάστασης: 0%, 25% και 100% (Α, Β, Γ αντίστοιχα).



Εικόνα 4.20 Λεπτομέρεια δοκιμίων ανακυκλωμένου σκυροδέματος: άσφαλτος, κομμάτι παλαιού σκυροδέματος και κομμάτι από τούβλο.

4.3 Τροποποίηση των ανακυκλωμένων αδρανών για τη βελτίωση των ιδιοτήτων αυτών και του ανακυκλωμένου σκυροδέματος.

Στα προηγούμενα κεφάλαια, παρουσιάστηκε αναλυτικά η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό της επίδρασης που παρουσιάζει η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών στις ιδιότητες του νωπού και του σκληρυμένου σκυροδέματος. Διαπιστώθηκε ότι η χρήση αυτών έχει αρνητική επίδραση στις ιδιότητες του παραγόμενου προϊόντος. Εντούτοις, καθορίστηκε το βέλτιστο ποσοστό αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή ήτοι το ποσοστό εκείνο, για το οποίο η απομείωση των ιδιοτήτων του ανακυκλωμένου σκυροδέματος είναι ανεκτή και αντισταθμίζεται από τα οφέλη χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών.

Τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του ανακυκλωμένου σκυροδέματος είχε προηγηθεί ο έλεγχος των ιδιοτήτων των ανακυκλωμένων αδρανών οι οποίες περιελάμβαναν γεωμετρικές, μηχανικές και χημικές ιδιότητες. Όπως αναλύθηκε εκτενώς στα αντίστοιχα κεφάλαια, οι ιδιότητες των ανακυκλωμένων αδρανών παρουσιάζουν συγκεκριμένες ιδιαιτερότητες οι οποίες με τη σειρά τους επιδρούν δυσμενώς στις ιδιότητες του παραγόμενου σκυροδέματος.

Για το λόγο αυτό ήταν επιθυμητή η εύρεση κάποιας μεθοδολογίας τροποποίησης των ανακυκλωμένων αδρανών ούτως ώστε να βελτιωθούν οι ιδιότητες αυτών και κατ' επέκταση του ανακυκλωμένου σκυροδέματος. Τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα των ανακυκλωμένων αδρανών είναι καταρχήν όσον αφορά στα θραύσματα από παλιό σκυρόδεμα (συμμετοχή σε ποσοστό 51%) η υπάρχουσα διεπιφάνεια μεταξύ των αδρανών και της τσιμεντόπαστας του αρχικού σκυροδέματος, και η υψηλή υδροαπορροφητικότητά τους. Ως εκ τούτου σκοπός των μεθοδολογιών τροποποίησης των ανακυκλωμένων αδρανών ήταν η αντιστάθμιση αυτών των μειονεκτημάτων. Επιπλέον, θεωρήθηκε σημαντικό η μεθοδολογία τροποποίησης των ανακυκλωμένων αδρανών να μπορεί να αξιοποιηθεί σε βιομηχανική κλίμακα.

Ως αποτέλεσμα, επιλέχθηκε η τροποποίηση της εξωτερικής επιφάνειας των χονδρόκοκκων ανακυκλωμένων αδρανών, με την επικάλυψή της είτε με κάποιο υδρόφοβο διάλυμα είτε με τη χρήση τσιμεντόπαστας. Για την επιλογή του υδρόφοβου διαλύματος επιδιώχθηκε αφενός να είναι ένα προϊόν διαθέσιμο στην τοπική αγορά, κατά προτίμηση χαμηλού κόστους και αφετέρου να μην αντιδρά με κάποιο από τα υλικά τα οποία περιέχονται στα ανακυκλωμένα αδρανή. Αντίστοιχα, αναφορικά με τη χρήση τσιμεντόπαστας επιλέχθηκαν συνθέσεις με διαφορετικό λόγο νερού προς τσιμέντο και με μερική αντικατάσταση του τσιμέντου από ιπτάμενη τέφρα. Στις δύο περιπτώσεις η επικάλυψη των ανακυκλωμένων αδρανών επιτυγχάνονταν μέσω της εμβάπτισής τους στο αντίστοιχο υλικό για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Σε όλες τις περιπτώσεις προσδιορίστηκαν συγκεκριμένες ιδιότητες των τροποποιημένων ανακυκλωμένων αδρανών: η κοκκομετρική τους ανάλυση, η υδροαπορροφητικότητα και το ειδικό τους βάρος και συγκριθήκαν με τις αντίστοιχες των μη τροποποιημένων ανακυκλωμένων αδρανών. Εν συνεχεία, με τη χρήση των τροποποιημένων ανακυκλωμένων αδρανών πραγματοποιήθηκαν συνθέσεις σκυροδέματος αποκλειστικά για το βέλτιστο ποσοστό αντικατάστασης θραυστών από

ανακυκλωμένα αδρανή. Για όλες τις περιπτώσεις προσδιορίστηκαν ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος, οι οποίες συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες σκυροδέματος με μη τροποποιημένα ανακυκλωμένα αδρανή. Βάσει αυτών επιλέχθηκε η καταλληλότερη μεθοδολογία για την βελτίωση των ιδιοτήτων των ανακυκλωμένων αδρανών.

4.3.1 Μεθοδολογία τροποποίησης των ανακυκλωμένων αδρανών και επίδραση στις ιδιότητές τους.

Αναφέρθηκε ανωτέρω ότι για την τροποποίηση των ανακυκλωμένων αδρανών αρχικά επιλέχθηκε η εμβάπτισή τους σε υδρόφοβα διαλύματα. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε έρευνα στην τοπική αγορά προς αναζήτηση προϊόντων τα οποία προορίζονταν για τη στεγανοποίηση ή αδιαβροχοποίηση επιφανειών. Κριτήριο για την επιλογή των υλικών ήταν καταρχήν να μην προκαλεί διάβρωση στα ανακυκλωμένα αδρανή και επιπλέον να είναι εύκολο στην εφαρμογή. Μεταξύ των υλικών τα οποία επιλέχθηκαν ήταν τα ακόλουθα:

(α) Σιλικονούχο αδιαβροχοποιητικό επιφανειών, PS -20 της εταιρείας ISOMAT, με διαλύτες. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του ήταν προϊόν έτοιμο για χρήση, διαφανές και προσέφερε εξαιρετικά υψηλή υδαταπωθητικότητα και μακρόχρονη προστασία. Προοριζόταν για εφαρμογή σε διάφορες επιφάνειες για την προστασία τους από την επίδραση της βροχής μεταξύ των οποίων: φυσικοί ή τεχνητοί λίθοι, άβαφο σοβά, εμφανή τοιχοποιία, διακοσμητικά τούβλα, κεραμίδια, κεραμικά πλακίδια και εμφανές σκυρόδεμα. Επιπλέον, ήταν κατάλληλο για την αδιαβροχοποίηση αρμών πλακιδίων.

(β) Σιλικονούχο αδιαβροχοποιητικό επιφανειών, PS -21 της εταιρείας ISOMAT, χωρίς διαλύτες. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του είχε χαρακτηριστικά αντίστοιχα με το PS-20 με εξαίρεση το ότι δεν περιείχε διαλύτες. Ήταν προϊόν έτοιμο για χρήση, διαφανές και προσέφερε εξαιρετικά υψηλή υδαταπωθητικότητα και μακρόχρονη προστασία. Επιπλέον ήταν κατάλληλο για την αδιαβροχοποίηση αρμών πλακιδίων και για την προστασία από τη βροχή επιφανειών από φυσικούς ή τεχνητούς λίθους, σοβά, εμφανή τοιχοποιία, διακοσμητικά τουβλάκια, κεραμίδια, πλακίδια, αγυάλιστα μάρμαρα και εμφανές σκυρόδεμα. Το συγκεκριμένο προϊόν είχε τη δυνατότητα να εφαρμοστεί και σε ελαφρώς υγρά υποστρώματα.

(γ) Γαλάκτωμα νανοεμποτισμού για την προστασία απορροφητικών επιφανειών, NANOPRO-C, της εταιρείας ISOMAT. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του το προϊόν παρέχει υδατική διασπορά υψηλής διεσδυτικότητας, νανομοριακής δομής και χρησιμοποιείται για την προστασία πορωδών επιφανειών από την υγρασία και τη δημιουργία αλάτων. Θεωρείται κατάλληλο για σκυρόδεμα, πλινθοδομή, σοβά, αρμούς πλακιδίων, γυψοσανίδες, μοριοσανίδες και επικαλύψεις φυσικών λίθων, οι οποίοι μπορεί να βρίσκονται σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους.

(δ) Προϊόν υδατικής βάσης SurfaPore C της NanoPhos. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του στόχος είναι η αποτελεσματική αδιαβροχοποίηση και προστασία δομικών επιφανειών. Επιπλέον, καθώς είναι λεπτόρρευστο σχεδόν σαν το νερό, διεσδύει αποτελεσματικά σε τριχοειδή και μικρορωγμές. Θεωρείται κατάλληλο για

εφαρμογή σε φυσική και τεχνητή πέτρα, τσιμεντοειδείς επιφάνειες, τοίχους, τaráτσες και αρμούς.

Παρά την πληθώρα προϊόντων, τα οποία είναι διαθέσιμα για την αδιαβροχοποίηση ή στεγανοποίηση επιφανειών, η πλειοψηφία τους είναι ακατάλληλη για χρήση στην περίπτωση ύπαρξης οργανικών συστατικών. Μάλιστα πολλά από αυτά αναφέρουν συγκεκριμένα ότι δεν ενδείκνυνται για τη χρήση σε άσφαλο. Ως εκ τούτου μιας και ένα από τα συστατικά των ανακυκλωμένων αδρανών είναι η άσφαλτος η χρήση των προϊόντων αυτών απορρίφθηκε.



Εικόνα 4.21 Προϊόντα που επιλέχθηκαν για την εμφάπτιση των ανακυκλωμένων αδρανών (υδρόφοβα διαλύματα).

Επιπλέον, κατά την εφαρμογή των αρχικώς επιλεχθέντων προϊόντων παρατηρήθηκε ότι τα δύο πρώτα προϊόντα αντέδρασαν με την άσφαλο, η οποία κατά την εμφάπτιση των αδρανών άρχισε να διαβρώνεται, και ως εκ τούτου η εφαρμογή τους σταμάτησε και τα προϊόντα απορρίφθηκαν χωρίς να ελεγχθούν οι ιδιότητες των τροποποιημένων αδρανών μήτε να παρασκευαστεί με αυτά ανακυκλωμένο σκυρόδεμα. Προβλήματα παρουσιάστηκαν και κατά την εφαρμογή του τρίτου προϊόντος το οποίο για το λόγο ότι ήταν σε μορφή γαλακτώματος ήταν δύσκολο να τοποθετηθεί στην εξωτερική επιφάνεια των αδρανών και ως εκ τούτου απορρίφθηκε και αυτό. Κατά συνέπεια, όσον αφορά στην τροποποίηση των ανακυκλωμένων αδρανών με τη χρήση υδρόφοβου διαλύματος, αποτελέσματα εξήχθησαν μόνο από την εφαρμογή του προϊόντος SurfaPore C της NanoPhos.

Αναφορικά με την τροποποίηση των ανακυκλωμένων αδρανών με τη χρήση τσιμεντόπαστας επιλέχθηκαν τέσσερις διαφορετικοί τύποι τσιμεντόπαστας για την εφαρμογή. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν: (α) τσιμεντόπαστα με λόγο νερού προς τσιμέντο ίσο με ένα (1), χωρίς τη χρήση ιπτάμενης τέφρας, (β) τσιμεντόπαστα με λόγο νερού προς τσιμέντο ίσο με 0,5, χωρίς τη χρήση ιπτάμενης τέφρας, (γ) τσιμεντόπαστα με λόγο νερού προς τσιμέντο ίσο με ένα (1), με τη χρήση ιπτάμενης τέφρας σε ποσοστό 30% επί της συνολικής ποσότητας τσιμέντου και ιπτάμενης

τέφρας και (δ) τσιμεντόπαστα με λόγο νερού προς τσιμέντο ίση με 0,5, με τη χρήση ιπτάμενης τέφρας σε ποσοστό 30% επί της συνολικής ποσότητας τσιμέντου και ιπτάμενης τέφρας. Για την παρασκευή της τσιμεντόπαστας σε όλες τις περιπτώσεις ακολουθήθηκε το πρότυπο ASTM C305.



Εικόνα 4.22 Ανακυκλωμένα αδρανή κατόπιν (Α) εμφύσησης σε υδρόφοβο προϊόν, (Β) επικάλυψης με τσιμεντόπαστα λόγω νερού προς τσιμέντο ίση με 1 και (Γ) επικάλυψης με τσιμεντόπαστα λόγω νερού προς τσιμέντο ίση με 0,5.

Με το υδρόφοβο διάλυμα και τις τσιμεντόπαστες επικαλύφθηκαν τα χονδρόκοκκα κλάσματα των αδρανών (ψηφίδα: 6-11mm και χαλίκι: 12-25mm), τα οποία επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν για την σύνθεση σκυροδέματος. Την επικάλυψή τους είχε προηγηθεί η επεξεργασία τους (έκλυση με νερό υπό πίεση) για την απομάκρυνση των ξένων υλών που βρίσκονται προσκολλημένες στην επιφάνειά τους (εικόνα 4.22).

Πίνακας 4.48 Κοκκομετρική ανάλυση ανακυκλωμένης ψηφίδας (κατά ASTM).

Αμερ. κόσκινα ASTM E11	Ανοιγμα βροχίδας (mm)	Ψηφίδα 6-11mm					
		ονομαστικό μέγεθος (mm)					
		χωρίς τροποποίηση	υδρόφοβο διάλυμα	τσιμεντόπαστα N/T =1		τσιμεντόπαστα N/T =0,5	
				χωρίς ιπταμ. τέφρα	με ιπταμ. τέφρα	χωρίς ιπταμ. τέφρα	με ιπταμ. τέφρα
%διερχόμενο							
1 1/2"	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,5	100,00	100,00	100,00	100,00	97,30	98,60
3/8"	9,50	98,50	97,80	84,90	85,60	70,50	71,50
No 4	4,75	25,80	26,20	15,40	14,90	9,30	9,70
No 8	2,36	1,80	1,70	1,20	1,00	3,00	2,80
No 16	1,18	1,30	1,40	0,60	0,50	1,70	1,40
No 30	0,60	0,80	0,80	0,40	0,40	1,10	1,10
No 50	0,30	0,30	0,20	0,20	0,20	0,90	0,90
No 60	0,25	0,30	0,20	0,20	0,20	0,80	0,70
No 200	0,075	0,10	0,10	0,20	0,10	0,40	0,40

Την τροποποίηση των ανακυκλωμένων αδρανών ακολούθησε ο έλεγχος των ιδιοτήτων τους. Συγκεκριμένα, προσδιορίστηκε η κοκκομετρική τους διαβάθμιση βάσει του πρότυπου ASTM C136 σε συνδυασμό με το πρότυπο ASTM C117 (για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε παιπάλη) με τη χρήση των κατάλληλων πιστοποιημένων κατά περίπτωση κόσκινων. Τα κόσκινα επιλέχθηκαν συναρτήσει του μεγέθους του μέγιστου κόκκου των εξεταζόμενων αδρανών και σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Αμερικανικού πρότυπου ASTM E11.

Πίνακας 4.49 Κοκκομετρική ανάλυση ανακυκλωμένου χαλικιού (κατά ASTM).

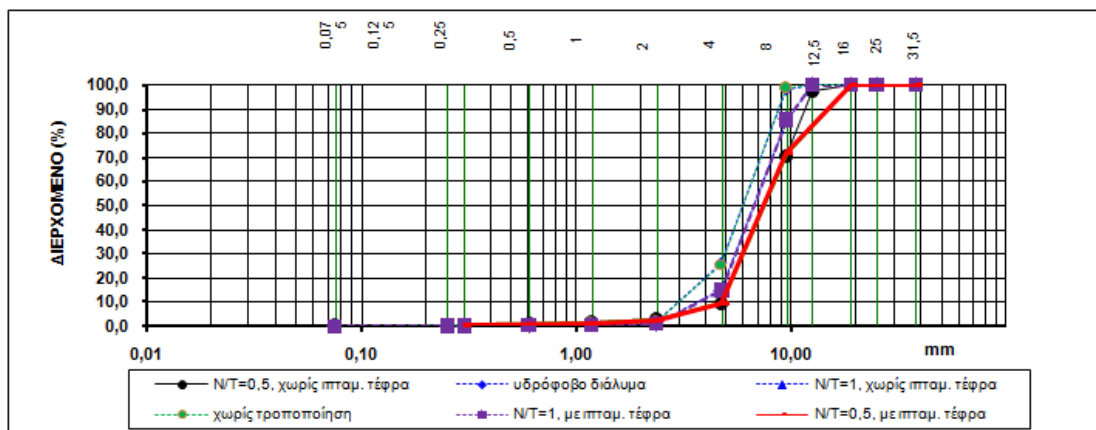
Αμερ. κόσκινα ASTM E11	Ανοιγμα βροχίδας (mm)	Χαλίκι 12-25mm					
		ονομαστικό μέγεθος (mm)					
		χωρίς τροποποίηση	υδρόφοβο διάλυμα	τσιμεντόπαστα N/T =1		τσιμεντόπαστα N/T =0,5	
				χωρίς ιπταμ. τέφρα	με ιπταμ. τέφρα	χωρίς ιπταμ. τέφρα	με ιπταμ. τέφρα
		%διερχόμενο					
1 1/2"	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25,0	98,70	98,50	95,70	96,50	93,90	94,20
3/4"	19,0	84,40	84,90	70,80	71,20	60,30	59,80
1/2"	12,5	45,00	44,70	20,40	19,90	13,90	12,90
3/8"	9,50	19,30	19,30	8,80	9,20	3,00	2,80
No 4	4,75	5,10	4,80	1,00	0,80	1,20	1,40
No 8	2,36	3,60	3,90	0,60	0,60	0,90	1,10
No 16	1,18	2,70	2,70	0,60	0,50	0,70	0,80
No 30	0,60	1,70	1,60	0,50	0,50	0,60	0,60
No 50	0,30	0,70	0,60	0,50	0,50	0,50	0,50
No 60	0,25	0,60	0,50	0,50	0,50	0,50	0,40
No 200	0,075	0,30	0,30	0,40	0,40	0,30	0,30

Στους πίνακες 4.48 και 4.49 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής διαβάθμισης για την ψηφίδα και το χαλίκι, ως ο μέσος όρος τριών δοκιμών για το κάθε κλάσμα, συγκρινόμενα με την κοκκομετρική διαβάθμιση των μη τροποποιημένων ανακυκλωμένων αδρανών.

