



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ – ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία



ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΑ
ΥΛΙΚΑ ΩΣ ΑΔΡΑΝΗ ΚΑΙ Η ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΩΝ
ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ



ΤΩΝ

ΤΖΙΟΥΒΕΛΗ ΕΛΕΝΗ, Α.Μ.:6770

ΖΑΧΑΡΟΥΛΑ ΧΑΝΙΩΤΟΥ, Α.Μ.:6925

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΑΥΤΟΥΣΜΗΣ

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2022

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Οι κάτωθι υπογεγραμμένες **Τζιούβελη Ελένη** του Νικήτα, με αριθμό μητρώου 44367700226 και **Χανιώτου Ζαχαρούλα** του Δημητρίου, με αριθμό μητρώου 44369250226, φοιτήτριες του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, δηλώνουμε υπεύθυνα ότι:

«Είμαστε συγγραφείς της παρούσας διπλωματικής εργασίας με τίτλο *ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ ΩΣ ΑΔΡΑΝΗ ΚΑΙ Η ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ* και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχαμε για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες κάναμε χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών, που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνουμε ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από εμάς αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μας, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μας ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μας».

Οι Δηλούσες



Τζιούβελη Ελένη



Χανιώτου Ζαχαρούλα

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι
Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή:

Αθανάσιος Αυτουσλής
Καθηγητής
Επιβλέπων

Σταυρούλα Δενεζάκη
Καθηγητής
Μέλος

Τριαντ.-Φίλης Κόκκινος
Αναπληρωτής Καθηγητής
Μέλος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα απόβλητα εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ) φαίνονται να αποτελούν τα σημαντικότερα και μεγαλύτερα σε όγκο ρεύματα απορριμμάτων. Τα ΑΕΚΚ στην Ευρώπη αντιπροσωπεύουν το 25%-30% του συνόλου των αποβλήτων καθώς επίσης η κατασκευαστική βιομηχανία, από την οποία προέρχονται, υπάγεται στις μεγαλύτερες παγκοσμίως καταναλωτές πρώτων υλών. Τα υλικά αυτά περιλαμβάνουν ύλες όπως π.χ σκυρόδεμα, κεραμικά, γύψος, ξύλο κ.λπ., εκ των οποίων τα περισσότερα είναι δυνατό και αναγκαίο να επαναχρησιμοποιηθούν ή/και να ανακυκλωθούν, καθώς αποτελούν μη ανανεώσιμες πηγές. Η αναπάντεχη εξαγωγή και χρήση αδρανών υλικών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή οικοδομικών υλικών και η μετέπειτα απόρριψή τους αποτελεί μείζον περιβαλλοντικό ζήτημα. Είναι λοιπόν, επιτακτική η ανάγκη να ληφθούν οι απαραίτητες ενέργειες για την επίλυση αυτού του προβλήματος εξετάζοντας λεπτομερώς τις δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης των ΑΕΚΚ. Υπάρχουν στόχοι που πρέπει να επιτευχθούν από όλα τα κράτη μέλη της ΕΕ, εκ των οποίων και η Ελλάδα.

Θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανακύκλωση αδρανών υλικών με σκοπό την παραγωγή νέου σκυροδέματος καθώς και η αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκύπτουν. Συγκεκριμένα, μέσα από την εργασία αυτή επιδιώκεται η εμβάθυνση της ανάγκης για ανακύκλωση και ο ρόλος αυτής σε περιβαλλοντικό επίπεδο ώστε το τεράστιο ρεύμα των αποβλήτων να αποκτήσει μια πιο βέβαιη αντιμετώπιση.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας γίνεται μια εισαγωγή σχετικά με το ρεύμα των ΑΕΚΚ, αναλύοντας τα χαρακτηριστικά και τις κατηγορίες που το περιγράφουν. Το μεγαλύτερο όμως μέρος της διπλωματικής περιλαμβάνει την ανάλυση σκυροδέματος με τα εξής κατά σειρά ανακυκλωμένα αδρανή: σκυρόδεμα, ασφαλικά υλικά, κεραμικά υλικά, γύψος, γυαλί, ξύλο, πετρώματα και πλαστικό. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην ανακύκλωση των παραπάνω αδρανών καθώς και πως επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά και τις αντοχές του παραγόμενου σκυροδέματος. Παρουσιάζονται επίσης αναφορές από έρευνες που έχουν διεξαχθεί όπου εστιάζουν στα προβλήματα του παραγόμενου σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή, παρουσιάζοντας τρόπους αντιμετώπισης. Συνεχίζοντας, μέσα από την εργασία, προσπαθούμε να εστιάσουμε στη σύγκριση του νέου σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή με το παραδοσιακό σκυρόδεμα από φυσικά αδρανή σε μία προσπάθεια ανάδειξης των διαφορών τους.

ABSTRACT

Excavation, construction and demolition waste seems to be the most important and largest waste streams. Excavation, construction and demolition waste in Europe represents 25% -30% of all waste as well as the construction industry, from which they come, is one of the largest consumers of raw materials in the world. These materials include materials such as concrete, ceramics, plaster, wood, etc., most of which are possible and necessary to be reused or recycled, as they are non-renewable sources. The unexpected export and use of aggregates used in the production of building materials and their subsequent disposal is a major environmental issue. It is therefore imperative that the necessary steps be taken to resolve this problem by examining in detail the possibilities of reuse and recycling of Excavation, construction and demolition waste. There are goals to be achieved by all EU Member States, including Greece.

The subject of this dissertation is the recycling of aggregates in order to produce new concrete and to address the problems that arise. In particular, this work seeks to deepen the need for recycling and its role at the environmental level so that the huge stream of waste can be treated more confidently.

In the first part of the work, an introduction is made about the current of Excavation, construction and demolition waste, analyzing the characteristics and the categories that describe it. But most of the dissertation includes the analysis of concrete with the following in order recycled aggregates: concrete, asphalt materials, ceramic materials, plaster, glass, wood, rocks and plastic. Special emphasis is given to the recycling of the above aggregates as well as how they affect the characteristics and strengths of the produced concrete. There are also reports from research that focuses on the problems of concrete produced from recycled aggregates, presenting ways to deal with it. Continuing, through the work, we try to focus on the comparison of the new concrete from recycled aggregate with the traditional concrete from natural aggregate in an attempt to highlight their differences.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ABSTRACT	2
Κατάλογος Εικόνων	9
Κατάλογος Πινάκων	11
Ευχαριστίες	12
Λεξιλόγιο	13
Εισαγωγή	14
1. Απόβλητα εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ)	15
1.1 Ποιοτική σύσταση ρεύματος ΑΕΚΚ	15
1.2 Χαρακτηριστικά και κατηγορίες ΑΕΚΚ	15
1.2.1 Απόβλητα από κατασκευές	16
1.2.2 Απόβλητα από κατεδαφίσεις	17
1.2.3 Απόβλητα από εκσκαφές	18
1.2.4 Απόβλητα από έργα οδοποιίας	19
1.2.5 Απόβλητα που δημιουργούνται σε εργοτάξια	20
1.2.6 Απόβλητα από φυσικές καταστροφές	20
1.3 Επικίνδυνα υλικά στα ΑΕΚΚ	22
1.4 ΑΕΚΚ στην Ελλάδα	23
1.5 Ανησυχίες που προκαλεί η συγκέντρωση των ΑΕΚΚ	24
2. Επεξεργασία, επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση ΑΕΚΚ	25
2.1 Επεξεργασία	26
2.2 Η ανάγκη της επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης	26
2.3 Ανακύκλωση ΑΕΚΚ	27
2.3.1 Πλεονεκτήματα ανακύκλωσης	28
2.3.2 Διαδικασία ανακύκλωσης	28
3. Σκυρόδεμα από ανακυκλωμένο αδρανές σκυρόδεμα	32
3.1 Τα οφέλη της χρήσης ανακυκλωμένου αδρανούς σκυροδέματος (ΑΑΣ)	32
3.1.1 Περιβαλλοντική προσέγγιση	33
3.1.2 Οικονομική Προσέγγιση	35
3.2 Παραγωγή	35
3.3 Θεώρηση για τη χρήση ανακυκλωμένου λεπτόκοκκου αδρανούς σκυροδέματος	37

3.4	Ανακύκλωση παλαιών σκυροδεμάτων	38
3.4.1	Διαδικασία ανακύκλωσης.....	39
3.5	Χαρακτηριστικά ανακυκλωμένου αδρανούς σκυροδέματος.....	41
3.5.1	Περιεχόμενο κονιάματος	41
3.5.2	Απορροφητικότητα	42
3.6	Χαρακτηριστικά σκυροδέματος με ανακυκλωμένο αδρανές σκυροδέμα	42
3.6.1	Εργασιμότητα	42
3.6.2	Πυκνότητα.....	42
3.6.3	Αντοχή σε θλίψη	43
3.6.4	Μέτρο ελαστικότητας	43
3.6.5	Αντοχή σε κάμψη	43
3.6.6	Αντοχή σε εφελκυσμό	44
3.6.7	Συστολή ξήρανσης.....	44
3.6.8	Ερπυσμός.....	44
3.6.9	Διαπερατότητα.....	45
3.6.10	Αντοχή στη διείσδυση χλωριόντων ιόντων	45
3.6.11	Ιδιότητες θραύσης	45
3.6.12	Συμπεράσματα	45
3.7	Τρόποι βελτίωσης της λειτουργίας του σκυροδέματος από ΑΑΣ.....	45
3.7.1	Ιπτάμενη τέφρα.....	46
3.7.2	Σκωρία υψικαμίνου	46
3.7.3	Προσέγγιση μίξης δύο σταδίων (TSMA)	47
3.7.4	Προσέγγιση ανάμειξης κονιάματος	47
3.7.5	Προσέγγιση ανάμειξης με άμμο	47
3.7.6	Ενσωμάτωση ινών στο μίγμα σκυροδέματος ΑΑΣ.....	47
4.	Σκυρόδεμα από ανακυκλωμένα αδρανή ασφαλτικά υλικά.....	49
4.1	Γενικά	49
4.2	Μορφές ανακύκλωσης.....	50
4.2.1	Ψυχρή ανακύκλωση οδοστρωμάτων (Cold in Place Recycling CIPR).....	51
4.2.2	Θερμή ανακύκλωση οδοστρωμάτων	55
4.3	Αναμόρφωση του ασφαλτικού οδοστρώματος (reshape).....	57
4.4	Επαναδιάστρωση του παλιού οδοστρώματος με προσθήκη υλικού χωρίς ανάμιξη (repave).....	57

4.5	Επανάμιξη του παλαιού υλικού οδοστρώματος με νέο ασφαλτικό μίγμα (remix)	57
4.6	Θερμή επιτόπια ανακύκλωση οδοστρωμάτων (Hot In Place Recycling, HIPR)	58
4.7	Λειτουργία συμβατικής θέρμανσης οδοστρώματος (Conventional Heater)	59
4.8	Ανάμιξη ασφάλτου και αδρανών υλικών	63
4.9	Συμπεράσματα	65
4.9.1	Σύγκριση των δύο μεθόδων επιτόπιας θερμής ανακύκλωσης	65
4.9.2	Πλεονεκτήματα ψυχρής ανακύκλωσης	65
4.9.3	Πλεονεκτήματα θερμής εναντίων ψυχρής επιτόπιας ανακύκλωσης	66
4.9.4	Πλεονεκτήματα θερμής επιτόπιας ανακύκλωσης	66
5.	Σκυρόδεμα από ανακυκλωμένα αδρανή κεραμικά	67
5.1	Περιβαλλοντική προσέγγιση	67
5.1.1	Επαναχρησιμοποίηση	67
5.1.2	Ανακύκλωση	68
5.2	Ιδιότητες σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή κεραμικά	69
5.2.1	Εργασιμότητα	69
5.2.2	Θλιπτική δύναμη	70
5.2.3	Αντοχή εφελκυσμού	70
5.2.4	Μέτρο ελαστικότητας	71
5.3	Ιδιότητες χονδρόκοκκων ανακυκλωμένων κεραμικών αδρανών	71
5.4	Ιδιότητες λεπτόκοκκων ανακυκλωμένων κεραμικών αδρανών	71
5.5	Ιδιότητες σκυροδέματος με λεπτόκοκκα ανακυκλωμένα κεραμικά αδρανή	72
5.5.1	Εργασιμότητα	73
5.5.2	Πυκνότητα	73
5.5.3	Αντοχή σε θλίψη	73
5.5.4	Αντοχή σε εφελκυσμό	74
5.5.5	Μέτρο ελαστικότητας	75
5.5.6	Αντίσταση τριβής	75
5.5.7	Επίδραση των υπερπλαστικοποιητών	76
5.5.8	Συμπεράσματα	77
6.	Σκυρόδεμα από ανακυκλωμένο αδρανή γύψο	78
6.1	Γενικά	78
6.2	Πλεονεκτήματα γύψου	78

6.3	Φυσικός γύψος.....	78
6.4	Απόρριψη σε ΧΥΤΑ.....	79
6.5	Ανακύκλωση.....	79
6.5.1	Εμπόδια στην ανακύκλωση	80
6.6	Πρωθητικοί παράγοντες.....	80
6.7	Απόβλητα γύψου.....	81
6.7.1	Τύποι απορριμμάτων γύψου	81
6.8	Συνδυασμός γύψου με ιπτάμενης τέφρας	81
6.8.1	Μελέτες για τα μειονεκτήματα γύψου και τέφρας.....	82
6.8.2	Εργαστηριακό πείραμα	83
6.8.3	Χαρακτηριστικά υλικών	83
6.8.4	Δοκιμή υγρασίας.....	83
6.8.5	Θλιπτική αντοχή.....	83
6.8.6	Επίδραση γύψου και τέφρας σε φυσικές ιδιότητες.....	83
6.8.7	Μελλοντική έρευνα.....	84
7.	Σκυρόδεμα από ανακυκλωμένο αδρανές γυαλί.....	85
7.1	Περιβαλλοντική προσέγγιση.....	85
7.1.1	Επαναχρησιμοποίηση	85
7.1.2	Ανακύκλωση ηλεκτρικών λαμπτήρων.....	87
7.2	Αλκαλοπυριτική Αντίδραση	90
7.2.1	Επίδραση της αλκαλοπυριτικής αντίδρασης στο σκυρόδεμα με ανακυκλωμένο αδρανές γυαλί.....	90
7.3	Ιδιότητες σκυροδέματος με λεπτόκοκκο ανακυκλωμένο αδρανές γυαλί	93
7.3.1	Εργασιμότητα	93
7.3.2	Φρέσκια και ξηρή πυκνότητα	93
7.3.3	Δοκιμή αντοχής σε θλίψη 7 ημερών.....	94
7.3.4	Δοκιμή αντοχής σε θλίψη 28 ημερών.....	94
7.3.5	Αντοχή σε κάμψη.....	94
7.3.6	Μέτρο ελαστικότητας	95
7.3.7	Συστολή ξήρανσης.....	95
7.4	Πολυμερές σκυροδέματος με ανακυκλωμένο αδρανές γυαλί	95
7.4.1	Φυσικά χαρακτηριστικά.....	95
7.4.2	Αντοχή εφελκυσμού.....	96

7.4.3	Θλιπτική αντοχή.....	97
7.4.4	Αισθητική προσέγγιση	97
8.	Σκυρόδεμα από ανακυκλωμένο αδρανές ξύλο.....	99
8.1	Γενικά	99
8.2	Κατηγορίες ξύλου	99
8.3	Ανακύκλωση ξύλου	100
8.3.1	Ανακύκλωση	101
8.3.2	Διάθεση Ανακύκλωσης από εταιρείες	102
8.3.3	Εμπόδια ανακύκλωσης.....	102
8.3.4	Καταλληλότητα αποβλήτων ανακύκλωσης ξύλου.....	104
8.4	Διάθεση υγειονομικής ταφής	105
8.5	Επαναχρησιμοποίηση	105
8.6	Ανάκτηση ενέργειας	105
8.7	Προσθήκη ξύλου στο σκυρόδεμα και αντοχή	105
8.8	Πλεονεκτήματα ξυλείας	106
8.9	Μειονεκτήματα ξυλείας	107
8.10	Τέφρα ξύλου	107
8.10.1	Ιδιότητες της τέφρας ξύλου.....	108
8.10.2	Χρήσεις τέφρας ξύλου	108
8.11	Εισαγωγή.....	110
8.12	Σύνθετα ξύλου-τσιμέντου	110
8.13	Ζητήματα συμβατότητας με ξύλο-τσιμέντο.....	111
9.	Σκυρόδεμα από ανακυκλωμένα αδρανή πετρώματα.....	113
9.1	Γρανίτης	113
9.1.1	Εργασιμότητα	113
9.1.2	Πυκνότητα χύδην σκληρυμένου σκυροδέματος.....	114
9.1.3	Αντοχή σε θλίψη	114
9.1.4	Δοκιμή αντοχής σε κάμψη	114
9.1.5	Αντοχή στην τριβή	115
9.1.6	Δοκιμή απορρόφησης νερού	115
9.1.7	Δοκιμή διείδυσης νερού	115
9.2	Μάρμαρο.....	116

9.2.1	Πυκνότητα.....	117
9.2.2	Περιεκτικότητα σε αέρα.....	117
9.2.3	Εργασιμότητα	118
9.2.4	Αντοχή σε εφελκυσμό και θλίψη	118
9.3	Ασβεστόλιθος.....	119
9.3.1	Θλιπτική δύναμη.....	120
9.3.2	Αντοχή σε θλίψη σκυροδέματος με απόβλητα ασβεστόλιθου και σκόνης μαρμάρου.....	120
9.3.3	Αντοχή σε εφελκυσμό σκυροδέματος με απόβλητα ασβεστόλιθου και σκόνης μαρμάρου	121
9.3.4	Αντοχή σε κάμψη σκυροδέματος με απόβλητα ασβεστόλιθου και σκόνης μαρμάρου.....	121
9.3.5	Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος με απόβλητα ασβεστόλιθου και σκόνης μαρμάρου.....	121
9.3.6	Υδατοπερατότητα	121
9.4	Βασάλτης	122
9.4.1	Διαπερατότητα.....	123
9.4.2	Αντοχή σε θλίψη	123
9.4.3	Αναλογίες τριβής.....	124
9.4.4	Επίδραση θειικού άλατος.....	124
9.4.5	Συνδυασμός απόβλητης πούδρας μαρμάρου και απόβλητου βασάλτη ...	124
10.	Σκυρόδεμα από ανακυκλωμένο αδρανές πλαστικό	125
10.1	Εισαγωγή.....	125
10.2	Υλικά και μέθοδοι.....	127
10.2.1	Υλικά	127
10.2.2	Μέθοδοι.....	128
	129
10.3	Αποτελέσματα και συζήτηση.....	129
10.3.1	Αντοχή σε θλίψη	129
10.3.2	Αντοχή εφελκυσμού διάσπασης.....	132
10.3.3	Αλλαγή μάζας.....	134
11.	Συμπεράσματα	137
	Βιβλιογραφία	150

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 Κατασκευαστικά απόβλητα Πηγή: https://gosmartbricks.com/construction-waste/	17
Εικόνα 1.2 Διαχείριση αποβλήτων κατεδαφίσεων Πηγή: Γαρδέλης, Γ. (2011)	18
Εικόνα 1.3 Χώματα εκσκαφών Πηγή: Jarred O'dell (2016).....	19
Εικόνα 1.4 Καθίζηση οδοστρώματος Πηγή: Καμελίδης, Α. Φ. (2020).....	20
Εικόνα 1.5 Τυπική σύσταση ΑΕΚΚ Πηγή: Γαρδέλης, Γ. (2011).....	22
Εικόνα 2.1 Κύκλος ζωής δομικού υλικού Πηγή: Γαρδέλης, Γ. (2011)	25
Εικόνα 2.2 Διαχείριση αποβλήτων κατεδαφίσεων στην οικοδομή Πηγή: Γαρδέλης, Γ. (2011).....	30
Εικόνα 2.3 Διαχείριση αποβλήτων κατασκευών στην οικοδομή Πηγή: Γαρδέλης, Γ. (2011).....	30
Εικόνα 2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα επεξεργασίας on και off site Πηγή: Αναστασίου, Γ., & Μπέλλος, Μ. (2013)	31
Εικόνα 3.1 Ανακυκλωμένο αδρανές σκυρόδεμα Πηγή: https://www.eesc.europa.eu/ ...	32
Εικόνα 3.2 Ανακυκλωμένο λεπτόκοκκο και χονδρόκοκκο σκυρόδεμα Πηγή: Xiao, J., Ma, Z., & Ding, T. (2016).....	36
Εικόνα 3.3 Συγκρότημα ανακύκλωσης παλαιού σκυροδέματος. Πηγή : Εφραιμίδης Χ. (2008).....	39
Εικόνα 3.4 Συγκρότημα ανακύκλωσης παλαιού σκυροδέματος. Πηγή : Εφραιμίδης Χ..	41
Εικόνα 4.1 Μορφές ανακύκλωσης ασφαλτικών οδοστρωμάτων	50
Εικόνα 4.2 Διάταξη μηχανημάτων στην επιτόπια ψυχρή ανακύκλωση.....	53
Εικόνα 4.3 Διάταξη μηχανημάτων μιας διέλευσης στην επιτόπια ψυχρή ανακύκλωση οδοστρωμάτων.....	54
Εικόνα 4.4 Μηχανήματα ψυχρής ανακύκλωσης οδοστρωμάτων.....	55
Εικόνα 4.5	55
Εικόνα 4.6	56
Εικόνα 4.7	56
Εικόνα 4.8 Σταθερές εγκαταστάσεις θερμής ανακύκλωσης οδοστρώματος.	56
Εικόνα 4.9 Κατάλληλος χρόνος επιλογής της θερμής επιτόπιας ανακύκλωσης	58
Εικόνα 4.10 Προθερμαντήρας οδοστρώματος (80-110°C)	59
Εικόνα 4.11 Προθερμαντήρας οδοστρώματος (140-150°C)	59
Εικόνα 4.12 Αναζωογονητικός παράγοντας	60
Εικόνα 4.13 Μηχάνημα με ατσάλινα δόντια και υδραυλικά ελατήρια	60
Εικόνα 4.14 Αναστρέψιμες κεφαλές	61
Εικόνα 4.15 Κατανομή και επαναδιάστρωση νέου ασφαλτομίγματος.....	61
Εικόνα 4.16 Πάτημα νέας ασφάλτου με οδόστρωμα	62
Εικόνα 4.17 Τελική μορφή ασφάλτου	62

Εικόνα 4.18 Μηχανή τοποθέτησης ασφάλτου σκυροδέματος σε λειτουργία στο Laredo του Τέξας.....	64
Εικόνα 5.1 Ανακυκλωμένα αδρανή τούβλα Πηγή: Anna Halick, Pawel Ogrodnik, Bartosz Zegardło (2013).....	72
Εικόνα 5.2 Σκυρόδεμα από ανακυκλωμένα αδρανή τούβλα Πηγή: Anna Halick, Pawel Ogrodnik, Bartosz Zegardło (2013).....	76
Εικόνα 5.3 1: χονδρόκοκκα αδρανή είδη υγιεινής 2: λεπτόκοκκα αδρανή είδη υγιεινής Πηγή: Anna Halick, Pawel Ogrodnik, Bartosz Zegardło (2013).....	77
Εικόνα 6.1	84
Εικόνα 7.1 Ανακυκλωμένο απόβλητο γυαλί Πηγή: Esraa Emam Ali , Sherif H. Al-Tersawy (2012)	85
Εικόνα 7.2 Είσοδοι λαμπτήρων στο διαχωριστή Πηγή: Γαϊτανέλης, Δ. (2015)	88
Εικόνα 7.3 Σημεία συλλογής υαλοθραύσματος και σιδηρομαγνητικών στοιχείων Πηγή: Γαϊτανέλης, Δ. (2015)	89
Εικόνα 7.4 Σύστημα ανακύκλωσης γυαλιού Balcan Πηγή: http://www.cfl-lamprecycling.com/	89
Εικόνα 7.5 Επίδραση της Αλκαλοπυριτικής Αντίδρασης ASR στο σκυρόδεμα Πηγή: Deschênes, R. Albert (2017).....	92
Εικόνα 7.6 Αισθητική των πολυμερών σκυροδεμάτων σε διαφορετικές περιεκτικότητες ΑΑΓ, (α) 100% περιεκτικότητα, (β) 50% περιεκτικότητα, (γ) 30% περιεκτικότητα Πηγή: Zegardło, B et al. (2018).....	98
Εικόνα 8.1 Θρυμματισμός ξύλου και παραγωγή MDF.....	104
Εικόνα 8.2 Εργάτες έτοιμοι να τοποθετήσουν φρέσκο σκυρόδεμα ξύλινης τέφρας δομικής ποιότητας	109
Εικόνα 8.3 Ολοκλήρωση της πλάκας επίδειξης σκυροδέματος δομικής ποιότητας ενσωματώνει τέφρα ξύλου, τοποθετήθηκε το 2001	109
Εικόνα 9.1 : Ανακύκλωση αποβλήτων γρανίτη Πηγή: Ostrowski, K., Stefaniuk, D., Sadowski, Ł., Krzywiński, K., Gicala, M., & Rózańska, M. (2020)	113
Εικόνα 9.2 Εικόνα SEM απόβλητα γυαλισμένου γρανίτη Πηγή: Chen, J. J., Li, B. H., Ng, P. L., & Kwan, A. K. H. (2021).....	116
Εικόνα 9.3 Ανακύκλωση αποβλήτων μαρμάρου Πηγή: Seghir, N. T., Mellas, M., Sadowski, Ł., & Žak, A. (2018).....	117
Εικόνα 9.4 Σκόνη απόβλητων μαρμάρου Πηγή: Ashish, D. K. (2019).....	119
Εικόνα 9.5 Απόβλητα μαρμάρου Πηγή: Kore, S. D., & Vyas, A. K. (2016).....	119
Εικόνα 9.6 (A) τεμάχια ασβεστόλιθου , (B) απόβλητα ασβεστόλιθου Πηγή: Elçi, H., Türk, N., & İşintek, İ. (2015).....	120
Εικόνα 9.7 Απόβλητα ασβεστόλιθου Πηγή: Sudarshan Reddy, Y., Suvarna, B., Prasad, M., Sunitha, V., & Ramakrishna Reddy, M. (2020).....	122
Εικόνα 9.8 Απόβλητα βασάλτη σε λατομείο Πηγή: https://www.stonecontact.com/	123

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.1	65
Πίνακας 4.2	65
Πίνακας 8.1	112
Πίνακας 11.1 Συμπεράσματα σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή ανά κατηγορία	149

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της Διπλωματικής μας Εργασίας ευχαριστούμε τον επιβλέποντα καθηγητή κο. Αθανάσιο Αυτουσμή, για την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθεια που μας προσέφερε καθώς και για την υπόδειξη της μεθοδικότητας με την οποία έπερπε να πραγματοποιηθεί η εργασία.

Ευχαριστούμε ακόμα την καθηγήτρια Σταυρούλα Δενεζάκη για την συμμετοχή της και βοήθειά της ως προς το πρόγραμμα πνευματικών δικαιωμάτων.

Λεξιλόγιο

ΑΑΓ: Ανακυκλωμένο Αδρανές Γυαλί

ΑΑΣ: Ανακυκλωμένο Αδρανές Σκυρόδεμα

ΑΑΣ100: Ανακυκλωμένο Αδρανές Σκυρόδεμα με αναλογία αντικατάστασης 100%

ΑΑΣ50: Ανακυκλωμένο Αδρανές Σκυρόδεμα με αναλογία αντικατάστασης 50%

ΑΕΚΚ: Απόβλητα Εκσκαφών Κατασκευών και Κατεδαφίσεων

ΑΗΗΕ: Απόβλητα Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού

ΑΚΑ: Ανακυκλωμένα Κεραμικά Αδρανή

ΕΕ: Ευρωπαϊκή Ένωση

ΕΚΑ: Ευρωπαϊκός Κατάλογος Αποβλήτων

ΕΥΧΑ: Ελεγχόμενο Υλικό Χαμηλής Ανοχής

ΗΗΕ: Ηλεκτρικών και Ηλεκτρονικών Εξοπλισμών

ΧΥΤΑ: Χώροι Υγειονομικής Ταφής

ΑΣΡ: Αλκαλοπυριτική Αντίδραση

PET: Πολυαιθυλένιο

PTFE: Πολυτετραφθοροαιθυλένιο

T SMA: Προσέγγιση Μίξης Δύο Σταδίων

Εισαγωγή

Τα απόβλητα που προέρχονται από τις διαδικασίες εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων καταλαμβάνουν ένα τεράστιο ποσοστό των συνολικών ετήσιων αποβλήτων που παράγονται. Όσον αφορά την υπάρχουσα διαχείριση αδρανών αποβλήτων στην Ελλάδα, υπάρχουν περιορισμένα κεντρικά δίκτυα οργάνωσης για τη συλλογή και χρήση των υλικών που περιέχονται σε αυτά τα απόβλητα. Λίγες είναι οι κινήσεις που έχουν γίνει για την αξιοποίηση των υλικών αυτών και συνήθως προέρχονται από τους ανάδοχους των κατασκευαστικών έργων. Συγκεκριμένα, τα υλικά που ανακυκλώνονται είναι λιγοστά, όπως το παλαιό σκυρόδεμα, το γυαλί και το ξύλο, ενώ τα περισσότερα δεν αξιοποιούνται σωστά αφού καταλήγουν σε ΧΥΤΑ ή σε μη κατάλληλους χώρους.