Συγκρίνοντας την κοκκομετρική ανάλυση κάθε κλάσματος των τροποποιημένων ανακυκλωμένων αδρανών παρατηρούμε καταρχήν, ότι όσον αφορά στα αδρανή που επικαλύφθηκαν με το υδρόφοβο διάλυμα η κοκκομετρική τους διαβάθμιση και κατ' επέκταση η κοκκομετρική τους καμπύλη είναι όμοια με αυτή του αντίστοιχου κλάσματος προ της τροποποίησης. Αυτό ήταν αναμενόμενο για το λόγο ότι το υδρόφοβο διάλυμα δεν αφήνει εμφανή υπολείμματα στην εξωτερική επιφάνεια των ανακυκλωμένων αδρανών.

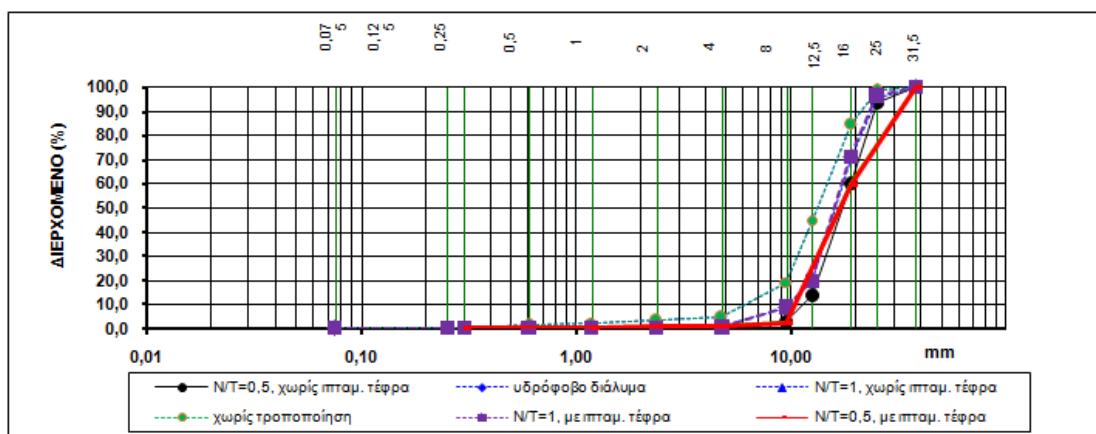
Απεναντίας τα τροποποιημένα με τη χρήση τσιμεντόπαστας ανακυκλωμένα αδρανή παρουσιάζουν διαφοροποίηση της κοκκομετρικής τους διαβάθμισης. Συγκεκριμένα, η επικάλυψη με τσιμεντόπαστα αυξάνει το μέγεθος των κόκκων των αδρανών και ως εκ τούτου το διερχόμενο ποσοστό από τα κόσκινα Νο 3/4", 1/2" και 3/8" μειώνεται. Επιπλέον, η μείωση αυτή είναι αυξημένη για την περίπτωση της

χρήσης τσιμεντόπαστας με λόγο νερού προς τσιμέντο 0,5 διότι ως πιο παχύρευστο υλικό δημιουργεί μεγαλύτερο πάχος επικάλυψης στα αδρανή.



Διάγραμμα 4.48 Κοκκομετρική ανάλυση ανακυκλωμένης ψηφίδας (6-11mm -κατά ASTM).

Η διαφοροποίηση αυτή είναι εμφανής στα διαγράμματα 4.48 και 4.49 στα οποία παρουσιάζονται οι κοκκομετρικές καμπύλες των τροποποιημένων και μη τροποποιημένων ανακυκλωμένων αδρανών.



Διάγραμμα 4.49 Κοκκομετρική ανάλυση ανακυκλωμένου χαλικιού (12-25mm -κατά ASTM).

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής διαβάθμισης με τις απαιτήσεις του ΚΤΣ-97, ο οποίος ορίζει ότι για το επόμενο μετά την άμμο κλάσμα δεν επιτρέπεται να υπάρχει διερχόμενο από το κόσκινο Νο 8 σε ποσοστό μεγαλύτερο από 25%, όπως επίσης και υλικό διερχόμενο από το κόσκινο Νο 16 σε ποσοστό μεγαλύτερο από 2%, παρατηρείται ότι οι περιορισμοί αυτού ικανοποιούνται για όλες τις περιπτώσεις τροποποίησης.

Ακολούθησε ο προσδιορισμός του ειδικού βάρους και της υδροαπορροφητικότητας των ανακυκλωμένων αδρανών, βάσει του αμερικανικού πρότυπου ASTM C127. Για όλες τις περιπτώσεις προσδιορίστηκαν η υδροαπορροφητικότητα και τα: μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος κορεσμένου και επιφανειακά ξηρού υλικού (το οποίο απαιτείται για τη μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος), μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος και φαινόμενο ειδικό βάρος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους πίνακες 4.50 και 4.51 για την ψηφίδα και το χαλίκι αντίστοιχα, συγκρινόμενα με την περίπτωση των μη τροποποιημένων αδρανών.

Πίνακας 4.50 Ειδικό βάρος και υδροαπορροφητικότητα ανακυκλωμένης ψηφίδας.

Ιδιότητα	Ψηφίδα 6-11mm					
	χωρίς τροποποίηση	υδρόφοβο διάλυμα	τσιμεντόπαστα N/T =1		τσιμεντόπαστα N/T =0,5	
			χωρίς ιπταμ. τέφρα	με ιπταμ. τέφρα	χωρίς ιπταμ. τέφρα	με ιπταμ. τέφρα
Υδροαπορροφητικότητα %	4,80	3,40	3,70	3,90	3,10	3,30
Μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος κορεσμένου και επιφανειακά στεγνού υλικού (tn/m ³)	2,44	2,27	2,16	2,15	2,21	2,21
Μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος (tn/m ³)	2,32	2,20	2,08	2,07	2,15	2,14
Φαινόμενο ειδικό βάρος (tn/m ³)	2,62	2,37	2,26	2,25	2,30	2,30

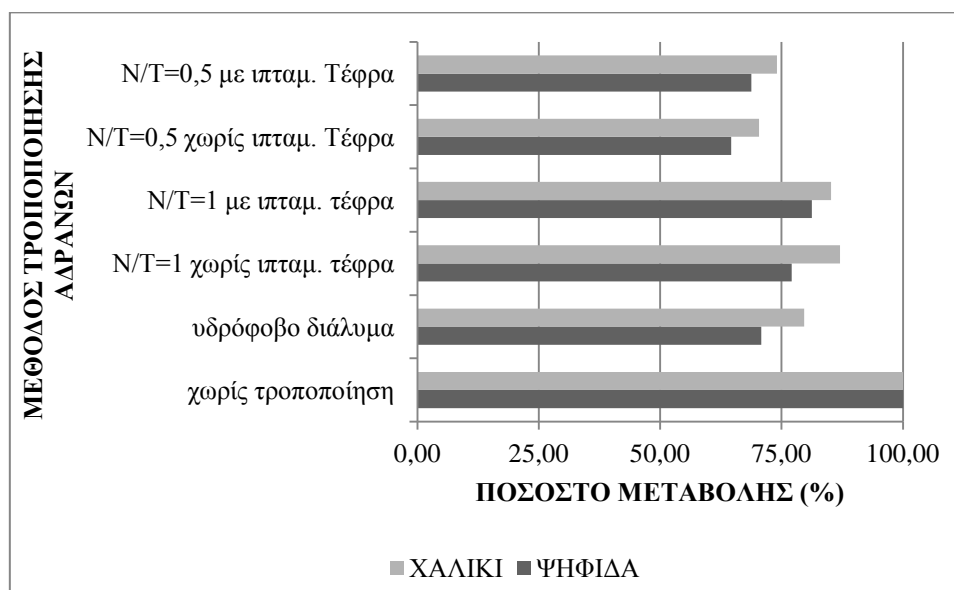
Παρατηρείται ότι ως αποτέλεσμα όλων των μεθόδων τροποποίησης, για τα δύο κλάσματα των ανακυκλωμένων αδρανών, υπάρχει μείωση της υδροαπορροφητικότητάς καθώς του ειδικού τους βάρους. Αναφορικά με το ειδικό βάρος των αδρανών η μείωση είναι περί το 10% και αναμένεται να επηρεάσει την πυκνότητα του παραγόμενου νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος.

Πίνακας 4.51 Ειδικό βάρος και υδροαπορροφητικότητα ανακυκλωμένου χαλικιού.

Ιδιότητα	Χαλίκι 12-25mm					
	χωρίς τροποποίηση	υδρόφοβο διάλυμα	τσιμεντόπαστα N/T =1		τσιμεντόπαστα N/T =0,5	
			χωρίς ιπταμ. τέφρα	με ιπταμ. τέφρα	χωρίς ιπταμ. τέφρα	με ιπταμ. τέφρα
Υδροαπορροφητικότητα %	5,40	4,30	4,70	4,60	3,80	4,00
Μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος κορεσμένου και επιφανειακά στεγνού υλικού (tn/m ³)	2,39	2,06	2,33	2,30	2,27	2,22
Μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος (tn/m ³)	2,27	1,98	2,23	2,20	2,19	2,14
Φαινόμενο ειδικό βάρος (tn/m ³)	2,59	2,16	2,48	2,44	2,38	2,34

Όσον αφορά στην υδροαπορροφητικότητα των τροποποιημένων ανακυκλωμένων αδρανών, παρατηρείται μείωση της τιμής αυτής για όλες τις μεθόδους τροποποίησης των ανακυκλωμένων αδρανών. Η μείωση αυτή είναι μεγαλύτερη για το κλάσμα της ψηφίδας και σε ορισμένες περιπτώσεις φτάνει ως το ποσοστό των 35%. Επιπλέον, η μεγαλύτερη μείωση της υδροαπορροφητικότητας παρατηρείται για την περίπτωση της χρήσης τσιμεντόπαστας με λόγο νερού προς τσιμέντο ίσο με 0,5, ενδεχομένως λόγω του μεγάλου πάχους επικάλυψης των ανακυκλωμένων αδρανών. Στο διάγραμμα 4.50 παρουσιάζεται αναλυτικά το ποσοστό μείωσης της υδροαπορροφητικότητας ανά κλάσμα αδρανών και ανά μέθοδο τροποποίησης. Η μείωση αυτή της υδροαπορροφητικότητας πρέπει να ληφθεί υπόψη

κατά τον σχεδιασμό της μελέτης σύνθεσης σκυροδέματος, ενώ παράλληλα αναμένεται να οδηγήσει σε βελτίωση των ιδιοτήτων του παραγόμενου σκυροδέματος.



Διάγραμμα 4.50 Ποσοστό μείωσης της υδροαπορροφητικότητας των ανακυκλωμένων αδρανών ανά κλάσμα και μέθοδο τροποποίησής τους.

4.3.2 Ιδιότητες ανακυκλωμένου σκυροδέματος με τροποποιημένα ανακυκλωμένα αδρανή.

Τον έλεγχο των ιδιοτήτων των τροποποιημένων ανακυκλωμένων αδρανών, ακολούθησε η παρασκευή δοκιμίων σκυροδέματος με μερική αντικατάσταση των θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή, σε ποσοστό ίσο με το βέλτιστο ποσοστό ήτοι 25% και ο έλεγχος των ιδιοτήτων του παραγόμενου νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος. Στόχος ήταν να προσδιοριστεί τυχούσα βελτίωση των ιδιοτήτων του παραγόμενου σκυροδέματος ως αποτέλεσμα της τροποποίησης των ανακυκλωμένων αδρανών.

Στο σύνολο των συνθέσεων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Portland II 42,5N, υπερρευστοποιητής Chemium 274 της εταιρείας Domylco, θραυστά ασβεστολιθικά αδρανή (λεπτόκοκκα – χονδρόκοκκα) και ανακυκλωμένα αδρανή προερχόμενα από την Ανακύκλωση Αδρανών Μακεδονίας (χονδρόκοκκα). Για τον προσδιορισμό της μελέτης σύνθεσης του κάθε ποσοστού, αξιοποιήθηκε ο προσδιορισμός σε προγενέστερο στάδιο των: κοκκομετρική ανάλυση, περιεκτικότητα παιπάλης, ειδικό βάρος (μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος κορεσμένου και επιφανειακά στεγνού υλικού) και υδροαπορροφητικότητα των αδρανών.

Σε όλες τις συνθέσεις διατηρήθηκαν σταθερά: η ποσότητα του τσιμέντου, του ρευστοποιητή καθώς και η αναλογία χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων αδρανών στο μείγμα των αδρανών η οποία ήταν: 50% λεπτόκοκκα αδρανή και 50% χονδρόκοκκα αδρανή (15% ψηφίδα και 35% χαλίκι). Επιπλέον, επιδιώχθηκε τα αποτελέσματα των δοκιμών να είναι ανεξάρτητα από την εργασιμότητα του αναμίγματος και για το λόγο αυτό ο σχεδιασμός της εκάστοτε μελέτης σύνθεσης βασίστηκε στο να παρουσιάζουν όλες την ίδια εργασιμότητα. Συγκεκριμένα ήταν επιθυμητό η εργασιμότητα

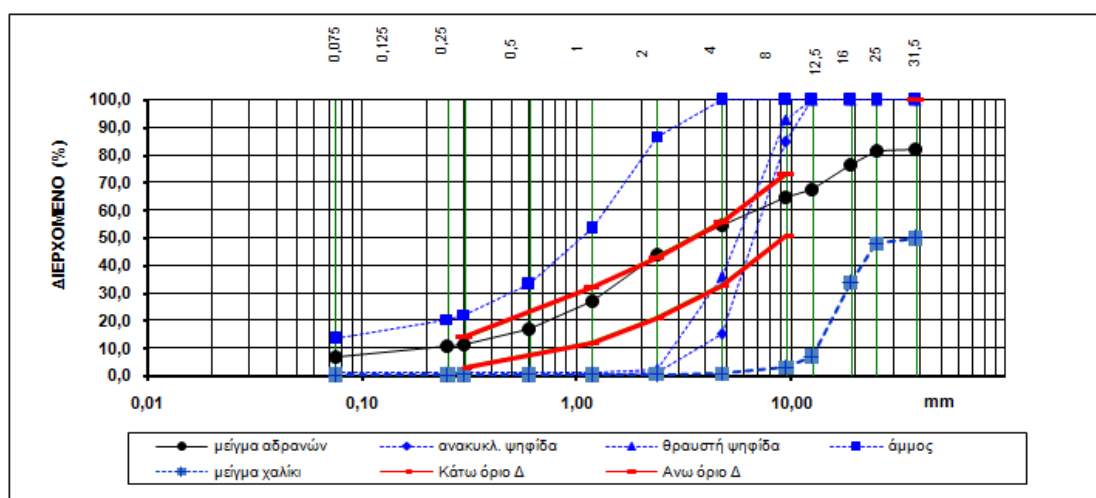
μετρούμενη μέσω της δοκιμής της κάθισης ίση με $11 \pm 0,50 \text{ cm}$. Ως εκ τούτου ο ενεργός λόγος νερού προς τσιμέντο έλαβε την τιμή 0,49 ενώ αντίστοιχα ο ολικός λόγος νερού προς τσιμέντο έλαβε τιμές μεταξύ 0,64 - 0,66, συναρτήσσει της υδροαπορροφητικότητας των χρησιμοποιούμενων αδρανών.

Στον πίνακα 4.52 που ακολουθεί περιγράφονται οι αναλογίες του αναμίγματος για την κάθε σύνθεση, κατά μέρη βάρους kg/m^3 , καθώς και ο ολικός – ενεργός λόγος νερού προς τσιμέντο.

Πίνακας 4.52 Αναλογίες αναμιγμάτων.

Υλικά παρασκευής	χωρίς τροποποίηση	υδρόφοβο διάλυμα	τσιμεντόπαστα N/T =1		τσιμεντόπαστα N/T =0,5	
			χωρίς ιπτάμενη τέφρα	με ιπτάμενη τέφρα	χωρίς ιπτάμενη τέφρα	με ιπτάμενη τέφρα
τσιμέντο	280	280	280	280	280	280
νερό	184	180	181	181	180	180
υπερρυστοποιητής	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85
άμμος θραυστή	939	939	939	939	939	939
ψηφίδα θραυστή	215	215	215	215	215	215
ψηφίδα ανακυκλωμένη	68	63	60	60	62	62
χαλίκι θραυστό	508	508	508	508	508	508
χαλίκι ανακυκλωμένο	156	134	152	150	148	145
ενεργός λόγος N/T	0,66	0,64	0,65	0,65	0,64	0,64
ολικός λόγος N/T	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49

Σε όλες τις περιπτώσεις, ελέγχθηκε εάν η κοκκομετρική διαβάθμιση του μείγματος των αδρανών βρίσκεται εντός των ορίων που ορίζει ο ΚΤΣ-97 (άνω – κάτω όριο Δ) για την περίπτωση οπλισμένου σκυροδέματος. Η επιλογή των ορίων αυτών έγινε διότι η χρήση του οπλισμένου σκυροδέματος είναι συνηθέστερη στις κατασκευές.



Διάγραμμα 4.51 Κοκκομετρική καμπύλη μείγματος αδρανών για τροποποιημένα αδρανή με τσιμεντόπαστα, λόγου νερού προς τσιμέντο ίσο με ένα χωρίς τη χρήση ιπτάμενης τέφρας.

Στο διάγραμμα 4.51 παρουσιάζεται ενδεικτικά η κοκκομετρική καμπύλη του μείγματος αδρανών σε σχέση με τα όρια του ΚΤΣ-97 για την περίπτωση των τροποποιημένων αδρανών με τσιμεντόπαστα λόγου νερού προς τσιμέντο ίσο με ένα (1) χωρίς τη χρήση ιπτάμενης τέφρας. Αντίστοιχες είναι οι κοκκομετρικές καμπύλες για τις συνθέσεις των λοιπών ποσοστών αντικατάστασης.

Μετά τον προσδιορισμό της μελέτης σύνθεσης για κάθε ποσοστό, ξεκίνησε η παρασκευή των αναμιγμάτων και ακολούθησαν οι εργαστηριακές δοκιμές του νωπού σκυροδέματος, οι οποίες περιελάμβαναν τον προσδιορισμό των: εργασιμότητα μέσω της δοκιμής κάθισης (ASTM C143), πυκνότητα (EN 12350-6) και περιεκτικότητα αέρα (ASTM C231). Οι ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος προσδιορίστηκαν, βάσει των οριζόμενων στο εκάστοτε πρότυπο δοκιμής που ακολουθήθηκε, μία φορά για κάθε σύνθεση σύμφωνα με τη συνήθη πρακτική. Ο προσδιορισμός της εργασιμότητας απαιτήθηκε για την επιβεβαίωση ότι τα αναμίγματα παρουσιάζουν την ίδια εργασιμότητα όπως ήταν η απαίτηση του σχεδιασμού τους.

Εν συνεχεία, παρασκευάστηκαν δοκίμια σκληρυμένου σκυροδέματος για τον έλεγχο της θλιπτικής και της καμπτικής αντοχής. Παρασκευάστηκαν τρία κυβικά δοκίμια διαστάσεων 150x150x150mm (για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής) και τρία πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 100x100x400mm (για τον υπολογισμό της καμπτικής αντοχής) για κάθε σύνθεση και η τιμή της αντοχής προσδιορίστηκε ως ο μέσος όρος αυτών για ηλικία δοκιμίων 28 ημέρες.

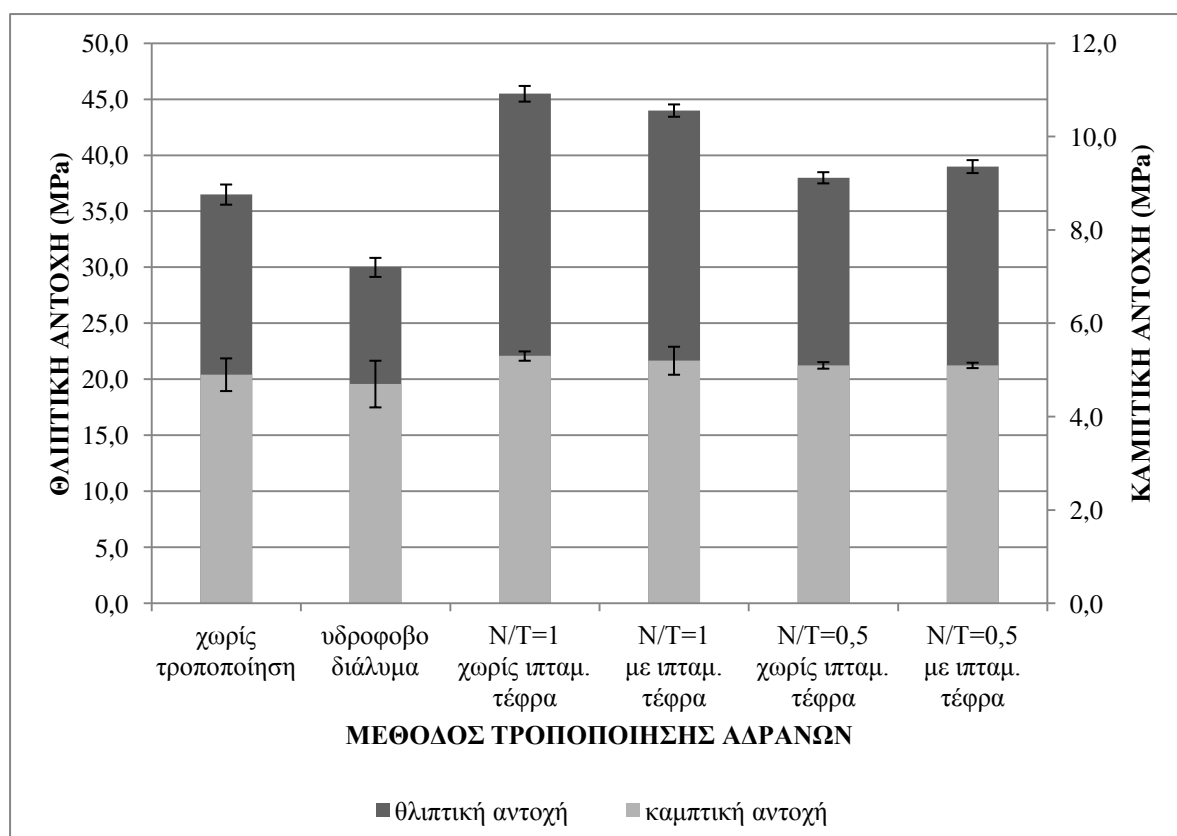
Η δοκιμή προσδιορισμού της θλιπτικής αντοχής, πραγματοποιήθηκε βάσει του EN 12390-03, με τη χρήση της υδραυλικής μηχανής Toni Technik με μέγιστο φορτίο 3000kN και ταχύτητα δοκιμής τα 0,50 MPa/s. Αντίστοιχα, η δοκιμή προσδιορισμού της καμπτικής αντοχής, πραγματοποιήθηκε στα πρισματικά δοκίμια βάσει των οριζόμενων στο πρότυπο EN 12390-5 για την κάμψη τεσσάρων σημείων. Χρησιμοποιήθηκε η σέρβο - υδραυλική μηχανή INSTRON με μέγιστο φορτίο 30kN, με ασκούμενο φορτίο το οποίο αυξανόταν με σταθερό ρυθμό τάσης 0,05 MPa/s.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος, παρουσιάζονται ανά μεθοδολογία τροποποίησης στον πίνακα 4.53 που ακολουθεί.

Πίνακας 4.53 Αποτελέσματα δοκιμών.

Ιδιότητες	χωρίς τροποποίηση	υδρόφοβο διάλυμα	τσιμεντόπαστα N/T =1		τσιμεντόπαστα N/T =0,5	
			χωρίς ιπτάμενη τέφρα	με ιπτάμενη τέφρα	χωρίς ιπτάμενη τέφρα	με ιπτάμενη τέφρα
εργασιμότητα μέσω κάθισης (cm)	11,5	11,0	11,5	10,5	11,0	11,5
πυκνότητα νωπού (Kg/m ³)	2260	2170	2230	2230	2250	2250
περιεκτικότητα σε αέρα (%)	2,2	2,5	2,2	2,1	2,3	2,1
θλιπτική αντοχή (28 ημερών) (MPa)	36,5	30,0	45,5	44,0	38,0	39,0
καμπτική αντοχή (28 ημερών) (MPa)	4,9	4,7	5,3	5,2	5,1	5,1

Τα αποτελέσματα των δοκιμών της εργασιμότητας συμβαδίζουν με τις απαιτήσεις του σχεδιασμού όλων των συνθέσεων και συγκεκριμένα, η εργασιμότητα μετρούμενη μέσω της κάθισης λαμβάνει τιμές $11 \pm 0,5 \text{ cm}$ για όλες τις μεθόδους τροποποίησης των ανακυκλωμένων αδρανών. Το ποσοστό του περιεχόμενου αέρα στο νωπό σκυρόδεμα κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 2,1 – 2,5% για το σύνολο των μεθόδων τροποποίησης. Το υψηλότερο ποσοστό περιεχόμενου αέρα (2,4%) αντιστοιχεί στη σύνθεση με τα αδρανή που είναι εμβαπτισμένα σε υδρόφοβο διάλυμα. Εντούτοις λόγω η διαφοράς περιεχόμενου αέρα μεταξύ των συνθέσεων, δεν μας οδηγεί σε κάποιο σχετικό συμπέρασμα ούτε αναμένεται ιδιαίτερη επίδραση στις ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος.

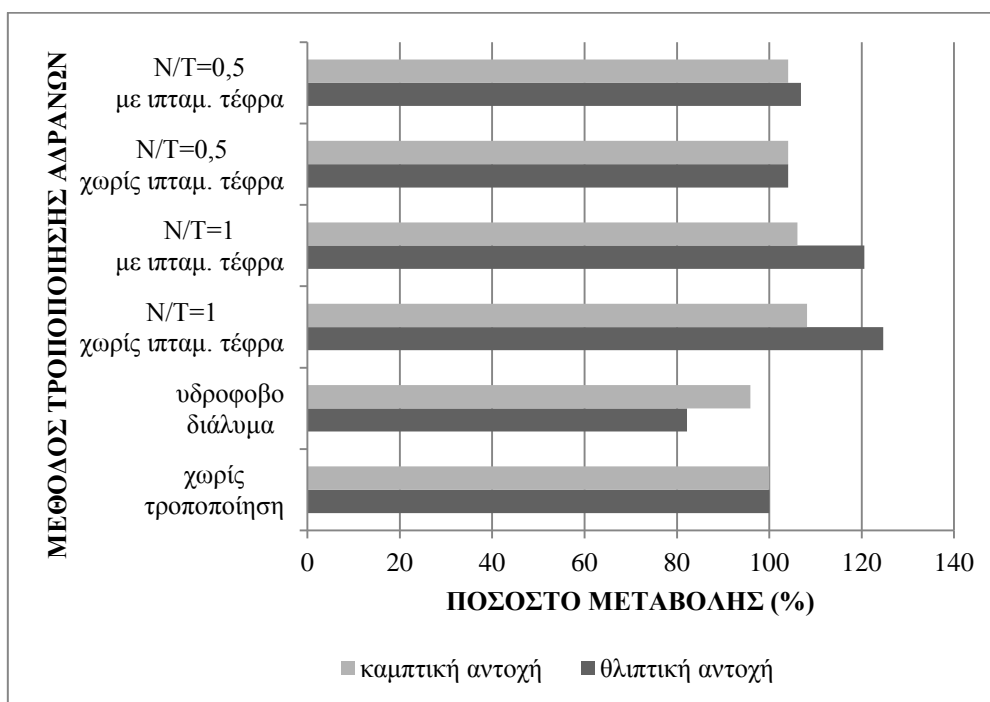


Διάγραμμα 4.52 Αποτελέσματα θλιπτικής και καμπτικής αντοχής σκυροδέματος.

Αναφορικά με την πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος των συνθέσεων παρατηρείται ότι υπάρχει μια μικρή διακύμανση των τιμών αυτής συναρτήσει της διακύμανσης που παρουσιάζουν τα ειδικά βάρη των τροποποιημένων ανακυκλωμένων αδρανών. Κατά συνέπεια, τη μικρότερη πυκνότητα νωπού σκυροδέματος παρουσιάζει η σύνθεση με τα επικαλυμμένα με το υδρόφοβο διάλυμα ανακυκλωμένα αδρανή, τα οποία είχαν και το μικρότερο ειδικό βάρος (μείωση σε ποσοστό 4%).

Στο διάγραμμα 4.52 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θλιπτικής και καμπτικής αντοχής του παραγόμενου σκυροδέματος. Παρατηρείται ότι με εξαίρεση την περίπτωση της χρήσης του υδρόφοβου διαλύματος, σε όλες τις λοιπές περιπτώσεις η τροποποίηση των ανακυκλωμένων αδρανών οδηγεί σε αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος. Η διακύμανση είναι εντονότερη για την περίπτωση της

θλιπτικής αντοχής. Συγκεκριμένα, στο διάγραμμα 4.53 παρουσιάζεται το κατά περίπτωση ποσοστό μείωσης ή αύξησης της αντοχής για την κάθε μέθοδο τροποποίησης των ανακυκλωμένων αδρανών.



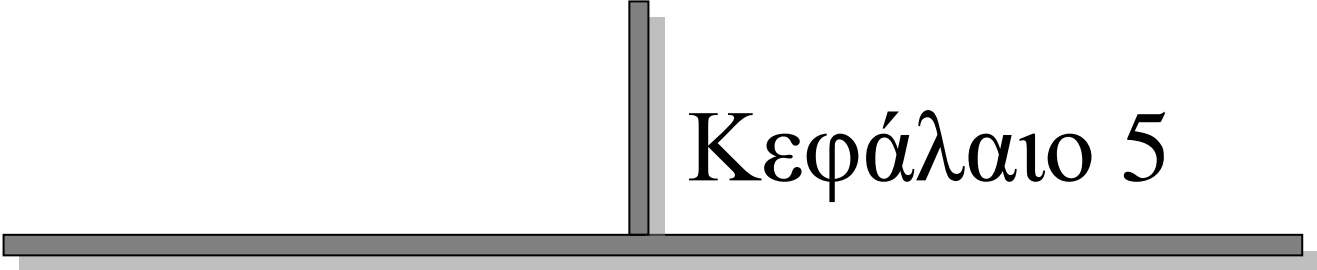
Διάγραμμα 4.53 Ποσοστό μείωσης της θλιπτικής και καμπτικής αντοχής συγκριτικά με το σκυρόδεμα αναφοράς.

Αναφέρθηκε ήδη ότι η μόνη περίπτωση μείωσης της αντοχής του παραγόμενου σκυροδέματος είναι για την περίπτωση χρήσης του υδρόφοβου διαλύματος, το οποίο προκαλεί μείωση της αντοχής 18% και 4% για τη θλιπτική και καμπτική αντοχή αντίστοιχα. Παρά το γεγονός ότι για την ίδια σύνθεση παρατηρείται η μικρότερη πυκνότητα νωπού και η μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε αέρα, λόγω του μικρού ποσοστού αυξομείωσης αυτών, δεν θεωρείται πιθανό η μείωση της αντοχής να οφείλεται σε αυτά. Αντίθετα εικάζεται ότι η χρήση του υδρόφοβου διαλύματος παρεμποδίζει την ανάπτυξη της συνάφειας μεταξύ των αδρανών και της τσιμεντόπαστας, οδηγώντας σε ασθενέστερο σκυρόδεμα.

Για την περίπτωση της χρήσης τσιμεντόπαστας παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη αύξηση της αντοχής αφορά στην περίπτωση της τσιμεντόπαστας με λόγο νερού προς τσιμέντο ίσο με τη μονάδα, χωρίς τη χρήση ιπτάμενης τέφρας, όπου παρουσιάζεται αύξηση της αντοχής 25% και 8% για τη θλιπτική και καμπτική αντοχή αντίστοιχα. Αντίστοιχη (αν και λίγο μικρότερη) είναι η αύξηση της αντοχής σε περίπτωση χρήσης ιπτάμενης τέφρας, ήτοι αύξηση της αντοχής 21% και 6% για τη θλιπτική και καμπτική αντοχή αντίστοιχα. Για την περίπτωση της χρήσης τσιμεντόπαστας με λόγο νερού προς τσιμέντο ίσο με 0,5, χωρίς τη χρήση ιπτάμενης τέφρας, παρουσιάζεται αύξηση της αντοχής 4% για τη θλιπτική και καμπτική αντοχή, ενώ για την περίπτωση της χρήσης της τσιμεντόπαστας με λόγο νερού προς τσιμέντο ίσο με 0,5, με τη χρήση ιπτάμενης τέφρας, παρουσιάζεται αύξηση της αντοχής 7% και 4% για τη θλιπτική και καμπτική αντοχή αντίστοιχα.

Η μικρότερη αύξηση της αντοχής για την περίπτωση της τσιμεντόπαστας με το μικρότερο λόγο νερού προς τσιμέντο εικάζεται ότι οφείλεται στην μεγαλύτερου πάχους επικάλυψη των ανακυκλωμένων αδρανών, η οποία παρά το ότι προσδίδει σε αυτά μικρότερη υδροαπορροφητικότητα εντούτοις εμποδίζει την συνάφεια της τσιμεντόπαστας του σκυροδέματος με τα αδρανή. Επιπλέον, η επικάλυψη αυτή θα αποτελεί μια διεπιφάνεια μειωμένης αντοχής εντός του παραγόμενου σκυροδέματος, με επακόλουθο της μείωση της αντοχής του.

Συμπεραίνουμε κατά συνέπεια ότι βέλτιστη περίπτωση για την τροποποίηση των ανακυκλωμένων αδρανών είναι η χρήση τσιμεντόπαστας με λόγο νερού προς τσιμέντο ίσο με τη μονάδα. Μάλιστα στην περίπτωση αυτής της μεθοδολογίας τροποποίησης ανακυκλωμένων αδρανών, η θλιπτική αντοχή αυξάνει σε τέτοιο βαθμό που να είναι συγκρίσιμη με τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος αναφοράς (κεφάλαιο 4.2.7) ήτοι με την περίπτωση σκυροδέματος χωρίς τη χρήση ανακυκλωμένων αδρανών. Η ιπτάμενη τέφρα μπορεί δυνητικά να αξιοποιηθεί, παρά την μικρή αρνητική επίπτωση που έχει στην αντοχή του σκυροδέματος για οικονομικούς και περιβαλλοντικούς λόγους, σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία [222].



Κεφάλαιο 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

5.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Η παρούσα έρευνα πραγματεύεται τις δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης απόβλητων εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ) στη χώρα μας και συγκεκριμένα, διερευνά τη δυνατότητα χρήσης των αποβλήτων αυτών ως ανακυκλωμένα αδρανή για την παραγωγή σκυροδέματος. Στο πλαίσιο αυτής της διερεύνησης ακολουθήθηκε πειραματική διαδικασία, η οποία διακρίθηκε σε δύο φάσεις αλληλένδετες μεταξύ τους. Η πρώτη φάση περιελάμβανε τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των ανακυκλωμένων αδρανών για τον έλεγχο της καταλληλότητας χρήσης τους για την παραγωγή σκυροδέματος, ενώ η δεύτερη φάση επικεντρώθηκε στον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του παραγόμενου με αυτά σκυροδέματος.

Λόγω της μεγάλης ανομοιογένειας και της πληθώρας διαφορετικών υλικών τα οποία περιέχονται στα ΑΕΚΚ, τον έλεγχο των ιδιοτήτων των ανακυκλωμένων αδρανών προηγήθηκε ο προσδιορισμός του ποσοστού συμμετοχής του κάθε υλικού σε αυτά. Παρατηρήθηκε ότι αυξημένη ήταν η παρουσία του σκυροδέματος, ενδεικτική της συχνής χρήσης του κατασκευαστικού αυτού υλικού στη χώρα μας. Ακολουθούν τα αδρανή και σε μικρότερο ποσοστό η άσφαλτος, τα μάρμαρα, τα τούβλα και τα κεραμικά πλακίδια. Υπήρχαν επίσης κομμάτια μωσαϊκού, γυαλιού, ξύλων, κόντρα πλακέ και ελαφρόπετρας καθώς και μικρή παρουσία άλλων συστατικών όπως κομμάτια από καλώδια, μεταλλικά αντικείμενα (βίδες, καρφιά) και πλαστικό. Είναι προφανές ότι τα υλικά που συναντήθηκαν σε μεγαλύτερο ποσοστό είχαν μεγαλύτερη επιρροή στις ιδιότητες των ανακυκλωμένων αδρανών αλλά και του παραγόμενου από αυτά σκυροδέματος.

Τον προσδιορισμό του ποσοστού συμμετοχής του κάθε υλικού στο σύνολο των ανακυκλωμένων αδρανών, ακολούθησε ο έλεγχος των γεωμετρικών, φυσικών – μηχανικών και χημικών ιδιοτήτων τους. Η έρευνα επικεντρώθηκε στις ιδιότητες, οι οποίες επιδρούν στις ιδιότητες του παραγόμενου σκυροδέματος. Για τον προσδιορισμό χρησιμοποιήθηκαν ευρωπαϊκά ή αμερικανικά πρότυπα, ανάλογα με τη συνήθη πρακτική στα εργαστήρια ποιοτικού ελέγχου αδρανών, ενώ μετά την ολοκλήρωση των ελέγχων αυτών, τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με: τα αντίστοιχα αποτελέσματα θραυστών ασβεστολιθικών αδρανών, προερχόμενα από τοπικό λατομείο και τις απαιτήσεις των ισχυόντων κανονισμών για τα αδρανή σκυροδέματος.