Το περιεχόμενο της διπλωματικής εργασίας αποτελεί ενδιαφέρον όσον αναφορά τη λήψη μέτρων σε όλα τα επίπεδα δομικών δραστηριοτήτων. Είναι απαραίτητα η σωστή αξιοποίηση φυσικών πρώτων υλών και ενέργειας, ο περιορισμός των αποβλήτων που προκύπτουν και η μείωση των αέριων ρύπων. Πρέπει να δοθεί σημασία στη διάρκεια του κύκλου ζωής των κτιρίων όπως και στο γεγονός ότι στην χώρα μας, ο κύριος φέρων οργανισμός των κατασκευών αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα, για να γίνει αντιληπτή η σημασία της ανάλυσης του κύκλου ζωής ως μέσο περιβαλλοντικής διαχείρισης.

Βασικός στόχος είναι να εξεταστεί ο τομέας της επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης των υλικών από οικοδομικές εργασίες καθώς αποτελεί μείζον θέμα συζήτησης για τον κλάδο των μηχανικών. Επιπλέον, ένας εξίσου βασικός σκοπός είναι η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με τις διαδικασίες παραγωγής σκυροδέματος, όπως για παράδειγμα οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αλλά και η ανεξέλεγκτη χρήση των φυσικών πόρων. Ειδικότερα, θα αναλυθούν οι λόγοι που η ανακύκλωση είναι απαραίτητη στην σύγχρονη εποχή, η διαδικασία της ανακύκλωσης, τα χαρακτηριστικά και οι αντοχές του νέου σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή υλικά σε σχέση με τις ιδιότητες του συμβατικού σκυροδέματος. Ακόμα, αν και κάποιες αντοχές του σκυροδέματος με ανακυκλωμένα υλικά φαίνονται να είναι μειωμένες σε σχέση με το συμβατικό, παρατίθενται τρόποι για την βελτίωσή τους.

Τα υλικά από σκυρόδεμα φυσικής προέλευσης δεν είναι απεριόριστα. Αν δε ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα σύντομα θα αποτελούν προϊόντα σε έλλειψη. Ως επιβεβαίωση στο παραπάνω έρχεται η αύξηση του κόστους των αδρανών υλικών, αλλά και οι μεγάλες αποστάσεις μεταφοράς από τον τόπο παραγωγής στο εργοτάξιο επεξεργασίας. Έτσι, με την ανακύκλωση μειώνονται η ανάγκη για κατάχρηση της φύσης καθώς και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την διαδικασία της εξόρυξης. Εφόσον η ανακύκλωση πραγματοποιείται σε τοποθεσίες κοντά στα εργοτάξια, έχει ως αποτέλεσμα να

περιορίζει την ποσότητα των αποβλήτων όπως και τους περιττούς χώρους τοποθέτησής τους.

1. Απόβλητα εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ)

Τα απορρίμματα που προκύπτουν από διάφορα κατασκευαστικά έργα, τα λεγόμενα Απόβλητα Εκσκαφών Κατασκευών και Κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ), δημιουργούν εκατομμύρια τόνους απορριμμάτων κάθε χρόνο. Λίγες είναι οι δράσεις που έχουν ληφθεί και συνήθως λαμβάνονται από κατασκευαστικές εταιρίες καθώς επίσης είναι ελάχιστα τα υλικά που επαναχρησιμοποιούνται. Ορισμένες ποσότητες καταλήγουν σε χωματερές, ενώ οι μεγαλύτερες ποσότητες εναποτίθενται είτε σε μη ελεγχόμενες είτε σε ακατάλληλες περιοχές.

Τα απόβλητα που παράγονται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός κτιρίου χαρακτηρίζονται από τη σύστασή τους και από τη τελική ποσότητα διάθεσής τους καθώς κυρίως προέρχονται από τις εργασίες κατασκευής και κατεδάφισης.

1.1 Ποιοτική σύσταση ρεύματος ΑΕΚΚ

Τα ΑΕΚΚ θεωρούνται ως απόβλητα με βάση τα εξής:

- Άρθρου 2 (στοιχείο α) της υπ' αριθ. 50910/2003 ΚΥΑ (ΦΕΚ Β' 1909)
- Παρ. 4 του άρθρου 2 του Ν.2939/2001 που περιλαμβάνεται στο
- Παράρτημα 1 του άρθρου 17 του διατάγματος ΦΕΚ Β' 1312/24/08/2010

Συγκεκριμένα, ως ΑΕΚΚ χαρακτηρίζεται κάθε υλικό που υπάρχει στον Ευρωπαϊκό Κατάλογο Αποβλήτων (ΕΚΑ), ο οποίος έχει θεσπιστεί από την Ευρωπαϊκή Κοινότητα. Αυτός ο κατάλογος έχει δυναμικό χαρακτήρα, που σημαίνει ότι ενδέχεται να έχει υποστεί διάφορες τροποποιήσεις με βάση τα νέα δεδομένα που προκύπτουν (Ευρωπαϊκή κοινότητα 2000).

1.2 Χαρακτηριστικά και κατηγορίες ΑΕΚΚ

Σε γενικές γραμμές, τα ΑΕΚΚ προέρχονται από τις εξής δραστηριότητες:

- Οικοδομικές εργασίες: κατασκευή, κατεδάφιση, ανακαίνιση, συντήρηση, περιφράξεις και περιφράξεις μεμονωμένων κατοικιών, κτιρίων και κτιριακών ομάδων.

- Έργα τεχνικής υποδομής: κατεδάφιση, κατασκευή ή συντήρηση δρόμων, γεφυρών, σηράγγων, δικτύων αγωγών αποχέτευσης, πεζοδρομίων, ανακαινίσεων κ.λπ.
- Φυσικές/τεχνολογικές καταστροφές: σεισμοί, πλημμύρες, κατολισθήσεις, δυσμενείς καιρικές συνθήκες και άλλες κατασκευαστικές καταστροφές.

Στον όρο ΑΕΚΚ περιλαμβάνεται ένα μεγάλο εύρος αποβλήτων. Έτσι έχουν καταταχθεί σε διαφορετικές κατηγορίες ανάλογα με τις διαδικασίες από όπου έχουν προέλθει:

- Απόβλητα από κατασκευές
- Απόβλητα κατεδάφισης
- Απόβλητα από εκσκαφές
- Απόβλητα από έργα οδοποιίας
- Απόβλητα που δημιουργούνται σε εργοτάξια
- Απόβλητα που προκαλούνται από φυσικές καταστροφές

1.2.1 Απόβλητα από κατασκευές

Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται τα απόβλητα που παράγονται από οποιαδήποτε κατασκευαστική δραστηριότητα, οι πιο σημαντικές από τις οποίες είναι η κατασκευή νέων κτιρίων και η ανακαίνιση υπαρχόντων κατασκευών. Τα απόβλητα που βρίσκονται σε αυτήν την κατηγορία είναι καθαρά ή σπασμένα τούβλα, οπλισμένο ή μη σκυρόδεμα, σίδερα διαφόρων διαμέτρων, κεραμικά, άθικτα παράθυρα, μεταλλικά υλικά, ξύλινες κατασκευές, γυαλί, γύψος, πλαστικά, υδραυλικοί σωλήνες, ηλεκτρικά εξαρτήματα, μονωτικά υλικά, ασφαλτικά υλικά και επικίνδυνα απόβλητα αμιάντου (Καμελίδης, Α. Φ,2020).



Εικόνα 1.1 Κατασκευαστικά απόβλητα Πηγή:
<https://gosmartbricks.com/construction-waste/>

1.2.2 Απόβλητα από κατεδαφίσεις

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει όλα τα απόβλητα από κατεδάφιση κτιρίων. Τέτοια απόβλητα είναι, σπασμένα τούβλα, κομμάτια οπλισμένου και μη σκυροδέματος, πέτρες, υλικό πλήρωσης (χώμα, χαλίκια, άμμος), σιδηρούχα μέταλλα, ανάμεικτα μπάζα, κεραμικά, μονωτικά, ασφαλτικά, σπασμένα γυαλιά και διάφορα άλλα απόβλητα (Καμελίδης, Α. Φ, 2020). Τα υλικά κατεδαφίσεων χαρακτηρίζονται από μεγάλη ετερογένεια, η οποία είναι αποτέλεσμα πλήρους ή μερικής κατεδάφισης του κτιρίου. Η σύνθεση αυτών των υλικών ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο, την ηλικία, τη μορφή, τον σκοπό και την κλίμακα του κτιρίου ή της κατασκευής. Για παράδειγμα, εάν επιτρέπεται στο συνεργείο να εισέλθει στο κτίριο πριν από την κύρια φάση της κατεδάφισης, μπορεί να ανακυκλωθεί μεγάλη ποσότητα επαναχρησιμοποιήσιμων υλικών όπως ξύλο και μέταλλο. Αντίθετα, εάν η κατεδάφιση γίνεται με ανατινάξεις ή με χρήση βαρέων μηχανημάτων, τα απόβλητα που δημιουργούνται αναμειγνύονται. Επίσης, η ιστορική, πολιτιστική και οικονομική αξία του κτιρίου παίζει σημαντικό ρόλο στην κατεδάφιση.

Τα απόβλητα αυτά είναι δύσκολο να διαχειριστούν καθώς σε σύγκριση με τις άλλες κατηγορίες αποβλήτων, αυτά φαίνεται να είναι τα μεγαλύτερα σε όγκο.



Εικόνα 1.2 Διαχείριση αποβλήτων κατεδαφίσεων Πηγή: Γαρδέλης, Γ. (2011)

1.2.3 Απόβλητα από εκσκαφές

Τα απόβλητα από εκσκαφές αποτελούνται κυρίως από χώμα, άμμο, χαλίκι, πέτρα, πηλό και οποιοδήποτε άλλο υλικό μπορεί να παραχθεί με εκσκαφή. Μη χρήσιμα υλικά εκσκαφής υπάρχουν σχεδόν σε όλες τις κατασκευαστικές δραστηριότητες, ειδικά σε υπόγεια οικοδομικά και γεωτεχνικά έργα μηχανικής. Οι ιδιότητες του χώματος εξαρτώνται από τον τύπο εδάφους καθώς και από άλλα ανάμεικτα υλικά που προέρχονται από την εκσκαφή (π.χ. ξύλα με χώμα), ενώ η σύνθεση των υλικών που έχουν εξορυχτεί εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από γεωλογικά χαρακτηριστικά.



Εικόνα 1.3 Χώματα εκσκαφών Πηγή: Jarred O'dell (2016)

1.2.4 Απόβλητα από έργα οδοποιίας

Τα απόβλητα της κατασκευής δρόμων μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- Διαδικασία κατασκευής, που συμπεριλαμβάνει διαδικασίες όπως την κοπή των υλικών, την διάστρωση υλικών (χώμα, άσφαλτος), την συμπύκνωσή τους καθώς και την ανάμειξή τους (χαλίκι, άμμος, σκύρα).
- Δομικά έργα, και συγκεκριμένα διαδικασίες όπως μορφοποίηση καλουπιών (ξυλότυποι, μεταλλότυποι) και κατασκευή της θεμελίωσης.
- Διαχείριση υλικών, που αποτελούνται από εργασίες παράδοσης, αποθήκευσης και διακίνησης των υλικών.

Τα απόβλητα από έργα οδοποιίας δεν προέρχονται μόνο από την κατεδάφιση και συντήρηση δρόμων, αλλά και από υπόγειους αγωγούς και ηλεκτρικές εγκαταστάσεις και έργα συντήρησης στην πόλη.



Εικόνα 1.4 Καθίζηση οδοστρώματος Πηγή: Καμελίδης, Α. Φ. (2020)

1.2.5 Απόβλητα που δημιουργούνται σε εργοτάξια

Αυτά τα απόβλητα μπορεί να είναι ξύλο, πλαστικό, χαρτί, γυαλί, μέταλλο, καλώδια και όλα τα υλικά που προκύπτουν συνήθως από χώρους κατασκευής, κατεδάφισης, επισκευής, ενίσχυσης, επέκτασης και ανακαίνισης. Πρέπει να σημειωθεί ότι μια μεγάλη ποσότητα απορριμμάτων στα εργοτάξια είναι υλικά συσκευασίας κατασκευαστικών υλικών.

1.2.6 Απόβλητα από φυσικές καταστροφές

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει υλικά που προέρχονται από τις καταστροφές της φύσης όπως τυφώνες, ανεμοστρόβιλους και σεισμούς. Τα υλικά της κατηγορίας αυτής είναι ανάμεικτα απορρίμματα τα οποία είναι δύσκολο να διαχωριστούν, δέντρα, υλικά οδοποιίας και υλικά από αμίαντο. Όπως και στις άλλες κατηγορίες έτσι και σε αυτή συμπεριλαμβάνεται το σκυρόδεμα, σπλισμένο και μη, υλικό πλήρωσης (χώμα, άμμος και χαλίκι) και διάφορα άλλα απόβλητα.

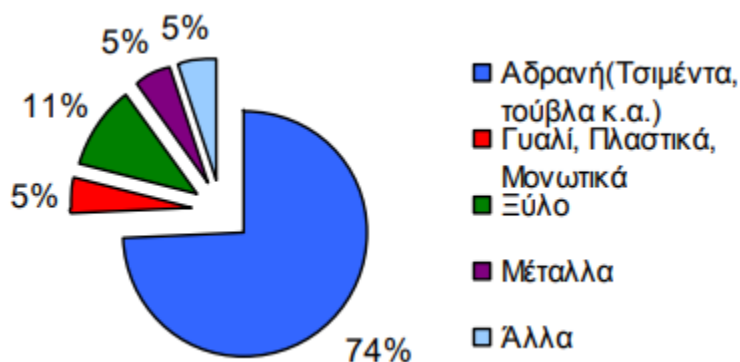
Σε κάθε περίπτωση, τα υλικά που προέρχονται από τις προαναφερθείσες κατασκευαστικές δραστηριότητες μπορεί να περιλαμβάνουν τα ακόλουθα υλικά, ανεξάρτητα από την προέλευσή τους:

- σκυρόδεμα

- τούβλα
- πλακάκια και κεραμικά
- μίγματα ή επιμέρους συστατικά από σκυρόδεμα , τούβλα, πλακάκια και κεραμικά ξύλο
- γυαλί
- πλαστικό
- μίγματα ορυκτής ασφάλτου
- λιθανθρακόπισσα και προϊόντα πίσσας
- χαλκό , μπρούντζο , ορείχαλκο
- αλουμίνιο
- μόλυβδο
- ψευδάργυρο
- σίδηρο και χάλυβα
- κασσίτερο
- ανάμεικτα μέταλλα
- καλώδια που περιέχουν πετρέλαιο, λιθανθρακόπισσα και άλλες επικίνδυνες ουσίες χρώματα και πέτρες
- μπάζα εκσκαφών
- μονωτικά υλικά
- υλικά δομικών κατασκευών που περιέχουν αμίαντο
- υλικά δομικών κατασκευών με βάση τον γύψο
- απόβλητα δομικών κατασκευών και κατεδαφίσεων που περιέχουν υδράργυρο απόβλητα δομικών κατασκευών και κατεδαφίσεων που περιέχουν PCB (π.χ. στεγανωτικά υλικά που περιέχουν PCB , δάπεδα με βάση ρητίνες που περιέχουν PCB, πυκνωτές που περιέχουν PCB κ.λπ)
- κόλλες
- γαλακτώματα
- χρώματα- βαφές
- ρητίνες (Γαρδέλης, Γ. (2011)).

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των απορριμμάτων κατασκευών και κατεδαφίσεων επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες, όπως:

- Περίοδος κατασκευής
- Είδος κατασκευής
- Βασικά υλικά κατασκευής
- Είδος και χρήση κατασκευών
- Τεχνικές κατασκευής
- Ιστορική, πολιτιστική και οικονομική αξία και σημασία της κατασκευής (Γαρδέλης, Γ. (2011)).



Εικόνα 1.5 Τυπική σύσταση ΑΕΚΚ Πηγή: Γαρδέλης, Γ. (2011)

1.3 Επικίνδυνα υλικά στα ΑΕΚΚ

Ανάλογα με τον τύπο των αποβλήτων που δημιουργούνται, τα ΑΕΚΚ μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- αδρανή και
- επικίνδυνα απόβλητα.

Τα αδρανή απόβλητα θεωρούνται απόβλητα που δεν υφίστανται σημαντικές φυσικές, χημικές ή βιολογικές αντιδράσεις, δεν είναι βιοδιασπώμενα και δεν προκαλούν δυσμενείς επιπτώσεις και επηρεάζουν άλλα υλικά που έρχονται σε επαφή με αυτά με τρόπο που μπορεί να προκαλέσει ρύπανση του περιβάλλοντος ή να θέσει σε κίνδυνο την υγεία του ανθρώπου.

Επικίνδυνα είναι τα απόβλητα που περιέχουν ουσίες ταξινομημένες ως τοξικές, εύφλεκτες, καρκινογόνες, ραδιενεργές, ερεθιστικές και μεταλλαξιογόνες και κάθε ουσία που μπορεί να επιδράσει αρνητικά το νερό, τον αέρα ή το έδαφος. Για όλα τα επικίνδυνα απόβλητα και τις μεθόδους διαχείρισής τους, υπάρχουν σχετικοί κανονισμοί και νομοθεσία (Οδηγία 91/689/EEC).

Τα επικίνδυνα απόβλητα συνιστάται να μην βρίσκονται μαζί με μη επικίνδυνα απόβλητα. Ορισμένοι τύποι ΑΕΚΚ δεν είναι επικίνδυνοι στην αρχική τους μορφή, αλλά κατά τη φάση της κατεδάφισης μπορεί να γίνουν επικίνδυνοι μέσω της ανάμειξης, της επεξεργασίας ή της απόρριψης. Μπορεί επίσης να μολύνουν τα μη επικίνδυνα υλικά, καθιστώντας τα ακατάλληλα για επαναχρησιμοποίηση ή ανακύκλωση.

Οι βλαβερές ουσίες που μπορούν να βρεθούν στα οικοδομικά απόβλητα είναι:

- Πρόσθετα σκυροδέματος με βάση διαλύτες
- Χημικές ουσίες για προστασία από την υγρασία
- Κόλλες και ρητίνες Γαλακτωματα με βάση την πίσσα
- Υλικά με βάση τον αμίαντο
- Ίνες ορυκτών (μόνωση)
- Βαφές και στρώματα επικάλυψης
- Υλικά με βάση τον αμίαντο
- Επεξεργασμένη ξυλεία Γυψοσανίδες (Γαρδέλης, Γ. (2011)).

Οι επικίνδυνες ουσίες που μπορούν να ανιχνευθούν στα απόβλητα κατεδάφισης είναι:

- Υλικά που περιέχουν αμίαντο
- Επεξεργασμένη ξυλεία
- Ορυκτές ίνες
- Ηλεκτρικός εξοπλισμός που πιθανόν να περιέχει τοξικές ουσίες
- Ψυκτικές μηχανές που περιέχουν χλωροφθοράνθρακες
- Συστήματα πυροπροστασίας που περιέχουν χλωροφθοράνθρακες (Γαρδέλης, Γ. (2011)).

1.4 ΑΕΚΚ στην Ελλάδα

Τα απόβλητα αποτελούν σημαντικό μέρος του συστήματος διαχείρισης απορριμμάτων στις περισσότερες βιομηχανικές χώρες. Η συλλογή και η διάθεση των οικοδομικών απορριμμάτων αντιπροσωπεύει μεγάλο ποσοστό των αστικών απορριμμάτων όσον αφορά τον όγκο μετακίνησης και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Υπολογίζεται ότι η ετήσια παραγωγή ισοδυναμεί με 300 εκατομμύρια τόνους στις χώρες της ΕΕ και περισσότερους από 3 εκατομμύρια τόνους στην χώρα μας (Αναστασίου, Γ., & Μπέλλος, Μ. (2013)).

Όσον αφορά την υπάρχουσα διαχείριση αδρανών αποβλήτων στην Ελλάδα, δεν υπάρχει κεντρικό δίκτυο οργάνωσης για τη συλλογή και χρήση των υλικών που περιέχονται σε αυτά τα απόβλητα. Λίγες είναι οι κινήσεις που έχουν γίνει για την αξιοποίηση των υλικών αυτών και συνήθως προέρχονται από τους ανάδοχους των κατασκευαστικών έργων.

Ένα μικρό μέρος της αχρησιμοποίητης ποσότητας θα αποσταλεί σε χωματερές ή σε παλιά λατομεία για αναγέννηση, ενώ μεγάλες ποσότητες υλικών, συνήθως ανεξέλεγκτη, απορρίπτονται σε ρέματα και στο περιβάλλον. Στους Χώρους Υγειονομικής Ταφής (ΧΥΤΑ), τα απόβλητα κατασκευών μετά από κατάλληλη επεξεργασία, αποτελούν αξιοποιήσιμα υλικά καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαμόρφωση των πρανών, την κατασκευή εσωτερικών δρόμων και την ημερήσια κάλυψη των απορριμμάτων. Η ποσότητα των οικοδομικών απορριμμάτων που καταλήγουν σε μια χωματερή είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη από την ποσότητα που απαιτείται για την κάλυψη των λειτουργικών αναγκών της. Τα οικοδομικά απόβλητα καταλαμβάνουν συνήθως μεγάλο μέρος των ΧΥΤΑ.

1.5 Ανησυχίες που προκαλεί η συγκέντρωση των ΑΕΚΚ

Η λήψη μέτρων σε όλα τα επίπεδα δομικών δραστηριοτήτων είναι αναγκαία. Είναι απαραίτητη η σωστή αξιοποίηση φυσικών πρώτων υλών και ενέργειας, ο περιορισμός των αποβλήτων που προκύπτουν και η μείωση των αέριων ρύπων. Πρέπει να δοθεί σημασία στη διάρκεια του κύκλου ζωής των κτιρίων όπως και στο γεγονός ότι στην Ελλάδα, ο κύριος φέρων οργανισμός των κατασκευών αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα, για να γίνει αντιληπτή η σημασία της ανάλυσης του κύκλου ζωής ως μέσο περιβαλλοντικής διαχείρισης.

Γενικά, το 40% της παγκόσμιας κατανάλωσης ανόργανων υλικών (άμμος, χαλίκι, ασβέστης) και το 25% της παγκόσμιας κατανάλωσης πρώτης δασικής ύλης διατίθεται για την κατασκευή κτιρίων. Ακόμη και η κατασκευή και η χρήση κτιρίων απορροφούν το 40% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας και το 16% της κατανάλωσης νερού (Αναστασίου, Γ., & Μπέλλος, Μ. (2013)). Αξίζει να σημειωθεί ότι τα αστικά απόβλητα που παράγονται στις Ηνωμένες Πολιτείες κάθε χρόνο, ισοδυναμούν με την ποσότητα των απορριμμάτων που παράγονται από την κατεδάφιση κτιρίων.

2. Επεξεργασία, επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση ΑΕΚΚ

Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα επιλογών επεξεργασίας και διάθεσης απορριμμάτων, μεταξύ των οποίων αναφέρεται ευρέως ως επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση και ανάκτηση από υλικά και ενέργεια με αυτή τη σειρά προτεραιότητας. Το πραγματικό φάσμα επιλογών διαχείρισης αποβλήτων ποικίλλει από περίπτωση σε περίπτωση, ανάλογα με τις κανονιστικές απαιτήσεις και τις οικονομικές, περιβαλλοντικές, τεχνικές και δημόσιες παραμέτρους υγείας

Τα υλικά από σκυρόδεμα φυσικής προέλευσης δεν είναι απεριόριστα. Αν δε ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα σύντομα θα αποτελούν προϊόντα σε έλλειψη. Ως επιβεβαίωση στο παραπάνω έρχεται η αύξηση του κόστους των αδρανών υλικών, αλλά και οι μεγάλες αποστάσεις μεταφοράς από τον τόπο παραγωγής στο εργοτάξιο επεξεργασίας.



Εικόνα 2.1 Κύκλος ζωής δομικού υλικού Πηγή: Γαρδέλης, Γ. (2011)

2.1 Επεξεργασία

Η επεξεργασία των ΑΕΚΚ είναι αναγκαία για τους παρακάτω λόγους:

- I. Υπάρχει η δυνατότητα συνετής χρήσης τεράστιων ποσοτήτων φυσικών πόρων.
- II. Συμβάλει θετικά στη μείωση της ποσότητας των απορριμμάτων που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής και παρατείνει τη διάρκεια ζωής τους.
- III. Οι επιπτώσεις που φέρει η ταφή τους στο περιβάλλον μειώνονται σημαντικά.

Τα ΑΕΚΚ περιλαμβάνουν διάφορα υλικά. Μερικά από αυτά τα υλικά μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ή να ανακυκλωθούν μέσω κατάλληλου διαχωρισμού. Τα αδρανή μείγματα (τούβλα, πλακάκια κ.λπ.) μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δευτερεύοντα υλικά μετά το πέρασμά τους από ειδικούς θραυστήρες, ενώ άλλα υλικά (όπως το ξύλο) μπορούν να αποτεφρωθούν. Ωστόσο, ένα μικρό μέρος δεν δύναται να χρησιμοποιηθεί και οδηγείται σε ΧΥΤΑ αφού υποστεί κατάλληλη επεξεργασία.

2.2 Η ανάγκη της επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης

Η επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση δομικών υλικών συμβάλλουν στην προστασία των φυσικών πόρων και στην αποτελεσματική διαχείριση των απορριμμάτων. Αυτό είναι το βασικό αίτημα για βιώσιμη ανάπτυξη στη σύγχρονη κοινωνία και αυτή είναι η βασική αρχή της κατασκευής. Έχει υπολογιστεί ότι η αναλογία οικοδομικών αποβλήτων ανά κάτοικο Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι 500 κιλά, με μεγαλύτερο ποσοστό οικοδομικών αποβλήτων αυτών που προέρχονται από σκυροδέματα. Η παγκόσμια ζήτηση και χρήση αδρανών υλικών συνεχίζει να αυξάνεται και ταυτόχρονα αυξάνεται η συσσώρευση προϊόντων κατεδάφισης υπαρχόντων κατασκευών, γεγονός που απαιτεί την ανακύκλωσή τους για να χρησιμοποιηθούν τόσο στην οδοποιία όσο και στα κτίρια.

Η ανάγκη να βρεθεί η καλύτερη μέθοδος διαχείρισης έχει γίνει πιο επιτακτική στην περίπτωση του σκυροδέματος λόγω της μεγάλης ποσότητας απορριμμάτων που παράγει. Επιπλέον, υπάρχουν μεγάλες δυσκολίες στην ανακύκλωσή του γιατί απαιτεί την εφαρμογή τεχνολογιών που αυξάνουν το κόστος του νέου προϊόντος. Για παράδειγμα, η ανακύκλωση οπλισμένου σκυροδέματος απαιτεί διαχωρισμό του σκυροδέματος από τον χάλυβα διαδικασία η οποία είναι επίπονη και δαπανηρή.

Τα αειφόρα κτίρια είναι το κλειδί για τη δημιουργία φιλικών προς το περιβάλλον δομών. Είναι σημαντικό να γίνουν γνωστές οι αρνητικές επιπτώσεις της αλόγιστης και

ανεξέλεγκτης παραγωγής, χρήσης και τελικής διάθεσης οικοδομικών υλικών στο περιβάλλον και η αναζήτηση και αξιολόγηση νέων μεθόδων για αποτελεσματική περιβαλλοντική διαχείριση.

2.3 Ανακύκλωση ΑΕΚΚ

Ο κύριος στόχος ενός σωστού συστήματος διαχείρισης απορριμμάτων δομικών κατασκευών είναι η απομάκρυνση της μέγιστης ποσότητας δομικών υλικών από τη ροή των απορριμμάτων. Προτεραιότητα είναι η άμεση επαναχρησιμοποίηση υλικών σε νέες ή υπάρχουσες κατασκευές διατηρώντας έτσι την οικονομική τους αξία. Η μετατροπή αποβλήτων σε νέα λειτουργικά υλικά αποτελεί άκρως βιώσιμη λύση ενώ οι εναλλακτικές χρήσεις τους μπορούν να αποτελέσουν μια μορφή ανακύκλωσης.

Σύμφωνα με δύο διαφορετικά πρότυπα, η ανακύκλωση δομικών υλικών χωρίζεται σε δύο τύπους:

- Πρωτογενή και δευτερογενή ανακύκλωση: ανάλογα με το που χρησιμοποιούνται τα ανακυκλωμένα υλικά
- Άμεση και έμμεση ανακύκλωση: εξαρτάται από την πόση επεξεργασία είναι αναγκαία για να επαναχρησιμοποιηθούν τα υλικά

Στην πρωτογενή ανακύκλωση, το υλικό χρησιμοποιείται στην ίδια εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιήθηκε αρχικά, για παράδειγμα: στην κατασκευή κτιρίου. Αυτά τα επαναχρησιμοποιήσιμα δομικά υλικά είναι ουσιαστικά οικοδομικά απόβλητα που παράγονται κατά την εκτέλεση διαφόρων κατασκευαστικών έργων. Στη δευτερογενή ανακύκλωση τα υλικά χρησιμοποιούνται σε διαφορετικά μέρη αλλάζοντας τα διαθέσιμα χαρακτηριστικά τους. Η πρωτογενής ανακύκλωση περιλαμβάνει καθαρά οικοδομικά υλικά, κυρίως τούβλα, πλακάκι, σκυρόδεμα, χώμα, πέτρες, μέταλλα κλπ., ενώ στη δευτερογενή τα υλικά είναι κυρίως χαρτί, λάστιχα, ηλεκτρικές συσκευές κλπ., δηλαδή υλικά από την βιομηχανία και την βιοτεχνία.

Στην άμεση ανακύκλωση τα υλικά μπορούν να συμμετάσχουν ξανά στην κατασκευή του κτιρίου και η διαδικασία επεξεργασίας είναι ελάχιστη ή ανύπαρκτη. Από περιβαλλοντική άποψη τα άμεσα υλικά που μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν, είναι η πρώτη επιλογή, γιατί η ποιοτική αξία των υλικών δεν μειώνεται και η ενέργεια που καταναλώνεται όταν αυτά επαναχρησιμοποιούνται, είναι πολύ χαμηλότερη από αυτή των ανακυκλωμένων υλικών. Στην έμμεση ανακύκλωση υφίστανται αρχικά έναν μετασχηματισμό πριν επαναχρησιμοποιηθούν. Στην ουσία πρόκειται για ανακυκλωμένα υλικά.

2.3.1 Πλεονεκτήματα ανακύκλωσης

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η ανακύκλωση είναι ιδιαίτερης σημασίας. Μερικά από αυτά είναι:

- Η αναγκαιότητα για χρήση φυσικών μη ανανεώσιμων πόρων μειώνεται.
- Μείωση περιβαλλοντικών επιπτώσεων που επέρχονται από την εξόρυξη πρώτων υλών καθώς και από τη διαδικασία επεξεργασίας αυτών.
- Μείωση των απορριμμάτων κατασκευών και κατεδαφίσεων και κατ' επέκταση μείωση των αναγκαίων χώρων τοποθέτησής τους καθώς και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν.
- Το κόστος κατασκευής ελαχιστοποιείται λόγω του μικρού ή και ανύπαρκτου κόστους των στερεών απορριμμάτων.
- Η ενέργεια που καταναλώνεται είναι μειωμένη για την παραγωγή πρώτων υλών.

Οι συνθήκες και οι ιδιότητες του εργοταξίου καθώς και η σύνθεση του αποβλήτου που επρόκειτο να επεξεργαστεί έχουν σημαντικό ρόλο στο να επιλεγεί η κατάλληλη τεχνική ανακύκλωσης.

2.3.2 Διαδικασία ανακύκλωσης

Η ανακύκλωση των ΑΕΚΚ μπορεί να πραγματοποιηθεί με πολλούς τρόπους. Κατά τη διαδικασία κατεδάφισης, και ακόμη και πριν ξεκινήσει η κατεδάφιση, αφαιρούνται όλα τα υλικά που μπορούν να αποσυναρμολογηθούν πλήρως ή μερικώς, όπως κουφώματα. Τα θραύσματα μπορούν να μεταφερθούν στη βιομηχανία για ανακύκλωση και να χρησιμοποιηθούν ως πρώτες ύλες για την παραγωγή νέων υλικών. Όσα δεν μπορούν να διαχωριστούν επιτόπου μεταφέρονται στη μονάδα επεξεργασίας για διαχωρισμό. Τα νέα υλικά που παράγονται μπορούν έπειτα να χρησιμοποιηθούν ως πρώτη ύλη.

Η διαδικασία ανακύκλωσης ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

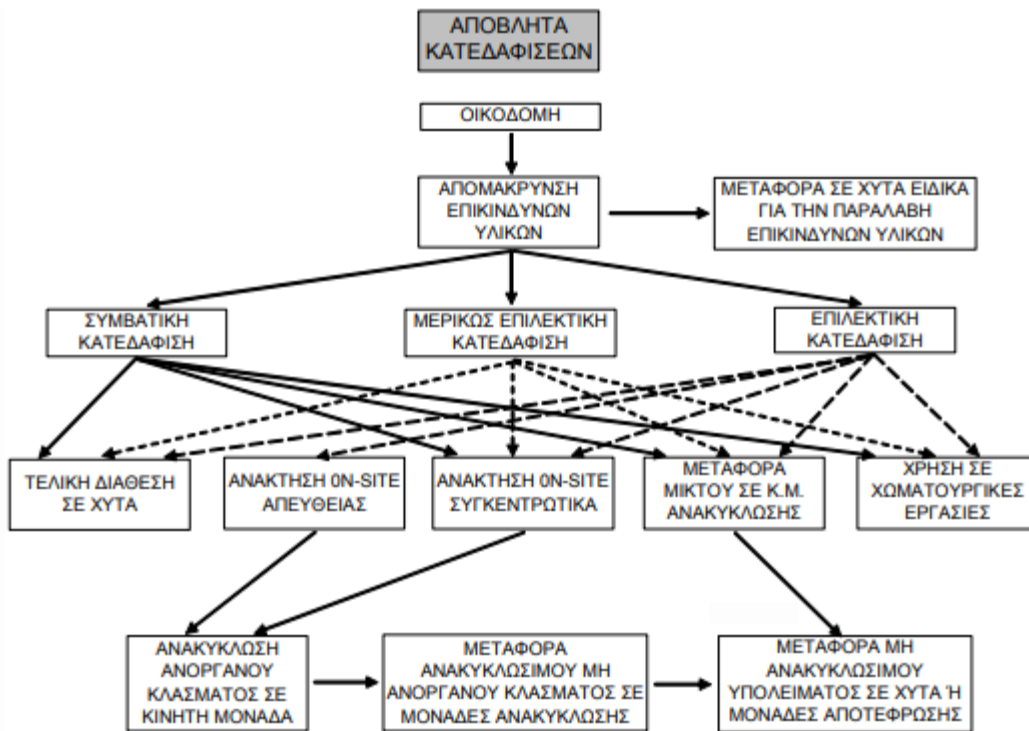
- Δημιουργία και συλλογή οικοδομικών υλικών.
- Μορφοποίηση και διαχωρισμός υλικών.
- Παραγωγή πρωτογενών και δευτερογενών υλικών και οδήγησή τους σε βιομηχανίες για αντικατάσταση της αντίστοιχης ποσότητας φυσικών πρώτων υλών.

Αφού συλλεχθεί και μεταφερθεί στον χώρο επεξεργασίας πραγματοποιούνται οι εξής διαδικασίες:

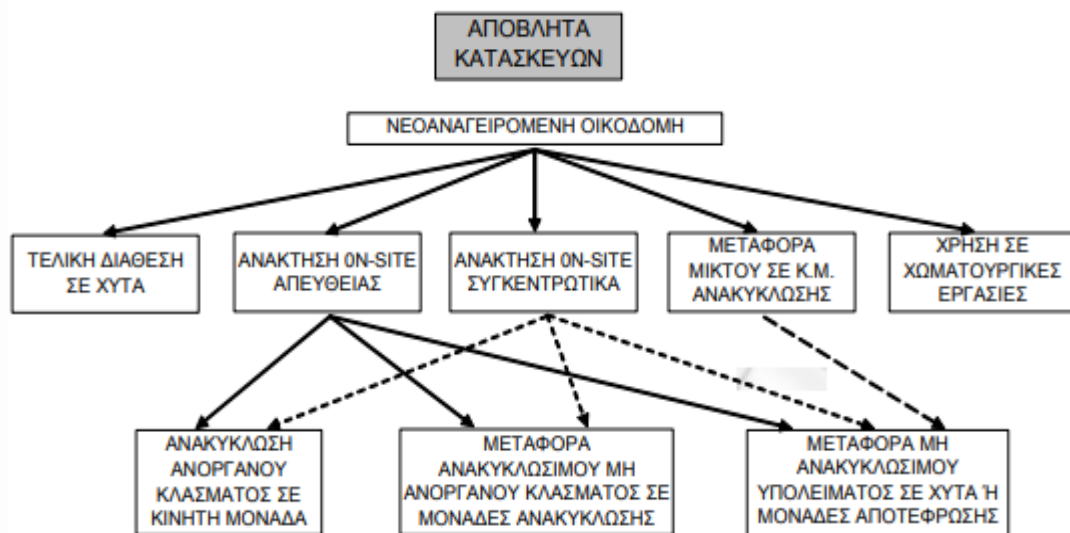
- 1) Χρήση υδραυλικού σφυριού για να σύνθλιψη του υλικού σε μέγεθος κατάλληλο για το σιλό του συστήματος επεξεργασίας.
- 2) Διαχωρισμός μεταλλικών αντικειμένων, που φορτώνονται σε όχημα μεταφοράς με μεταφορική ταινία για εκ νέου χύτευση.
- 3) Διαχωρισμός των υλικών από πέτρες ή σκυρόδεμα από τα γαιώδη χώματα. Τα γαιώδη συλλέγονται και μεταφέρονται μέσω του ταινιοδρόμου για τελική διάθεση ή αξιοποίηση. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα οικοδομικά απόβλητα που παράγονται από την κατεδάφιση, το σκυρόδεμα αποτελεί περίπου το 40%.
- 4) Θραύση πετρωμάτων και σκυροδέματος σε μεταβλητό μέγεθος κόκκου.
- 5) Τα τελικά υλικά συλλέγονται και αποθηκεύονται με τη βοήθεια μηχανημάτων για να είναι έτοιμα προς διάθεση.

Σε γενικές γραμμές, η διαδικασία ανάκτησης και ανακύκλωσης χρήσιμων υλικών στα δομικά απόβλητα συμβαίνει κυρίως με δύο τρόπους.

1. Επιτόπια κατεργασία (On-site): Σε αυτή την περίπτωση με τη βοήθεια του κινητού σταθμού ανακύκλωσης υλικών γίνεται η επεξεργασία των υλικών στον χώρο παραγωγής αποφεύγοντας τη μεταφορά απορριμμάτων, γεγονός το οποίο λειτουργεί θετικά στο οικονομικό ζήτημα. Ταυτόχρονα, το αρχικό κόστος επένδυσης και η οργανωτική ευελιξία της επιτόπιας επεξεργασίας είναι σχετικά περιορισμένα. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι περιορίζεται σε μια σχετικά μικρή γκάμα υλικών και η ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων δεν είναι πολύ υψηλή.
2. Επεξεργασία σε σταθερούς σταθμούς ανακύκλωσης (Off-site): Σε αυτή την περίπτωση τα δομικά απόβλητα οδηγούνται σε σταθμό ανακύκλωσης. Τα υλικά αυτά δεν είναι ομοιογενή και προέρχονται από κατασκευαστικές δραστηριότητες σε ακτίνα 50-100 χιλιομέτρων. Όταν φτάσουν στο σημείο συγκέντρωσης, συνθλίβονται και στη συνέχεια υποβάλλονται σε διάφορα στάδια διαχωρισμού. Τα κύρια πλεονεκτήματα της σταθερής μονάδας είναι η υψηλή ποιότητα των νέων προϊόντων που προκύπτουν, η μεγάλη γκάμα επεξεργασίας απορριμμάτων κατασκευών κάτι που συμβάλλει στη βελτίωση της προσαρμοστικότητας των εγκαταστάσεων που διερευνώνται. Ωστόσο, αυτές οι εγκαταστάσεις απαιτούν μεγαλύτερο κόστος επένδυσης.



Εικόνα 2.2 Διαχείριση αποβλήτων κατεδαφίσεων στην οικοδομή Πηγή: Γαρδέλης, Γ. (2011)



Εικόνα 2.3 Διαχείριση αποβλήτων κατασκευών στην οικοδομή Πηγή: Γαρδέλης, Γ. (2011)

<p>Πλεονεκτήματα θραύσης και διαχωρισμού on-site:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλότερο κόστος διαχείρισης και μεταφοράς των υλικών. • Χαμηλότερο κόστος επένδυσης μηχανημάτων. • Μειωμένες απαιτήσεις μεταφοράς, δεδομένου ότι τα ανακυκλωμένα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν on-site. 	<p>Μειονεκτήματα θραύσης και διαχωρισμού on-site:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Υψηλότερο λειτουργικό κόστος των μηχανημάτων ανά τόνο ΑΚΚ • Περισσότερες οχλήσεις στην περιοχή του έργου λόγω θορύβου και σκόνης. • Λιγότερη ευελιξία ως προς το πού και πότε θα χρησιμοποιηθούν τα ανακυκλωμένα υλικά. • Πιθανή καθυστέρηση στην κατασκευή του έργου
<p>Πλεονεκτήματα θραύσης και διαχωρισμού off-site:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ευκολότερος έλεγχος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στις κοντινές περιοχές. • Πιο πρακτική η χρήση εξοπλισμού μεγαλύτερου εύρους και μεγαλύτερης δυναμικότητας. • Χαμηλότερο λειτουργικό κόστος των μηχανημάτων ανά τόνο ΑΚΚ • Ευκολότερος έλεγχος της ποιότητας των ανακυκλωμένων υλικών. • Υπάρχει δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης των υλικών. 	<p>Μειονεκτήματα θραύσης και διαχωρισμού off-site:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Απαραίτητος έλεγχος της διαδικασίας κατεδάφισης ώστε να αποφευχθεί η παραλαβή υλικών αμφίβολης ποιότητας. • Υψηλότερο κόστος διαχείρισης και μεταφοράς των υλικών. • Υψηλότερο κόστος επένδυσης μηχανημάτων.

Εικόνα 2.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα επεξεργασίας on και off site Πηγή: Αναστασίου, Γ., & Μπέλλος, Μ. (2013)

Οι οικοδομικές δραστηριότητες και ο σχετικός σωστός σχεδιασμός καθώς και οι επιτόπιες δραστηριότητες διαχείρισης απορριμμάτων αποτελούν προϋπόθεση για τη διασφάλιση υψηλών ποσοστών ανάκτησης και υψηλής ποιότητας ανακυκλωμένων προϊόντων. Αν και μεγάλο μέρος των ΑΕΚΚ ανακυκλώνεται για οικονομικούς λόγους, τα οφέλη των ανακυκλωμένων υλικών (όπως σκυρόδεμα, ξύλο, γυαλί) δεν περιορίζονται σε οικονομικά οφέλη. Δημιουργούν περισσότερες θέσεις εργασίας, μειώνουν τη χρήση πρώτων υλών καθώς και μειώνουν την υγειονομική ταφή. Η αποφυγή χωματερών μπορεί επίσης να ενισχύσει την προστασία του περιβάλλοντος, να χρησιμοποιήσει πιο συνετά τους φυσικούς πόρους, να εξοικονομήσει ενέργεια, να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και να αποφύγει (ή να αναπτύξει) τις εκσκαφές σε αγροτικές ή δασικές περιοχές.

3. Σκυρόδεμα από ανακυκλωμένο αδρανές σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα θεωρείται ένα από τα πιο αναλώσιμα οικοδομικά υλικά. Οι πρώτες ύλες στο μίγμα σκυροδέματος είναι τσιμέντο, αδρανή, λεπτόκοκκα και χονδροκόκκα, νερό και πρόσμικτα σκυροδέματος τα οποία αποτελούν το 70% έως 80% του όγκου του σκυροδέματος. Οι τύποι αδρανών που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή σκυροδέματος είναι θρυμματισμένη πέτρα, άμμος και χαλίκι. Αυτά τα φυσικά αδρανή προέρχονται από την εξόρυξη φυσικών πόρων και από τα λατομεία αδρανών και η διαδικασία εξόρυξης πραγματοποιείται σε μεγάλα λατομεία, τα οποία περιλαμβάνουν βαρύ εξοπλισμό και καταναλώνουν πολλή ενέργεια.



Εικόνα 3.1 Ανακυκλωμένο αδρανές σκυρόδεμα Πηγή:
<https://www.eesc.europa.eu/>

3.1 Τα οφέλη της χρήσης ανακυκλωμένου αδρανούς σκυροδέματος (ΑΑΣ)

Όσον αφορά το περιβάλλον και την οικονομία, η χρήση ανακυκλωμένου σκυροδέματος έχει θετική σημασία, επομένως, καθώς αυξάνεται η ευαισθησία στην προστασία του περιβάλλοντος, απαιτούνται αυστηρότεροι περιβαλλοντικοί νόμοι και προσπάθειες για την ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής ενός έργου. Η ανακύκλωση σκυροδέματος

είναι μια εξελισσόμενη μέθοδος που χρησιμοποιεί παλιό σκυρόδεμα που παράγεται λόγω κατεδάφισης, σεισμών ή άλλων καταστροφικών επιπτώσεων (Εφραιμίδης Χ., (2008)).

3.1.1 Περιβαλλοντική προσέγγιση

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει αυξημένο ενδιαφέρον ως προς την αξιολόγηση και την επιτήρηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που αφορούν τόσο το τσιμέντο όσο και το σκυρόδεμα. Με τη μέθοδο της αξιολόγησης του κύκλου ζωής, εξετάζονται τόσο τα υλικά όσο και η απαιτούμενη ενέργεια, καθώς και ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος των υλικών και των τεχνικών που χρησιμοποιούνται, κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους.

Έχει αποδειχθεί ότι εάν το πρόσθετο τσιμέντο και η μεταφορά του ανακυκλωμένου σκυροδέματος είναι ελεγχόμενη, (σε συνδυασμό με το δεδομένο ότι τα υποπροϊόντα δεν προέρχονται από ανακύκλωση, εφαρμόζονται στη διαδικασία και μπορούν να προκαλέσουν παρόμοιο δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη) το μίγμα ανακυκλωμένου σκυροδέματος μπορεί να μειώσει τις επιπτώσεις στο περιβάλλον στο 70% περίπου σε σύγκριση με το συμβατικό δείγμα σκυροδέματος. Άλλα αποτελέσματα δείχνουν ότι, σε σύγκριση με το φυσικό σκυρόδεμα, το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα έχει

ελαφρώς μεγαλύτερη επίδραση στο τσιμέντο και στο συνολικό στάδιο παραγωγής, επειδή για να επιτευχθεί η ίδια εργασιμότητα και αντοχή σε θλίψη, η ποσότητα τσιμέντου από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα θα πρέπει να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη. Ένα ακόμη πλεονέκτημα της ανακύκλωσης είναι η παραγωγή άμμου ελεγχόμενης κοκκομετρικής διαβάθμισης και ποσοστού παιπάλης, το οποίο οφείλεται στις σύγχρονες μεθόδους πλύσεως του λεπτόκοκκου υλικού (Εφραιμίδης Χ., (2008))

Στη μελέτη των Serres et al.(2016), επεξεργάστηκαν δείγματα μεγέθους 20mm από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα με ανακυκλωμένο αδρανές σκυρόδεμα (ΑΑΣ), φυσικό σκυρόδεμα και μικτό σκυρόδεμα (ανακυκλωμένο και συμβατικό), ξεχωριστά. Το ανακυκλωμένο δείγμα σκυροδέματος 20 mm έχει την καλύτερη περιβαλλοντική συμπεριφορά από το παραδοσιακό σκυρόδεμα 20 mm. Αυτό το δείγμα αξιολογήθηκε ως δείγμα αναφοράς και ήταν ελαφρώς χαμηλότερο από το δείγμα μικτού σκυροδέματος 20 mm (εκτός από την οξίνιση) το οποίο σημειώνει βελτίωση όσον αφορά τις επιπτώσεις του στο περιβάλλον, όταν προστίθεται ανακυκλωμένη άμμος και αδρανής. Η χημική σύνθεση των δειγμάτων ανακυκλωμένου σκυροδέματος και μικτού σκυροδέματος, περιέχουν πρόσμικτο (3% και 0,75% αντίστοιχα), το οποίο μπορεί εύλογα να αυξήσει το δείκτη όξυνσης που σχετίζεται με την κατηγορία ποιότητας επιβάρυνσης του οικοσυστήματος, ειδικά για το δείγμα ανακυκλωμένου σκυροδέματος που περιέχει περισσότερο. Τα δείγματα ανακυκλωμένου και μικτού σκυροδέματος 20 mm περιείχαν λιγότερο νερό στις συνθέσεις τους σε σύγκριση με το παραδοσιακό σκυρόδεμα 20 mm, επισημαίνοντας την καλή συμπεριφορά τους. Η μείωση του περιβαλλοντικού δείκτη δεν είναι σημαντική όσο αφορά το δείγμα σκυροδέματος από

ΑΑΣ διότι για τα ανακυκλωμένα υλικά που χρησιμοποιούνται χρειάζονται περεταίρω διαδικασίες όπως η θραύση τους, η προετοιμασία τους και ο καθαρισμός τους. Ωστόσο παραμένει καλύτερος σε σύγκριση με τα δείγματα από φυσικό σκυρόδεμα.

Σε άλλη έρευνα που διεξάχθηκε στη Σερβία, έδειξε ότι το φυσικό αδρανές σκυρόδεμα με θρυμματισμένο αδρανές έχει τους μεγαλύτερους δείκτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ενώ το φυσικό αδρανές σκυρόδεμα με αδρανές χαλίκι έχει τους χαμηλότερους δείκτες. Αυτό οφείλεται επειδή το πρώτο έχει μεγαλύτερη ποσότητα τσιμέντου. Οι δείκτες για όλες τις κατηγορίες αντικτύπων του ανακυκλωμένου αδρανούς σκυροδέματος με αναλογία αντικατάστασης 50% (ΑΑΣ50) σκυροδέματος από ΑΑΣ είναι σχεδόν οι ίδιοι σε σύγκριση με τους δείκτες του φυσικού αδρανούς σκυροδέματος με αδρανές χαλίκι (αύξηση ή μείωση κάτω του 2%, που μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα), ενώ με αναλογία αντικατάστασης 100% σκυροδέματος από ΑΑΣ (ΑΑΣ100), η αύξηση του δείκτη είναι ελαφρώς μεγαλύτερη - κάτω του 3%, αλλά αυτό μπορεί επίσης να θεωρηθεί αμελητέο (80). Από την μελέτη αυτή, διαπιστώθηκε ότι το σκυρόδεμα από ΑΑΣ έχει καλύτερη περιβαλλοντική συμπεριφορά από το αδρανές χαλίκι και το θρυμματισμένο αδρανές.

Έρευνα από τους Hossain et al. (2016) διαπίστωσε ότι η χρήση χονδρόκοκκων ανακυκλωμένων αδρανών από απορρίμματα κατασκευών και κατεδαφίσεων στο Χονγκ Κονγκ, μπορεί να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 65% και να εξοικονομήσει περισσότερο από το 58% της κατανάλωσης ενέργειας.

3.1.1.1 Διοξείδιο του άνθρακα

Για την υπερθέρμανση του πλανήτη, το τσιμέντο φέρει μεγάλη ευθύνη λόγω του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) που παράγεται στη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου, το οποίο παράγει εκατομμύρια τόνους απορριμμάτων σκόνης τσιμέντου, έχοντας επιβλαβή αποτελέσματα για το αναπνευστικό σύστημα και το περιβάλλον. Το διοξείδιο του άνθρακα προέρχεται από δύο παράγοντες: την κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για να επιτευχθεί υψηλή θερμοκρασία που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του υλικού και το φαινόμενο μετατροπής ασβεστόλιθου (CaCO_3) υπό την επίδραση της θερμότητας του ασβεστίου (CaO) και του CO_2 . Πάνω από το 60% των εκπομπών CO_2 στη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου προέρχονται από αυτήν την ανθρακοποίηση (Marinković, S. B., et al., (2014)).

Αν στο συμβατικό σκυρόδεμα χρησιμοποιούταν παρόμοια αναλογία νερού με αυτή του ανακυκλωμένου σκυροδέματος, η ποσότητα νερού θα ήταν μικρότερη με αποτέλεσμα και η ποσότητα του τσιμέντου να ήταν ελαττωμένη για την ίδια εργασιμότητα και αντοχή σε θλίψη. Ως απόρροια, όλες οι επιπτώσεις του παραδοσιακού σκυροδέματος που σχετίζονται με τις εκπομπές CO_2 θα ήταν μικρότερες.

3.1.1.2 Μεταφορά πρώτων υλών

Το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα από ΑΑΣ μπορεί να διατηρήσει την κατανάλωση φυσικών αδρανών μειώνοντας την ανάγκη ανοίγματος νέων περιοχών εξόρυξης και κατανάλωσης ενέργειας ή καυσίμου που σχετίζεται με τις μεταφορές. Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται οι εκπομπές οργανικών υλικών και η απελευθέρωση σκόνης στην ατμόσφαιρα. Για την ίδια απόσταση μεταφοράς, η ενέργεια που καταναλώνεται για τη μεταφορά ανακυκλωμένου σκυροδέματος είναι μικρότερη από εκείνη του φυσικού αδρανούς, επειδή το βάρος του ανακυκλωμένου αδρανούς είναι μικρότερο. Το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα έχει επίσης την δυνατότητα να μετριάσει την παραγωγή αποβλήτων που προκύπτουν συνήθως σε χώρους υγειονομικής ταφής.

Προκειμένου να εκτιμηθεί ο αντίκτυπος της συνολικής απόστασης μεταφοράς στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής σκυροδέματος, η απόσταση μεταφοράς φυσικών και ανακυκλωμένων αδρανών από το χώρο εξόρυξης ή ανακύκλωσης στο εργοστάσιο σκυροδέματος κυμαίνεται από 0 έως 150 με 200 χιλιόμετρα. Για τα ΑΑΣ50, ΑΑΣ100 και φυσικό αδρανές σκυρόδεμα με θρυμματισμένο αδρανές, η οριακή απόσταση είναι περίπου 20 km, 80 km και 130 km, αντίστοιχα (Marinković, S. B., et al., (2014)).

3.1.2 Οικονομική Προσέγγιση

Η ανακύκλωση παλιών σκυροδεμάτων συμβάλει σημαντικά στο οικονομικό ζήτημα ενός κατασκευαστικού έργου, καθώς μπορεί να αποδεχθεί κερδοφόρα. Ωστόσο πρέπει να τεθούν υπό συζήτηση θέματα όπως το κόστος μεταφοράς αλλά και η επένδυση για την εγκατάσταση συγκροτήματος ανακύκλωσης το οποίο εξαρτάται από το μέγεθος και τη σύνθεση της εγκατάστασης. Το κόστος επεξεργασίας του συγκροτήματος ανακύκλωσης κυμαίνεται μεταξύ 2,76\$ και 6,61\$ ανά τόνο ανάλογα με το μέγεθος της παραγωγής και τις φάσεις επεξεργασίας. Η μέση ικανότητα ενός μόνιμου συγκροτήματος ανακύκλωσης είναι περίπου 150.000 τόνοι το χρόνο (Εφραιμίδης Χ., (2008)). Σύμφωνα με μια μελέτη της επιτροπής βιολογικού περιβάλλοντος σκυροδέματος, εκτιμάται ότι περισσότερο από το 60% του κόστους μπορεί να εξοικονομηθεί χρησιμοποιώντας ανακυκλωμένα αδρανή.