Μια από τις πρώτες ιδιότητες που ελέγχθηκαν ήταν η κοκκομετρική διαβάθμιση λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων ανακυκλωμένων αδρανών. Παρατηρήθηκε ότι ενώ η κοκκομετρική καμπύλη των λεπτόκοκκων αδρανών είχε τα ίδια χαρακτηριστικά με την αντίστοιχη καμπύλη των θραυστών αδρανών, στα χονδρόκοκκα αδρανή, παρατηρήθηκε αυξημένο ποσοστό λεπτόκοκκων. Το υψηλό ποσοστό των λεπτόκοκκων οφείλεται στα ξένα υλικά (χώμα) τα οποία είναι προσκολλημένα στα ανακυκλωμένα αδρανή, ως αποτέλεσμα της αποθήκευσής τους σε σωρούς σε εξωτερικό χώρο στην εταιρεία διαχείρισής τους.

Τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής διαβάθμισης συγκρίθηκαν επιπλέον με τις απαιτήσεις του ΚΤΣ-97 και διαπιστώθηκε ότι κάποιοι από τους περιορισμούς σχετικά με το διερχόμενο ποσοστό συγκεκριμένων κόσκινων στα χονδρόκοκκα αδρανή (μεταξύ αυτών και η ποσότητα της παιπάλης) δεν ικανοποιούνται. Φυσικά οι περιορισμοί αυτοί αφορούν στην περίπτωση θραυστών ή φυσικών αδρανών και όχι ανακυκλωμένων, τα οποία χρήζουν ειδικής αντιμετώπισης.

Επειδή ο ΚΤΣ-97 και τα πρότυπα EN12620, EN480-1, δεν ορίζουν ανώτατα και κατώτατα επιτρεπόμενα όρια για την κοκκομετρική διαβάθμιση κλάσματος αδρανών, παρά μόνο για μείγμα αδρανών, προσδιορίστηκε ένα θεωρητικό μείγμα ανακυκλωμένων αδρανών, για την πραγματοποίηση του ελέγχου. Το θεωρητικό αυτό μείγμα συγκρίθηκε με τα όρια των προαναφερθέντων κανονισμών για την περίπτωση οπλισμένου σκυροδέματος και διαπιστώθηκε ότι πληρούσε τις απαιτήσεις των κανονισμών. Ως εκ τούτου, η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών από άποψη κοκκομετρικής διαβάθμισης δεν καθίσταται απαγορευτική.

Επόμενη ιδιότητα που προσδιορίστηκε ήταν το σχήμα των χονδρόκοκκων αδρανών, μέσω του δείκτη πλακοειδούς. Όλα τα κλάσματα παρουσίασαν σχετικά υψηλό δείκτη πλακοειδούς, με τον υψηλότερο να συναντάται στα σκύρα. Εντούτοις, δεν υπάρχει καθορισμένη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του δείκτη αυτού και ως εκ τούτου δεν απορρίφθηκε κάποιο κλάσμα.

Ακολούθησε έλεγχος της ποιότητας των λεπτόκοκκων αδρανών με τη χρήση δύο μεθόδων: της δοκιμής του ισοδύναμου άμμου και του μπλε του μεθυλενίου. Η τιμή ισοδύναμου άμμου των ανακυκλωμένων αδρανών προσδιορίστηκε μικρότερη του κατώτερου ορίου που ορίζει ο ΚΤΣ-97 και κατά συνέπεια τα λεπτόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή κρίθηκαν ακατάλληλα για παραγωγή σκυροδέματος, λόγω της υψηλής περιεκτικότητά τους σε παιπάλη. Κατά τον έλεγχο του μπλε του μεθυλενίου και αφού το πρότυπο EN 12620 δεν ορίζει ανώτερο αποδεκτό όριο, η σύγκριση του αποτελέσματος έγινε με τις επιτρεπτές τιμές που συνιστώνται από το προσχέδιο των Ελληνικών προδιαγραφών καθώς και άλλες διεθνείς προδιαγραφές. Με τον τρόπο αυτό οδηγηθήκαμε εν νέου στο συμπέρασμα ότι τα λεπτόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή δεν είναι κατάλληλα για παραγωγή σκυροδέματος, λόγω της χαμηλής τους ποιότητας.

Σημαντική ιδιότητα για τα αδρανή σκυροδέματος είναι η αντοχή σε θρυμματισμό των αδρανών, η οποία αφορά αποκλειστικά σε χονδρόκοκκα αδρανή. Η τιμή που προσδιορίστηκε ήταν μεγαλύτερη από την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή κατά ΚΤΣ-97, υποδεικνύοντας έτσι τη μειωμένη αντοχή των ανακυκλωμένων αδρανών. Εντούτοις, η τιμή αυτή δεν θεωρήθηκε απαγορευτική (τουλάχιστον σε πειραματικό στάδιο) γιατί αφενός η υπέρβαση του ορίου ήταν μικρή (3%) και αφετέρου γιατί τα όρια αυτά έχουν καθοριστεί για θραυστά ή/και φυσικά αδρανή, ενώ τα ανακυκλωμένα αδρανή χρήζουν διαφορετικής αντιμετώπισης.

Για τη χρήση των αδρανών στην παραγωγή σκυροδέματος σημαντικός είναι ο προσδιορισμός του ειδικού βάρους και της υδροαπορροφητικότητάς τους. Για το λόγο ότι δεν υπάρχουν ανώτερα ή κατώτερα επιτρεπόμενα καθορισμένα όρια για τις ιδιότητες αυτές (ΚΤΣ-97, EN 12620), πραγματοποιήθηκε σύγκριση των ιδιοτήτων των ανακυκλωμένων αδρανών με τις αντίστοιχες θραυστών αδρανών. Παρατηρήθηκε

αφενός ότι τα ανακυκλωμένα αδρανή όλων των κλασμάτων παρουσίαζαν μικρότερο ειδικό βάρος από τα θραυστά αδρανή και αφετέρου ότι η υδροαπορροφητικότητα των ανακυκλωμένων αδρανών ήταν υψηλότερη (έως και τετραπλάσια) από αυτή του αντίστοιχου κλάσματος θραυστών αδρανών.

Επόμενη ιδιότητα που προσδιορίστηκε ήταν η ανθεκτικότητα των ανακυκλωμένων αδρανών σε αποσάθρωση. Παρατηρήθηκε ότι τα λεπτόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή, σε αντίθεση με τα χονδρόκοκκα, δεν πληρούσαν τις απαιτούμενες προδιαγραφές κατά ΚΤΣ-97 και κρίθηκαν ακατάλληλα για χρήση ως αδρανή σκυροδέματος.

Στη συνέχεια, προσδιορίστηκαν οι χημικές ιδιότητες για όλα τα κλάσματα των ανακυκλωμένων αδρανών και ειδικότερα η περιεκτικότητα σε χλωριόντα, σε θειικά ιόντα και σε ανθρακικά άλατα, τα οποία συγκρίθηκαν με τις απαιτήσεις του προτύπου EN 12620. Διαπιστώθηκε ότι το ολικό θείο ήταν εντός ορίων για όλα τα κλάσματα ανακυκλωμένων αδρανών, ενώ το ποσοστό των χλωριόντων αρκετά μικρό ώστε να μην αναμένεται αρνητική επίδραση στις ιδιότητες του παραγόμενου σκυροδέματος. Αναφορικά με το περιεχόμενο σε ανθρακικά άλατα, το ποσοστό παρουσίας τους ήταν υψηλό, δικαιολογώντας την αυξημένη υδροαπορροφητικότητα και το χαμηλότερο ειδικό βάρος αυτών.

Ο έλεγχος των ιδιοτήτων των ανακυκλωμένων αδρανών ολοκληρώθηκε με τον προσδιορισμό της ποιοτικής και ποσοτικής στοιχειακής ανάλυσής τους με τη μέθοδο της φασματοσκοπίας ακτίνων φθορισμού X. Διαπιστώθηκε αυξημένη παρουσία του διοξειδίου του πυριτίου και του οξειδίου του ασβεστίου. Προβλήματα κατά την παραγωγή σκυροδέματος ήταν πιθανόν να δημιουργήσει το διοξείδιο του πυριτίου, το οποίο δεν είναι αδρανές στο περιβάλλον υψηλού pH του σκυροδέματος, αλλά αντιδρά με το υδροξείδιο του νατρίου και του καλίου που περιέχεται στην τσιμεντόπαστα. Αποτέλεσμα αυτής της αντίδρασης είναι η παραγωγή κολλοειδούς γέλης από πυριτικά αλκάλια γνωστής σαν αλκαλοπυριτικής γέλης, η οποία είναι δυνατόν λόγω διόγκωσης να οδηγήσει σε ρηγμάτωση των αδρανών και κατ' επέκταση του σκυροδέματος.

Η υψηλή περιεκτικότητα σε οξείδιο του ασβεστίου, πιθανόν να δημιουργήσει προβλήματα μόνο εάν είναι στη μορφή παιπάλης, διότι στην περίπτωση αυτή μειώνει το επίπεδο πρόσφυσης μεταξύ αδρανών και σκυροδέματος και δρα αρνητικά στην αντοχή του σκυροδέματος. Τέλος, αρνητική επιρροή ενδέχεται να έχει το υδροξείδιο του σιδήρου, το οποίο εντούτοις παρουσιάζεται σε μικρή συγκέντρωση στα ανακυκλωμένα αδρανή για το λόγο ότι οι ενώσεις του σιδήρου ευθύνονται για την πρόκληση διόγκωσης και κηλίδων στο σκυρόδεμα.

Με την ολοκλήρωση της πρώτης φάσης της πειραματικής διαδικασίας, η έρευνα στράφηκε προς τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του ανακυκλωμένου σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, η καταλληλότητα των ανακυκλωμένων αδρανών για χρήση ως αδρανή σκυροδέματος, προσδιορίστηκε μέσω της μερικής ή ολικής αντικατάσταση των θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή και του έλεγχος των ιδιοτήτων του νωπού ή/και του σκληρυμένου σκυροδέματος.

Για τη σύνθεση του ανακυκλωμένου σκυροδέματος δεν χρησιμοποιήθηκαν τα λεπτόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή, διότι όπως προέκυψε από τον έλεγχο των

ιδιοτήτων αυτών, είναι χαμηλής ποιότητας και κατά συνέπεια ακατάλληλα για χρήση στο σκυρόδεμα. Ως εκ τούτου, στις συνθέσεις σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά τα χονδρόκοκκα αδρανή.

Τα ανακυκλωμένα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα, προέρχονται από ΑΕΚΚ και η εταιρεία διαχείρισής τους, προ της διάθεσής τους στους τελικούς καταναλωτές, τα αποθηκεύει σε εξωτερικό, μη στεγασμένο χώρο. Ως αποτέλεσμα, στην εξωτερική επιφάνεια των ανακυκλωμένων αδρανών βρίσκονται προσκολλημένες ξένες ύλες - ακαθαρσίες (κυρίως χώμα), προερχόμενες από το χώρο των εγκαταστάσεων.

Για το λόγο αυτό αρχικά διερευνήθηκε εάν απαιτείται, προ της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών, επεξεργασία τους για την απομάκρυνση αυτών των ακαθαρσιών. Λόγω της φύσης του προσκολλημένου υλικού και για το λόγο ότι βρισκόταν προσκολλημένο στην εξωτερική επιφάνεια των ανακυκλωμένων αδρανών, για την απομάκρυνσή του αρκούσε η χειρωνακτική πλύση των ανακυκλωμένων αδρανών με τη χρήση νερού υπό πίεση. Διαπιστώθηκε ότι για τη χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών στο σκυρόδεμα πρέπει να προηγηθεί η απομάκρυνση των ακαθαρσιών αυτών. Το αποτέλεσμα στηρίχτηκε στην σημαντική απομείωση της αντοχής του παραγόμενου σκυροδέματος με τη χρήση μη επεξεργασμένων ανακυκλωμένων αδρανών, συγκριτικά με τη χρήση επεξεργασμένων ανακυκλωμένων αδρανών.

Σε επόμενο στάδιο, διερευνήθηκε η επίδραση της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών στη διατήρηση της εργασιμότητας του σκυροδέματος, μέσω του προσδιορισμού αυτής σε δύο χρονικές στιγμές μετά την ανάμιξη. Διαπιστώθηκε ότι η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών οδηγεί σε σημαντική μείωση της εργασιμότητας, η οποία μείωση είναι ανάλογη της αύξησης του ποσοστού αντικατάστασης των θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή. Ως εκ τούτου, στην περίπτωση που τα ανακυκλωμένα αδρανή χρησιμοποιηθούν για την εργοταξιακή παραγωγή σκυροδέματος, πρέπει να ληφθεί ιδιαίτερη μέριμνα ούτως ώστε να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα.

Ως μέρος των προκαταρκτικών δοκιμών σύνθεσης σκυροδέματος, προσδιορίστηκε η επίδραση της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών στην διαπερατότητα των χλωριόντων στο σκληρυμένο σκυρόδεμα, λόγω της μεγάλης σημασίας της για την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια από αποκλειστικά θραυστά και αποκλειστικά ανακυκλωμένα αδρανή και παρατηρήθηκε αυξημένη διαπερατότητα για την περίπτωση του ανακυκλωμένου σκυροδέματος. Εντούτοις, παρά τη διαφορά αυτή, οι δύο τύποι σκυροδέματος κατατάσσονται στην ίδια κατηγορία ήτοι της μέτριας διαπερατότητας σε χλωριόντα, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η χρήση ανακυκλωμένων αδρανών για την παραγωγή σκυροδέματος δεν είναι απαγορευτική.

Μετά την ολοκλήρωση των ανωτέρω προκαταρκτικών δοκιμών, επιδιώχθηκε ο προσδιορισμός της επίδρασης της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών στις ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος. Οι ιδιότητες του σκυροδέματος που ελέγχθηκαν ήταν διευρυμένες σε σχέση με εκείνες που πραγματοποιήθηκαν στις προκαταρκτικές δοκιμές και για τον προσδιορισμό τους αξιοποιήθηκαν καταστροφικές

και μη καταστροφικές δοκιμές, ενώ χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια από συνθέσεις με διαφορετικό ποσοστό αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή η κάθε μία.

Κατά τις δοκιμές αυτές, διαπιστώθηκε ότι η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών επιδρά μειωτικά στην εργασιμότητα του παραγόμενου σκυροδέματος (ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών), η οποία επίδραση με τη σειρά της επηρεάζει την αντοχή του σκυροδέματος, αποδίδοντας ανορθόδοξα αποτελέσματα, τα οποία δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή ασφαλών αποτελεσμάτων σχετικά με την επιρροή των ανακυκλωμένων αδρανών.

Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε για να μπορούν τα αποτελέσματα να είναι ανεξάρτητα της εργασιμότητας του παραγόμενου αναμίγματος, να τροποποιηθεί η εκάστοτε μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος και να ακολουθηθεί μεθοδολογία η οποία να διατηρεί σταθερή την εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος για όλα τα ποσοστά αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν δύο διαφορετικές μεθοδολογίες: η πρώτη μεθοδολογία αφορούσε στην τροποποίηση της ποσότητας του υπερρευστοποιητή που χρησιμοποιείται και η δεύτερη μεθοδολογία αφορούσε στην τροποποίηση του ενεργού λόγου νερού προς τσιμέντο.

Διαπιστώθηκε ότι η μεθοδολογία που διατηρεί σταθερή την εργασιμότητα μέσω της τροποποίησης του ενεργού λόγου νερού προς τσιμέντο, εκμηδενίζει την επίδραση της εργασιμότητας στην αντοχή του σκυροδέματος και κατ' επέκταση και στις λοιπές ιδιότητες αυτού. Για το λόγο αυτό θεωρήθηκε κατάλληλη για να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια της παρούσας έρευνας, για την περαιτέρω διερεύνηση των ιδιοτήτων του ανακυκλωμένου σκυροδέματος.

Την επιλογή της κατάλληλης μεθοδολογίας για την εξάλειψη της σχέσης μεταξύ εργασιμότητας και ιδιοτήτων του ανακυκλωμένου σκυροδέματος, ακολούθησε η διερεύνηση της επίδρασης των ανακυκλωμένων αδρανών στην θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Διαπιστώθηκε η αρνητική επίδραση που έχει η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών στην αντοχή του σκυροδέματος, για δοκίμια διαφόρων ηλικιών. Συγκεκριμένα, το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα παρουσίασε απομειωμένη αντοχή ανάλογη του ποσοστού συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών στο μείγμα. Παράλληλα, δεν παρατηρήθηκε αυξημένη θλιπτική αντοχή σε δοκίμια μικρής ηλικίας (συγκριτικά με την αναμενόμενη τιμή), η οποία να καθιστούσε πιθανή την ύπαρξη αυξημένων πρώιμων αντοχών στο ανακυκλωμένο σκυρόδεμα και να δικαιολογούσε την έρευνα προς την κατεύθυνση αυτή.

Φυσικά, για το λόγο ότι τα ανακυκλωμένα αδρανή παρουσιάζουν μειονεκτήματα σε σχέση με τα συνήθως χρησιμοποιούμενα θραυστά και φυσικά αδρανή, δεν αποτελεί έκπληξη η δυσμενής τους επίδραση στην αντοχή του παραγόμενου σκυροδέματος. Ωστόσο, για το λόγο ότι η αξιοποίησή τους θα ήταν ιδιαίτερος χρήσιμη για οικονομικούς και περιβαλλοντικούς λόγους, αποφασίστηκε να ερευνηθεί εάν η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών σε κάποιο ποσοστό αντικατάστασης θα ήταν ανεκτή, με άλλα λόγια εάν υπάρχει βέλτιστο ποσοστό αντικατάστασης των θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή.

Για την επίτευξη του σκοπού αυτού εξετάστηκε η επίδραση της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών σε ιδιότητες του νωπού και του σκληρυμένου σκυροδέματος για διαφορετικά ποσοστά αντικατάστασης των θραυστών χονδρόκοκκων αδρανών από ανακυκλωμένα. Ακολουθήθηκε η επιλεγθείσα μεθοδολογία για τη διατήρηση σταθερής της εργασιμότητας του παραγόμενου σκυροδέματος για τις συνθέσεις.

Κατά την πειραματική διαδικασία επιβεβαιώθηκε η σταθερή τιμή της εργασιμότητας για όλα τα αναμίγματα μέσω των δοκιμών της κάθισης και της εξάπλωσης. Το περιεχόμενο αέρα του νωπού σκυροδέματος παρουσίασε μία μικρή διακύμανση τιμών με τις υψηλότερες τιμές να αντιστοιχούν στις συνθέσεις με τα μεγαλύτερα ποσοστά συμμετοχής ανακυκλωμένων αδρανών, απόρροια του αυξημένου πορώδους αυτών.

Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών οδηγεί σε μείωση της πυκνότητας τόσο του νωπού όσο και του σκληρυμένου σκυροδέματος (για δοκίμια διαφόρων ηλικιών). Η αύξηση αυτή οφείλεται στο μικρότερο ειδικό βάρος των ανακυκλωμένων αδρανών, ωστόσο η μείωση αυτή είναι μικρή, με αποτέλεσμα το παραγόμενο ανακυκλωμένο σκυροδέμα να αποτελεί σκυροδέμα συνήθους φαινόμενου βάρους ομοίως με το σκυροδέμα αναφοράς.

Παράλληλα, επιβεβαιώθηκε η άμεση σχέση που υπάρχει μεταξύ του ποσοστού αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή με τη μείωση της αντοχής του παραγόμενου σκυροδέματος, τόσο για την θλιπτική όσο και την καμπτική αντοχή. Συγκεκριμένα, η μείωση της αντοχής για την περίπτωση χρήσης αποκλειστικά ανακυκλωμένων χονδρόκοκκων αδρανών είναι ιδιαίτερος υψηλή (40% και 32%, για τη θλιπτική και την καμπτική αντοχή αντίστοιχα), ωστόσο παρατηρείται ότι για μικρότερα ποσοστά αντικατάστασης η μείωση της αντοχής είναι μικρότερη. Ειδικότερα, για ποσοστό αντικατάστασης ίσο με 25%, η μείωση της αντοχής είναι τέτοια (ποσοστό 17% και 14% για θλιπτική και καμπτική αντοχή αντίστοιχα), που παρά την απομείωση της αντοχής του παραγόμενου προϊόντος αυτό εξακολουθεί να διατηρεί μία σχετικά υψηλή αντοχή, η οποία επιτρέπει την τυχούσα χρήση του σε κατασκευές. Για το λόγο, ως βέλτιστο ποσοστό αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή επιλέχθηκε το ποσοστό της 25% αντικατάστασης.

Κατόπιν του προσδιορισμού του βέλτιστου ποσοστού αντικατάστασης, ο οποίος έγινε παράλληλα με τον προσδιορισμό της επίδρασης της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών στις ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος, επιδιώχθηκε η επέκταση της παρούσας έρευνας σε επιπλέον ιδιότητες του παραγόμενου σκυροδέματος. Ειδικότερα, επιδιώχθηκε ο προσδιορισμός της επίδρασης των ανακυκλωμένων αδρανών στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος έναντι χλωριόντων και θεικών ιόντων, στην δομή του σκυροδέματος, καθώς και στην ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα. Για το σκοπό αυτό μελετήθηκαν δοκίμια με αποκλειστικά θραυστά αδρανή, με το βέλτιστο ποσοστό αντικατάστασης και με αποκλειστικά ανακυκλωμένα αδρανή.

Αναφορικά με την διαπερατότητα σε χλωριόντα, παρατηρήθηκε αύξηση αυτής με την αύξηση της συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών στο μείγμα των

αδρανών, με παράλληλη αύξηση του συντελεστή διάχυσης των χλωριόντων διαμέσου του σκυροδέματος. Σε όλες τις περιπτώσεις το παραγόμενο σκυρόδεμα κατατάσσεται στην κατηγορία σκυροδέματος μέτριας διαπερατότητας σε χλωριόντα, εντούτοις το σκυρόδεμα με αποκλειστικά ανακυκλωμένα αδρανή παρουσιάζει τιμή η οποία οριακά δεν το κατατάσσει σε σκυρόδεμα υψηλής διαπερατότητας και για το λόγο αυτό παρά το χαρακτηρισμό του ως μέτριας διαπερατότητας η χρήση του πρέπει να γίνεται με προσοχή.

Για τον προσδιορισμό της επίδρασης των ανακυκλωμένων αδρανών στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος έναντι θεικών ιόντων, δοκίμια εμβαπτίστηκαν σε διάλυμα θεικού νατρίου και διάλυμα θεικού νατρίου - χλωριούχου νατρίου. Η επίδραση των θεικών ιόντων προσδιορίστηκε βάσει των μεταβολών στη μάζα των δοκιμίων. Για όλες τις συνθέσεις, η εμβάπτιση των δοκιμίων στα διαλύματα θεικών είχε ως αποτέλεσμα την απώλεια μάζας τους, η οποία είναι ενδεικτική της φθοράς η οποία προκαλείται από τα θεικά ιόντα στο σκληρυμένο σκυρόδεμα. Επιπλέον, σε όλα η απώλεια μάζας των δοκιμίων είναι αυξημένη για το διάλυμα θεικού νατρίου - χλωριούχου νατρίου, λόγω της συνδυαστικής δράσης των θεικών ιόντων με τα χλωριόντα.

Παρατηρήθηκε επιπλέον, ότι η απώλεια μάζας αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης ενώ για τα δύο διαλύματα το δοκίμιο με αποκλειστικά ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή παρουσίασε τη μεγαλύτερη απώλεια μάζας. Η παρατήρηση αυτή είναι σε αντιστοιχία με τις απομειωμένες ιδιότητες του ανακυκλωμένου σκυροδέματος και της αυξημένης διαπερατότητα σε χλωριόντα, η οποία προδικάζει την αυξημένη διαπερατότητα και σε λοιπά ιόντα.

Με την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος (ενανθράκωση, διαπερατότητα σε χλωριόντα και λοιπά ιόντα, πιθανότητα διάβρωσης του οπλισμού) έχει συσχετιστεί η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε ο προσδιορισμός της επίδρασης της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών στην ηλεκτρική αντίσταση του παραγόμενου σκυροδέματος. Μελετήθηκαν δοκίμια τα οποία εκτός από διαφορετικά ποσοστά αντικατάστασης, είχε χρησιμοποιηθεί για αυτά διαφορετική μεθοδολογία ξήρανσης: στον αέρα ή σε φούρνο.

Παρατηρήθηκε καταρχήν ότι σε όλες τις συνθέσεις, η επιφανειακή αντίσταση είναι αυξημένη για τα δοκίμια που έχουν ξηρανθεί με τη χρήση φούρνου, κατά συνέπεια ο χρόνος ξήρανσής τους πιθανόν να μην ήταν επαρκής. Ωστόσο, στις δύο περιπτώσεις η επιφανειακή ηλεκτρική αντίσταση μειώνονταν με την αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης των ανακυκλωμένων αδρανών, σε αντιστοιχία με την μειωμένη ανθεκτικότητα του σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή.

Κατόπιν, προσδιορίστηκαν οι θερμικές ιδιότητες του ανακυκλωμένου σκυροδέματος με την αξιοποίηση της μεθόδου της υπέρυθρης θερμογραφίας. Παρατηρήθηκε ότι ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας, κατά την αποθέρμανση των δοκιμίων, παρά τις διακυμάνσεις που παρουσιάζονται ανά δοκίμιο, είναι σχεδόν ίδιος για όλα τα ποσοστά συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών. Αντίστοιχα, όμοια μορφή για όλα τα δοκίμια παρουσίασαν οι καμπύλες αποθέρμανσης. Για το λόγο αυτό, οδηγηθήκαμε στο συμπέρασμα ότι η αντικατάσταση θραυστών από

ανακυκλωμένα αδρανή, δεν επηρεάζει τις θερμικές ιδιότητες του παραγόμενου σκυροδέματος.

Ακολούθησε πετρογραφική ανάλυση δοκιμίων σκυροδέματος, η οποία επικεντρώθηκε στον προσδιορισμό διαφορών στην δομή του σκυροδέματος, οι οποίες να προέρχονταν από τη χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη συνάφεια των ανακυκλωμένων αδρανών και της τσιμεντόπαστας. Ωστόσο, κατά τον έλεγχο των δοκιμίων με τη χρήση του οπτικού μικροσκοπίου δεν παρατηρήθηκαν διαφορές στην δομή, οι οποίες να πηγάζουν από την χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών. Αντίθετα, τα αδρανή, η τσιμεντόπαστα και το σκυροδέμα ως σύνολο παρουσίαζαν τα ίδια χαρακτηριστικά.

Εντούτοις, λόγω της μορφής των δοκιμίων ήταν εμφανής για την περίπτωση των ανακυκλωμένων αδρανών η παρουσία αδρανών τα οποία έχουν επίμηκες σχήμα. Παράλληλα, στις περιπτώσεις όπου τμήθηκαν αδρανή από κομμάτια παλιού σκυροδέματος ήταν εμφανής η ύπαρξη της διεπιφάνειας μεταξύ της παλιάς τσιμεντόπαστας και των παλιών αδρανών.

Στο τελευταίο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας και για το λόγο ότι οι ιδιότητες των ανακυκλωμένων αδρανών επιδρούν δυσμενώς στις ιδιότητες του παραγόμενου σκυροδέματος, ήταν επιθυμητή η εύρεση μεθοδολογίας τροποποίησης των ανακυκλωμένων αδρανών ούτως ώστε να βελτιωθούν οι ιδιότητες αυτών και κατ' επέκταση του ανακυκλωμένου σκυροδέματος.

Τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα των ανακυκλωμένων αδρανών αποτελούν η υπάρχουσα διεπιφάνεια μεταξύ των αδρανών και της τσιμεντόπαστας του αρχικού σκυροδέματος (για τα θραύσματα παλαιού σκυροδέματος) και η υψηλή υδροαπορροφητικότητά τους. Ως εκ τούτου οι μεθοδολογίες τροποποίησης των ανακυκλωμένων αδρανών επικεντρώθηκαν στην αντιστάθμιση αυτών των μειονεκτημάτων.

Ως αποτέλεσμα, επιλέχθηκε η τροποποίηση της εξωτερικής επιφάνειας των χονδρόκοκκων ανακυκλωμένων αδρανών, με την επικάλυψή της είτε με κάποιο υδρόφοβο διάλυμα είτε με τη χρήση τσιμεντόπαστας. Για την επιλογή του υδρόφοβου διαλύματος επιδιώχθηκε αφενός να είναι ένα προϊόν διαθέσιμο στην τοπική αγορά και αφετέρου να μην αντιδρά με τα συστατικά των ανακυκλωμένων αδρανών. Αντίστοιχα, αναφορικά με τη χρήση τσιμεντόπαστας επιλέχθηκαν συνθέσεις με διαφορετικό λόγο νερού προς τσιμέντο και με μερική αντικατάσταση του τσιμέντου από ιπτάμενη τέφρα. Στις δύο περιπτώσεις η επικάλυψη των ανακυκλωμένων αδρανών επιτυγχάνθηκε μέσω της εμβάπτισής των αδρανών στο αντίστοιχο υλικό για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Κατόπιν της τροποποίησης των ανακυκλωμένων αδρανών, προσδιορίστηκε η επίδραση αυτής στην κοκκομετρική διαβάθμιση, το ειδικό βάρος και την υδροαπορροφητικότητα των ανακυκλωμένων αδρανών. Αναφορικά με την κοκκομετρική διαβάθμιση παρατηρήθηκε καταρχήν, ότι όσον αφορά στα αδρανή που επικαλύφθηκαν με το υδρόφοβο διάλυμα η κοκκομετρική τους διαβάθμιση ήταν όμοια με αυτή του αντίστοιχου κλάσματος προ της τροποποίησης. Αυτό ήταν αναμενόμενο για το λόγο ότι το υδρόφοβο διάλυμα δεν άφηνε εμφανή υπολείμματα στην εξωτερική επιφάνεια των ανακυκλωμένων αδρανών.

Απεναντίας τα τροποποιημένα με τη χρήση τσιμεντόπαστας ανακυκλωμένα αδρανή παρουσίαζαν διαφοροποίηση της κοκκομετρικής τους διαβάθμισης. Συγκεκριμένα, η επικάλυψη με τσιμεντόπαστα αύξανε το μέγεθος των κόκκων των αδρανών και ως εκ τούτου το διερχόμενο ποσοστό από συγκεκριμένα κόσκινα μειωνόταν. Επιπλέον, η μείωση αυτή ήταν αυξημένη για την περίπτωση της χρήσης τσιμεντόπαστας με μικρότερο λόγο νερού προς τσιμέντο διότι είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία πιο παχύρευστου υλικού και αντίστοιχα μεγαλύτερο πάχος επικάλυψης στα αδρανή. Ωστόσο, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής διαβάθμισης με τις απαιτήσεις του ΚΤΣ-97 παρατηρήθηκε ότι οι περιορισμοί αυτού ικανοποιούνται για όλες τις περιπτώσεις τροποποίησης.

Αναφορικά με την υδροαπορροφητικότητα και το ειδικό βάρος των ανακυκλωμένων αδρανών, παρατηρήθηκε ότι ως αποτέλεσμα όλων των μεθόδων τροποποίησης, υπήρξε μείωση της υδροαπορροφητικότητάς καθώς του ειδικού βάρους των ανακυκλωμένων αδρανών. Η μεγαλύτερη μείωση της υδροαπορροφητικότητας παρατηρήθηκε για την περίπτωση της χρήσης τσιμεντόπαστας με το μικρότερο λόγο νερού προς τσιμέντο, ενδεχομένως λόγω του μεγάλου πάχους επικάλυψης των ανακυκλωμένων αδρανών. Ενώ, η μεγαλύτερη μείωση του ειδικού βάρους παρατηρήθηκε για την περίπτωση της εμφάνισης των αδρανών στο υδρόφοβο διάλυμα.

Τον έλεγχο των ιδιοτήτων των τροποποιημένων ανακυκλωμένων αδρανών, ακολούθησε η παρασκευή δοκιμών σκυροδέματος με μερική αντικατάσταση των θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή, σε ποσοστό ίσο με το βέλτιστο ποσοστό και ο έλεγχος των ιδιοτήτων του παραγόμενου νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος. Στόχος ήταν να προσδιοριστεί τυχούσα βελτίωση των ιδιοτήτων του παραγόμενου σκυροδέματος ως αποτέλεσμα της τροποποίησης των ανακυκλωμένων αδρανών.

Σε όλες τα περιπτώσεις τα αποτελέσματα των δοκιμών της εργασιμότητας συμβάδιζαν με τις απαιτήσεις του σχεδιασμού των συνθέσεων και συγκεκριμένα, η εργασιμότητα μετρούμενη μέσω της κάθισης έλαβε την ίδια τιμή για όλες συνθέσεις. Το ποσοστό του περιεχόμενου αέρα στο νωπό σκυροδέμα παρουσίασε μία διακύμανση στην τιμή του, με το υψηλότερο ποσοστό περιεχόμενου αέρα να αντιστοιχεί στη σύνθεση με τα αδρανή που ήταν εμφάνισης σε υδρόφοβο διάλυμα. Εντούτοις η διαφορά ήταν μικρή και δεν οδήγησε σε κάποιο σχετικό συμπέρασμα. Η πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος παρουσίασε μικρή διακύμανση των τιμών της συναρτήσει της διακύμανσης που παρουσίαζαν τα ειδικά βάρη των τροποποιημένων ανακυκλωμένων αδρανών.

Τέλος, αναφορικά με τα αποτελέσματα της θλιπτικής και καμπτικής αντοχής του παραγόμενου σκυροδέματος, παρατηρήθηκε ότι με εξαίρεση την περίπτωση της χρήσης του υδρόφοβου διαλύματος, σε όλες τις λοιπές περιπτώσεις η τροποποίηση των ανακυκλωμένων αδρανών οδήγησε σε αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος. Ωστόσο, η μεγαλύτερη αύξηση της αντοχής παρατηρήθηκε για την περίπτωση της τσιμεντόπαστας με λόγο νερού προς τσιμέντο ίσο με τη μονάδα που ως εκ τούτου αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή για την τροποποίηση των ανακυκλωμένων αδρανών. Μάλιστα στην περίπτωση αυτής της μεθοδολογίας τροποποίησης, η θλιπτική αντοχή αυξήθηκε σε τέτοιο βαθμό που να είναι συγκρίσιμη με τη θλιπτική αντοχή του

σκυροδέματος αναφοράς ήτοι με την περίπτωση σκυροδέματος χωρίς τη χρήση ανακυκλωμένων αδρανών.

Ανακεφαλαιώνοντας, αναφορικά με τη χρήση ΑΕΚΚ ως ανακυκλωμένων αδρανών για την παρασκευή σκυροδέματος, πρέπει να τονιστεί ότι παρά τις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν οι ιδιότητές τους, δεν καθιστούν απαγορευτική τη χρήση των χονδρόκοκκων ανακυκλωμένων αδρανών. Η χρήση τους παρουσιάζει αρνητική επίπτωση στις ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος, ιδίως όσον αφορά στην αντοχή και την ανθεκτικότητά του. Εντούτοις, προσδιορίστηκε ένα βέλτιστο ποσοστό αντικατάστασης των θραυστών αδρανών από ανακυκλωμένα για το οποίο η απομείωση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος αντισταθμίζεται από τα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη της χρήσης τους. Τέλος, κατάλληλη τροποποίηση των ανακυκλωμένων αδρανών οδηγεί σε σημαντική βελτίωση τόσο των ιδιοτήτων αυτών όσο και του παραγόμενου από αυτά σκυροδέματος σε βαθμό που η αντοχή του να είναι συγκρίσιμη με αυτή του συμβατικού σκυροδέματος.

5.2 Συμπεράσματα

Βάσει της ανάλυσης των αποτελεσμάτων, τα σημαντικότερα συμπεράσματα της παρούσας έρευνας συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Τα λεπτόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή, που προέρχονται από απόβλητα εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων, είναι ακατάλληλα για χρήση ως αδρανή σκυροδέματος λόγω της χαμηλής ποιότητάς τους.
- Τα χονδρόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή, που προέρχονται από απόβλητα εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων, δύνανται να χρησιμοποιηθούν ως αδρανή σκυροδέματος, παρά τις δυσμενέστερες ιδιότητές τους.
- Τη χρήση των χονδρόκοκκων ανακυκλωμένων αδρανών για την παραγωγή σκυροδέματος, πρέπει να προηγηθεί επεξεργασία τους για την απομάκρυνση των ξένων υλικών/ακαθαρσιών, που βρίσκονται προσκολλημένες στην επιφάνειά τους.
- Το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα παρουσιάζει σημαντική απώλεια εργασιμότητας, γεγονός που πρέπει να ληφθεί υπόψη σε πιθανή εργοταξιακή χρήση του.
- Η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών οδηγεί σε μείωση της εργασιμότητας του παραγόμενου σκυροδέματος, ανάλογη με το ποσοστό συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών στο μείγμα.
- Για τον προσδιορισμό της επίδρασης της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών στις ιδιότητες του σκυροδέματος, πρέπει να ακολουθηθεί κατάλληλη μεθοδολογία για τη διατήρηση σταθερής της εργασιμότητας, ανεξάρτητα από το ποσοστό συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών στο μείγμα. Καταλληλότερη μεθοδολογία αποτελεί η μεταβολή του ενεργού λόγου νερού προς τσιμέντο στην εκάστοτε μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος.
- Η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών επιδρά δυσμενώς στην αντοχή και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Η επίδραση αυτή είναι ανάλογη

με το ποσοστό συμμετοχής των ανακυκλωμένων αδρανών στο μείγμα των αδρανών.