3.2 Παραγωγή

Το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα δημιουργείται με σύνθλιψη υφιστάμενου σκυροδέματος και τη χρήση του ως αδρανή σε νέο σκυρόδεμα. Πολλοί παράγοντες παίζουν ρόλο στη

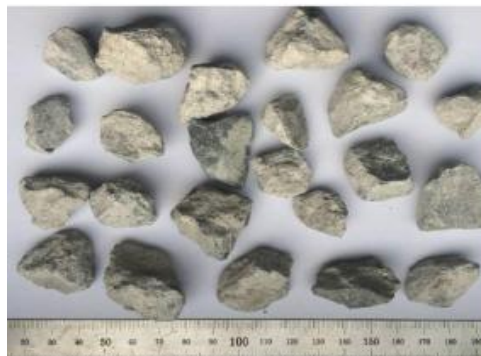
ποιότητα του ανακυκλωμένου σκυροδέματος, όπως η ποιότητά του πρωταρχικού σκυροδέματος, η ύπαρξη ρύπων αλλά και η επεξεργασία του ίδιου. Ορισμένα βήματα που πρέπει να ληφθούν για την ανακύκλωση του σκυροδέματος περιλαμβάνουν την αξιολόγηση της πηγής του σκυροδέματος, την προετοιμασία του σκυροδέματος, το σπάσιμο και την αφαίρεση του σκυροδέματος, την απομάκρυνση τυχόν ρύπων, τη σύνθλιψη του σκυροδέματος και το μέγεθος του ανακυκλωμένου σκυροδέματος, όπως και οι διαδικασίες που θα ακολουθήσουν.



(a) Recycled fine aggregate (0-5mm)



(b) Recycled coarse aggregate (5-25mm)



(c) Recycled coarse aggregate (25-31.5mm)



(d) The characteristics of aggregates

Εικόνα 3.2 Ανακυκλωμένο λεπτόκοκκο και χονδρόκοκκο σκυρόδεμα Πηγή: Xiao, J., Ma, Z., & Ding, T. (2016).

3.3 Θεώρηση για τη χρήση ανακυκλωμένου λεπτόκοκκου αδρανούς σκυροδέματος

Σε σύγκριση με το ανακυκλωμένο χονδρόκοκκο αδρανές σκυρόδεμα, η ανησυχία σχετικά με τη χρήση ανακυκλωμένου λεπτόκοκκου αδρανούς σκυροδέματος σε μίγματα σκυροδέματος, σχετίζεται με μια μεγάλη ποσότητα κονιάματος και ρύπων του λεπτόκοκκου. Τόσο το κονίαμα όσο και το χαλαρό κονίαμα έχουν καθοριστικό ρόλο στο γωνιακό σχήμα, όσον αφορά την υφή της σκληρής επιφάνειας και την υψηλή απορρόφηση σωματιδίων του λεπτόκοκκου ΑΑΣ (Evangelista et al., 2015). Σε πολλές περιπτώσεις, τα χαρακτηριστικά του λεπτόκοκκου αδρανούς σκυροδέματος έχουν αναφερθεί ότι έχουν αρνητικό αντίκτυπο στην εργασιμότητα, μείωση της αντοχής του σκυροδέματος και σημαντική αύξηση της αστάθειας του όγκου. Πολλές άλλες μελέτες

έχουν δείξει ότι το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να ταιριάζει με την ποιότητα του φυσικού σκυροδέματος χωρίς τη χρήση πρόσθετου τσιμέντου. Έρευνα από τους Beltran et al. (2014) έδειξε ότι όταν η αναλογία τσιμέντου-νερού είναι 0,5, όταν προστίθενται και άλλα τσιμέντα στο μίγμα, η χρήση ανακυκλωμένου σκυροδέματος μπορεί να βελτιώσει τις δυνάμεις θλίψης και κάμψης του σκυροδέματος.

Σύμφωνα με εργαστηριακές μετρήσεις, η αντοχή του ανακυκλωμένου σκυροδέματος είναι περίπου 10% χαμηλότερη από την αντοχή του φυσικού σκυροδέματος. Το ποσοστό 10% μπορεί να μειωθεί υιοθετώντας σύγχρονες και βελτιωμένες μεθόδους συνολικής παραγωγής που ανακυκλώνονται και επαναχρησιμοποιούνται σε οργανωμένα κέντρα παραγωγής.

Έρευνα των Fan et al. (2015) έδειξε ότι σε σύγκριση με τα δείγματα ελέγχου που δοκιμάστηκαν σε όλες τις ηλικίες (7, 14, 21 και 28 ημέρες), τα κονιάματα που περιείχαν 25% έως 100% λεπτόκοκκο ανακυκλωμένο αδρανές σκυρόδεμα έδειξαν μεγαλύτερη ξηρότητα, η οποία προκαλείται από το υψηλό πορώδες του υλικού με αποτέλεσμα το νερό να εξατμίζεται γρήγορα. Άλλος ερευνητής παρατήρησε ότι το λεπτόκοκκο ανακυκλωμένο αδρανές σκυρόδεμα περιέχει πολλές ακαθαρσίες που μπορούν να μειώσουν την αντοχή του σκυροδέματος. Σύμφωνα με την έρευνα των Evangelista et al. (2015) οι μικροί φραγμοί μεγέθους (150-500μm) έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε κονίαμα, ενώ οι μεγαλύτεροι φραγμοί (1-4 mm) δείχνουν μεγάλο αριθμό ρωγμών στη τσιμεντόπαστα.

Στην εφαρμογή του κονιάματος, πολλές ερευνητικές αναφορές ισχυρίζονται ότι σε σύγκριση με τη φυσική άμμο, η χρήση ανακυκλωμένου αδρανούς σκυροδέματος μπορεί να παρέχει την ίδια ή και καλύτερη αντοχή σε θλίψη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πιο ακανόνιστη και πορώδης επιφάνεια του μπορεί να ενισχύσει τη σχέση μεταξύ των αδρανών και του τσιμέντου (Verian, K. P., et al., (2018)).

Έρευνα του Κυριακόπουλου (2016), κατά την οποία εξετάστηκαν δείγματα από αδρανή υλικά τα οποία προήλθαν από την ανακύκλωση σπασμένων δοκιμίων, δείχνει πτώση της αντοχής σε θλίψη λόγω επίσης του μεγάλου πορώδους των ανακυκλωμένων αδρανών.

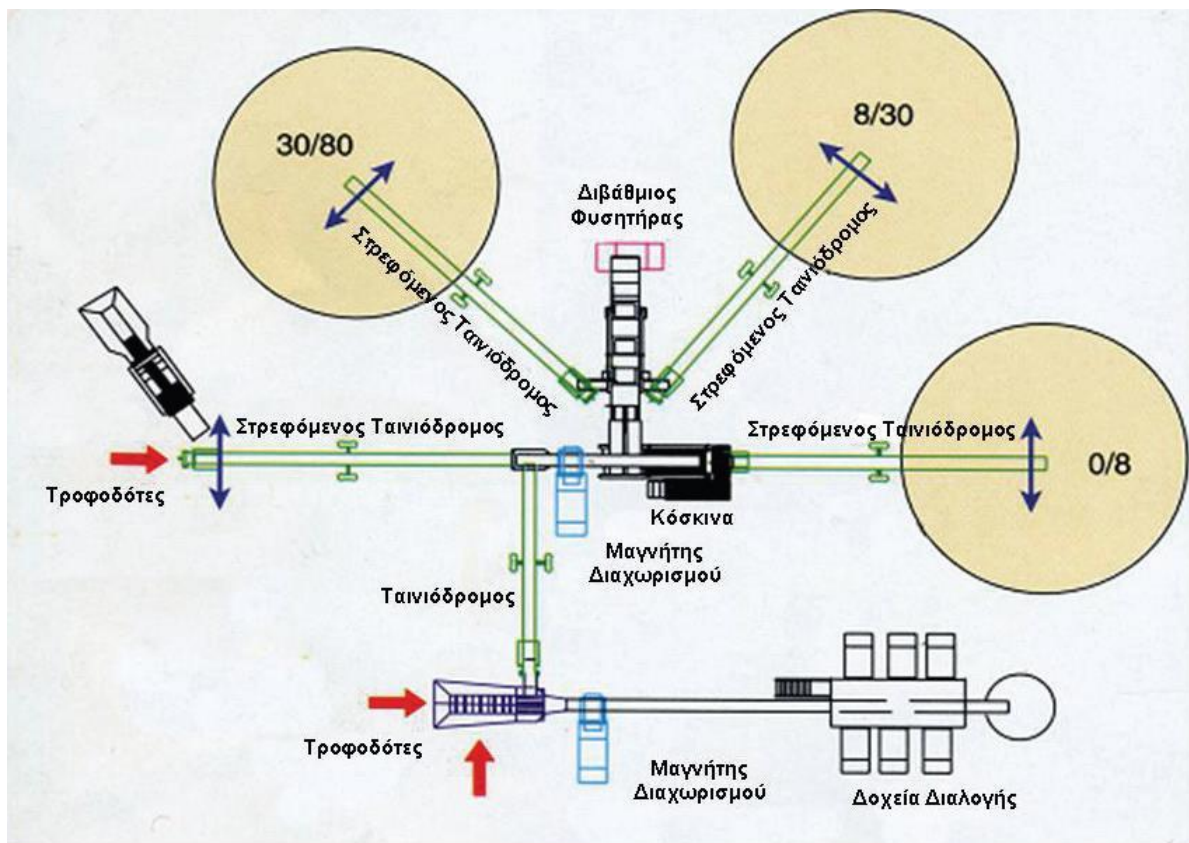
3.4 Ανακύκλωση παλαιών σκυροδεμάτων

Οι μονάδες ανακύκλωσης χωρίζονται σε αυτοδύναμες μονάδες παραγωγής για χρησιμοποίηση εντός εργοταξίου και μόνιμες μονάδες που βρίσκονται σε οργανωμένες δημόσιες, κοινοτικές ή ιδιωτικές κεντρικές μονάδες που ανταποκρίνονται στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών.

Τα υλικά που συλλέγονται από τον καθαρισμό του σκυροδέματος, μεταφέρονται στο κέντρο ανακύκλωσης και αποστέλλονται πρώτα στον θραυστήρα. Οι συγκεκριμένες πέτρες και τα συντρίμια μπορούν να περιέχουν διάφορα άλλα υλικά όπως άσφαλτο, ξύλο, τούβλο, χαρτί, πλαστικό και ακαθαρσίες (Εφραιμίδης Χ., (2008)). Ο θραυστήρας μπορεί να επεξεργαστεί μόνο σκυρόδεμα που δεν περιέχει αυτά τα ακατάλληλα υλικά, τα οποία μπορούν να αφαιρεθούν με ειδικό εξοπλισμό. Μέταλλα όπως χαλύβδινες ράβδοι είναι αποδεκτά επειδή μπορούν να αφαιρεθούν με μαγνήτες ή άλλες συσκευές διαχωρισμού και στη συνέχεια να ανακυκλωθούν με τήξη για άλλες χρήσεις (Εφραιμίδης Χ., (2008)).

Τα αυτοφερόμενα θραυστικά συγκροτήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για θραύση στο χώρο κατεδάφισης, τα οποία μπορούν να μειώσουν το κόστος κατασκευής και την ατμοσφαιρική ρύπανση, η οποία προκαλείται από τα υλικά που μεταφέρονται προς και από το λατομείο. Μερικά θετικά των μεγάλων αυτοφερούμενων θραυστικών συγκροτημάτων είναι ότι μπορούν να χειριστούν υλικά κατεδαφίσεων έως 400 m³ / h. Επίσης, δεν ρυπαίνουν το δρόμο και δεν προκαλούν ρύπανση λόγω καυσαερίων ή θορύβου.

Οι μόνιμες μονάδες κέντρων ανακύκλωσης που χρησιμοποιούνται σε πολλές ευρωπαϊκές πόλεις είναι πλήρεις μονάδες παραγωγής με προηγμένα μηχανήματα καθαρισμού, σύνθλιψης, μηχανικής διαλογής ή με μαγνήτες, διαχωρισμού, κοσκινίσματος, πλύσεως του λεπτόκοκκου υλικού και ελέγχου της παραγωγής (Εφραιμίδης Χ., (2008)). Σε αυτές τις μονάδες, επειδή συμβαίνει έλεγχος των μη επιθυμητών λεπτόκοκκων υλικών, η ποιότητα των υλικών που προκύπτουν είναι στο ίδιο επίπεδο ή και καλύτερη από αυτή των παραδοσιακών υλικών.



Εικόνα 3.3 Συγκρότημα ανακύκλωσης παλαιού σκυροδέματος. Πηγή : Εφραιμίδης Χ. (2008)

3.4.1 Διαδικασία ανακύκλωσης

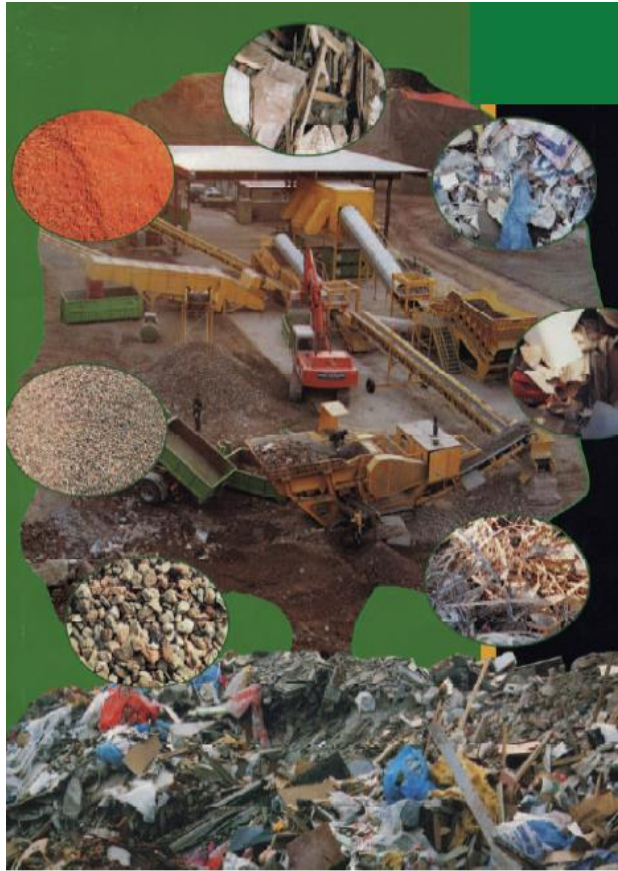
Το μικτό υλικό διαφόρων εξαρτημάτων φτάνει στο χώρο ανακύκλωσης με φορτηγό. Αφού φτάσουν στη γεφυροπλάστιγγα, ελέγχεται το φορτίο με ειδική κάμερα για να εξετάσει εάν η επεξεργασία έχει τελεστή σωστά. Ακατάλληλα φορτία τοποθετούνται σε χώρους υγειονομικής ταφής για απόρριψη, ενώ κατάλληλα φορτία τοποθετούνται σε εξοπλισμό πλύσης. Χρησιμοποιείται σφυρί ή "ψαλίδι" για να κοπούν τα μπάζα, το οποίο είναι τοποθετημένο στην άκρη του υδραυλικού εκσκαφέα.

Τα περισσότερα από τα υλικά μεταφέρονται με φορτωτή στον θραυστήρα σιαγόνων (Εφραιμίδης Χ., (2008)). Το υλικό τροφοδοσίας περνά πρώτα από το διαχωριστικό δόνησης πρώτου σταδίου για να αφαιρέσει υλικά μεγαλύτερου από 100 mm σε μέγεθος. Ο χαλύβδινος οπλισμός διαχωρίζεται, ενώ με μαγνήτη που βρίσκεται πάνω από τον τροφοδοτικό ιμάντα, αφαιρούνται τυχόν μεταλλικά αντικείμενα. Στη συνέχεια το υλικό μεταφέρεται σε κόσκινο για πλύση και κατεργασίας άμμου και η πάστα μεγέθους μικρότερου από 5mm

μεταφέρεται σε πλυστική μονάδα με σκοπό την απομάκρυνση παιπάλης και αργίλου. Η άμμος αφυδατώνεται σε ποσοστό υγρασίας μικρότερο του 12% και είναι απαλλαγμένη από μικροϋλικά κάτω των 40 μm ($=10^{-3}$ mm) (Εφραιμίδης Χ., (2008)). Η μέθοδος παρέχει λεπτόκοκκη άμμο προς διάθεση χωρίς προ εξέταση ή αφαίρεση χρωμάτων από το υλικό τροφοδοσίας, συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο στη αναβάθμιση της ποιότητας του παραγόμενου προϊόντος.

Τα αδρανή υλικά και οι ανεπιθύμητοι κόκκοι περνάνε κατ' ευθείαν από το πρωτογενές κόσκινο καταιονισμού σε ένα πλυντήριο με δίδυμους άξονες (Εφραιμίδης Χ., 2008). Διάφοροι ελαφροί ρύποι (όπως σκουριά, πλαστικά και οργανικά υλικά, ξύλο και γρασίδι) αιωρούνται και μετακινούνται σε κόσκινο απόρριψης απορριμμάτων, το οποίο ανακτά νερό και λεπτόκοκκα υλικά και τα στέλνει στη συσκευή πλύσης με άμμο. Διάφορα συντρίμια που δημιουργούνται από τριβή μεταφέρονται σε κόσκινο αποστράγγισης. Τα λεπτόκοκκα υλικά που απελευθερώνονται και το νερό οδηγούνται σε ένα φρεάτιο με υποβρύχια αντλία (Εφραιμίδης Χ., (2008)). Στη συνέχεια μεταφέρονται τα πλυμένα και στραγγισμένα αδρανή μεγαλύτερα από 5 mm από το κόσκινο αποστράγγισης σε ένα κόσκινο δύο πλεγμάτων χωρίς νερό για την τελική κοκκομετρική διαβάθμιση (Εφραιμίδης Χ., (2008)).

Οι μαγνήτες για την αφαίρεση μεταλλικών στοιχείων έχουν επίσης σημαντικό ρόλο στην δημιουργία καθαρών υλικών. Το κόσκινο της πρώτης βαθμίδας ξεχωρίζει υλικά μεγέθους μικρότερα των 30 μm ενώ το κόσκινο της δεύτερης βαθμίδας απομακρύνει από το υλικό αυτό τα ανεπιθύμητα λεπτά υλικά. Το υλικό που υπολείπεται οδηγείται με ταινία μεταφοράς στο μαγνήτη, ο οποίος με τη σειρά του απομακρύνει τα μεταλλικά αντικείμενα ώστε να μην αναμειχθούν με το ρεύμα του υλικού.



Εικόνα 3.4 Συγκρότημα ανακύκλωσης παλαιού σκυροδέματος. Πηγή : Εφραιμίδης Χ.

3.5 Χαρακτηριστικά ανακυκλωμένου αδρανούς σκυροδέματος

Πολλές έρευνες έχουν εντοπίσει διαφορές μεταξύ του φυσικού αδρανούς και του ανακυκλωμένου αδρανούς σκυροδέματος, μερικές από αυτές είναι το περιεχόμενο κονιάματος και η απορροφητικότητα.

3.5.1 Περιεχόμενο κονιάματος

Έχει αποδειχθεί ότι μερικά παλιά κονιάματα είναι προσκολλημένα από τη φύση τους, στην επιφάνεια του αρχικού αδρανούς και αποτελούν μέρος του ανακυκλωμένου αδρανούς σκυροδέματος (Verian, K. P., et al., (2018)). Δεδομένου ότι η φύση του κονιάματος δεν είναι τόσο πυκνή και πορώδης όσο η συνολική δομή, αυτό το παλιό κονίαμα θα δημιουργήσει ένα ελαφρύτερο σύστημα ανακυκλωμένου αδρανούς σκυροδέματος.

3.5.2 Απορροφητικότητα

Σε σύγκριση με τα περισσότερα φυσικά αδρανή υλικά, η παρουσία αυτών των παλαιών κονιαμάτων αυξάνει τελικά την ικανότητα απορρόφησης και μειώνει σημαντικά τη βαρύτητα του ανακυκλωμένου αδρανούς σκυροδέματος (Kisku, N., et al., (2017)).

3.6 Χαρακτηριστικά σκυροδέματος με ανακυκλωμένο αδρανές σκυρόδεμα

Τα χαρακτηριστικά των αδρανών επιδρούν στις ιδιότητες του σκυροδέματος κατά τις διαδικασίες πλαστιμότητας και σκλήρυνσης (Verian, K. P., et al., (2018)). Έτσι η απόδοση του ΑΑΣ εξαρτάται από την ποιότητα μεταξύ αυτού και των φυσικών αδρανών.

3.6.1 Εργασιμότητα

Η μειωμένη εργασιμότητα του σκυροδέματος που περιέχει ανακυκλωμένο αδρανές σκυρόδεμα αποδίδεται στην υψηλή ικανότητα απορρόφησης ανακυκλωμένου αδρανούς σκυροδέματος, στην τραχιά επιφάνεια και στο πιο ακανόνιστο σχήμα (Kurad, R., et al., (2017)70). Προκειμένου να επιτευχθεί μια λειτουργία παρόμοια με το φυσικό σκυρόδεμα, όταν το ανακυκλωμένο αδρανές σκυρόδεμα χρησιμοποιείται σε ξηρή κατάσταση, απαιτείται τουλάχιστον 5-15% πρόσθετου νερού στο μείγμα (Verian, K. P., et al., (2018)). Υπό ορισμένες συνθήκες, η τακτική αυτή μπορεί να αποφευχθεί εάν γίνει ορθή χρήση του ΑΑΣ και αν ο σχηματισμός του σκυροδέματος είναι σωστά σχεδιασμένος. Η διάθεση πρόσμικτων, ιπτάμενης τέφρας, και η ανάμιξη και των δυο, βελτιώνουν την λειτουργικότητα του και χρησιμοποιούνται για να μειώσουν τη ποσότητα του νερού (Kurda, R., et al., (2017)) .

3.6.2 Πυκνότητα

Μια μεγάλη ποσότητα ΑΑΣ στο σκυρόδεμα βοηθά στη μείωση της πυκνότητάς του (Verian, K. P., et al., (2018)). Το χαμηλό ειδικό βάρος και το παλιό κονίαμα που συνδέονται με το ΑΑΣ βοηθούν στη μείωση της πυκνότητας του σκυροδέματος που περιέχει ΑΑΣ. Η μεταβολή της πυκνότητας του σκυροδέματος που περιλαμβάνει ΑΑΣ εξαρτάται από την ποσότητα του ΑΑΣ που χρησιμοποιείται στο μίγμα σκυροδέματος και εξαρτάται από την αλλαγή στο ειδικό βάρος του σε σχέση με το ειδικό βάρος του φυσικού αδρανούς. Σύμφωνα με ερευνητές, η πυκνότητα του σκυροδέματος που περιέχει 100% χονδρόκοκκο ΑΑΣ είναι περίπου 5% μικρότερη από αυτό που περιέχει 100% φυσικά αδρανή.

3.6.3 Αντοχή σε θλίψη

Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι ο ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής του ΑΑΣ στο σκυρόδεμα είναι υψηλότερος από αυτόν του φυσικού σκυροδέματος, ειδικά σε μεταγενέστερη ηλικία (28 ημέρες) (Verian, K. P., et al., (2018)). Αυτό συμβαίνει επειδή το αφυδατωμένο παλιό υπόλειμμα τσιμέντου προσκολλάται στην επιφάνεια των σωματιδίων του ΑΑΣ που αντιδρούν με το νερό, αυξάνοντας έτσι τον ρυθμό ανάπτυξης της αντοχής (Kurad, R., et al., (2017)). Σε μελέτη που διεξάχθηκε, προέκυψε το αποτέλεσμα ότι είναι δυνατό να κατασκευαστεί ένα μοντέλο για την πρόβλεψη της μείωσης της αντοχής του σκυροδέματος που περιέχει ΑΑΣ με διαφορετικό ποσοστό αντικατάστασης. Η αντοχή σε θλίψη τείνει να μειώνεται καθώς αυξάνεται η ποσότητα του ΑΑΣ. Ωστόσο, η θλιπτική αντοχή του ποσοστού αντικατάστασης επηρεάζεται σημαντικά από τις αρχικές συνθήκες υγρασίας του ΑΑΣ.

Ανάλογα με το επίπεδο υγρασίας, η αντικατάσταση 100% του συμβατικού αδρανούς με ΑΑΣ μπορεί να μειώσει τη θλιπτική αντοχή έως και 30% ή να την αυξήσει κατά 20%. Η επίδραση της χαμηλότερης αντοχής σε θλίψη από σκυρόδεμα με ΑΑΣ αποδίδεται στην παρουσία δύο τύπων ζωνών μετάβασης στη δομή του (Verian, K. P., et al., (2018)). Η διασυνδετική ζώνη μετάβασης στη δομή αντιπροσωπεύει τον δεσμό μεταξύ του αδρανούς και της πάστας, ο οποίος είναι συνήθως ασθενέστερος από το αδρανές ή το υγρό τσιμέντο. Σε σκυρόδεμα κατασκευασμένο από φυσικά αδρανή, η διασυνδετική ζώνη μετάβασης εμφανίζεται μεταξύ του αδρανούς και του κονιάματος, ενώ στο σκυρόδεμα, εμφανίζεται μεταξύ του αρχικού αδρανούς και του παλιού και του νέου κονιάματος (Verian, K. P., et al., (2018)).

3.6.4 Μέτρο ελαστικότητας

Αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος που περιέχει ΑΑΣ είναι χαμηλότερο από αυτό του φυσικού σκυροδέματος και ο βαθμός μείωσης είναι ανάλογος με την αύξηση του ΑΑΣ που χρησιμοποιείται στο μείγμα σκυροδέματος (Verian, K. P., et al., (2018)). Σε σύγκριση με τα φυσικά αδρανή, αυτή η απώλεια σχετίζεται με το χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας των ανακυκλωμένων αδρανών, ειδικά όταν τα άλλα συστατικά του μίγματος παραμένουν σταθερά (Silva, R. V., et al., (2016)). Η τιμή ελαστικότητας του σκυροδέματος με χονδρόκοκκο ΑΑΣ είναι 10-33% χαμηλότερη από αυτήν του φυσικού σκυροδέματος (Verian, K. P., et al., (2018)). Μια άλλη μελέτη έδειξε ότι όταν όλα τα χονδρόκοκκα φυσικά αδρανή αντικαταστάθηκαν από ΑΑΣ, το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος μειώθηκε περίπου κατά 45%.

3.6.5 Αντοχή σε κάμψη

Μια μελέτη έδειξε ότι η αντοχή κάμψης του σκυροδέματος από ΑΑΣ είναι περίπου 10% χαμηλότερη από εκείνη του φυσικού σκυροδέματος. Ειδικά όταν χρησιμοποιούνται κορεσμένα ανακυκλωμένα αδρανή σε μίγματα σκυροδέματος, η αντοχή κάμψης του

ΑΑΣ θα μειωθεί (Verian, K. P., et al., (2018)). Ωστόσο, άλλες έρευνες υποστηρίζουν ότι το ΑΑΣ δεν έχει σημαντική επίδραση στην αντοχή σε κάμψη του σκυροδέματος.

3.6.6 Αντοχή σε εφελκυσμό

Έχει αποδειχθεί ότι η αντοχή εφελκυσμού του σκυροδέματος από ΑΑΣ είναι περίπου 6% χαμηλότερη από αυτήν του φυσικού σκυροδέματος. Άλλες μελέτες έχουν δείξει ότι όταν μόνο τα χονδρόκοκκα φυσικά αδρανή αντικαθίστανται από χονδρόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή, η αντοχή εφελκυσμού του σκυροδέματος που περιέχει ΑΑΣ μειώνεται έως και 10%. Στην περίπτωση χρήσης ΑΑΣ αντί για χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα φυσικά αδρανή, η δύναμη εφελκυσμού μειώνεται περαιτέρω κατά 10-20%, αντισταθμίζοντας έτσι τη δυνατότητα για τη μείωση της εφελκυστικής δύναμης λόγω της προσθήκης ΑΑΣ με την εισαγωγή επιπλέον τσιμέντου (έως 25kg/m³), κρατώντας σταθερή τη ποσότητα νερού (Verian, K. P., et al., (2018)).

3.6.7 Συστολή ξήρανσης

Ο βαθμός συστολής της ξήρανσης επηρεάζεται από την περιεκτικότητα τσιμεντόπαστας και την αναλογία w/cm του τσιμέντου (Verian, K. P., et al., (2018)). Επειδή το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα από ΑΑΣ συνήθως περιέχει υψηλότερη περιεκτικότητα σε πάστα και λόγω της χρήσης νέου και ανακτημένου κονιάματος, σε σύγκριση με το φυσικό σκυρόδεμα, το σκυρόδεμα που περιέχει ΑΑΣ έχει υψηλότερη συστολή ξήρανσης. Σύμφωνα με την Japan Contractors Association, η ξήρανση του σκυροδέματος με χονδρόκοκκο ΑΑΣ και φυσική άμμο, είναι 20% έως 50% υψηλότερη από εκείνη του φυσικού σκυροδέματος και η ξήρανση του σκυροδέματος που περιέχει τόσο λεπτόκοκκο όσο και χονδρόκοκκο ΑΑΣ είναι 70% έως 100% υψηλότερη από αυτή του φυσικού σκυροδέματος. Σε σύγκριση με το χοντρόκοκκο ΑΑΣ όπου έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο ρυθμό απορρόφησης, η ενσωμάτωση λεπτόκοκκου ΑΑΣ θα προκαλέσει μεγαλύτερη συστολή ξήρανσης, επειδή το περιεχόμενο της παλιάς πάστας είναι σχετικά υψηλό.

3.6.8 Ερπυσμός

Ο ερπυσμός του σκυροδέματος που περιέχει ΑΑΣ επηρεάζεται με την ποσότητα του ΑΑΣ. Όσο αυξάνεται η ποσότητα ΑΑΣ στο μίγμα σκυροδέματος, τόσο μεγαλώνει ο βαθμός ερπυσμού. Άλλες μελέτες αναφέρουν ότι ο ερπυσμός του σκυροδέματος από ΑΑΣ είναι μεγαλύτερος από αυτόν του φυσικού σκυροδέματος κατά 30% έως 60%. Αυτό συμβαίνει διότι το σκυρόδεμα από ΑΑΣ έχει μεγαλύτερο όγκο τσιμεντόπαστας σε σχέση με το παραδοσιακό σκυρόδεμα.

3.6.9 Διαπερατότητα

Ο βαθμός διαπερατότητας του σκυροδέματος εξαρτάται από το μέγεθος και τη συνέχεια των πόρων στην πάστα ενυδατωμένου τσιμέντου. Για μείγματα αναλογίας 0,5 με 0,7 w / cm, η διαπερατότητα του σκυροδέματος με ΑΑΣ είναι 2 έως 5 φορές αυτή του φυσικού σκυροδέματος.

3.6.10 Αντοχή στη διείσδυση χλωριόντων ιόντων

Με την αύξηση της διαπερατότητας, η αντίσταση διείσδυσης των ιόντων χλωρίου στο σκυρόδεμα που περιέχει ΑΑΣ, μειώνεται. Σε σύγκριση με το φυσικό σκυρόδεμα, η αντοχή του σκυροδέματος από ΑΑΣ που περιέχει 100% χονδρόκκα ΑΑΣ στη διείσδυση ιόντων χλωρίου, είναι χαμηλότερη κατά πάνω από ποσοστό 40%.

3.6.11 Ιδιότητες θραύσης

Η ποιότητα του ανακυκλωμένου αδρανούς και η σχέση μεταξύ του αδρανούς και της πάστας παίζουν σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της απόδοσης θραύσης του σκυροδέματος. Οι Brand et al. (2014) χρησιμοποίησαν ανακυκλωμένη άσφαλτο οδοστρώματος και ΑΑΣ στην έρευνά τους και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, παρά τη χαμηλότερη αντοχή και ελαστικότητα, το σκυρόδεμα που περιείχε τα προαναφερθέντα υλικά παρήγαγε συγκρίσιμη ή μερικές φορές υψηλότερη συνολική ενέργεια θραύσης. Αυτό συμβαδίζει με άλλες μελέτες, οι οποίες δείχνουν ότι το σκυρόδεμα από ΑΑΣ έχει μεγαλύτερη αντοχή στη σύνθλιψη από το φυσικό σκυρόδεμα. Ωστόσο, άλλες μελέτες έχουν δείξει ότι οι ιδιότητες θραύσης μειώνονται με την ενσωμάτωση του ΑΑΣ.

3.6.12 Συμπεράσματα

Από τα παραπάνω μπορεί να συμπεραθεί ότι η επιρροή του ΑΑΣ διαφέρει ως προς τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος. Οι περισσότερες μελέτες συμφωνούν για τις δυνάμεις θλίψης και κάμψης όσον αφορά την πυκνότητα, τη λειτουργικότητα, τη διαπερατότητα, τη συστολή ερπυσμού και ξήρανσης. Ωστόσο, πολλές μελέτες έχουν διαφορετικές απόψεις σχετικά με την απόδοση της θραύσης και την αντοχή σε εφελκυσμό.

3.7 Τρόποι βελτίωσης της λειτουργίας του σκυροδέματος από ΑΑΣ

Λόγω ορισμένων αρνητικών επιπτώσεων του σκυροδέματος που περιέχει ΑΑΣ, αρκετές έρευνες έχουν προτείνει μερικούς τρόπους αντιμετώπισης που θα συζητηθούν παρακάτω.

3.7.1 Ιπτάμενη τέφρα

Η ιπτάμενη τέφρα είναι η περίσσεια ένυδρου πυριτικού ασβεστίου που παράγεται από την ποζολανική αντίδραση λεπτόκοκκων αδρανών, τα οποία συμπυκνώνουν τη τσιμεντόπαστα, και αποτελούν την αιτία για το υψηλό πορώδες του σκυροδέματος από ΑΑΣ (Lothenbach, B., et al., (2011)). Η πηγή υδροξειδίου του ασβεστίου που είναι απαραίτητη για την ποζολανική αντίδραση με σκυρόδεμα από ΑΑΣ, προέρχεται όχι μόνο από την ενυδάτωση μεταξύ του νέου τσιμέντου και νερού, αλλά και από το παλιό κονίαμα που συνδέεται με την επιφάνεια των μορίων του ΑΑΣ (Verian, K. P., et al., (2018)).

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης ιπτάμενης τέφρας είναι:

- Η ιπτάμενη τέφρα επιδρά θετικά στην εργασιμότητα του σκυροδέματος.
- Ελλατώνει τη διαπερατότητα του σκυροδέματος δυσχεραίνοντας τη διείσδυση νερού και / ή άλλων υγρών που μπορεί να προκαλέσουν βλάβη στο σκυρόδεμα.
- Μειώνει την αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος σε μεταγενέστερη ηλικία (Verian, K. P., et al., (2018)).
- Μικραίνει τη συστολή του σκυροδέματος που παράγεται από ΑΑΣ.
- Σε μια κατάσταση που προωθεί την ενανθράκωση, μπορεί να αυξήσει το διοξείδιο του άνθρακα που δεσμεύεται στο σκυρόδεμα. Αυτό συμβαίνει επειδή η ποζολανική αντίδραση μειώνει την τιμή του pH, και έτσι δημιουργούνται ιδανικές συνθήκες για την ενανθράκωση.

Πολλοί ερευνητές έχουν δείξει ότι η χρήση ιπτάμενης τέφρας ως μερικό υποκατάστατο του τσιμέντου Portland μπορεί να μειώσει τις επιβλαβείς επιπτώσεις του ΑΑΣ. Σύμφωνα με αναφορές, η 28 ημερών αντοχή σε θλίψη από σκυρόδεμα κατασκευασμένο με χονδρόκοκκο ΑΑΣ σε ποσοστά 50% και 100%, ενισχύθηκε κατά περισσότερο από 10% και 5%, αντίστοιχα, προσθέτοντας 20% ιπτάμενη τέφρα αντί τσιμέντου Portland. Ωστόσο, η ιπτάμενη τέφρα δεν έχει απαραίτητως σημαντική συνεισφορά στην μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων επειδή η ίδια θεωρείται υποπροϊόν κατασκευής μεταφέροντας το φορτίο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του αρχικού προϊόντος στο νέο.

3.7.2 Σκωρία υψικαμίνου

Η σκωρία υψικαμίνου, που ονομάζεται επίσης τσιμέντο σκωρίας, έχει λανθάνων υδραυλική υποστήριξη η οποία ενισχύει τις μακροπρόθεσμες ιδιότητες αντοχής του σκυροδέματος (Verian, K. P., et al., (2018)). Οι Parthiban και Saravana Raja Mohan (2017) αντικατέστησαν όλο το τσιμέντο Portland με σκωρία υψικαμίνου, χρησιμοποίησαν ένα μίγμα πυριτικού νατρίου και διαλύματος υδροξειδίου του νατρίου αντί του νερού ως υγρό ανάμιξης. Σε αυτή τη μελέτη, 0%, 25%, 50%, 75% και 100% χονδρόκοκκο ΑΑΣ ενσωματώθηκε στο μίγμα που παρασκευάστηκε με συνδετικό

σκωρίας υψικαμίνου. Σε σύγκριση με το σκυρόδεμα από τσιμέντο Portland που κατασκευάζεται με φυσικά αδρανή, σε όλα τα παραπάνω επίπεδα ΑΑΣ, η χρήση σκωρίας υψικαμίνου σε συνδυασμό με τους παραπάνω ενεργοποιητές μπορεί να παράγει σκυρόδεμα υψηλής ποιότητας (υψηλότερη αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε κάμψη και αντοχή στη θραύση).

3.7.3 Προσέγγιση μίξης δύο σταδίων (TSMA)

Η προσέγγιση μίξης δύο σταδίων αναπτύχθηκε από τους Tam, V. W., & Tam, C. M. (2007) με σκοπό την ενίσχυση της ποιότητας του σκυροδέματος με ΑΑΣ. Στη TSMA, το αναμεμιγμένο νερό διαιρείται σε δύο τμήματα και προστίθεται στο μείγμα σκυροδέματος σε διαφορετικούς χρόνους. Σε αυτή τη μέθοδο ανάμειξης, αφού τα αδρανή αναμειγνύονται για 60 δευτερόλεπτα, στη συνέχεια προστίθεται το πρώτο μέρος νερού στο μείγμα των αδρανών και αναμειγνύονται ξανά για άλλα 60 δευτερόλεπτα. Μετά από αυτό το χρονικό διάστημα, προστίθεται τσιμέντο στο μίγμα και η διαδικασία ανάμειξης συνεχίζεται για 30 δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια, το δεύτερο μέρος του νερού εισάγεται στο μίγμα και η ανάμιξη συμβαίνει για 120 δευτερόλεπτα. Αυτή η μέθοδος έχει αποδειχθεί ότι συμβάλει θετικά στην μεταβατική ζώνη διεπαφής του σκυροδέματος που περιέχει ΑΑΣ. Σε σύγκριση με την κανονική μέθοδο ανάμειξης, το μειονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι ο μεγαλύτερος χρόνος ανάμειξης.

3.7.4 Προσέγγιση ανάμειξης κονιάματος

Η μέθοδος ανάμειξης κονιάματος αναπτύχθηκε από τους Liang et al. (2015) με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος. Η μελέτη συγκέντρωσε τα στοιχεία χρησιμοποιώντας χονδρόκοκκο ΑΑΣ ως υποκατάστατο ολόκληρου του χονδρόκοκκου φυσικού αδρανούς καθώς επίσης το ίδιο υποβλήθηκε σε επεξεργασία 7 ημερών πριν από την ανάμιξη. Ως συμπέρασμα, με την προσέγγιση ανάμειξης κονιάματος παρατηρείται βελτίωση της αντοχής σε θλίψη, όταν το σκυρόδεμα αποτελείται από 100% χονδρόκοκκο ΑΑΣ.

3.7.5 Προσέγγιση ανάμειξης με άμμο

Η μέθοδος ανάμειξης άμμου προσεγγίστηκε επίσης από τους Liang et al. (2015). Παρόμοια με τη μέθοδο ανάμειξης κονιαμάτων, το χονδρόκοκκο ΑΑΣ προεπεξεργάστηκε 7 ημέρες πριν από την ανάμιξη. Σε σύγκριση με το σκυρόδεμα από ΑΑΣ που παρασκευάστηκε με τη μέθοδο ανάμειξης κονιάματος και τη μέθοδο ανάμειξης άμμου αλλά χωρίς προκατεργασία, το σκυρόδεμα από ΑΑΣ που παρασκευάστηκε με αυτήν τη μέθοδο έχει μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη 28 ημερών.

3.7.6 Ενσωμάτωση ινών στο μίγμα σκυροδέματος ΑΑΣ

Σύμφωνα με αναφορές, η χρήση ινών μπορεί να καλύψει ορισμένα μειονεκτήματα από τη χρήση του ΑΑΣ στο σκυρόδεμα. Οι Katkhuda και Shatarat (2017) χρησιμοποίησαν

έξι διαφορετικά επίπεδα από ίνες βασάλτη (0%, 0,1%, 0,3%, 0,5%, 1% και 1,5% του συνολικού όγκου σκυροδέματος) σε μη επεξεργασμένο και επεξεργασμένο ΑΑΣ. Μελέτες έχουν δείξει ότι το σκυρόδεμα που κατασκευάζεται με 20% ΑΑΣ (80% φυσικό

σκυρόδεμα), με χρήση ποσοστού 1% και 1,5% ινών βασάλτη, έχει μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό και κάμψη από το σκυρόδεμα ελέγχου (Katkhuda, H., & Shatarat, N. (2017)). Αυτά τα αποτελέσματα είναι σύμφωνα με τη μελέτη των Afroughsabet et al. (2017) που χρησιμοποίησε το 1% των ινών χάλυβα διπλού αγκίστρου σε σκυρόδεμα ΑΑΣ (Verian, K. P., et al., (2018)). Οι Afroughsabet et al. (2017) ανέφεραν ότι εντός 28 ημερών, οι χαλύβδινες ίνες αύξησαν την αντοχή εφελκυσμού του σκυροδέματος από ΑΑΣ κατά 60% και την αντοχή κάμψης κατά 88%. Αυτές οι βελτιώσεις μπορούν να αποδοθούν σε καλύτερη πρόσφυση μεταξύ ΑΑΣ και τσιμεντόπαστας, η οποία αποδίδεται στην τραχιά επιφάνεια του ΑΑΣ εκτός από το φαινόμενο αλληλοσύνδεσης μεταξύ των ινών και του ΑΑΣ (Afroughsabet, V., et al., (2017)). Οι Gao et al. (2017) τοποθέτησαν έως και 2% χαλύβδινες ίνες σε ποσοστά 30%, 50% και 100% του ΑΑΣ. Αυτή η μελέτη έδειξε ότι η παρουσία χαλύβδινων ινών (2% του συνολικού όγκου) αύξησε την αντοχή σε διάτμηση (έως και 135%) του σκυροδέματος που περιείχε 50% χοντρόκοκκο ΑΑΣ (Gao, D., et al., (2017)).

4. Σκυρόδεμα από ανακυκλωμένα αδρανή ασφατικά υλικά

4.1 Γενικά

Υλικά πεζοδρομίου, ακόμη και αν έχουν υποστεί ζημιά ή τα καταστραφεί δεν πρέπει να θεωρούνται άχρηστα και πρέπει να απορρίπτονται. Πλέον, υπό συντήρηση και υπό ορισμένες συνθήκες, επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίησή τους. Η τεχνολογία συντήρησης δρόμων, χρησιμοποιεί υπάρχοντα υλικά που χαρακτηρίζονται ως ανακύκλωση οδοστρωμάτων

Για την κάλυψη των αναγκών σε οικοδομικά υλικά και για την κατασκευή οδοστρωμάτων σε όλο τον κόσμο παράγονται μεγάλες ποσότητες αδρανών υλικών και ασφάλτου. Μόνο στην Ευρώπη παράγονται 400 εκατομμύρια τόνοι πίσσας ετησίως (EAPA και NAPA, 2011), αφού περίπου 5,2 εκατομμύρια χιλιόμετρα οδοστρώματος καλύπτονται από ασφάλτο.

Η χρήση της ασφάλτου είναι γνωστή από την αρχαιότητα, αφού πλέον είναι το πιο παλιό και το πιο ευρύ οικοδομικό υλικό. Σε χρήση από το 6.000 π.Χ. ως το πιο άριστο, σε ποιότητα, μονωτικό υλικό. Η χρήση ασφάλτου μέχρι τις αρχές του 20ου αιώνα, προερχόταν από φυσικά προϊόντα διαφόρων αποθεμάτων από τον πλανήτη. Η φυσική πίσσα χρησιμοποιείται τώρα περιστασιακά για την κατασκευή δρόμων εξαιτίας οικονομικών λόγων, και λόγω δυσκολίας καθαρισμού και συλλογής εν συγκρίσει με την ασφαλτο που δημιουργείται από την κλασματική απόσταξη του πετρελαίου. Στην σημερινή εποχή τα φυσικά αποθέματα προς εκμετάλλευση είναι λιγοστά και βρίσκονται κυρίως στην Αλβανία, την Ρουμανία και τον Καζακστάν.

Η τεχνητή ασφαλτος είναι κατάλοιπο κλασματικής απόσταξης πρωτογενούς (αργής) πίσσας (crude tar) ή αργού πετρελαίου (crude oil). (Πότση, Σ. (2019). Στην πρώτη περίπτωση παράγεται ο πισσίτης ή κοινώς πίσσα και στη δεύτερη η πετρελαϊκή ασφαλτος ή κοινώς ασφαλτος. Και τα δύο προϊόντα οπτικώς είναι όμοια, έχουν παρόμοιες τεχνολογικές ιδιότητες με αυτές της φυσικής ασφάλτου και χρησιμοποιούνται για τις ίδιες εφαρμογές. Διαφέρουν ωστόσο ριζικά ως προς τη φυσική και χημική σύστασή τους, καθώς επίσης και ως προς την οσμή. Η πίσσα έχει περισσότερο έντονη και χαρακτηριστική αρωματική μυρωδιά από αυτήν της ασφάλτου (Νικολαΐδης 2011).

Τα ασφατικά υλικά παίζουν αρκετά μεγάλο ρόλο στην οδοποιία, καθώς οι περισσότεροι συμβατικοί δρόμοι έχουν ασφαλτο, αλλά χωρίς αυτό να σημαίνει πως δεν υπάρχει δύσκαμπτο οδόστρωμα από σκυρόδεμα. Τα ασφατικά υλικά χρησιμοποιούνται και ως συνδετικά σε διάφορα μίγματα ασφάλτου ή για συνένωση ασφατικών στρώσεων.

4.2 Μορφές ανακύκλωσης

Η ανακύκλωση δρόμων χωρίζεται σε:

- Ψυχρή ανακύκλωση
- Θερμή ανακύκλωση

Το πεδίο εφαρμογής συντήρησης οδοστρωμάτων αυτών των δύο μεθόδων είναι διαφορετικό. Διαφορετικοί τύποι έχουν επίσης αναπτυχθεί για κάθε μέθοδο την οποία εξαρτάται από τον τύπο επεξεργασίας-τη συγκέντρωσης του υλικού και την απόδοση του έργου. Η εικόνα 4.1. δείχνει σχηματικά τις μορφές της ανακύκλωσης των δύο ασφαλτοστρωμάτων.



Εικόνα 4.1 Μορφές ανακύκλωσης ασφαλτικών οδοστρωμάτων

4.2.1 Ψυχρή ανακύκλωση οδοστρωμάτων (Cold in Place Recycling CIPR)

Σε αυτή τη μέθοδο, τα υλικά κατασκευής δρόμων χωρίζονται με τον κατάλληλο εξοπλισμό και στην συνέχεια ανακατεύονται με νέα άσφαλτο. Η προσθήκη του νέου υλικού δύναται να γίνει πριν την κονιοποίηση ή σε οποιαδήποτε φάση μετά το πρώτο πέρασμα του υλικού από τον κονιοποιητή (Ιορδανίδης, 2015). Αυτό το ενωτικό υλικό που χρησιμοποιείται έχει σχεδόν πάντα την μορφή γαλακτώματος πίσσας, για να διασφαλιστεί το πορώδες του υλικού.

Ο δρόμος που επισκευάζεται με αυτόν τον τρόπο είναι κατάλληλος για να χρησιμοποιείται σε ήπιες καιρικές συνθήκες και ελαφρά κυκλοφοριακή κίνηση. Όταν το κλίμα είναι θερμό, η αναλογία της υγρασίας στο μίγμα ανακύκλωσης πριν κατανεμηθεί στην επιφάνεια πρέπει να είναι χαμηλό, διαφορετικά θα αποτύχει εξαιτίας της εσωτερικής πίεσης λόγω του περιττού νερού που εξατμίζεται.

Υπάρχουν δύο τρόποι εφαρμογής της ψυχρής ανακύκλωσης:

- Επιτόπια μέθοδος (in place): Κατά τη διάρκεια της επιτόπιας ψυχρής ανακύκλωσης, όλες οι επιμέρους εργασίες λαμβάνουν μέρος στο δρόμο. Το υλικό του υπάρχοντος ασφαλτικού θα αφαιρεθεί και αφού υποστεί επεξεργασία και διαμόρφωση θα επαναδιαστρωθεί. Η επεξεργασία περιλαμβάνει συνθλίψη, ανακάτεμα και ενδεχομένως προσθήκη των κατάλληλων προιόντων σταθεροποίησης. Όλες οι εργασίες, από την αφαίρεση έως την τοποθέτηση, πραγματοποιούνται σε ένα μόνο πέρασμα κατάλληλων μηχανημάτων, δηλαδή χωρίς την μεταφορά υλικών εκτός δρόμου.
- Σε σταθερή εγκατάσταση (in plant): Στην ψυχρή ανακύκλωση σε σταθερή εγκατάσταση τα υπάρχοντα υλικά του ασφαλτόδρομου απομακρύνονται στο βάθος που προβλέπεται ανάλογα και στην συνέχεια εναποθέτονται σε εγκατεστημένο συγκρότημα. Εκεί, μετά από κατάλληλη θεραπεία και πιθανό εμπλουτισμό νέων αδρανών υλικών ή πρόσθετων σταθεροποιητικών, το καινούργιο και αναμορφωμένο υλικό μεταφέρεται επιτόπου του έργου και απλώνεται στον δρόμο. Οι κεντρικές εγκαταστάσεις όπου συμβαίνει η ανακύκλωση, πιθανώς να είναι παλιές εγκαταστάσεις παραγωγής τροποποιημένου μείγματος ασφάλτου ή καινούργιες εγκαταστάσεις που κατασκευάστηκαν με τον όρο να αποδέχονται και να επεξεργάζονται και τα ανακυκλωμένα υλικά από παλιούς ασφαλτοστρωμένους δρόμους. Με αυτόν τον τρόπο επιτρέπεται ο πιο ορθός έλεγχος ποιότητας υλικών και ο πιο ορθός μηχανικός έλεγχος της κατασκευαστικής λειτουργίας, έτσι ώστε το μίγμα που προκύπτει να εμφανίζει υψηλή συνοχή και ποιότητα.

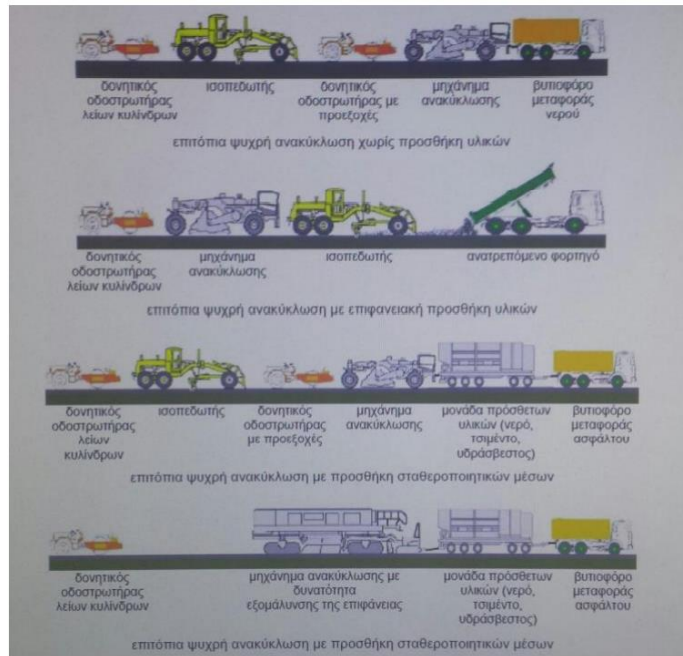
Η μέθοδος της επιτόπιας ψυχρής ανακύκλωσης μπορεί να λάβει τόπο σε ποικίλες τεχνικές. Βασικά κριτήρια για την επιλογή της καταλληλότερης τεχνικής είναι η επεξεργασία και ο εμπλουτισμός υφιστάμενων υλικών και η διάθεση μηχανικού εξοπλισμού. Η απλούστερη τεχνική είναι η επαναχρησιμοποίηση υφιστάμενων υλικών ασφαλτόδρομου χωρίς προσθήκη νέων υλικών (αδρανών ή σταθεροποιητές).

Αυτό απαιτεί την ανάκτηση μηχανήματος ανακύκλωσης και ενός βυτιοφόρου οχήματος μεταφοράς νερού. Καθώς η μηχανή είναι σε λειτουργία, τα υπάρχοντα υλικά στο δρόμο αφαιρούνται, συνθλίβονται και αναμιγνύονται με το νερό από το βυτιοφόρο. Το νερό χρησιμοποιείται για την αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία, επιτυγχάνοντας έτσι υψηλό επίπεδο συμπύκνωσης. Αφού η μηχανή ανακύκλωσης δεν διαθέτει εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για την ισοπέδωση, γίνεται από μια άλλη μηχανή ισοπέδωσης. Για την τελική συγκέντρωση χρησιμοποιούνται λείοι κύλινδροι που δονούνται ομαλά.

Σε περίπτωση ανάγκης βελτίωσης των υλικών του με νέες μορφές αδρανών ή σταθεροποιητών σκόνης (όπως τσιμέντο, ασβέστη), τότε αυτά τα υλικά μεταφέρονται στο δρόμο με φορητά ανατρεπόμενου τύπου και απορρίπτονται σε σωρούς. Στη συνέχεια, το μηχάνημα του ισοπεδωτή τα κατανέμει ομοιόμορφα στην επιφάνεια. Η χρήση αυτοκινούμενου τροχού, επιτρέπει την ομοιόμορφη τοποθέτηση υλικών στην επιφάνεια του δρόμου, και έτσι δεν χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί μηχάνημα ισοπεδωτή. Καθώς περνάει το μηχάνημα ανακύκλωσης τα διάσπαρτα χαλαρά υλικά αναμιγνύονται με τα αποσυναρμολογημένα υλικά ασφαλοδρόμου και διαστρώνονται εκ νέου. Ένα βήμα μετά, είναι η ισοπέδωση του εμπλουτισμένου ανακυκλωμένου υλικού και η συμπύκνωση του με δονητικό οδοστρωτήρα (Ιορδανίδης, 2015). Αυτή η μέθοδος δεν είναι κατάλληλη για κατοικημένες περιοχές, και όταν υπάρχουν άνεμοι και επειδή παράγεται σκόνη προκαλεί επιβάρυνση του περιβάλλοντος αλλά και αλλοίωση της ποσότητας των σταθεροποιητικών παραγόντων.

Μια άλλη λύση για να γίνει η προσθήκη τσιμέντου ή υδρασβέστη είναι η χρήση συσκευές προετοιμασίας εναιωρήματος, με δεξαμενές νερού και τσιμέντου η ασβέστη. Αυτά τα υλικά αναμιγνύονται για να σχηματίσουν έναν πολτοποιημένο αιώρημα που θα διοχετευτεί μέσω ενός σωλήνα στο ακόλουθες μηχάνημα ανακύκλωσης.

Η πιο σύγχρονη μέθοδος υπαγορεύει τη χρήση ασφάλτου ως σταθεροποιητικό παράγοντα (ασφατικό γαλάκτωμα ή αφρισμένη άσφαλτος). Υπό αυτές τις συνθήκες η άσφαλτος μεταφέρεται στο βυτιοφόρο και αποστέλλεται στο μηχάνημα ανακύκλωσης μέσω του αγωγού. Αυτή η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιπλέον και με έναν άλλον σταθεροποιητή (τσιμέντο ή υδρασβέστη). Σε αυτή την περίπτωση, είτε τα πρόσθετα υλικά διασκορπίζονται σε μορφή σκόνης, είτε γίνεται η χρήση της μονάδας παρασκευής αιωρήματος, που παρεμβάλλεται μεταξύ του βυτιοφόρου, που μεταφέρει την άσφαλτο, και του μηχανήματος ανακύκλωσης. Η δουλειά ολοκληρώνεται με την ισοπέδωση και συμπύκνωση του ανακυκλωμένου υλικού.