- Το βέλτιστο ποσοστό αντικατάστασης θραυστών από ανακυκλωμένα αδρανή, ήτοι το ποσοστό εκείνο για το οποίο η επίδραση στις ιδιότητες του παραγόμενου σκυροδέματος είναι ανεκτή, είναι το ποσοστό 25% επί του συνόλου των χονδρόκοκκων αδρανών.
- Τροποποίηση των ανακυκλωμένων αδρανών με εμβάπτισή τους σε τσιμεντόπαστα οδηγεί σε σημαντική βελτίωση των ιδιοτήτων των ανακυκλωμένων αδρανών και της αντοχής του ανακυκλωμένου σκυροδέματος.

5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

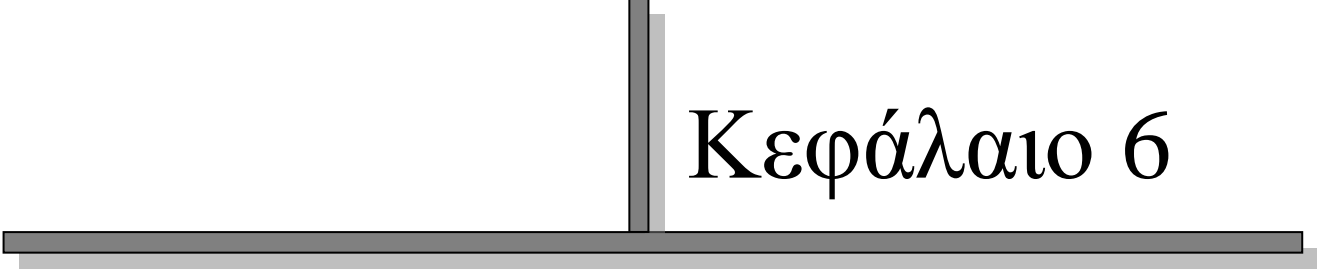
Η παρούσα έρευνα επικεντρώθηκε στην αξιοποίηση των αποβλήτων εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων με τη χρήση τους ως ανακυκλωμένα αδρανή και αποδείχτηκε η δυνατότητα χρήσης αυτών για την παραγωγή σκυροδέματος. Δεδομένου ότι στο μέλλον ενδέχεται να αντιμετωπιστούν προβλήματα αναφορικά με την εξεύρεση πρώτων υλών και την εξοικονόμηση ενέργειας, τα υλικά αυτά θα μπορούσαν να αποτελέσουν μία πιθανή λύση στο πρόβλημα.

Συγκεκριμένοι τομείς που θα μπορούσαν να εξεταστούν μελλοντικά, ως συνέχεια και με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας διατριβής παρουσιάζονται ακολούθως:

- Η θεσμοθέτηση κατάλληλων προδιαγραφών μπορεί να βοηθήσει στην διεύρυνση της εφαρμογής των ανακυκλωμένων αδρανών ως αδρανή σκυροδέματος και την αποδοχή τους από το ευρύτερο κατασκευαστικό κοινό.
- Ιδιαίτερος χρήσιμος θα ήταν ο επανέλεγχος των ιδιοτήτων του ανακυκλωμένου σκυροδέματος με βάση τα οριζόμενα στον νέο Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος (2016), ο οποίος εκδόθηκε μετά το τέλος της διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας και είναι σε ισχύ από 02.04.2017.
- Διερεύνηση της επίδρασης των ανακυκλωμένων αδρανών σε λοιπές ιδιότητες αναφορικά με την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος (όπως η ενανθράκωση αυτού) και την συνάφεια ανακυκλωμένου σκυροδέματος – χαλύβδινου οπλισμού.
- Προσδιορισμός εναλλακτικών μεθόδων τροποποίησης των ανακυκλωμένων αδρανών, που να μην αφορούν στην τροποποίηση της εξωτερικής επιφάνειας αυτών.
- Ανάλυση κύκλου ζωής των ανακυκλωμένων αδρανών για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών οφελών και της οικονομικής αποδοτικότητας της χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών.

Ολοκληρώνοντας, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η καταλληλότητα των ανακυκλωμένων αδρανών ως πρώτων υλών στην παραγωγή σκυροδέματος δεν θα πρέπει να αντιμετωπιστεί μόνο από τεχνολογικής απόψεως. Ζητήματα όπως η

συνεχής διαθεσιμότητα των υλικών αυτών, είναι εξίσου σημαντικά για μία ολοκληρωμένη εικόνα του θέματος. Φυσικά, η αξιοποίηση των οικοδομικών απορριμμάτων παρουσιάζεται σήμερα ιδιαίτερα ελκυστική λόγω των περιβαλλοντικών οφελών που προκύπτουν από την χρήση τους και τη σύσταση οργανωμένων συστημάτων εναλλακτικής διαχείρισης αυτών, με αποτέλεσμα να διαφαίνεται μία τάση δυναμικής διεξόδου των προϊόντων ανακύκλωσης στις υφιστάμενες αγορές αδρανών υλικών.



Κεφάλαιο 6

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Παπαδόπουλος, Π. (2009). Αειφορία στην κατασκευή και σκυρόδεμα. 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23/10/2009, Πάφος, Κύπρος.
2. Δημούδη, Α. (2006). Οικολογικά δομικά υλικά. Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Περιβαλλοντικού και Ανθρωπογνωστικού Σχεδιασμού. Ξάνθη.
3. Κανιτάκη Ε. (2009). Οι κατασκευές από σκυρόδεμα είναι και αειφόρες και πράσινες. 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23/10/2009, Πάφος, Κύπρος.
4. Σάββα Α.Ε. (2010). Σκυροδέματα με ανακυκλωμένα αδρανή: Επίδραση της ομοιογένειας του σκυροδέματος προέλευσης. Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, τεύχος 2.
5. Οικονόμου Ν., Τσώχος Γ. (2003). Ανακυκλωμένο σκυρόδεμα. Συνέδριο σκυροδέματος (14ο: Κως) / ΤΕΕ-ΕΤ Σκυροδέματος, ΕΤΕΚ τ. Γ'.
6. <http://www.interbeton.gr/default.asp?pageid=38&langid=1> Ανακτήθηκε στις 15/1/2016.
7. Μπίσκα Α.Γ., Οικονόμου Ν. (2006). Ανάπτυξη πρότυπου λογισμικού συστήματος περιβαλλοντικής διαχείρισης στον τομέα παραγωγής ετοιμού σκυροδέματος. 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, 25-27/10/2006.
8. http://www.dash.com.gr/prasinospiti/oikologika_domika_ylika.html Ανακτήθηκε στις 18/1/2016.
9. Γεωργιάδης Γ. (2011). Ετήσια στατιστικά στοιχεία μεταλλείων – λατομείων. Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, Γενική Γραμματεία Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, Γενική Διεύθυνση Φυσικού Πλούτου, Διεύθυνση Πολιτικής Ορυκτών Πρώτων υλών, Αθήνα.
10. http://www.oryktosploutos.net/2010/04/blog-post_04.html#.ViO1rk3otfx Ανακτήθηκε στις 18/1/2016.
11. Αγγελόπουλος Γ. (2010). Αξιολόγηση αδρανών υλικών. Συμβολή στη διαχείριση λατομικών περιοχών Ελληνικού χώρου. Παρουσίαση στην Ημερίδα: «Βιώσιμη Διαχείριση και Βέλτιστες Πρακτικές Εκμετάλλευσης Αδρανών Υλικών», 18/5/2010, ΙΓΜΕ, Αθήνα.
12. <http://www.concreteconstruction.net/aggregates/global-demand-for-construction-aggregates-to-exceed-48-billion-metric-tons-in-2015.aspx> Ανακτήθηκε στις 25/1/2016.
13. Δίγκα Α. (2012). Αξιολόγηση της Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων για την κατασκευή του φράγματος των ποταμών Πείρου-Παραπείρου στο Νομό Αχαΐας και εκτίμηση της εφαρμογής των περιβαλλοντικών όρων από τη μελέτη των επιπτώσεων του έργου στο περιβάλλον. Πανεπιστήμιο Πατρών, τμήμα Βιολογίας, Τομέας Βιολογίας Φυτών, Μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών Οικολογία-διαχείριση και προστασία φυσικού περιβάλλοντος, Πάτρα.
14. Αναστασοπούλου Μ., Βασιλείου Β., Καράλης Κ. (2012). Ανακύκλωση οικοδομικών απορριμμάτων. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος. Πάτρα.
15. Γιαννακοπούλου Τ. (2007). Εισαγωγή στις βιώσιμες κατασκευές. Ανακτήθηκε στις 4/3/2016 από:

- https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwi--sP156fLahWICBoKHQIHAY4QFggbMAA&url=https%3A%2F%2Fsamos.files.wordpress.com%2F2007%2F10%2Fbiosimes_kataskeyes.doc&usq=AFQjCNE6iUEADnYALNZy-UQCuUGaCe9dJw
16. Edge Environment Pty Ltd (2012). Construction and demolition waste guide – Recycling and re-use across the supply chain. Australian Government. Australia.
 17. Γαρδέλης Γ. (2011). Διαχείριση Οικοδομικών Αποβλήτων. Περίπτωση Ν. Αττικής. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Σχολή Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πειραιώς, Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας. Αθήνα.
 18. <http://www.eedsa.gr/Contents.aspx?catid=51&lang=gr> Ανακτήθηκε στις 25/1/2016.
 19. Watkins E., Hogg D., Mitsios A., Shailendra M., Neubauer A., Reisinger H., Troeltzsch J., Van Acoleyen M. (2012) Use of economic instruments and waste management performances. European Commission (DG ENV). Bio Intelligence Service S.A.S. Paris. France.
 20. Monier V., Mudgal S., Hestin M., Trarieux M., Mimid S. (2011).Service contact on management of construction and demolition waste – SR1. European Commission (DG ENV). Bio Intelligence Service S.A.S. Paris. France.
 21. Ρεμούνδου Α. (2014). Η εναλλακτική διαχείριση αποβλήτων εκσκαφών κατασκευών και κατεδαφίσεων (Α.Ε.Κ.Κ.) στην Ελλάδα. ΕΟΑΝ.
 22. <http://www.eoan.gr/el/content/14/apovlita-ekskafon-kataskeuon-katedafiseon-aekk> Ανακτήθηκε στις 26/1/2016.
 23. Μπεριάτος Η., Αραβώσης Κ., Καραγιαννίδης Α., Περκουλίδης Γ., Κολτσίδας Ε., Κούγκολος Α. (2003). Θεσμικό πλαίσιο και πολιτική διαχείρισης στερεών αποβλήτων: Εξελίξεις και προοπτικές. Περιβάλλον & Δίκαιο, Τεύχος 2/2003, σελ. 306 – 323, εκδότης: Νομική Βιβλιοθήκη.
 24. Κουτσογιαννόπουλος Π. (2011). Νομοθεσία για την εναλλακτική διαχείριση Υλικών Συσκευασίας και άλλων προϊόντων. Απόβλητα Εκσκαφών Κατασκευών & Κατεδαφίσεων. Ανακτήθηκε στις 5/3/2016 από: <http://www.kalamata.gr/assets/APORRIMATA/aekk.pdf>.
 25. ΦΕΚ 1312/Β/24.08.2010
 26. Ν.4030/2011, ΦΕΚ 249/Α/25.11.2011
 27. <http://anakyklosi-am.gr/> Ανακτήθηκε στις 26/2/2016.
 28. <http://sanke.gr> Ανακτήθηκε στις 7/3/2016.
 29. Εφραιμίδης Χ. (2008). Παραγωγή αδρανών υλικών από ανακύκλωση παλαιών σκυροδεμάτων.1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, ΤΕΕ, Αθήνα, 21-23 Μαΐου, 2008.
 30. Μακρίδου Π., Πανιώρας Γ. (2009). Σύγχρονα υλικά στην κατασκευή και συντήρηση των έργων οδοποιίας. Α.Τ.Ε.Ι Θεσ/νίκης, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Πολ. Έργων Υποδομής. Θεσσαλονίκη.
 31. Γαλετάκης Μ. (2014). Επαναχρησιμοποίηση αποβλήτων εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων, παρουσίαση στα πλαίσια εσπερίδας την Τετάρτη 4 Ιουνίου 2014 στα Χανιά, που διοργανώθηκε από την Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση

Χανίων με θέμα: Προστασία Περιβάλλοντος: Νομική απαίτηση ή εργαλείο για την τοπική βιώσιμη ανάπτυξη.

32. Ελληνικός Οργανισμός Ανακύκλωσης Ε.Ο.ΑΝ. (2014). Ετήσια έκθεση ελληνικού οργανισμού ανακύκλωσης 2013. Ανακτήθηκε στις 5/3/2016 από: <http://www.eoan.gr/uploads/files/365/c5b80c99fb201bba974929334e671b22812d2640.pdf>.

33. Τ.Ε.Ι Κρήτης. Δομικές μηχανές παραγωγής αδρανών υλικών. Ανακτήθηκε στις 5/3/2016 από: http://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwi61v2j_KnLAhWEPRoKHSYvAc8QFgghMAE&url=http%3A%2F%2Fdiocles.civil.duth.gr%2Flinks%2Fhome%2Fvltiomeno%2Fnees%2FDomikes_Michanes%2FParagogh_Adranon_Ylikon.pdf&usg=AFQjCNEFOrmQBYiqHG1ErY39026OAK437Q

34. Μουρκάκος Χ. (2016). Η Περίπτωση της Μεσσηνίας. Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές. Ανακτήθηκε στις 8/3/2016 από: <http://docplayer.gr/2813190-I-periptosi-tis-messinias.html>.

35. Symonds, ARGUS, COWI, PRC Bouwcentrum (1999). Construction and demolition waste management practices and their economic impacts. Ανακτήθηκε στις 8/3/2016 από: http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/cdw/cdw_chapter1-6.pdf

36. Οικονόμου Ν., Σελεβός Σ. (1999). Ανακυκλωμένο σκυρόδεμα. Πρακτικά 13ου Ελληνικού Συνεδρίου Σκυροδέματος, 25-27 Οκτωβρίου, 1999. Ρέθυμνο.

37. Εφραιμίδης Χ. (2008). Παραγωγή αδρανών υλικών σκυροδέματος από ανακύκλωση και άλλες δευτερογενείς πηγές. 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, ΤΕΕ, Αθήνα, 21-23 Μαΐου, 2008.

38. Οικονόμου Ν., Σταθακόπουλος Α., Μαυρίδου Σ., (2006). Μέτρα για την αποτελεσματική Διαχείριση των Δομικών Απορριμμάτων στο Πολεοδομικό Συγκρότημα της Θεσσαλονίκης, 1ο Συνέδριο Περιβάλλοντος Α.Π.Θ.

39. Βερούχη Α.-Μ., (2005). Εναλλακτική Διαχείριση Αποβλήτων από Εκσκαφές, Κατασκευές, Κατεδαφίσεις, ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη.

40. Γκαλμπένης, Χ.Τ., Τσίμας, Σ., (2005). Διαχείριση οικοδομικών Απορριμμάτων- Η παρούσα κατάσταση στην Ελλάδα. Πρακτικά 1ου Πανελληνίου Συνεδρίου για την Αξιοποίηση Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στη δόμηση, σελ. 367-374, Θεσσαλονίκη.

41. Παπαδάκης Ε.Γ., (2009). Χρήση Βιομηχανικών Παραπροϊόντων και Τεχνικών για Μείωση του Περιβαλλοντικού Κόστους των Κατασκευών. Πρακτικά 2ου Πανελληνίου Συνεδρίου ΕΒΙΠΑΡ.

42. Fatta D., Papadopoulos A., Avramikos E., Sgourou E., Moustakas K., Kourmoussis F., Mentzis A., Loizidou M., (2003). Generation and management of construction and demolition waste in Greece—an existing challenge. Resources, Conservation and Recycling, 40, 81–91.

43. Oikonomou N. (2004). Recycled concrete aggregates. Cement & Concrete Composites 27, 315–318.

44. Miss Kwong Man Karen CHIU (2006). The use of recycled concrete aggregate in structural concrete around south east Queensland. University of Southern Queensland Faculty of Engineering and Surveying. Towards the degree of Bachelor of Engineering (Civil).
45. Γκαλμπένης Χ.-Γ., Τσακαλάκης Κ., Τσίμας Σ., (2005). Υποκατάσταση φαρίνας τσιμέντου από ανακυκλωμένα υλικά κατεδάφισης κτιρίων. Heleco '05, ΤΕΕ, Αθήνα, 3-6 Φεβρουαρίου 2005.
46. Οικονόμου Ν., Ζυγούρας Μ., (2006). Πρόταση για τη διαχείριση των δοκιμών απορριμμάτων σε πολεοδομικά συγκροτήματα, 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, 25-27/10/2006.
47. Σταθακοπούλου Α. (2011). Μοντέλο διαχείρισης των αποβλήτων από εκσκαφές κατασκευές και κατεδαφίσεις (Α.Ε.Κ.Κ.): πεδίο εφαρμογής η ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης. Διδακτορική διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
48. Banias G., Achillas C., Vlachokostas C., Moussiopoulos N., Tarsenis S. (2010). Assessing multiple criteria for the optimal location of a construction and demolition waste management facility. *Building and Environment* 45 p.2317 – 2326.
49. Μουσιόπουλος Ν., Ιακώβου Ε., Παπαδόπουλος Α., Αχίλλας Χ., Αηδόνης Δ., Αναστασέλος Δ. και Μπανιάς Γ. (2007). Αξιοποίηση αποβλήτων εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή Α.Π.Θ., ΥΔΡΟΓΑΙΑ, Τιμητικός Τόμος στον Καθηγητή Χρήστο Τζιμόπουλο, 413-423.
50. Arslan H., Coşgun N., Salgın B., Construction and Demolition Waste Management in Turkey DOI: 10.5772/46110.
51. Symonds, ARGUS, COWI, PRC Bouwcentrum. (1999). Construction and demolition waste management practices and their economic impacts. Report to DGXI, European Commission.
52. Sáez P., del Río Merino M., Porrás-Amores C., (2011). Managing construction and demolition (C&D) waste – a European perspective. 2011 International Conference on Petroleum and Sustainable Development IPCBEE vol. 26 IACSIT Press, Singapore.
53. Del Río Merino M1, Izquierdo Gracia P, Weis Azevedo IS. (2010). Sustainable construction: construction and demolition waste reconsidered. *Waste Manag Res.* 2010 Feb; 28(2):118-29.
54. Reid M. (2003). A Strategy for Construction and Demolition Waste as Recycled Aggregates. Addressing the Barriers to Construction and Demolition Waste as Recycled Aggregates. Draft Strategy D5 v1.1, 01/04/03, JMR.
55. Calvo N., Varela-Candamio L., Novo-Corti I. (2014). A Dynamic Model for Construction and Demolition (C&D) Waste Management in Spain: Driving Policies Based on Economic Incentives and Tax Penalties. *Sustainability* 2014, 6, 416-435; doi:10.3390/su6010416.
56. Kelly, M., (2002). The development of a construction and demolition waste recycling facility in Galway - a case study. Master thesis (Master of Science in

Construction Management), Galway-Mayo Institute of Technology. Ανακτήθηκε στις 20/4/2016 από: <http://hdl.handle.net/10759/314835>.

57. Zhao W., Rotter S. (2008). The current situation of construction & demolition waste management in China. Inst. of Constr. Manage. & Real Estate, Chongqing Univ., Chongqing DOI: 10.1109/ICBBE.2008.344 Conference: Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2008. ICBBE 2008. The 2nd International Conference on Source: IEEE Xplore.

58. Weil M., Jeske U., Schebek L. (2006). Closed-loop recycling of construction and demolition waste in Germany in view of stricter environmental threshold values. Waste Manage Res 2006: 24: 197–206.

59. Huang W-L, Lin D.-H. , Chang N.-B., Lin K.-S., (2002). Recycling of construction and demolition waste via a mechanical sorting process. Resources, Conservation and Recycling 37 p. 23 -37.

60. Tam V., Tam C.M. (2006). Evaluations of existing waste recycling methods: A Hong Kong study. Building and Environment 41 p. 1649–1660.

61. Tam V. (2008). Economic comparison of concrete recycling: A case study approach. Resources, Conservation and Recycling 52 p.821–828.

62. Tam V., Tam C.M. (2006). A review on the viable technology for construction waste recycling. Resources, Conservation and Recycling 47 p. 209–221.

63. Jeong H. (2011). Processing and properties of recycled aggregate concrete. Master Thesis Master of Science in Civil Engineering in the Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois.

64. Sonawane T., Pimplikar S. (2009). Use of Recycled Aggregate Concrete. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) ISSN: 2278-1684, PP: 52-59.

65. Tam V. (2009). Comparing the implementation of concrete recycling in the Australian and Japanese construction industries. Journal of Cleaner Production 17 p. 688–70.

66. Tam V., Tam C.M. (2009). Parameters for assessing recycled aggregate and their correlation. Waste Manag Res p.27: 52.

67. Tam V., (2008). Economic comparison of concrete recycling: A case study approach. Resources, Conservation and Recycling 52 p. 821–828.

68. Dosho Y. (2007). Development of a sustainable concrete waste recycling system. – Application of recycled aggregate concrete produced by aggregate replacing method-. Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 5, No. 1, 27-42.

69. Tam V., Gao X.F., Tam C.M., (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. Cement and Concrete Research 35 p.1195– 1203.

70. Topcu I, Sengel S. (2004). Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. Cement and Concrete Research 34 p. 1307–1312.

71. Tam V., Wang K., Tam C.M., (2008). Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis. Journal of Hazardous Materials 152 p. 703–714.

72. Etxeberria M., Mari' A. R., Va'zquez E. (2007). Recycled aggregate concrete as structural material. *Materials and Structures* 40:529–541.
73. Xiao J.-Zh., Li J.-B., Zhang Ch., (2006). On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: An overview. *Materials and Structures* 39:655–664.
74. Chen H.-J., Yen T., Chen K.-H., (2003). Use of building rubbles as recycled aggregates. *Cement and Concrete Research* 33 p. 125–132.
75. Rao A., Jha K.N., Misra S., (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling* 50 p. 71–81.
76. Shing Chai N., (2004). High-Strength Structural Concrete with Recycled Aggregates. Bachelor of Engineering (Civil). Course ENG 4111 and ENG 4112 Research Project. Ανακτήθηκε από:
77. Anderson K.W., Uhlmeyer J.S. Russell M., (2009). Use of Recycled Concrete Aggregate in PCCP: Literature Search. Washington State. Department of Transportation. Office of Research & Library Services. WSDOT Research Report.
78. American Concrete Pavement Association. (1993). Recycling Concrete Pavement, Concrete Paving Technology, TB-014P.
79. Ryu J. S., (2002). Improvement on strength and impermeability of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Journal of materials science letters*. 21, p. 1565 – 1567.
80. Yanagibashi K., Yonezawa T., Arakawa K., Yamada M. (2002). A new concrete recycling technique for coarse aggregate regeneration process, Japan.
81. Mulder E., Blaakmeer J., Nijland T., Tamboer L. (2002). A closed material cycle for concrete as part of an integrated process for the reuse of the total flow of C&D Waste, Netherlands.
82. Tam W.Y. V., Tam C.M., Le K.N. (2006). Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches, Hong Kong.
83. Tam W.Y. V., Tam C.M. (2006). Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach, Hong Kong.
84. Sanchez de Juan M., Pilar AlaeJow Gutierrez (2008). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, CEDEX, Spain.
85. Katz, A. (2003). Properties of Concrete Made with Recycled Aggregate from Partially Hydrated Old Concrete, *Cement and Concrete Research*, V. 343 No. 5, pp. 703-711.
86. Salem, R.M., Burdette, E.G., and Jackson, N.M. (2003). Resistance to Freezing and Thawing of Recycled Aggregate Concrete, *ACI Materials Journal*, V. 100, No. 3, May-June 2003, pp. 216-221.
87. Κασιίδου Μ., Παπαθανασίου Α. (2013). Σκυρόδεμα από ανακυκλώσιμα αδρανή. Διπλωματική εργασία. Α.Τ.Ε.Ι Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
88. Smith J.T. (2009). Recycled Concrete Aggregate – A Viable Aggregate Source for Concrete Pavements. PhD Thesis. University of Waterloo. Waterloo, Ontario, Canada.

89. Li X. (2008). Recycling and reuse of waste concrete in China Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete. *Resources, Conservation and Recycling* 53 p. 36–44.
90. Βαρδάκα Γ. (2013) Διαπερατό σκυρόδεμα: Ανάπτυξη, σχεδιασμός, μελέτη ιδιοτήτων και περιβαλλοντικά οφέλη. Διδακτορική διατριβή. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Σχολή Χημικών Μηχανικών.
91. Sagoe-Crentsil, K.K., Brown, T., and Taylor, A.H. (2001). Performance of Concrete Made with Commercially Produced Coarse Recycle Concrete Aggregate. *Cement and Concrete Research*, V. 31, No. 5, pp. 707-712.
92. Naik, T.R., and Moriconi, G. (2005). Environmental-Friendly Durable Concrete Made with Recycled Materials for Sustainable Concrete Construction, International Symposium on Sustainable Development of Cement, Concrete and Concrete Structures, Toronto, Ontario, October 5-7, pp. 277-298.
93. Hansen, T.C., and Angelo, J.W. (1986). Crushed Concrete Fines Recycled for Soil Modification Purposes, *ACI Materials Journal*, V. 83, No. 6, November-December 1986, pp. 983-987.
94. Οικονόμου Ν., Εσκίογλου Π., Μαυρίδου Σ. (2007). Μελέτη κρασπέδων σκυροδέματος τροποποιημένων με φθαρμένα ελαστικά αυτοκινήτων. 4ο Διεθνές Συνέδριο Σφαιρικά Μίγματα και Οδοστρώματα. Θεσσαλονίκη, 19-20/4/2007.
95. Σαρακατσάνος Χ. (2009). Ενίσχυση σκυροδέματος με ανακυκλωμένα ελαστικά οχημάτων. Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος. Χανιά.
96. Νεοφύτου Π. (2009). Σκυρόδεμα από παλιά ελαστικά Από το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα «EcoLanes». Εφημερίδα «Η σημερινή». Δευτέρα 27/4/2009. Οικονομία, σελ. 45.
97. Μπάτσιος Α., Παπαγιάννη Ι., Δημητρογιαννάκης Θ., Φραγκούλης Γ., Μαυρίδου Σ., Πανουτσακόπουλος Β., (2009). Σκυρόδεμα με ανακυκλωμένο ελαστικό για δάπεδα αθλοπαιδιών. 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23/10/2009, Πάφος, Κύπρος.
98. Πηλακούτας Κ., Guadagnini M., Νεοκλέους Κ., Matthy S. (2009). Σκυρόδεμα Οπλισμένο με Ινοπλισμένα Πολυμερή: Ερευνητικές Δραστηριότητες της fib. 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23/10/ 2009, Πάφος, Κύπρος.
99. Νεοκλέους Κ., Πηλακούτας Κ., Δρίτσος Σ., Τριανταφύλλου Θ. (1999). Σχεδιασμός Οπλισμένου Σκυροδέματος με Ινοπλισμένα Πολυμερή. 13ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος - Ρέθυμνο Κρήτη, 25 – 27/10/1999.
100. Batayneh M., Marie I., Asi I. (2007). Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste Management* 27 p.1870–1876.
101. Παπαδάκης Ε.Γ. (2009). Χρήση Βιομηχανικών Παραπροϊόντων και Τεχνικών για Μείωση του Περιβαλλοντικού Κόστους των Κατασκευών. Πρακτικά 2ου Πανελληνίου Συνεδρίου για την Αξιοποίηση των Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στη Δόμηση, ΕΒΠΙΑΡ, Αιανή Κοζάνης, 1-3/6/2009.
102. Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A. (2002). Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement & Concrete Composites* 24 p.269–279.

103. Arm M. (2001). Self-cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: results from triaxial tests and field tests. *Waste Management* 21 p.235-239.
104. Zega C. J., Villagra'n-Zaccardi Y. A., Di Maio A. A. (2010). Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates. *Materials and Structures* 43:195–202.
105. Nagataki S., Gokce A., Saeki T., Hisada M. (2004). Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research* 34 p.965–971.
106. Eguchi K., Teranishi K., Nakagome A., Kishimoto H., Shinozaki K., Narikawa M. (2007). Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction. *Construction and Building Materials* 21 p.1542–1551.
107. Zhang X., Deng S., Deng X., Qin Y. (2007). Experimental research on regression coefficients in recycled concrete Bolomey formula. *J. Cent. South Univ. Technol.* s1–0314–04.
108. Chakradhara Rao M., Bhattacharyya S. K., Barai S. V. (2010). Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures* DOI 10.1617/s11527-010-9620-x.
109. Poon C.S., Shui Z.H., Lam L., Fok H., Kou S.C. (2004). Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research* 34 p. 31–36.
110. Rahal K. (2007). Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environment* 42 p.407–415.
111. Xiao J., Li J., Zhang Ch. (2005). Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research* 35 p. 1187– 1194.
112. Khatib J.M. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Research* 35 p.763– 769.
113. Tam V., Tam C.M. (2008). Diversifying two-stage mixing approach (TSMa) for recycled aggregate concrete: TSMa and TSMAsc. *Construction and Building Materials* 22 p.2068–2077.
114. Tu T.-Y., Chen Y.-Y., Hwang C.-L. (2006). Properties of HPC with recycled aggregates. *Cement and Concrete Research* 36 p. 943–950.
115. López-Gayarre F., Serna P., Domingo-Cabo A., Serrano-López M.A., López-Colina C. (2009). Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. *Waste Management* 29 p. 3022–3028.
116. Liu KK., Tam W.H. (2001). A Report on the Use of Recycled Aggregates in Low Grade Concrete. Public Works Central Laboratory Materials Division Geotechnical Engineering Office Civil Engineering Department.
117. Σάββα Α.Ε. (2010). Σκυροδέματα με ανακυκλωμένα αδρανή: Επίδραση της ομοιογένειας του σκυροδέματος προέλευσης. *Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ*, τεύχ. 2.
118. Μαυρίδου Σ., Οικονόμου Ν., Γιάνναρης Κλ., Παντούλα Στ. (2009). Πειραματική προσέγγιση της χρήσης ανακυκλωμένων αδρανών βιομηχανικής επεξεργασίας στην παράγωγή νέου σκυροδέματος. Μέρος Ι. Πρακτικά 2ου

Πανελληνίου Συνεδρίου για την Αξιοποίηση των Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στη Δόμηση, ΕΒΠΙΑΡ, Αιανή Κοζάνης, 1-3/6/2009.

119. Μαυρίδου Σ., Οικονόμου Ν. (2009). Πειραματική προσέγγιση της χρήσης ανακυκλωμένων αδρανών βιομηχανικής επεξεργασίας στην παράγωγη νέου σκυροδέματος. Μέρος II. 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23/10/2009, Πάφος, Κύπρος.

120. Μαυρίδου Σ., Οικονόμου Ν. (2014). Απόβλητα από εκσκαφές, κατασκευές και κατεδαφίσεις (ΑΕΚΚ) και παρασκευή νέου σκυροδέματος. Αριστοτέλειο πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Τμήμα πολιτικών Μηχανικών. Θεσσαλονίκη.

121. Mavridou S., Oikonomou N., Kaisidou E. (2013). Utilization of Construction and Demolition Wastes (C&DW) for the production of new concrete mixtures, Fourth International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE) and SECOTOX Conference, Mykonos.

122. Οικονόμου Ν., Τσώχος Γ. (2013). Ανακυκλωμένο Σκυρόδεμα. 14ο Συνέδριο σκυροδέματος. 5-17/10/2003, Κως

123. Abbas A., Fathifazl G., Isgor B., Razaqpur A. G., Fournier B., Foo S. (2009). Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method. *Cement & Concrete Composites* 31p. 555–563.

124. Fathifazl G., Razaqpur A. G., Isgor B., Abbas A., Fournier B., Foo S., (2011). Shear capacity evaluation of steel reinforced recycled concrete (RRC) beams. *Engineering Structures* Volume 33, Issue 3, P. 1025–1033.

125. Sellakkannu N., Subramani V. (2016). Study On Properties Of Recycled Aggregate - A Review. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)* Vol-2, Issue-3.

126. Jin, C., Wang, X. P., Akinkurolere O. O. (2008). Experimental research on the conversion relationships between the mechanical performance indexes of recycled concrete (in Chinese). *Chinese Concrete Journal* 11: 37–39, 49.

127. Hansen, T.C., and Hedegard, S.E. (1984). Properties of Recycled Aggregate Concretes as Affected by Admixtures in Original Concretes. *ACI Journal*, January-February 1984, pp. 21-26.

128. Lin, Y.H., Tyan, Y.Y., Chang, T.P., Chang, C.Y. (2004). An Assessment of Optimal Mixture for Concrete Made With Recycled Concrete Aggregates. *Cement and Concrete Research*, V. 34, No. 8, pp. 1373-1380.

129. Katz A. (2003). Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cem Concr Res*;33:703–11.

130. Topcu B. I., Guncan F.N. (1995). Using waste concrete as aggregate. *Cem Concr Res* 1995;25(7):1385–90.

131. Xiao, J. Z. and Li, J. B. (2005). Study on relationships between strength indexes of recycled concrete (in Chinese). *Chinese Journal of Building Material* 9: 197–201.

132. Tang J. (2007). Preliminary study on compressive strength of recycled aggregate concrete (in Chinese). *Sichuan Building Science* 33: 183–186.

133. Li J (2004). Study on Mechanical Behavior of Recycled Aggregate Concrete. Dissertation of Masteral Degree, Shanghai: Tongji University

134. Jin, C., Wang, X. P., Akinkurolere O. O. (2008). Experimental research on the conversion relationships between the mechanical performance indexes of recycled concrete (in Chinese). *Chinese Concrete Journal* 11: 37–39, 49.
135. Evangelista, L. and de Brito, J. (2007). Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and concrete composites* 29: 397-401.
136. Sofi M., Mendis P., Lumantarna E., (2013). Use of recycled concrete aggregates in sustainable structural concrete applications. Ανακτήθηκε στις 25/5/2016 από: <http://dl.lib.mrt.ac.lk/handle/123/9115>.
137. Rao A. (2005). Experimental Investigation on Use of Recycled Aggregates in Mortar and Concrete. Thesis submitted to the Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur.
138. Gokce, A., Nagataki, S., Saeki, T., Hisada, M. (2004). Freezing and Thawing Resistance of Air-Entrained Concrete Incorporating Recycled Coarse Aggregate: The Role of Air Content in Demolished Concrete. *Cement and Concrete Research*, V. 34, No. 5, pp. 799-806.
139. Salem, R.M., and Burdette, E.G. (1998). Role of Chemical and Mineral Admixtures on Physical Properties and Frost-Resistance of Recycled Aggregate Concrete. *ACI Materials Journal*, V. 95, No. 5, September-October 1998, pp. 558-563.
140. Ajdukiewicz A, Kliszczewicz A. (2002). Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement Concrete Composites*;24:269–79.
141. Hansen, T.C., and Boegh, E. (1985). Elasticity and Drying Shrinkage of Recycled-Aggregate Concrete. *ACI Materials Journal*, V. 82, No. 5, September-October 1985, pp. 648-652.
142. Poon, C.S., Kou, S.C., and Lam, L. (2002). Use of Recycled Aggregates in Molded Concrete Bricks and Blocks. *Construction and Building Materials*, V. 16, No. 5, pp. 281-289.
143. Chakradhara Rao M., Bhattacharyya S. K., Barai S.V. (2009). Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures*. DOI 10.1617/s11527-010-9620-x.
144. Μπένος Α. (2012). Απαιτούμενες ποσότητες υλικών σε αναλογία μίξεως για την Παρασκευή σκυροδέματος των κατηγοριών: C8/10, C12/15, C16/20, C20/25, C25/30. Πτυχιακή εργασία. Ανώτατο Τεχνολογικό Ίδρυμα Αθήνας. Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών. Τμήμα Πολιτικών Έργων Υποδομής. Αθήνα.
145. Hirschi T., Knauber H., Lanz M., Schlumpf J., Schrabach J., Spirig C., Waeber U. (2007). Εγχειρίδιο Τεχνολογίας Σκυροδέματος Sika. Απόδοση στα Ελληνικά και προσαρμογή: Σάλτα Ε.
146. Παπαγιάννη Ι., Οικονόμου Ι, Στεφανίδου Μ. (2013) Δομικά Υλικά Ι. Ενότητα 4: Τεχνολογία τσιμέντου. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα. Θεσσαλονίκη.
147. Λουσαπάκης Κ. (2013). Σημειώσεις διαλέξεων του μαθήματος Τεχνική Γεωλογία ΙΙ. Ανακτήθηκε στις 8/6/2016 από: www.metal.ntua.gr/uploads/3711/d1.pdf