Εικόνα 4.2 Διάταξη μηχανημάτων στην επιτόπια ψυχρή ανακύκλωση

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την επιτόπια ψυχρή ανακύκλωση οδοστρωμάτων εμφανίζουν τα μηχανήματα ψυχρής ανακύκλωσης, που έχουν τη δυνατότητα πλήρους εργασίας με ένα μόνο πέρασμα (ένα μηχανήματα διαμετακόμισης), δηλαδή:

- Κατεδάφιση δρόμων βάθους άνω των 30 εκατοστών για τη διατήρηση της σταθερότητας βάθους.
- Άλεση και ανάμειξη του υλικού για την πλήρης αξιοποίησή του.
- Σταθερά υλικά με προσθήκη ανακυκλωμένων υλικών.
- Τοποθέτηση και ισοπέδωση του ανακυκλώμενου υλικού καθώς επίσης σε ορισμένες περιπτώσεις προσυμπύκνωσης της διαστρωμένης επιφάνειας.

Η απόδοση αυτών των μηχανών μπορεί να φτάσει τα 10.000 m² κάθε 8 ώρες. Επειδή όλη η εργασία γίνεται ταυτόχρονα από το μηχανήματα, ο ``γυμνός`` δρόμος (μετά την αφαίρεση του επιφανειακού στρώματος) δεν υπόκειται σε ζημιές που προκαλούνται από την κυκλοφορία των οχημάτων ή τον καιρό. Τελικά η οδική κυκλοφορία δεν επηρεάζεται από τη διέλευση των οχημάτων μεταφοράς.



Εικόνα 4.3 Διάταξη μηχανημάτων μιας διέλευσης στην επιτόπια ψυχρή ανακύκλωση οδοστρωμάτων

Ο τρόπος διάκρισης των μηχανημάτων γίνεται αναλόγως με τον τρόπο κίνησης του καθενός (επί ελαστικών τροχών ή επί ερπυστριών), με τον τρόπο λειτουργίας τους (χωρίς ή με δυνατότητα ισοπέδωσης και προσυμπύκνωσης του ανακυκλώμενου υλικού) καθώς και με τον εξοπλισμό (με ή χωρίς κάδο βίαιης ανάμειξης). Με βάση τα παραπάνω τα οχήματα ανακύκλωσης κατηγοριοποιούνται σε:

- ελαστικοφόρα (επί ελαστικών τροχών),
- ερπυστριοφόρα (επί ερπυστριών),
- με ειδικό εξοπλισμό.



Εικόνα 4.4 Μηχανήματα ψυχρής ανακύκλωσης οδοστρωμάτων

4.2.2 Θερμή ανακύκλωση οδοστρωμάτων

Η θερμή ανακύκλωση των δρόμων είναι ένας τρόπος ανακατασκευής της κυκλοφορίας στο ασφαλτόστρωμα. Εφαρμόζεται για να αποκατασταθεί το οδόστρωμα που παρουσιάζει μεγάλο βαθμό ζημιάς στη στρώση κυκλοφορίας, δηλαδή για να αποκατασταθεί σε μεγάλο μήκος και πλάτος τουλάχιστον μιας λωρίδας κυκλοφορίας ή ασφαλική στρώση κυκλοφορίας. Συνίσταται στην αποξήλωση του υπάρχοντος ασφαλτοστρώματος και την ανακατανομή του. Το όνομά της είναι έτσι, επειδή ακολουθεί η αφαίρεση υπάρχοντων υλικών και στην συνέχεια η τοποθέτηση νέων ασκυκλώσιμων υλικών με την χρήση θερμότητας.

Η εφαρμογή της θερμής ανακύκλωσης είναι ιδιαίτερα κατάλληλη όταν δεν επιτρέπεται η μεταβολή της στάθμης της ερυθράς του δρόμου. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα σε παρουσία παροδικών δομών, όπως κράσπεδα, τσιμεντένιο χαντάκι ή όταν χρειάζεται να επισκευαστεί μόνο μία λωρίδα κυκλοφορίας ενός δρόμου. Αυτή η μέθοδος δεν επιταχύνει την ενισχύση του οδοστρώματος, εκτός εάν κατασκευαστεί πρόσθετη άσφαλτος με επίπεδο κυκλοφορίας.

Κατά την θερμή ανακύκλωση, το προς αποκατάσταση στρώμα ασφάλτου αφαιρείται, αφού προηγηθεί η θέρμανσή του με κατάλληλες συσκευές, όπως θα αναλυθεί στην συνέχεια. Εν συνεχεία, ο περιστροφικός κόφτης αφαιρεί το ασφαλικό οδόστρωμα, το οποίο βελτιώνεται με προσθήκη κατάλληλων υλικών (άσφαλτος και πιθανώς νέα συσσωματώματα που αποτελούνται από κατάλληλα σωματίδια) και ανακατανέμεται. Υπάρχουν δύο δυνατότητες για την εφαρμογή της ανάκτησης θερμότητας:

- Σε σταθερή εγκατάσταση (in plant): το ασφαλτόδρομο θερμαίνεται Και αφαιρείται. Στη συνέχεια, μεταφέρεται στη θέση εγκατάστασης στο εργοστάσιο παραγωγής μίγματος ασφάλτου, όπου ενδείκνυται σε επεξεργασία. Το ανακυκλωμένο μίγμα ασφάλτου μεταφέρεται στη θέση του έργου και ακολουθεί η τοποθέτησή του στο δρόμο.
- Μέθοδος επί τόπου (in place): όλες οι εργασίες από την θέρμανση-αφαίρεση του ασφαλτοστρώματος μέχρι την επαναδιάστρωσή του εκτελούνται επί της οδού σε μια διέλευση με την χρήση κατάλληλων μηχανημάτων.



Εικόνα 4.8 Σταθερές εγκαταστάσεις θερμής ανακύκλωσης οδοστρώματος.

Η επιτόπια ανακύκλωση εν θερμώ μπορεί να χωριστεί σε τρεις διαδικασίες, που έχουν ως χαρακτηριστικό τη χρήση του ίδιου μηχανικού εξοπλισμού και τη χρησιμοποίηση θερμότητας. Αυτές είναι η αναμόρφωση (reshape), η επαναδιάστρωση (repave) και η επανάμιξη (remix).

4.3 Αναμόρφωση του ασφαλτικού οδοστρώματος (reshape)

Σε αυτή τη μέθοδο, ο δρόμος θερμαίνεται με υπέρυθρες ακτίνες με την θερμοκρασία να είναι 120-130°C και επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση χωρίς την πρόσμιξη του υλικού. Ακολουθεί πλευρική κατανομή μέσω βιδών(κοχλιών) στο ανασκαμμένο υλικό ακολουθώντας τον μύλο με αυτόν τον τρόπο ώστε το υλικό να μπορεί να τοποθετηθεί με σταθερό πάχος σύμφωνα με τη διατομή. Επιπλέον, αφαιρείται τα τυχόν περίσσεια υλικού από τα πλάγια του οδοστρώματος. Η συμπίκνωση του επαναδιαστρωθέντος τάπητα ολοκληρώνεται αμέσως με βαρείς στατικούς ή δονητικούς συμπυκνωτές, όπου πρέπει να ολοκληρωθεί πριν πέσει η θερμοκρασία του υπό επεξεργασία στρώματος. Για να γίνει η εφαρμογή αυτής της μεθόδου, ο δρόμος πρέπει να έχει τη σωστή διατομή και όχι να εμφανίζει ανωμαλίες, γιατί σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να προηγηθεί πλάνισμα και επιφανειακή άλεση(φρεζάρισμα).Ακόμη, το υπάρχων υλικό ασφάλτου του ασφαλοτάπητα θα πρέπει να έχει τη σωστή κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανούς υλικού και σωστή αναλογία σε άσφαλτο. Στο τέλος, η άσφαλτος δεν πρέπει να επηρεαστεί από χημικές αλλαγές (όπως η οξειδωση) σε προχωρημένο επίπεδο.

4.4 Επαναδιάστρωση του παλιού οδοστρώματος με προσθήκη υλικού χωρίς ανάμιξη (repave)

Σε αυτή τη μέθοδο, η επιφάνεια του δρόμου θερμαίνεται από υπέρυθρες ακτίνες, και στη συνέχεια αναμοχλεύεται σε βάθος 3-4 εκατοστών. Έτσι ανακατεύεται ένα στρώμα από το παλιό πεζοδρόμιο και ξαναζεστένεται, και ταυτόχρονα απλώνεται ένας λεπτοτάπητας (πάχους 3 εκατοστών) από νέο ασφαλτικό μείγμα ,πάνω σε αυτό. Ακολουθεί η συμπίκνωση της διπλής στρώσηςασφαλομίγματος.Αν το παλιό μείγμα ασφάλτου έχει τροποποιηθεί χημικά,τότε αυτό αντιμετωπίζεται καλύπτοντάς το με μια νέα επίστρωση.

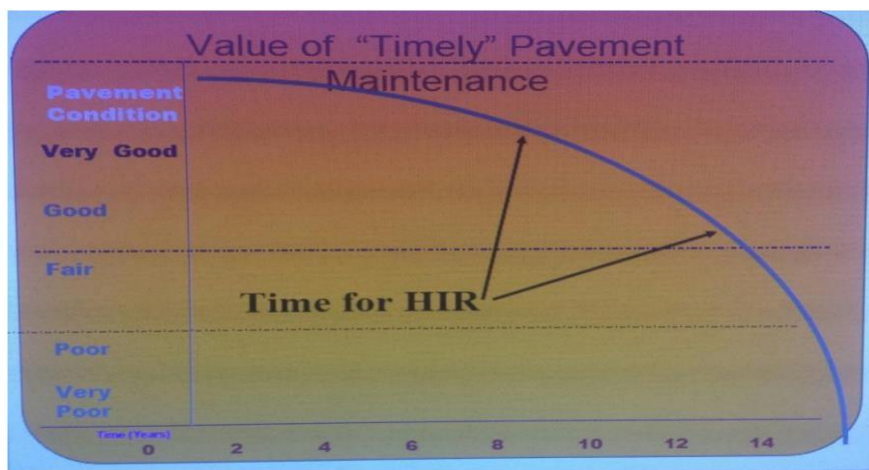
4.5 Επανάμιξη του παλαιού υλικού οδοστρώματος με νέο ασφαλτικό μίγμα (remix)

Σε αυτή τη μέθοδο, η παλιά άσφαλτος θερμαίνεται και ανασκάπτεται σε βάθος περίπου 5 εκατοστών.Γίνεται ανάμιξη του παλιού ασφαλτικού μίγματος με νέο πρόσθετο μίγμα ασφάλτου που θερμαίνεται στον ειδικό αναμικτήρα της μηχανής ανακύκλωσης.Στη συνέχεια ακολουθεί η διάστρωσή του καθώς και η κυλίνδρωσή του με το νέο μείγμα, έτσι ώστε να εμφανιστεί η συμπίκνωση. Αυτή η μέθοδος διορθώνει την κοκκομετρική διαβάθμιση του αδρανολυς υλικου,το ποσοστό της ασφάλτου στο μείγμα,καθώς και το είδος της ασφάλτου. Οι απαραίτητες προϋποθέσεις για την εφαρμογή της μεθόδου είναι η σχετική ομοιογένεια του μίγματος ασφάλτου,ως προς στην ταξινόμηση των υλικών και στο ποσοστό ασφάλτου.

4.6 Θερμή επιτόπια ανακύκλωση οδοστρωμάτων (Hot In Place Recycling, HIPR)

Η θερμή επιτόπια ανακύκλωση οδοστρωμάτων είναι εκείνη, που εφαρμόζεται στις περισσότερες περιπτώσεις σήμερα, όσο αφορά την θερμή ανακύκλωση οδοστρωμάτων.

Η επιτόπια ανάκτηση θερμότητας είναι πολλά υποσχόμενη για την μείωση κατανάλωσης ενέργειας, καθώς και την μείωση του κόστους του θερμού μείγματος ασφάλτου (Hot Mix Asphalt) που βρίσκεται στο δρόμο που επισκευάζεται. Η μέθοδος της θερμής ανακύκλωσης σε σταθερή εγκατάσταση έχει ως στόχο να αλέσει το ανώτερο στρώμα του δρόμου, να το μεταφέρει με φορητό στη μονάδα επεξεργασίας και εν συνεχεία, να στρώσει ξανά το νέο ζεστό μίγμα ασφάλτου. Η επιτόπια μέθοδος εξαλείφει την μεταφορά του ανακυκλωμένου υλικού, πραγματοποιώντας όλη την διαδικασία με ένα μόνο πέρασμα.



Εικόνα 4.9 Κατάλληλος χρόνος επιλογής της θερμής επιτόπιας ανακύκλωσης

Η θερμή επιτόπια ανακύκλωση διακρίνεται σε δύο κατηγορίες:

- Συμβατική θέρμανση οδοστρώματος (Conventional Heater)
- Αναθέρμανση οδοστρώματος (Re-Heat)

4.7 Λειτουργία συμβατικής θέρμανσης οδοστρώματος (Conventional Heater)

Βήμα 1^ο

Ο 1ος προθερμαντήρας θερμαίνει το οδόστρωμα στους 80-110°C



Εικόνα 4.10 Προθερμαντήρας οδοστρώματος (80-110°C)

Βήμα 2^ο

Ο 2ος προθερμαντήρας θερμαίνει το οδόστρωμα στους 140-150°C.



Εικόνα 4.11 Προθερμαντήρας οδοστρώματος (140-150°C)

Βήμα 3^ο
Εισαγωγή αναζωογονητικού παράγοντα.



Εικόνα 4.12 Αναζωογονητικός παράγοντας

Βήμα 4^ο
Μηχάνημα με ασάλινα δόντια και υδραυλικά ελατήρια, σκάβουν-ξύνουν το υπάρχον οδόστρωμα.



Εικόνα 4.13 Μηχάνημα με ασάλινα δόντια και υδραυλικά ελατήρια

Βήμα 5°

Αναστρέψιμες κεφαλές ξανά ανακατεύουν το πλάτος του οδοστρώματος.



Εικόνα 4.14 Αναστρέψιμες κεφαλές

Βήμα 6°

Κατανομή και επαναδιάστρωση νέου ασφαλτομίγματος.



Εικόνα 4.15 Κατανομή και επαναδιάστρωση νέου ασφαλτομίγματος.

Βήμα 7^ο
Πάτημα νέας ασφάλτου με οδόστρωτήρα.



Εικόνα 4.16 Πάτημα νέας ασφάλτου με οδόστρωμα

Βήμα 8^ο
Η νέα πλέον πλαστικοποιημένη ασφαλτος έχει λάβει την τελική της μορφή και είναι έτοιμη προς χρήση.



Εικόνα 4.17 Τελική μορφή ασφάλτου

4.8 Ανάμειξη ασφάλτου και αδρανών υλικών

Η ανάμειξη ασφάλτου και αδρανών υλικών επιτυγχάνεται με έναν από τους διάφορους τρόπους:

A) Τεμαχισμένο ασφαλτικό σκυρόδεμα

Είναι μια μορφή ασφάλτου ψυχρού μίγματος που παράγεται με διάλυση του συνδετικού υλικού σε κηροζίνη ή άλλο ελαφρύτερο κλάσμα πετρελαίου που αναμιγνύεται με το αδρανή. Ενώ βρίσκεται σε διαλυμένη κατάσταση, η ασφαλτος είναι λιγότερο παχύρρευστη και το μίγμα είναι εύκολο να λειτουργήσει και συμπαγές. Μετά την απομάκρυνση του μίγματος, το ελαφρύτερο κλάσμα εξατμίζεται. Λόγω των ανησυχιών σχετικά με τη ρύπανση από τις πτητικές οργανικές ενώσεις στο ελαφρύτερο κλάσμα, η ασφαλτος που έχει κοπεί έχει αντικατασταθεί σε μεγάλο βαθμό από ασφαλτικό γαλάκτωμα.

B) Μαστίχα ασφάλτου σκυροδέματος, ή φύλλου ασφάλτου

Αυτό παράγεται με θέρμανση σκληρής πίσσας (δηλαδή, μερικώς οξειδωμένη) σε πράσινη κουζίνα (αναμικτήρας) έως ότου γίνει παχύρρευστο υγρό και στη συνέχεια προστίθεται το συνολικό μίγμα.

Το μείγμα αδρανούς πίσσας μαγειρεύεται (ωριμάζει) για περίπου 6-8 ώρες και μόλις είναι έτοιμο, ο αναμικτήρας μαστίχας μεταφέρεται στο χώρο εργασίας όπου τα έμπειρα στρώματα αδειάζουν το μίξερ και είτε το μηχάνημα είτε το χέρι τοποθετούν το περιεχόμενο ασφάλτου μαστίχας στο δρόμο. Το ασφαλτικό σκυρόδεμα μαστίχας τοποθετείται γενικά σε πάχος περίπου 3/4-1+3/16 ίντσες (20-30 mm) για εφαρμογές σε μονοπάτια και δρόμους και περίπου 3/8 της ίντσας (10 mm) για εφαρμογές δαπέδου ή οροφής.

Γ) Ασφαλτικό σκυρόδεμα υψηλού συντελεστή, το οποίο μερικές φορές αναφέρεται με το γαλλόφωνο ακρωνύμιο ΕΜΕ (enrobé à module élevé)

Χρησιμοποιεί ένα πολύ σκληρό ασφαλτικό σκεύασμα (διείσδυση 10/20), μερικές φορές τροποποιημένο, σε αναλογίες κοντά στο 6% κατά βάρος των αδρανών, καθώς και υψηλή αναλογία ορυκτής σκόνης (μεταξύ 8-10%) για τη δημιουργία σκυροδέματος ασφάλτου στρώμα με υψηλό συντελεστή ελαστικότητας (της τάξης των 13000 MPa). Αυτό καθιστά δυνατή τη μείωση του πάχους του στρώματος βάσης έως και 25% (ανάλογα με τη θερμοκρασία) σε σχέση με τη συμβατική πίσσα, [10] ενώ προσφέρει ως πολύ υψηλές αντοχές κόπωσης. Στρώματα ασφάλτου υψηλού συντελεστή χρησιμοποιούνται τόσο σε επιχειρήσεις ενίσχυσης όσο και στην κατασκευή νέων οπλισμών για μεσαία και βαριά κυκλοφορία. Στα βασικά στρώματα, τείνουν να εμφανίζουν μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης των εντάσεων και, γενικά, καλύτερη αντοχή στην κόπωση.

Εκτός από την άσφαλτο και το αδρανή, πρόσθετα, όπως πολυμερή και αντιολισθητικοί παράγοντες μπορούν να προστεθούν για να βελτιώσουν τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος.

Περιοχές στρωμένες με άσφαλτο σκυρόδεμα - ειδικά ποδιές αεροδρομίου - μερικές φορές ονομάστηκαν «άσφαλτος», παρά το γεγονός ότι δεν κατασκευάστηκαν με τη χρήση της άσφαλτου.

Έχει αναπτυχθεί μια ποικιλία ειδικών μιγμάτων ασφάλτου σκυροδέματος για την κάλυψη συγκεκριμένων αναγκών, όπως η άσφαλτος πέτρας-μήτρας, η οποία έχει σχεδιαστεί για να εξασφαλίζει πολύ ισχυρή επιφάνεια φθοράς ή πορώδη ασφαλτοστρώματα, τα οποία είναι διαπερατά και επιτρέπουν την αποστράγγιση του νερού στο πεζοδρόμιο για τον έλεγχο των ομβρίων υδάτων.



Εικόνα 4.18 Μηχανή τοποθέτησης ασφάλτου σκυροδέματος σε λειτουργία στο Laredo του Τέξας

4.9 Συμπεράσματα

4.9.1 Σύγκριση των δύο μεθόδων επιτόπιας θερμής ανακύκλωσης

	Συμβατική θέρμανση οδοστρώματος (Conventional Heater)	Αναθέρμανση οδοστρώματος (Re Heat)
Ανάγκη για επιφανειακή επεξεργασία / Επικάλυψη	ΝΑΙ	ΟΧΙ
Υλικά που προστίθενται κατά τη διαδικασία	Ανανεωμένη άσφαλτος	Ανανεωμένη άσφαλτος
m ² /ημέρα	9000	4.500
Βάθος Διείσδυσης σε ίντσες	Μέχρι και 1,5"	Μέχρι και 2"
Επιτόπια δυνατότητα ανάμιξης	Ανασκαφή με λεπίδες	Εποχούμενος μίκτης (On board)
Δεσμός θερμικής επίδρασης	Μέτρια-Υψηλή	Χαμηλή-Μέτρια
Τιμή/m ²	οδοστρωτήρας 2,81 € + Επιφανειακή θεραπεία/Επικάλυψη	5,61 € Σύνολο

Πίνακας 4.1

4.9.2 Πλεονεκτήματα ψυχρής ανακύκλωσης

Χαρακτηριστικά	Μέθοδος ψυχρής ανακύκλωσης
Διάρκεια κατασκευής	Εξαιρετικά σύντομη διάρκεια λόγω ολοκλήρωσης εργασιών σε μία μόνο διέλευση
Κόστος κατασκευής	Μεγάλη μείωση κόστους λόγω έλλειψης μεταφοράς υλικών
Μηχανικός εξοπλισμός	Χρήση σύγχρονων μηχανημάτων με αποτέλεσμα την καλύτερη ποιότητα κατασκευής
Προστασία περιβάλλοντος	Μειωμένη ρύπανση και κατανάλωση ενέργειας
Οδική ασφάλεια	Αυξημένη οδική ασφάλεια λόγω μικρής διάρκειας εργασιών

Πίνακας 4.2

4.9.3 Πλεονεκτήματα θερμής εναντίων ψυχρής επιτόπιας ανακύκλωσης

- Η θέρμανση του οδοστρώματος μαλακώνει τα συνδετικά υλικά
- Τα αδρανή του ασφαλτομίγματος δεν θρυμματίζονται κατά την απόξεση
- Η διαβάθμιση διατηρείται
- Υψηλής ποιότητας οδοστρώματα με 80% ανακυκλωμένα υλικά
- Το κόστος αγοράς – μεταφοράς νέων υλικών μειώνεται

4.9.4 Πλεονεκτήματα θερμής επιτόπιας ανακύκλωσης

Τα πλεονεκτήματα της θερμής επιτόπιας ανακύκλωσης είναι πάρα πολλά, τόσο σε σχέση με την ανακύκλωση σε σταθερή εγκατάσταση όσο και με την μέθοδο της ψυχρής ανακύκλωσης:

- Ανακυκλώνει το 100% του υπάρχοντος οδοστρώματος, μειώνοντας την ανάγκη για νέα αδρανή υλικά
- Χρησιμοποιεί λιγότερη ενέργεια από ότι άλλες μεθόδους αποκατάστασης
- Δεν απαιτεί μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων του νέου υλικού στο εργοτάξιο, με αποτέλεσμα λιγότερες εργασίες
- Εξοικονόμηση σε χρήμα και σε χρόνο
- Πιο φιλική μέθοδος για το περιβάλλον
- Βελτίωση της αντοχής και της δύναμης του ασφαλτομίγματος
- Εξοικονόμηση πρώτων υλικών και ενέργειας
- Οι πιο λεπτές επικαλύψεις έχουν μεγαλύτερο βαθμό απορροής των υδάτων
- Η θέρμανση και η απόξεση του οδοστρώματος σφραγίζει και θεραπεύει σε βάθος τις ρωγμές
- Αποκαθίσταται η ευελιξία του ασφαλτομίγματος με την προσθήκη των χημικών παραγόντων αναζωογόνησης
- Η οδική ασφάλεια ενισχύεται μέσω της βελτιωμένης αντίστασης ολίσθησης
- Επεκτείνει την ζωή του οδοστρώματος
- Μειώνει τα αέρια του θερμοκηπίου μέχρι και 40%
- Το ανακυκλωμένο οδόστρωμα είναι υψηλότερης ποιότητας από το πρωτότυπο
- Και τέλος μπορεί και αυτό ξανά, να ανακυκλωθεί.

5. Σκυρόδεμα από ανακυκλωμένα αδρανή κεραμικά

Τα κεραμικά είναι ανόργανα και μη μεταλλικά στερεά που σχηματίζονται με θέρμανση και ψύξη. Τα κεραμικά υλικά μπορεί να έχουν κρυσταλλική ή μερικώς κρυσταλλική δομή ή μπορεί να είναι άμορφα (Κακλόπουλος, Σ. (2015)). Δεδομένου ότι τα περισσότερα από αυτά είναι κρυσταλλικά κεραμικά, κατατάσσονται στα ανόργανα κρυσταλλικά υλικά.

Τα τούβλα είναι κεραμικά υλικά που συνδέονται με κονίαμα ή κόλλα.

Τα πλακάκια είναι βιομηχανικά μέρη ισχυρών υλικών, όπως κεραμικά με ένα σκληρό φινίρισμα λούστρου που χρησιμοποιείται για επένδυση στεγάστρων, πατωμάτων και τοίχων, καθώς επίσης και για διακοσμητικούς ρόλους και έχουν ως πρώτη ύλη τον πηλό.

5.1 Περιβαλλοντική προσέγγιση

Ο σημαντικότερος αρνητικός περιβαλλοντικός αντίκτυπος στη διάθεση αυτών των υλικών από ΑΕΚΚ σε χώρους υγειονομικής ταφής, είναι η χρησιμοποίηση μεγάλων εκτάσεων γης. Σε πολλές περιπτώσεις, αυτός ο τύπος αποβλήτων αναμιγνύεται με δυνητικά ρυπογόνα στοιχεία όπως μονωτικά υλικά, κονίαμα και τσιμέντο που μπορεί να περιέχουν επιβλαβή στοιχεία. Για αυτό το λόγο, η ανακύκλωση κεραμικών υλικών είναι αναγκαία για τον ρόλο τους ως αδρανή στο σκυρόδεμα.

5.1.1 Επαναχρησιμοποίηση

Η επαναχρησιμοποίηση αυτού του τύπου απορριμμάτων πρέπει να επιτευχθεί με προσεκτική αποσυναρμολόγηση προ υπαρχόντων κατασκευών. Αν και η διάρκεια ζωής αυτών των υλικών μπορεί να ξεπεράσει τα 100 χρόνια, συνήθως αφαιρούνται σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Για την επαναχρησιμοποίηση πλακιδίων, τούβλων και κεραμικών, είναι σημαντικό να αφαιρεθεί τυχόν κονίαμα ή κόλλα.

Η επαναχρησιμοποίηση τούβλων και πλακιδίων καθιστά ικανή την μείωση της κατανάλωση ενέργειας και της εκπομπής αερίων στην ατμόσφαιρα, που συμβαίνουν συνήθως κατά την παραγωγή τους. Οι εκπομπές αυτές διακρίνονται κυρίως σε τρεις τύπους:

- Εκπομπές από κεραμική μετατροπή πρώτων υλών στον κλίβανο (υδροχλωρικό οξύ, υδροφθορικό οξύ, θειικό οξύ και διοξείδιο του άνθρακα).
- Εκπομπές καυσαερίων από τη διαδικασία καύσης (μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του αζώτου και σωματίδια).
- Εκπομπές οργανικών ενώσεων που οφείλονται στη χρήση οργανικών ουσιών (πρόσθετα) (Κακλόπουλος, Σ. (2015)).

5.1.2 Ανακύκλωση

Σύμφωνα με το Πορτογαλικό Κέντρο Κεραμικής και Γυαλιού, μόνο το 2012, η πορτογαλική κεραμική βιομηχανία δημιούργησε 10.000 τόνους οικιακών απορριμμάτων και 35.000 τόνους απορριμμάτων από τούβλα. Επιπλέον, υπάρχουν κεραμικά απόβλητα που δημιουργούνται κατά την κατασκευή και κατεδάφιση. Ως εκ τούτου, παράγεται μεγάλη ποσότητα κεραμικών αποβλήτων και μόνο μια μικρή ποσότητα ανακυκλώνεται, με αποτέλεσμα μια τεράστια απόρριψη απορριμμάτων.

Η χρήση ανακυκλωμένων κεραμικών αδρανών στο νέο δομικό σκυρόδεμα συμβάλλει στην προστασία του περιβάλλοντος και μειώνει την κατανάλωση φυσικών πόρων.

Τα απορρίμματα κατασκευής τούβλων, πλακιδίων και κεραμικών από την κατεδάφιση είναι σε μικτή μορφή. Αυτά μπορούν να θρυμματιστούν και να κοσκινιστούν αντικαθιστώντας την άμμο, το χαλίκι ή τις πέτρες για διάφορες εργασίες (Κακλόπουλος, Σ. (2015)). Αν και υπάρχουν λίγα τεχνικά πρότυπα για τη χρήση κοκκωδών κεραμικών υλικών, το μίγμα πρέπει να είναι εντελώς απαλλαγμένο από ρύπους όπως πετροβάμβακα, σκυρόδεμα, βαρέα μέταλλα και πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες, οι οποίοι μπορούν να διαφύγουν και να προκαλέσουν μόλυνση υπόγειων υδάτων. Για αυτό το λόγο, τα παραπάνω πρέπει να διαχωριστούν από το βασικό υλικό.

Οι επιλογές ανακύκλωσης είναι:

- Άθραυστα, χρησιμοποιούνται για την ολοκλήρωση και τη σταθεροποίηση μικρών δρόμων, ειδικά σε περιοχές με υγρασία όπως δάση και πεδιάδες. Αυτή η πρακτική χρησιμοποιείται ευρέως στη Δανία, όπου η προμήθεια λίθων είναι δύσκολη.
- Θρυμματισμένα ως βασικό υλικό για την κατασκευή δρόμων. Αυτή η μέθοδος είναι πολύ κοινή και έχει εφαρμογές στο Ηνωμένο Βασίλειο, τη Γερμανία, τη Δανία και την Ελβετία. Μόνο στη Γερμανία, λόγω των απαιτήσεων ποιότητας για αντοχή στον παγετό και αντοχή στην κρούση, η μέγιστη περιεκτικότητα σε τούβλα για αυτόν τον τύπο χρήσης είναι 30%. Αυτό το μίγμα αντικαθιστά φυσικά υλικά όπως άμμο και χαλίκι.
- Θρυμματισμένα, που χρησιμοποιούνται για την εξομάλυνση και την πλήρωση τάφρων στο δίκτυο σωλήνων όπου αντικαθιστούν φυσικά υλικά όπως άμμο συμβάλλοντας επίσης και στην παραγωγή σκυροδέματος. Αυτό ισχύει συνήθως για την Αυστρία, τη Δανία, την Ελβετία και Ολλανδία.
- Σπασμένα κόκκινα τούβλα και πλακάκια που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή άμμου σε γήπεδα τένις. Πάνω από τη χονδροκόκκη στρώση που μπορεί να περιέχει σπασμένα τούβλα, απλώνεται η λεπτή επιφανειακή στρώση. Αυτός ο τρόπος είναι πιο αποτελεσματικός όταν πραγματοποιείται σε εργοστάσιο τούβλων ή πλακιδίων όπου υπάρχει μεγάλη διάθεση σε ακατάλληλα υλικά.

- Θρυμματισμένα τούβλα και κεραμίδια χρησιμεύουν ως φυτικό υπόστρωμα. Αυτό το υλικό μπορεί να αναμιχθεί με βιοαπτοικοδομήσιμα οργανικά υλικά και είναι κατάλληλο για πράσινες στέγες: το πορώδες του υλικού διατηρεί την υγρασία και βοηθά στην προστασία των φυτών κατά τη διάρκεια της ξηρασίας.

Μέτρα προώθησης ανακύκλωσης:

- Σχεδιασμός για το τέλος του κύκλου ζωής τους (σχεδιασμός για προσεκτική κατεδάφιση (αποδόμηση) για επαναχρησιμοποίηση των τούβλων και κεραμιδιών (Κακλόπουλος, Σ. (2015)).
- Επέκταση της διάρκειας ζωής του κτιρίου με σκοπό τη μείωση της ποσότητας των παραγόμενων αποβλήτων.
- Μέτρα όπως φόροι ή απαγορεύσεις για διάθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής αυτού του τύπου αποβλήτων με σκοπό την ανάπτυξη διαφορετικών λύσεων.
- Βελτίωση της τεχνολογίας που αφορά τον διαχωρισμό και καθαρισμό τούβλων από ρύπους και ακαταλλήλων.

5.2 Ιδιότητες σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή κεραμικά

Η ποιότητα των ανακυκλωμένων αδρανών κεραμικών είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ποιότητα του παραγόμενου σκυροδέματος. Παρακάτω αναφέρονται οι ιδιότητες του νέου σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή κεραμικά καθώς και η σύγκριση αυτού με το συμβατικό σκυρόδεμα.

5.2.1 Εργασιμότητα

Σε μελέτη που έχει διεξαχθεί παρατηρήθηκε ότι η χρήση χονδρόκοκκου ανακυκλωμένου τούβλου ως αδρανές παρέχει σταθερά χαμηλότερη εργασιμότητα από τα αντίστοιχα μίγματα με φυσικά αδρανή. Αυτό συμβαίνει διότι η επιφάνεια των ανακυκλωμένων αδρανών είναι τραχιά.

Σε άλλη έρευνα, διατηρώντας σταθερή την αναλογία νερού / τσιμέντου για ολόκληρο το παραγόμενο σκυρόδεμα, αυξάνοντας τα λεπτόκοκκα φυσικά αδρανή με λεπτόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή τούβλα, λόγω του υψηλού ρυθμού απορρόφησης νερού των τελευταίων αδρανών, η τιμή κάθισης καταρρέει.

5.2.2 Θλιπτική δύναμη

Σύμφωνα με αναφορές, εντός του εύρους αντοχής που δοκιμάστηκε, το σκυρόδεμα από χονδρόκοκκα αδρανή τούβλα έχει μεγαλύτερη αντοχή από το παραδοσιακό σκυρόδεμα. Σε σύγκριση με τα φυσικά αδρανή, τα ανακυκλωμένα αδρανή κεραμικά έχουν αρκετά πιο γωνιώδη σχήματα και πιο τραχιές επιφάνειες για αυτό και αυτή η υψηλότερη αντοχή είναι λογική. Επίσης, για τον ίδιο λόγο τα ανακυκλωμένα αδρανή έχουν καλύτερη ανάπτυξη δύναμης, μηχανική αλληλεπίδραση αλλά και πρόσφυση. Δεν βρέθηκε σημαντική αλλαγή στον ρυθμό ανάπτυξης αντοχής μεταξύ των δύο τύπων σκυροδέματος.

Επίσης, επισημαίνεται ότι καθώς αυξάνεται ο ρυθμός αντικατάστασης, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος μειώνεται γραμμικά. Δεδομένου ότι τα χονδρόκοκκα αδρανή τούβλα είναι ελαφρύτερα και λιγότερο ανθεκτικά από τα φυσικά αδρανή, η μείωση της αντοχής είναι λογική. Ωστόσο, μελέτη αναφέρει πως με βάση την ίδια αναλογία αντικατάστασης και την ηλικία που δοκιμάστηκαν, τα μίγματα του αδρανούς τούβλου αποκτούν μεγαλύτερη αντοχή από τα ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος. Μεταξύ 28 ημερών και 90 ημερών, ο ρυθμός αύξησης της αντοχής σε θλίψη όλων των μιγμάτων που περιέχουν σπασμένα τούβλα ήταν υψηλότερος από αυτόν των μιγμάτων που περιέχουν σπασμένο σκυρόδεμα και μόνο συμβατικά αδρανή. Η ποζολανική αντίδραση που προκλήθηκε από την περιεκτικότητα σε πυρίτιο και αλουμίνα στα σπασμένα τούβλα δικαίωσε αυτό το αποτέλεσμα.

5.2.3 Αντοχή εφελκυσμού

Διαπιστώθηκε ότι το σκυρόδεμα από χοντρόκοκκα αδρανή τούβλα έχει μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό από το παραδοσιακό σκυρόδεμα. Αυτό συμβαίνει επειδή το σχήμα των αδρανών από τούβλα είναι πιο γωνιακό και η επιφάνεια είναι πιο τραχιά, γεγονός που μπορεί να βελτιώσει τη διασύνδεση και τη συγκόλληση, αυξάνοντας έτσι τη δύναμη.

Σε άλλη έρευνα αναφέρεται ότι η εφελκυστική δύναμη των μιγμάτων σκυροδέματος που αντικατέστησαν πλήρως τα χονδρόκοκκα φυσικά κεραμικά αδρανή με χονδρόκοκκα ανακυκλωμένα κεραμικά αδρανή, ήταν χαμηλότερη από αυτή του παραδοσιακού σκυροδέματος. Ωστόσο, η διαφορά είναι πολύ μικρή.

Άλλοι ερευνητές επεσήμαναν ότι παρόλο που το γωνιακό σχήμα του θρυμματισμένου υλικού και η τραχιά επιφάνεια του γενικά διευκολύνουν να δημιουργηθεί ένας καλός δεσμός μεταξύ του θρυμματισμένου αδρανούς τούβλου και της τσιμεντόπαστας, αυξάνοντας έτσι την αντοχή κάμψης, παρατηρείται μείωση της αντοχής εφελκυσμού. Αυτή η μείωση είναι παρόμοια με τη μείωση της θλιπτικής δύναμης.

5.2.4 Μέτρο ελαστικότητας

Όταν τα χονδρόκοκκα φυσικά αδρανή αντικαθίστανται από ανακυκλωμένα αδρανή, το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται. Επίσης αποτελέσματα δείχνουν ότι και για τους δύο τύπους σκυροδέματος, η αύξηση της αντοχής σε θλίψη αντιστοιχεί σε αύξηση του συντελεστή ελαστικότητας (Alves, A et al., (2014)).

Η αντικατάσταση του λεπτόκοκκου φυσικού αδρανούς με σπασμένα τούβλα θα προκαλέσει πτώση του συντελεστή ελαστικότητας. Επιπλέον, όσο αυξάνεται η αναλογία αντικατάστασης τόσο μειώνεται το μέτρο ελαστικότητας. Παρατηρήθηκε ότι, για το ίδιο επίπεδο αντικατάστασης, τα μείγματα σκυροδέματος που αποτελούνται από θρυμματισμένα τούβλα απέδωσαν υψηλότερο συντελεστή ελαστικότητας από εκείνα που περιέχουν θρυμματισμένο σκυρόδεμα.

5.3 Ιδιότητες χονδρόκοκκων ανακυκλωμένων κεραμικών αδρανών

Σε σύγκριση με τα χονδρόκοκκα κεραμικά φυσικά αδρανή, τα χονδρόκοκκα ανακυκλωμένα κεραμικά αδρανή (ΑΚΑ) παρουσιάζουν υψηλότερη απορρόφηση νερού οι τιμές για τα οποία είναι 6,1% και 0,7%, αντίστοιχα. Όσον αφορά τη χύδην πυκνότητα, αναφέρθηκε ότι για τα χονδρόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή από τούβλα (2,21 kg / dm³) είναι χαμηλότερη από αυτή των χονδρόκοκκων φυσικών αδρανών.

Σύμφωνα με έρευνα, τα χονδρόκοκκα ΑΚΑ έχουν υψηλό ρυθμό απορρόφησης νερού (12,0%). Αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να είναι ο μεγαλύτερος περιορισμός για τη χρήση τέτοιων αδρανών στην παραγωγή σκυροδέματος χωρίς απώλεια μηχανικής αντοχής, εργασιμότητας ή ανθεκτικότητας (Alves, A et al., (2014)). Αναφέρουν επίσης ότι η χύδην πυκνότητα των ανακυκλωμένων αδρανών από τούβλα είναι χαμηλότερη από εκείνη των χονδρόκοκκων φυσικών αδρανών.

5.4 Ιδιότητες λεπτόκοκκων ανακυκλωμένων κεραμικών αδρανών

Το ανακυκλωμένο λεπτόκοκκο κεραμικό αδρανές, αποτελείται από θρυμματισμένα τούβλα και θρυμματισμένα είδη υγιεινής (Alves, A et al., (2014)).

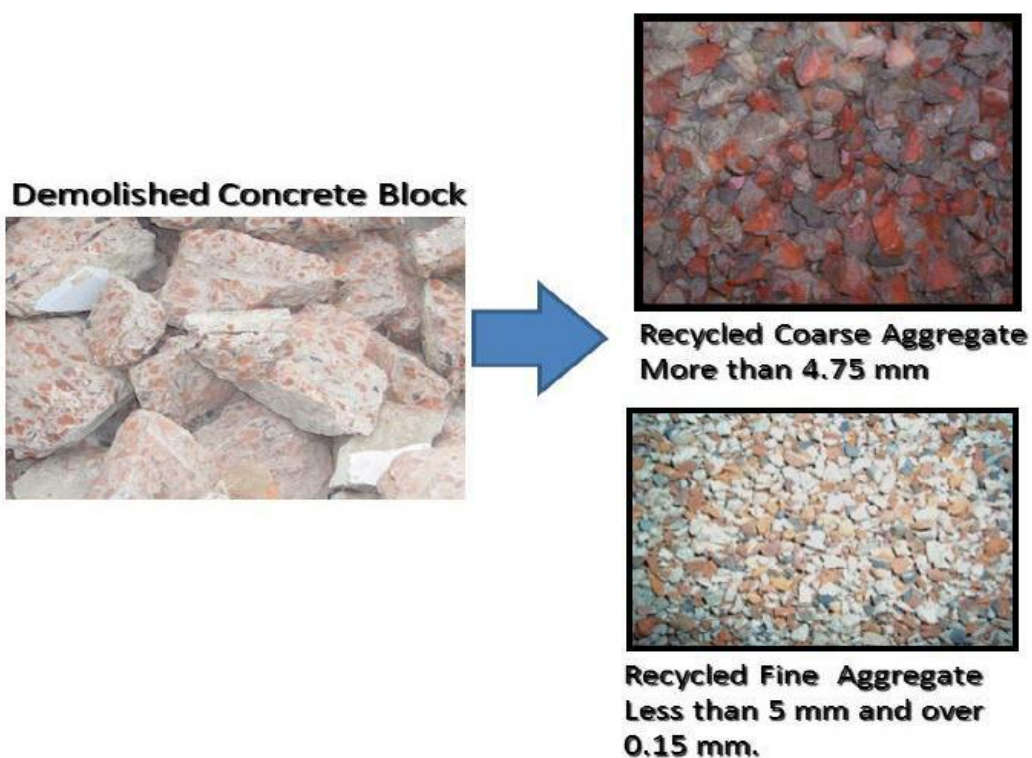
Τα ανακυκλωμένα αδρανή από τούβλα, είναι τα λεπτόκοκκα αδρανή με την πιο μειωμένη πυκνότητα. Τα ανακυκλωμένα είδη υγιεινής έχουν τη μεγαλύτερη πυκνότητα.

Σύμφωνα με έρευνα των Alves, A et al. (2014), όσον αφορά την απορρόφηση νερού μετά από βύθιση 24 ωρών, τα λεπτόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή από τούβλα έχουν την υψηλότερη τιμή (12,2%) και τα λεπτόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή από είδη υγιεινής συγκεντρώνουν το χαμηλότερο (0,2%) (Alves, A et al., (2014)). Η μέγιστη απορρόφηση νερού γίνεται στα πρώτα 10 λεπτά. Επομένως, πιστεύεται ότι το 84% του μέγιστου δυναμικού

απορρόφησης συνέβη μετά από αυτό το χρονικό διάστημα. Αυτό το επιπλέον νερό μείον την περιεκτικότητα σε νερό που υπάρχει ήδη στα αδρανή, προστίθεται στο μίγμα (20). Τα ανακυκλωμένα αδρανή τούβλα, διαπιστώθηκε ότι έχουν μεγαλύτερο πορώδες από τα ανακυκλωμένα είδη υγιεινής, μετά από ανάλυση της πυκνότητας και της απορρόφησης νερού των λεπτόκοκκων ανακυκλωμένων κεραμικών αδρανών.

5.5 Ιδιότητες σκυροδέματος με λεπτόκοκκα ανακυκλωμένα κεραμικά αδρανή

Παρακάτω θα αναλυθούν τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος που περιέχει λεπτόκοκκα αδρανή τούβλων και είδη υγιεινής.



Εικόνα 5.1 Ανακυκλωμένα αδρανή τούβλα Πηγή: Anna Halick, Pawel Ogrodnik, Bartosz Zegardło (2013)

5.5.1 Εργασιμότητα

Αν και τα ανακυκλωμένα κεραμικά αδρανή θα έχουν αρνητικό αντίκτυπο στην εργασιμότητα του σκυροδέματος που αναμιγνύεται με αυτά, η αλλαγή της φαινομενικής αναλογίας νερού / τσιμέντου είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα.

Για μίγματα σκυροδέματος που περιέχουν λεπτόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή από τούβλα, η αύξηση της αναλογίας νερού/τσιμέντου που απαιτείται για να επιτευχθεί η ίδια εργασιμότητα με το παραδοσιακό σκυρόδεμα μπορεί να αποδοθεί στην υψηλότερη απορρόφηση νερού των αδρανών. Αυτό το χαρακτηριστικό σημαίνει ότι το νερό θα μεταναστεύσει σε αδρανείς ουσίες, περιορίζοντας έτσι το ποσοστό του νερού που συμβάλλει στην εργασιμότητα.

Όσον αφορά τα μίγματα σκυροδέματος που περιέχουν ανακυκλωμένα αδρανή είδη υγιεινής, τα αποτελέσματα δεν ήταν τα αναμενόμενα. Παρά τη χαμηλή απορρόφηση νερού αυτών των αδρανών, για να επιτευχθεί ο στόχος κάθισης, η αναλογία νερού/σκυροδέματος πρέπει να αυξηθεί σημαντικά. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην λεία επιφάνεια και στην προαναφερθείσα χαμηλή απορρόφηση νερού αυτών των αδρανών. Λόγω της υγρής γέφυρας μεταξύ του λεπτόκοκκου ανακυκλωμένου αδρανούς και του χονδρόκοκκου αδρανούς, αυτά τα δύο χαρακτηριστικά μπορεί να είναι η αιτία για τη συσσώρευση μικρού ποσοστού νερού στη διεπιφάνεια μεταξύ αυτών. Ακόμα κι αν ο λόγος ανάμιξης είναι μικρός, τα σωματίδια του ανακυκλωμένου αδρανούς θα προσκολληθούν.

5.5.2 Πυκνότητα

Αναφέρεται ότι η προσθήκη λεπτόκοκκων αδρανών μειώνει τη μαζική πυκνότητα των σκυροδεμάτων από ανακυκλωμένα τούβλα αλλά και αυτών από είδη υγιεινής, υπό νέες συνθήκες. Όσον αφορά τα μίγματα με ενσωματωμένα λεπτόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή από τούβλα, αυτό οφείλεται κυρίως στη χαμηλότερη πυκνότητα αυτών των αδρανών σε σύγκριση με τα φυσικά αδρανή.

Στα μίγματα με ενσωματωμένα είδη υγιεινής, αν και η πυκνότητα όγκου αυτών των αδρανών είναι μεγαλύτερη από εκείνη των φυσικών αδρανών, η πυκνότητα μειώνεται καθώς αυξάνεται ο ρυθμός αντικατάστασης, λόγω του ότι αυτά έχουν πολύ υψηλότερη περιεκτικότητα σε νερό.

5.5.3 Αντοχή σε θλίψη

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι καθώς αυξάνεται ο ρυθμός αντικατάστασης των ανακυκλωμένων αδρανών τούβλων, η αντοχή σε θλίψη μειώνεται. Αυτή η μείωση της

θλιπτικής δύναμης, οφείλεται στη μείωση της αντοχής της πάστας τσιμέντου καθώς αυξάνεται ο ρυθμός αντικατάστασης. Ακόμα κι αν προστεθούν λεπτόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή τούβλα με μειωμένη δύναμη και πιο πορώδη δομή από τα φυσικά τούβλα, η αντοχή της πάστας τσιμέντου θα μειωθεί, με αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής του σκυροδέματος.

Στην ίδια έρευνα των Alves, A et al. (2014), την 7η ημέρα, το ποσοστό αντικατάστασης 50%, αντί για 100% ,πέτυχε τη μεγαλύτερη απώλεια. Υπάρχουν δύο πιθανοί λόγοι για αυτό το αποτέλεσμα: ένας είναι ότι τα πλήρως υποκατεστημένα συστατικά παρουσιάζουν σημαντικά υψηλότερη τυπική απόκλιση. Ο άλλος είναι, ότι λόγω της αυξημένης τραχύτητας και της δεδομένης επιφάνειας των ανακυκλωμένων αδρανών από τούβλα, σε σύγκριση με τα φυσικά, μειώθηκε η αύξηση του πορώδους της τσιμεντόπαστας, στο οποίο συμβάλει η καλύτερη διεπιφανειακή ζώνη μετάβασης.

Στο μίγμα με ενσωματωμένα είδη υγιεινής, καθώς αυξάνεται ο ρυθμός αντικατάστασης, παρατηρείται σημαντική μείωση της αντοχής σε θλίψη. Η μείωση της αντοχής σε θλίψη οφείλεται στην αύξηση της αναλογίας νερού/τσιμέντου με την αναλογία αντικατάστασης, η οποία οδηγεί σε μείωση της αντοχής της πάστας (Alves, A et al., (2014))

Στην πραγματικότητα, οι Martins et al. (2014) επισήμαναν ότι η περίσσεια νερού στο μίγμα μπορεί να προκαλέσει αύξηση της εργασιμότητας, αλλά θα έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο πορώδες και μειωμένη αντοχή σε θλίψη. Σε άλλη μελέτη διαπιστώθηκε ότι παρόλο που αυτά τα αδρανή έχουν ποζολανικές ιδιότητες, το χαμηλό πορώδες τους δεν επιτρέπει ποζολανικές αντιδράσεις, όπως ακριβώς και τα ανακυκλωμένα αδρανή από τούβλα. Επιπλέον, τα συνηθισμένα τούβλα είναι κεραμικά υλικά με τις ισχυρότερες ποζολανικές ιδιότητες.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των μιγμάτων σκυροδέματος από τούβλα και ειδών υγιεινής, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η θλιπτική αντοχή του πρώτου είναι εμφανώς υψηλότερη από αυτή του δεύτερου.

5.5.4 Αντοχή σε εφελκυσμό

Όπως και με την τάση αντοχής σε θλίψη, τα αποτελέσματα σε αυτήν την περίπτωση δείχνουν επίσης ότι καθώς αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης των ανακυκλωμένων κεραμικών αδρανών, η απόδοση θα μειωθεί. Οι λόγοι που οδηγούν σε αυτή τη μείωση της αντοχής είναι ίδιοι με αυτούς που συμβάλλουν στη μείωση της αντοχής σε θλίψη, δηλαδή καθώς αυξάνεται ο ρυθμός αντικατάστασης, αυξάνεται το πορώδες της τσιμεντόπαστας. Όταν συγκρίνουμε σκυρόδεμα με ανακυκλωμένα αδρανή τούβλα με την ίδια περιεκτικότητα σε τσιμέντο και νερό, η τραχύτητα της επιφάνειας αυτού του ανακυκλωμένου αδρανούς μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα αυξημένη αντοχή.

5.5.5 Μέτρο ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος σχετίζεται στενά με την ακαμψία των χονδροκόκκων αδρανών, την ακαμψία του κονιάματος, το πορώδες τους και τον δεσμό (20). Μεταξύ αυτών των παραγόντων, όταν χρησιμοποιείται ανακυκλωμένο λεπτόκοκκο αδρανές υλικό αντί για λεπτόκοκκο φυσικό αδρανές, επηρεάζει μόνο την ακαμψία του κονιάματος. Επομένως, καθώς αυξάνεται ο ρυθμός αντικατάστασης, η ακαμψία του κονιάματος πέφτει τόσο πολύ που επηρεάζει σημαντικά το μέτρο ελαστικότητας. Στη μείωση των μιγμάτων σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή τούβλα που σημειώθηκε, συμβάλλει σημαντικά το ότι τα ανακυκλωμένα αδρανή τούβλα έχουν χαμηλότερη ακαμψία από τα λεπτόκοκκα φυσικά αδρανή λόγω του υψηλού πορώδους τους, αλλά και λόγω της αύξησης της αναλογίας νερού/τσιμέντου (Alves, A et al., (2014)). Για μίγματα σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή είδη υγιεινής, η μείωση οφείλεται στην αύξηση της αναλογίας νερού/τσιμέντου, η οποία βελτιώνει το πορώδες του κονιάματος και ξεπερνά την υψηλότερη ακαμψία αυτού του τύπου αδρανών.

Οι Alves, A et al. (2014) επισήμαναν ότι για ένα μίγμα που περιέχει ανακυκλωμένα αδρανή από τούβλα, η μέγιστη απώλεια ήταν 29% για ποσοστό αντικατάστασης 100%, ενώ για ένα μίγμα με ανακυκλωμένα αδρανή είδη υγιεινής, η μέγιστη απώλεια ήταν 26% για το ίδιο ποσοστό αντικατάστασης.

5.5.6 Αντίσταση τριβής

Η αντοχή στην τριβή παρέχεται κυρίως από την αντίσταση τριβής της πάστας και της σύνδεσης μεταξύ αυτής και του χονδροκόκκου αδρανούς. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αντίσταση στην τριβή μειώνεται με τον ρυθμό αντικατάστασης. Στο μίγμα με προσθήκη ανακυκλωμένων λεπτόκοκκων αδρανών τούβλων, η παρατηρούμενη μείωση οφείλεται στο υψηλό πορώδες της τσιμεντόπαστας. Για μίγματα με ενσωματωμένα ανακυκλωμένα αδρανή είδη υγιεινής, η αύξηση του λόγου νερού / τσιμέντου με την αναλογία αντικατάστασης αύξησε το πορώδες της πάστας, προκαλώντας μείωση της αντοχής στην τριβή (Alves, A et al., (2014)) Επιπλέον, αν και η λεία επιφάνεια του αδρανούς έχει αντοχή στην τριβή, είναι πιο εύκολο να αποκολληθεί από την πάστα, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη απώλεια μάζας λόγω φθοράς.

Σε ένα μίγμα με ενσωματωμένο ανακυκλωμένο αδρανές από τούβλα, η μέγιστη απώλεια που προέκυψε ήταν 31,4% και το ποσοστό αντικατάστασης ήταν 100%. Για το ίδιο ποσοστό αντικατάστασης, η μέγιστη απώλεια που παρατηρήθηκε στο μίγμα με ανακυκλωμένα είδη υγιεινής ήταν 49,8%.

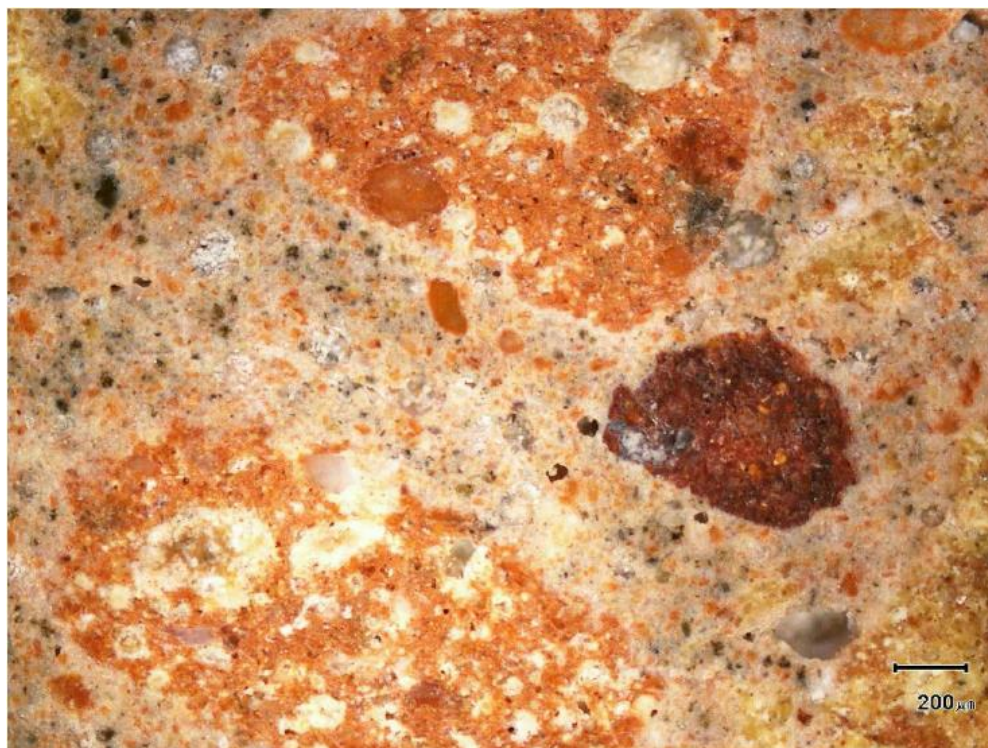
Συμπερασματικά, στα μίγματα σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή τούβλα και στα μίγματα σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή είδη υγιεινής, αποδείχθηκε ότι οι αντιστάσεις τριβής είναι μικρότερες για αυξημένο ρυθμό αντικατάστασης. Αυτό είναι

πιθανό να συμβαίνει διότι τα αδρανή είδη υγιεινής έχουν μεγαλύτερη αντοχή από αυτή των αδρανών τούβλων , αντισταθμίζοντας κατά ένα ποσοστό την υψηλή αναλογία νερού / τσιμέντου των τελευταίων.