148. Παπαγιάννη Ι. (2009). Σκυρόδεμα: Μικροδομή, ιδιότητες και υλικά. Μετάφραση τρίτης Αμερικανικής Έκδοσης των P. Kumar Mehta and Paulo J.M. Monteiro, Εκδόσεις Κλειδάριθμος.
149. Κωνσταντίνου Χ. (2008). Μέθοδοι συντήρησης στοιχείων από σκυρόδεμα. Διπλωματική εργασία. Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων. Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών.
150. Ρούτουλας Α. (2010). Έλεγχος ποιότητας και τεχνολογία δομήσιμων υλικών. Γενικό τμήμα Φυσικής, χημείας και τεχνολογίας υλικών. Εργαστήριο ελέγχου ποιότητας και τεχνολογίας δομήσιμων υλικών. TEI Πειραιά.
151. British Standard EN 932-1:1997. Tests for general properties of aggregates. Part 1. Methods for sampling.
152. http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/P_AGGREGATES/ad1_5.htm Ανακτήθηκε στις 5/3/2017.
153. Μπεάζη – Κατσιώτη Μ. (2008). Αδρανή Σκυροδέματος, Τυποποίηση, Μύθος & Πραγματικότητα. Ημερίδα Σχεδιασμός & Κατασκευή, 8/11/2008, Τρίπολη.
154. American Standard Test Method (ASTM) C136- 96a. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.
155. <http://www.tecnotest.it/> Ανακτήθηκε στις 5/3/2017.
156. <http://www.achema.gr/> Ανακτήθηκε στις 5/3/2017.
157. Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων (2008). Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών. Σημειώσεις Εργαστηριακού Μαθήματος: Εργαστήριο Τεχνολογίας Σκυροδέματος. Εργαστηριακή Άσκηση 4 : Έλεγχος χαρακτηριστικών των αδρανών: Κοκκομετρία, Ειδικά βάρη /Υγρασία απορροφητικότητα.
158. Αντωνόπουλος Α. (2011). Αδρανή Υλικά. Διπλωματική εργασία. Τμήμα πολιτικών μηχανικών. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αθήνα.
159. http://www.skyrodemanet.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=47 Ανακτήθηκε στις 9/3/2017.
160. British Standard EN 933-3:1997. Tests for geometrical properties of aggregates -Part 3: Determination of particle shape - Flakiness index.
161. British Standard EN 12620:2002. Aggregates for concrete.
162. Λίτινας Ν. (2008). Νέες απαιτήσεις για τα αδρανή υλικά στις κατασκευές εμπειρία από την εφαρμογή της σήμανσης CE στην Ελλάδα. 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, ΤΕΕ, Αθήνα, 21-23/5/2008.
163. Νικολαΐδης Αθ.Φ., Μάνθος Ε., Σαραφειδου Μ. (2005). Ισοδύναμο άμμου και μπλε του μεθυλενίου αδρανών υλικών οδοποιίας. 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας, Βόλος, 18-20/5/2005.
164. Λυκούδης Σ. (2009). Χρήση του μπλε του μεθυλενίου για τον προσδιορισμό των επιβλαβών λεπτόκοκκων στην άμμο σκυροδέματος. 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23/10/ 2009, Πάφος, Κύπρος.
165. <http://www.paver.gr/> Ανακτήθηκε στις 20/3/2017.
166. Φούρναρη Ρ., Ιωάννου Ι., Πέτρου Μ., Ανδρέου Α., Σάββας Β., Χατζηγεωργίου Χ., Κωνσταντίνου Γ., Κελεπέσης Ν. (2009). Μελέτη της αποσάθρωσης των αδρανών με στόχο τη βελτίωση της ανθεκτικότητας του παραγόμενου σκυροδέματος. 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23/10/ 2009, Πάφος, Κύπρος.

167. Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων (2008). Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών. Σημειώσεις Εργαστηριακού Μαθήματος: Εργαστήριο Τεχνολογίας Σκυροδέματος. Εργαστηριακή Άσκηση 3 : Έλεγχος καταλληλότητας αδρανών για σκυρόδεμα.
168. Μοροπούλου Α. (2009). Τσιμέντο και σκυρόδεμα. Δομικά Υλικά. 9^ο Εξάμηνο Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ (ntua ACADEMIC OPEN COURSES) Ανακτήθηκε από στις 4/3/2016: http://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwixtp3bxqfLAhXJrxoKHT-CBMwQFggaMAA&url=http%3A%2F%2Focw.aoc.ntua.gr%2Fmodules%2Fdocument%2Ffile.php%2FCHEMENG114%2FCement%2520and%2520Concrete.pdf&usq=AFQjCNGkTYTC8uh1_grxAGPB8sQ9f5RV-Q&bvm=bv.115339255,d.d2s
169. Παπαχριστοδούλου Χ., Ιωαννίδης Κ. (2011). Μονάδα Φασματοσκοπίας Ακτίνων-Χ Φθορισμού (XRF). Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων. Ανακτήθηκε στις 13/06/2016 από: http://www.uoi.gr/services/lab-net/net-web/XRF_gr.pdf
170. Καντηράνης Ν., Παπαδοπούλου Λ. (2016). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Σχολή θετικών επιστημών. Τμήμα Γεωλογίας. Σημειώσεις μαθήματος: Εργαστηριακές Μέθοδοι Έρευνας ορυκτών και Πετρωμάτων. 2^ο μάθημα: Φασματοσκοπία με Φθορισμό των Ακτίνων Χ (XRF).
171. Χρυσοβελίδου Δ. (2012). Αδρανή σκυροδέματος. Εφαρμογή των Προτύπων ΕΛΟΤ EN 206-1 & ΕΛΟΤ EN 12620. Εσπερίδα Πρότυπο Σκυροδέματος ΕΛΟΤ EN 206-1: Παρουσίαση και εφαρμογή, 6/3/2012. Αίθουσα Εκδηλώσεων ΤΕΕ, Νίκης 4, Σύνταγμα. Αθήνα.
172. ΦΕΚ 1561/Β/2-6-2016. Απόφαση. Αριθμ. Γ.Δ.Τ.Υ./οικ.3328. Έγκριση του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος 2016 (ΚΤΣ-2016).
173. Παπαδοπούλου Μ., Γκουντουρά Σ. (2013). Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα. Γενική μελέτη σχετικά με τα συστατικά, τις ιδιότητες, τις χρήσεις και τις εφαρμογές του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος. Πτυχιακή εργασία. Αλεξάνδρειο τεχνολογικό εκπαιδευτικό ίδρυμα Θεσσαλονίκης.
174. ΦΕΚ 315/Β/1997. Υπουργική απόφαση Δ14/19164/1997. Έγκριση του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος – 97.
175. Ρούτουλας Α. (2010). Έλεγχος ποιότητας και τεχνολογία δομήσιμων υλικών. Ενότητα 2^η. Τσιμέντα –Σκυροδέματα. Γενικό τμήμα Φυσικής, χημείας και τεχνολογίας υλικών. Εργαστήριο ελέγχου ποιότητας και τεχνολογίας δομήσιμων υλικών. ΤΕΙ Πειραιά.
176. Κυριακόπουλος Β. (2012). Σχέση αντοχής σκυροδέματος σε θλίψη και κάμψη για ασβεστολιθικά αδρανή Αττικής. Διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Σχολή πολιτικών μηχανικών. Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών, Δομοστατικός σχεδιασμός και ανάλυση κατασκευών. Αθήνα.
177. Κωτσοβός Μ. (2010). Οπλισμένο σκυρόδεμα. Εισαγωγή στο σχεδιασμό με βάση το θεωρητικό υπόβαθρο των κατασκευών. Κεφάλαιο 2^ο. Υλικά οπλισμένου σκυροδέματος. Συμείων. Αθήνα.
178. Κορδάτος Ε. (2013). Μη καταστροφικός χαρακτηρισμός της βλάβης προηγμένων υλικών μέσω ανάλυσης της θερμο-μηχανικής συμπεριφοράς τους με μεθόδους θερμογραφίας. Διδακτορική διατριβή. Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων. Σχολή Επιστημών και Τεχνολογιών. Τμήμα μηχανικών επιστήμης υλικών. Ιωάννινα.
179. Κυπριωτάκη Α. (2012). Εργαστηριακές εφαρμογές ακουστικής εκπομπής σε δοκίμια άοπλου και ινοπλισμένου σκυροδέματος. Διπλωματική εργασία. Εθνικό

Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών. Σχεδιασμός και κατασκευή υπογείων έργων. Αθήνα.

180. Tsoumani A.A., Barkoula N.-M., Matikas T. E. (2015) Acoustic emission monitoring of recycled aggregate concrete under bending, Proceedings of SPIE Volume 9436, Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems Integration 2015, 94360U. DOI:10.1117/12.2085512.

181. Ματίκας Θ., Αγγέλης Δ. (2015). Μη καταστροφικοί έλεγχοι. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Ανακτήθηκε στις 23/5/2016 από: <http://hdl.handle.net/11419/3601>.

182. Σπανός Χ., Σπιθάκης Μ., Τρέζος Κ. (2006). Μέθοδοι για την επιτόπου αποτίμηση των χαρακτηριστικών των υλικών. Β' έκδοση. ΕΠΑΝΤΥΚ- Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας. Αθήνα.

183. Mohan Malhotra V., Carino N.J. (2006). Handbook on nondestructive testing of concrete, CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington, D.C..

184. Mpalaskas A.C., Thanasia O.V., Matikas T.E., Aggelis D.G. (2014). Mechanical and fracture behavior of cement-based materials characterized by combined elastic wave approaches. Construction and Building Materials. Volume 50, 15 January 2014, Pages 649–656.

185. Βορκά Χ., Λακκοτρύπης Κ. (2013). Αξιολόγηση και επισκευή κατεστραμμένου δομικού στοιχείου οπλισμένου σκυροδέματος. Διπλωματική εργασία. Σχολή πολιτικών μηχανικών. Τομέας Δομοστατικής. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

186. Tsoumani A. A., Barkoula N.-M., Matikas T. E. (2015). Determination of the dynamic elastic constants of recycled aggregate concrete, Proceedings of the SPIE, Volume 9436, id. 94360X 8 pp. DOI: 10.1117/12.2085509.

187. Layssi H., Ghods P., Alizadeh A. R., Salehi M. (2015). Electrical Resistivity of Concrete. Concrete International 37(5) p.41-46.

188. Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων (2013). Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών. Σημειώσεις Εργαστηριακού Μαθήματος: Εργαστήριο Υλικών VI. Εργαστηριακή Άσκηση 7: Ηλεκτρική αγωγιμότητα.

189. Βερνάρδου Δ. (2011). Πανεπιστήμιο Κρήτης. Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών. Σημειώσεις μαθήματος: «Δομική και Χημική Ανάλυση Υλικών». Διάλεξη 9^η. Ανακτήθηκε στις 03/07/2016 από: https://www.materials.uoc.gr/el/undergrad/courses/ETY248/notes/2011/lecture_9.pdf.

190. Πανεπιστήμιο Κρήτης. Τμήμα Βιολογίας. Εργαστηριακές σημειώσεις μαθήματος: Εφαρμογές Σύγχρονων Τεχνικών Μικροσκοπίας. Ανακτήθηκε στις 03/07/2016 από:

<http://www.biology.uoc.gr/courses/BIOL493/documents/Microscopy2.pdf>

191. Τσίκας Π., Παπασπυράκος Χ. (2010). Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος σε διάρκεια. 16^ο Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών. Πάτρα.

192. Κουρνέτας Δ. (2010). Διάβρωση οπλισμένου σκυροδέματος – Μέτρα επέμβασης. 16^ο Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών. Πάτρα.

193. Πιπλικάκη Π., Χανιωτάκης Μ., Κατσιώτη Μ. (2009). Συγκριτική αξιολόγηση της ανθεκτικότητας σκυροδεμάτων από σύνθετα τσιμέντα. 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23/10/ 2009, Πάφος, Κύπρος.

194. Μαρίνος Α. (2007). Διπλωματική εργασία. Διαπερατότητα χλωριόντων στο σκυρόδεμα – Ελληνικοί τύποι τσιμέντου και ταχεία μέθοδος εκτίμησης αυτής. Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων. Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών. Ιωάννινα.
195. <http://geotest.gr/index.php/el/apotimisi-anthektikotitas> Ανακτήθηκε στις 08/07/2016.
196. Έλκα Α. (2009). Διπλωματική Εργασία. Μελέτη Ανθεκτικότητας στα χλωριόντα σκυροδέματος με τσιμέντο CEM II 42,5. Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων. Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών. Ιωάννινα.
197. Formasior G., Fava C. (2007). Ensayo Rapido de permeabilidad al ion crocuro: Evaluacion de hormigones con scoria de alto horno, Centro Tecnico. LOMA NEGRA.
198. Tang L. (1992), “Rapid determination of chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field”, ACI Materials Journal, 1-2/1992.
199. Sugiyama T. (2001), “Relationship between coulomb and migration coefficient of chloride in a steady – state chloride migration test”, Magazine of Concrete Research February 13 -14/4/2001.
200. European Standard EN 206-1 Concrete- part 1: Specification, performance, production and conformity.
201. Hodhod O., Salama A. G. (2013). Analysis of sulfate resistance in concrete based on artificial neural networks and USBR4908- modeling. Ain Shams Engineering Journal. Ain Shams Engineering Journal. Volume 4, p. 651–660.
202. Σωτηριάδης Κ., Νικολοπούλου Ε., Τσιβιλής Σ., Παυλου Α., Χανιωτάκης Ε., Swamy N. (2009). Συμπεριφορά σκυροδέματος με ασβεστολιθικά τσιμέντα Portland σε συνδυασμένο περιβάλλον χλωριόντων και θεικών ιόντων και χαμηλές θερμοκρασίες. 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, TEE, ETEK, 21-23/10/2009, Πάφος, Κύπρος.
203. <http://www.anabe.gr/index.php/symvevlimes-monades-aekk> Ανακτήθηκε στις 10/07/2016.
204. Μπάτσιος Α., Παπαγιάννη Ι., Δημητρογιαννάκης Θ., Φραγκούλης Γ., Μαυρίδου Σ., Πανουτσακόπουλος Β. (2009). Σκυρόδεμα με ανακυκλωμένο ελαστικό για δάπεδα αθλοπαιδιών. 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, TEE, ETEK, 21-23/10/2009, Πάφος, Κύπρος.
205. Λυκούδης Σ., Κοτρώτσιος Θ. (2009). Χρήση ανακυκλωμένων τούβλων ως αδρανών σκυροδέματος. 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, TEE, ETEK, 21-23/10/2009, Πάφος, Κύπρος.
206. Debieb F., Kenai S. (2008). The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. Construction and Building Materials, Volume 22, p. 886–893.
207. Bektas F., Wang K., Ceylan H. (2009). Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability. Construction and Building Materials, Volume 23 p. 1909–1914.
208. Reza F. (2013). Use of recycled brick in aggregates. Center for transportation research and implementation. Minnesota State University, Mankato. Research Project. Final Report 2013.
209. Khatib J.M. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. Cement and Concrete Research, Volume 35, p. 763–769.

210. Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος - ΚΤΣ 1997 (ΦΕΚ 315B / 17-4-1997)
211. Νικολαΐδης Αθ.Φ., Ε. Μάνθος, Σαραφείδου Μ. (2005). Ισοδύναμο άμμου και μπλε του μεθυλενίου αδρανών οδοποιίας. 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας, Βόλος, 18-20/5/2005.
212. Chrisovelidou D. (2012). Concrete Aggregates: ELOT EN 206-1 & ELOT EN 12620, Lafarge.
213. Wang K. (2015). Carbonate aggregate in concrete. Department of Civil, Construction, Environmental Engineering Institute of Transportation. Iowa State University. Research Project Final Report 2015-14.
214. Μαρασίδης Τ., Νταλάρης Σ. (2017). Διερεύνηση σκυροδέματος παρασκευασμένο με ανακυκλωμένα αδρανή και προσθήκη ποζολάνης και ιπτάμενης τέφρας σε αντικατάσταση της άμμου κατά 20%. Πτυχιακή εργασία. Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε.
215. Νικηφοράκη Κ. (2008). Καταλληλότητα ασβεστολιθικών πρώτων υλών περιοχών Κρήτης για παραγωγή υδραυλικών κονιών και τεχνολογία παρασκευής τους. Διπλωματική εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης. Τμήμα Μηχανικών ορυκτών πόρων.
216. Σοφιανός Γ. (2007). Αδρανή υλικά στην παραγωγή σκυροδέματος και τρόπος παραγωγής αυτών. Πτυχιακή εργασία. Αλεξάνδρειο τεχνολογικό εκπαιδευτικό ίδρυμα Θεσσαλονίκης. Σχολή τεχνολογικών εφαρμογών. Τμήμα πολιτικών έργων υποδομής.
217. Σακελλαρίου Α., Ζέρης Χ., Μαρσέλλος Ν., Βογιατζής Χ., Ζυγούρης Ν., Μπαρδάκης Β., Παναγιωτίδης Θ., Παπανικολάου Κ., Πιττός Γ. (2012). Τεχνική οδηγία 3 – Σκυροδέτηση σε συνήθεις καιρικές συνθήκες. Σύλλογος πολιτικών μηχανικών Ελλάδας.
218. Σκαροπούλου Α., Σωτηριάδης Κ., Μεχίλη Γ., Πλιακοπάνου Α., Τσιβιλής Σ. (2006). Ανθεκτικότητα σκυροδέματος με ασβεστολιθικά τσιμέντα σε περιβάλλον θεικών ιόντων. 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, 25-27 Οκτωβρίου, 2006.
219. Σίδερης Κ.Κ., Πανταζοπούλου Π., Μπατής Γ. (2006). Μελέτη της συνεργιστικής επίδρασης χλωριόντων, θεικών και νιτρωδών ιόντων στην ανθεκτικότητα τσιμεντοκονιαμάτων. 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, 25-27/10/2006.
220. Ozkan Sengul, (2014). Use of electrical resistivity as an indicator for durability. Construction and Building Materials, Volume 73, p. 434–441.
221. Dalla T.P., Dasios G.K., Tragazikis K. I. Exarchos A. D. (2016). Carbon nanotubes and nanofibers as strain and damage sensors for smart cement. Materials Today Communications, Volume 8, p. 196–204.
222. Τσικαρδάνη Ε., Κούκουζας Ν., Κακαράς Ε. (2005). Οικονομική και περιβαλλοντική αξιολόγηση της χρήσης ιπτάμενης τέφρας για την παραγωγή τσιμεντοπροϊόντων. Πρακτικά 1ου Πανελληνίου Συνεδρίου για την Αξιοποίηση των Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στη Δόμηση, ΕΒΙΠΑΡ, Θεσσαλονίκη, 24-26 Νοεμβρίου 2005.