5.5.7 Επίδραση των υπερπλαστικοποιητών

Όταν υπερπλαστικοποιητής αναλογίας 1% της μάζας του τσιμέντου προστέθηκε στο σκυρόδεμα από ανακυκλωμένα αδρανή είδη υγιεινής με ποσοστό αντικατάστασης 100%, με την ίδια αναλογία νερού / τσιμέντου του σκυροδέματος αναφοράς, διατηρώντας την βύθιση εντός του επιθυμητού διαστήματος, η αντοχή σε θλίψη και η αντοχή σε εφελκυσμό ήταν αντίστοιχα 28% και 17% υψηλότερα από αυτά του σκυροδέματος αναφοράς (Alves, A et al., (2014)).

Αυτά τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι τα λεπτόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή είδη υγιεινής έχουν υψηλό δυναμικό στην παραγωγή δομικού σκυροδέματος, υπό την προϋπόθεση ότι χρησιμοποιούνται υπερπλαστικοποιητές για την εξάλειψη της πρόσφυσης μεταξύ σωματιδίων των αδρανών.



Εικόνα 5.2 Σκυρόδεμα από ανακυκλωμένα αδρανή τούβλα Πηγή: Anna Halick, Pawel Ogronnik, Bartosz Zegardło (2013)

5.5.8 Συμπεράσματα

- Το σκυρόδεμα αναμειγμένο με λεπτόκοκκα αδρανή τούβλα μπορεί να έχει παρόμοια ποιότητα με το δομικό σκυρόδεμα, σε σύγκριση με το σκυρόδεμα με λεπτόκοκκα αδρανή είδη υγιεινής, το οποίο δεν ενδείκνυται για κατασκευαστικούς σκοπούς.
- Σε σύγκριση με το παραδοσιακό σκυρόδεμα, η προσθήκη αδρανών τούβλων δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τη θλιπτική αντοχή και την αντοχή σε εφελκυσμό, αλλά αυτές οι δύο ιδιότητες θα μειωθούν σημαντικά με την προσθήκη ανακυκλωμένων αδρανών ειδών υγιεινής.
- Το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται καθώς αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης των λεπτόκοκκων ανακυκλωμένων αδρανών τούβλων και των ανακυκλωμένων ειδών υγιεινής.
- Η ανάμειξη και των δύο αυτών ειδών λεπτόκοκκων ανακυκλωμένων κεραμικών αδρανών, θα επηρεάσει δυσμενώς την αντοχή στη τριβή.



*Εικόνα 5.3 1: χονδρόκοκκα
αδρανή είδη υγιεινής 2:
λεπτόκοκκα αδρανή είδη
υγιεινής Πηγή: Anna Halick,
Pawel Ogrodnik, Bartosz
Zegardło (2013)*

6. Σκυρόδεμα από ανακυκλωμένο αδρανή γύψο

6.1 Γενικά

Αμέτρητες κατασκευές χτίζονται και γκρεμίζονται καθημερινά, δημιουργώντας το αναπόφευκτο βάρος της διαχείρισης των απορριμμάτων κατασκευών και κατεδαφίσεων (Silgado et al., 2017). Τα περισσότερα από τα απόβλητα που παράγονται μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ή να ανακυκλωθούν (Teo and Loosemore, 2001), συμπεριλαμβανομένης της γυψοσανίδας, η οποία αντισταθμίζει

Αντιπροσωπεύει το 27% όλων των αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων (Recycling Council of Ontario, 2006). Η διάθεση πολύτιμων αποβλήτων στους χώρους υγειονομικής ταφής γίνεται όλο και πιο φιλική προς το περιβάλλον και υπάρχει συνεχής ανάγκη ανάπτυξης νέων τεχνολογιών ανακύκλωσης (Safiuddin et al., 2010). Το σκυρόδεμα είναι το πιο συνηθισμένο δομικό υλικό στον κόσμο (Adak and Mandal, 2019; Helercius et al., 2017). Είναι γνωστό ότι έχει επίσης τεράστιο αντίκτυπο στο περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένων των υψηλών εκπομπών άνθρακα που προκαλούνται κυρίως από την παραγωγή τσιμέντου (Mehta and Monteiro, 2014 Mayer, 2009). Κατά την εξέταση των περιβαλλοντικών ζητημάτων της παραγωγής και αποβλήτων τσιμέντου, υπάρχει η ευκαιρία να μετατραπεί το σκυρόδεμα σε ένα πιο βιώσιμο υλικό από τη χρήση ανακυκλωμένων αποβλήτων γύψου.

6.2 Πλεονεκτήματα γύψου

Ο γύψος είναι ένα από τα παλαιότερα και πιο συχνά χρησιμοποιούμενα δομικά υλικά στον κόσμο. Έχει πολλά θετικά χαρακτηριστικά.

- Πρώτον, είναι άφθονο γιατί μπορεί επίσης να εξορύσσεται στη φυσική του μορφή
- Συνθετική παραγωγή ως υποπροϊόν διαφόρων βιομηχανικών διεργασιών.
- Πολύ οικονομικό, ανθεκτικό στη φωτιά, ευέλικτο και ικανό να μειώνει τον ήχο (Olson, 2001).

6.3 Φυσικός γύψος

Συνθετική γύψος: Ένα από τα κύρια υποκατάστατα της φυσικής γύψου προερχόμενη από την δέσμευση του διοξειδίου του θείου, από τα καυσαέρια των θερμικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος ή από τη χημική βιομηχανία. Ο γύψος είναι ορυκτό που ανήκει στην κατηγορία των ιζηματογενών. Ανακαλύφθηκε στο κάτω στρώμα που σχηματίστηκε πριν από εκατομμύρια χρόνια. Το νερό εξατμίζεται και αφήνει πίσω ορυκτά. «Ο φυσικός γύψος αποτελείται από θειικό ασβέστιο (CaSO_4) και νερό (H_2O)». Το χρώμα του συνήθως είναι λευκό, γκρι ή άχρωμο, αλλά μπορεί επίσης να είναι κόκκινο, καφέ και κίτρινο. Μετά την πυροδότηση, σχηματίζει μια λεπτή λευκή σκόνη που ονομάζεται ανυδρίτης, ή πιο γνωστή ως "Γύψος του Παρισιού".

6.4 Απόρριψη σε ΧΥΤΑ

Το 2007, περίπου 10 εκατομμύρια τόνοι απορριμμάτων γυψοσανίδας διατέθηκαν σε χωματερές παγκοσμίως. Περίπου 4 εκατομμύρια τόνοι απορριμμάτων γύψου απορρίπτονται κάθε χρόνο στην Ευρώπη (εξαιρούνται τα απόβλητα από τις μονάδες παραγωγής, που κυμαίνονται από 600.000-1.200.000 τόνους). Η απόρριψη απορριμμάτων γύψου σε χώρους υγειονομικής ταφής μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή υδρόθειου (H₂S), ενός άχρωμου, πολύ τοξικού και εύφλεκτου αερίου που έχει μια τυπική χαρακτηριστική οσμή όταν έρχεται σε επαφή με βιοδιασπώμενα απόβλητα. Η Ευρωπαϊκή Ένωση απαιτεί τα απορρίμματα γύψου να απορρίπτονται μόνο σε ειδικές μονάδες, σε χώρους υγειονομικής ταφής αδρανών αποβλήτων για να αποφευχθεί η παραγωγή αυτού του επικίνδυνου αερίου.

6.5 Ανακύκλωση

Ο γύψος είναι μια πρώτη ύλη που μπορεί να ανακυκλωθεί επ'αόριστον. Τα προϊόντα γύψου είναι ένα από τα ελάχιστα δομικά υλικά που μπορούν να ανακυκλωθούν με την μέθοδο του "κλειστού βρόχου", δηλαδή το ίδιο προϊόν μπορεί να παρασκευαστεί ξανά από απόβλητα. «Η βιομηχανία ανακύκλωσης γύψου έχει αναπτύξει ένα σύστημα που αφαιρεί την επένδυση χαρτιού από τη γυψοσανίδα και αλέθει τη σκόνη γύψου στην ίδια σχεδόν ποιότητα με το γύψο (κύρια μορφή)»(Κακλόπουλος,2015). Η καθαρότητα του τελικού προϊόντος είναι 99%. Αυτό είναι μια καλή ποιότητα για την κατασκευή κανούριας γυψοσανίδας. «Από το σύνολο των απορριμμάτων γυψοσανίδας, το 94% αποτελείται από σκόνη γύψου και το υπόλοιπο 6% αποτελείται από χαρτί ή χαρτόνι (ή άλλα υλικά)»(Κακλόπουλος,2015). Το ποσοστό γύψου είναι αμελητέο και αυτό το μέρος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κομποστοποίηση ή θερμική παραγωγή. Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν πάντα υπολείμματα απορριμμάτων χαρτιού στη σκόνη γύψου, γεγονός που εμποδίζει την αύξηση του ποσοστού εισαγωγής ανακυκλωμένης σκόνης στην τρέχουσα διαδικασία παραγωγής. Η Δανία εδραιώθηκε στον τομέα της ανακύκλωσης γύψου των ΑΕΚΚ, με αναλογία 65%. Σύμφωνα με τη συμφωνία μεταξύ του κρατικού οργανισμού WRAP και ορισμένων βιομηχανιών γύψου, η Αγγλία προωθεί την ανακύκλωση γύψου 100% μέσω των ΑΕΚΚ για να αυξήσει το ποσοστό ανακύκλωσης. Η αύξηση της ανακύκλωσης γύψου αναλύεται στους παρακάτω τομείς:

- Στην ανάπτυξη για την πιο επιτυχημένη μέθοδο αφαίρεσης σκόνης χαρτιού από γυψοσανίδες.
- Στην επιλογή για τον ανακυκλωμένο γύψο αντί φυσικού γύψου για την παραγωγή τσιμέντου (το τσιμέντο περιέχει 5% γύψο).
- Στην χρήση ανακυκλωμένου γύψου για σκοπούς που εξυπηρετούν την γεωργία. Ο γύψος χρησιμοποιείται ως μέσο καλλιέργειας (όπως προϊόντα λιπάσματος) και ως διογκωτικό μέσο, εμπλουτίζοντας το έδαφος προσθέτοντας θείο και ασβέστιο που αυτός περιέχει και μειώνοντας τις βλαβερές συνέπειες των αλάτων νατρίου που μπορεί να υπάρχουν στο έδαφος.

6.5.1 Εμπόδια στην ανακύκλωση

Το κύριο πρόβλημα με την ανακύκλωση είναι ότι παραμένουν ρύποι χαρτιού στη σκόνη γύψου, η οποία θα έχει αρνητικό αντίκτυπο στη διαδικασία ανακύκλωσης, θα προκαλέσει ζημιά στο μηχάνημα και θα αλλάξει τις θερμικές και ακουστικές δυνατότητες του τελικού προϊόντος. Μία άλλη μελέτη ανέφερε ότι η παρουσία ημιένυδρων στον ανακυκλωμένο γύψο παίζει σημαντικό ρόλο στον χρόνο σταθερότητας του τσιμέντου. Συγκεκριμένα, οι αρχικές και οι τελικές καθυστερήσεις χρόνου σταθεροποίησης του ανακυκλωμένου γύψου που περιέχεται στο τσιμέντο ήταν 15,29% και 13,67%, αντίστοιχα.

Τα απορρίμματα γύψου που συλλέγονται κατά την κατεδάφιση και την ανακαίνιση κτιρίων ενδέχεται να έχουν μολυνθεί με άλλα υλικά, όπως βαφή, συνδετήρες μετάλλων, βίδες, ξύλο και μονωτικά υλικά, γεγονός που καθιστά δύσκολη την ανακύκλωση. Αυτό είναι το αποτέλεσμα των τωρινών δημοφιλών διαδικασιών κατεδάφισης, όταν το κτίριο φτάνει στην ωφέλιμη ζωή του, συλλέγοντας και αναμειγνύοντας όλα τα απόβλητα που δεν επιτρέπουν περαιτέρω ανακύκλωση γύψου. Επομένως, οι παραγωγοί γυψοσανίδας δεν μπορούν πάντα να βασίζονται σε εγκαταστάσεις ανακύκλωσης, επειδή μόνο τα μη επεξεργασμένα απόβλητα γύψου μπορούν να ανακυκλωθούν.

6.6 Προωθητικοί παράγοντες

- Αύξηση της τιμής του φυσικού γύψου, λόγω μεγάλης ζήτησης, σε πολλές χώρες. Αν και η ποσότητα γύψου στον κόσμο είναι επαρκής γενικά, είναι περιορισμένη στην Ευρώπη (Γαλλία, Ηνωμένο Βασίλειο, Ρουμανία). Η δοκιμή αντικατάστασης του φυσικού γύψου με ανακυκλωμένο ή συνθετικό γύψο εποτελεί ιδανική λύση ώστε να αποφευχθεί η εισαγωγή από άλλες χώρες.
- Αύξηση της φορολογίας των απορριμμάτων γύψου από τους χώρους υγειονομικής ταφής. Στο Ηνωμένο Βασίλειο και σε άλλες ευρωπαϊκές χώρες, από το 2004 έως το 2011 αυξήθηκε κατά 117%.
- Η ταξινόμηση και ο διαχωρισμός των απορριμμάτων γύψου στα εργοτάξια αποτελούν ένα από τα βασικότερα βήματα για την ανακύκλωση του γύψου. Η ποσότητα που ανακτήθηκε από τα απόβλητα προέρχεται κυρίως από την κατασκευή του κτιρίου και πιο σπάνια από την κατεδάφιση.

Ωστόσο, ακόμη και σε κτίρια όπου τα απόβλητα γύψου είναι «καθαρά» ως απόβλητα, λόγω του ότι συλλέγονται και τοποθετούνται με τα υπόλοιπα ΑΕΚΚ, τελικά θα μολυνθούν και δεν μπορούν να ανακυκλωθούν περαιτέρω. Όσον αφορά τα κατασκευαστικά απόβλητα, εκτιμάται ότι το 25% των φυσικών υλικών γύψου μπορεί να αντικατασταθεί από ανακυκλωμένη σκόνη γύψου για παραγωγή γυψοσανίδας. Επομένως, ο στόχος, που ανέρχεται στο 30%, της ευρωπαϊκής βιομηχανίας γύψου φαίνεται ότι είναι εφικτό να συμβεί όσον αφορά την εισαγωγή ανακυκλωμένου γύψου για την παραγωγή προϊόντων.

6.7 Απόβλητα γύψου

Τα απόβλητα γύψου αποτελούνται κυρίως από απορρίμματα και γυψοσανίδες. Πρόκειται για έναν πίνακα τοίχου ή οροφής κατασκευασμένος από πυρήνα γύψου μεταξύ επενδύσεων χαρτιού. Αυτό το είδος χαρτονιού ονομάζεται επίσης μεταλλική σανίδα, γυψοσανίδα, ταπετσαρία και γυροσκόπια. Τα απόβλητα γύψου σε ορισμένες χώρες περιλαμβάνουν επίσης μπλοκ γύψου και γύψο.

6.7.1 Τύποι απορριμμάτων γύψου

Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες απορριμμάτων γύψου που μπορούν να διακριθούν ανά πηγή:

- Απόβλητα γύψου που δημιουργούνται κατά την παραγωγή προϊόντων γύψου.

Αυτά τα απόβλητα βρίσκονται σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις παραγωγής γύψου και αποτελούνται από απόβλητα και μη ειδικά υλικά που παράγονται κατά τη διαδικασία παραγωγής γύψου. Η ανακύκλωση αυτού του ρεύματος αποβλήτων είναι συνήθως μέρος των δραστηριοτήτων επεξεργασίας απορριμμάτων μιας μονάδας γύψου. Τα απόβλητα καλούνται ως γύψος ή απόβλητα παραγωγής και ο αναγεννημένος γύψος που προέρχεται από την ανάκτησή του ονομάζεται «αναγεννημένος γύψος που εξάγεται από απόβλητα παραγωγής»

- Απόβλητα γύψου από νέα κτίρια.

Τα απόβλητα γύψου που παράγονται από νέες κατασκευαστικές δραστηριότητες είναι συνήθως καθαρά απόβλητα, που αποτελούνται κυρίως από κοπή γυψοσανίδας (γυψοσανίδα, ταπετσαρία ή γυροσκόπιο), τα οποία έχουν επεξεργαστεί καταλλήλως ώστε να προορισθούν για τοίχους ή οροφές. Τα απόβλητα καλύπτουν στατιστικά το 15% του υλικού γύψου που χρησιμοποιείται στις εγκαταστάσεις. Ο συγκεκριμένος τύπος απορριμμάτων αναφέρεται συχνά ως απορρίμματα γύψου νέων κατασκευών και μπορεί να μειωθεί παραγγέλλοντας σανίδες "συνήθειας", αν και στις περισσότερες αγορές, μικρότερο από το 10% από το σύνολο των παραγγελιών είναι "συνήθεια".

6.8 Συνδυασμός γύψου με ιπτάμενης τέφρας

Πραγματοποιήθηκε μία έρευνα από τον Naik et al. (2010) χρησιμοποιώντας 0,7%, 10% ή 20% σκόνη γυψοσανίδας με σκυρόδεμα αντί για τσιμέντο, σε συνδυασμό με 0%, 20%, 33%, 50% ή 60% ιπτάμενη τέφρα. Μελέτες έχουν δείξει ότι η αντοχή σε θλίψη των μειγμάτων που περιέχουν σκόνη γύψου είναι χαμηλή, ιδιαίτερα σε πολύ νεαρή ηλικία. Ωστόσο, η αντικατάσταση του τσιμέντου με συνδυασμό ιπτάμενης τέφρας και γύψου είναι πιο αποτελεσματική από την αντικατάσταση του τσιμέντου μόνο με γύψο. Ο συνδυασμός ιπτάμενης τέφρας (20%) και σκόνης γύψου (10%) και τσιμέντου (70%) έδωσε αποτελέσματα συγκρίσιμα με το συνηθισμένο τσιμέντο μετά από 91 ημέρες παλαίωσης, αποδεικνύοντας ότι έως και 10% σκόνης γύψου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σκυρόδεμα χωρίς παραγωγή. Έχει αρνητικό αντίκτυπο στις μηχανικές του ιδιότητες. Στο ίδιο πείραμα, παρατηρήθηκε μεγαλύτερη διαστολή (0,043%) στο μίγμα

γυψομπετόν, πράγμα που σημαίνει ότι η αντίσταση στην προσβολή θειικών είναι χαμηλότερη. Παρ' όλα αυτά, το μίγμα ελέγχου που περιέχει μόνο τσιμέντο έδειξε ασθενέστερη αντοχή στην προσβολή θειικού άλατος σε σχέση με το μίγμα κονιάματος με 10% γύψο σε σκόνη και 50% ιπτάμενη τέφρα.

6.8.1 Μελέτες για τα μειοκρήματα γύψου και τέφρας

Μια μελέτη από τους Raghavendra και Udayashankar (2015) ανέφερε τα χαρακτηριστικά καθαρότητας και σκλήρυνσης ενός μίγματος κονιάματος που περιέχει χυτή ταπετσαρία γύψου και ιπτάμενη τέφρα ως βοηθητικό υλικό τσιμέντου στο ελεγχόμενο υλικό χαμηλής αντοχής (ΕΥΧΑ). Σε αυτή τη μελέτη, η σκόνη λατομείου χρησιμοποιήθηκε ως λεπτόκοκκο αδρανής και η σκόνη ξηρού τοιχώματος χρησιμοποιήθηκε ως υποκατάστατο τσιμέντου με πολύ υψηλή αναλογία ανάμειξης (51,8-60,9%). Επισημαίνουν ότι όταν αναμιγνύεται με γύψο και σκόνη λατομείου, η αντοχή σε θλίψη του μείγματος ΕΥΧΑ μειώνεται και η ζήτηση νερού αυξάνεται και η μέγιστη αντοχή σε θλίψη εμφανίζεται στις 28 ημέρες.

Ο Antus et al. (2019) ερεύνησε τη σκοπιμότητα επαναχρησιμοποίησης γύψου από απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων ως αδρανούς υποκατάστατου της τσιμεντοκονιάς Portland. Το συμπέρασμα είναι ότι μετά από 28 ημέρες χρησιμοποιούνται ως μερικό πλήρες υποκατάστατο απόβλητα γύψου με μηχανική αντοχή έως και 30%.

Στην παραπάνω μελέτη του Naik et al. (2010) εξετάστηκαν μόνο πέντε τύποι σκυροδέματος ανάμεικτου γύψου, που αντικατέστησαν το 10% ή και περισσότερο τσιμεντοειδών υλικών, καθώς και η μελέτη των Raghavendra and Udayashankar (2015), λαμβάνονται υπόψη μόνο μείγματα κονιάματος. Ως επί τω πλείστων, φαίνεται ότι δεν έχει διεξαχθεί ουσιαστική τεχνική έρευνα σε μεγάλη ποσότητα γύψου ως μερικό υποκατάστατο του τσιμέντου στο σκυρόδεμα. Οι νεότερες αναφορές στον περιβαλλοντικό τομέα οδήγησαν σε εκτεταμένη έρευνα σχετικά με τη χρήση απορριμμάτων σκυροδέματος για την καταπολέμηση των αρνητικών επιπτώσεων της υπερθέρμανσης του πλανήτη (Aprianti, 139 2017; Bajrai et al., 2020; Meyer, 2009; Suarez et al., 2016). Ένας ικανοποιητικός αριθμός πειραμάτων και μελετών έχουν αποδείξει πως η ιπτάμενη τέφρα είναι ένα ικανοποιητικό αντικατάστατο του τσιμέντου τόσο από οικονομική όσο και από περιβαλλοντική άποψη, αν και δεν θεωρείται συχνά πως μεγαλώνει η περιεκτικότητά σε γύψο.

Ο γύψος είναι ένας ενεργοποιητής θειικού ασβεστίου που ευρέως στο τσιμέντο, αλλά λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς του σε θειικό άλας, το ποσοστό του περιορίζεται σήμερα στο 5% περίπου του τσιμεντοειδούς υλικού. Παραδοσιακά, πιστεύεται ότι η παρουσία μεγάλων ποσοτήτων θειικού άλατος στο σκυρόδεμα μπορεί να προκαλέσει υπερβολική διαστολή και ρωγμές (Mehta and Monteiro, 2014; Naik et al., 2010). Για το λόγο αυτό, λίγες μελέτες έχουν διερευνήσει τη δομική σκοπιμότητα της χρήσης γύψου σε γενικά αποδεκτές αναλογίες

6.8.2 Εργαστηριακό πείραμα

Η δοκιμαστική μήτρα αποτελείτο από 15 παρτίδες σκυροδέματος με διάφορα συστατικά τσιμέντου, συμπεριλαμβανομένου ενός μείγματος ελέγχου χωρίς γύψο στο τσιμεντοειδές υλικό. Ο γύψος χρησιμοποιείται ως μερικό υποκατάστατο του βάρους του τσιμέντου σε αναλογίες 0, 5, 10, 15 και 20%. Η ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιείται για την αντικατάσταση του 0, 25 και 50% του βάρους του τσιμέντου.

Σε όλα τα μείγματα, ο λόγος νερού-τσιμέντου (W/C) διατηρείται στο 0,48. Για να διατηρηθεί η συνοχή του μείγματος.

6.8.3 Χαρακτηριστικά υλικών

Το τσιμέντο που χρησιμοποιείται σε όλα τα μείγματα είναι το τσιμέντο GU Portland (CRH Canada Group, ON, Canada). Η ιπτάμενη τέφρα είναι η ασφαλική ιπτάμενη τέφρα «F-Class», που παρέχεται από τοπικές εταιρείες (Ocean Contractors, Halifax, NS, Canada). Ο γύψος που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη προέρχεται από γυψοσανίδα από εταιρεία ανακύκλωσης απορριμμάτων (Gypsum, Denver, Pennsylvania, USA), η οποία επεξεργάζεται το υλικό. Το μέγεθος των σωματιδίων κυμαίνεται από 3.175 mm έως την εξαιρετικά λεπτή σύσταση σκόνης. Λεπτό αδρανές (άμμος) και χονδρόκοκκο αδρανές (χαλίκι) προέρχονται από περιοχές μετά το ASTM C33 (2018) (Casey Metro, Halifax, NS, Canada) 5.

6.8.4 Δοκιμή υγρασίας

Η δοκιμή υγρασίας δείχνει ότι το χαλίκι είναι πολύ μικρό. Η μέση περιεκτικότητα σε νερό είναι 0,1%, επομένως χρησιμοποιείται υπό κανονικές συνθήκες. Η σκόνη γύψου και η άμμος έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία (18,3% και 3,4% αντίστοιχα), έτσι στεγνώνουν σε φούρνο όλη τη νύχτα και στη συνέχεια ψύχονται. Στη συνέχεια φυλάσσεται σε αεροστεγές δοχείο πριν από τη χρήση.

6.8.5 Θλιπτική αντοχή

Μετά από 7, 28 και 90 ημέρες ωρίμανσης, κάθε δείγμα δοκιμάστηκε για τη θλιπτική του αντοχή (f_c) υπό αξονικό φορτίο. Ο Πίνακας 6.1. συνοψίζει τα αποτελέσματα των δοκιμών συμπίεσης με βάση τον μέσο όρο τριών ίδιων δειγμάτων για κάθε ομάδα δειγμάτων.

6.8.6 Επίδραση γύψου και τέφρας σε φυσικές ιδιότητες

Όσον αφορά την εργασιμότητα, η περιεκτικότητα σε γύψο φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση κατά το στάδιο της ανάμιξης. Η περιεκτικότητα σε γύψο αυξάνεται για να διατηρηθεί η συνοχή. Εάν δεν προστεθεί παράγοντας μείωσης νερού, το φρέσκο σκυρόδεμα με υψηλή περιεκτικότητα σε γύψο θα παραμείνει πολύ παχύρρευστο και μη

λειτουργικό. Η ποσότητα του πλαστικοποιητή που προστίθεται καθορίζεται με ανάμιξη σύμφωνα με τις φυσικές αρχές και την οπτική αξιολόγηση του μείγματος.

Σε υψηλότερη περιεκτικότητα σε γύψο (15% και 20%), η περιεκτικότητα σε ιπτάμενη τέφρα δεν έχει σημαντική επίδραση στη καθαρότητα του μίγματος φρέσκου σκυροδέματος και η ζήτηση για υπερπλαστικοποιητή ισοδυναμεί με όλο το περιεχόμενό του. Το μείγμα που περιέχει 5% και 10% γύψο διατηρεί μια σχετικά σταθερή συνοχή.

6.8.7 Μελλοντική έρευνα

Το πιο σοβαρό και δύσκολο είναι η ανάκτηση και η εργασιμότητα σε ένα μείγμα με περιεκτικότητα σε γύψο 20%. Για το λόγο αυτό, δεν έχουν γίνει δείγματα με περιεκτικότητα σε γύψο άνω του 20%. Συνιστάται περαιτέρω έλεγχος της διαδικασίας χημικής ενυδάτωσης στο μέλλον. Η έρευνα περιλαμβάνει την ανάλυση της μικροδομής καθ' όλη την περίοδο ενυδάτωσης και το σπάσιμο του σκυροδέματος μετά από βλάβη. Η τέφρα στο σκυροδέμα και ο αναγεννημένος γύψος είναι κατάλληλα, αφού πρώτα παρατηρηθεί προσεκτικά ότι τα προϊόντα ενυδάτωσης είναι διαφορετικών ηλικιών.

Εφαρμόζεται για ακριβή μέτρηση τυχόν διαστολής ή συστολής υγρού σκυροδέματος και ξηρού σκυροδέματος. Συνιστούμε ανεπιφύλακτα δείγματα, όπως συγκριτές μήκους που πληρούν τον εξοπλισμό Απαιτήσεις προδιαγραφών που περιγράφονται στο ASTM C490 (2017). Αυτή η συσκευή δεν είναι διαθέσιμη. ΌΤα αποτελέσματα αυτής της μελέτης θα χρησιμοποιηθούν για να συνεχιστεί ο έλεγχος της ανθεκτικότητας των δειγμάτων εκθέτοντας τα δείγματα σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες και συγκρίνοντάς τα μετά την περίοδο ωρίμανσης των 28 ημερών. Αντοχή μετά από επιλεγμένο χρόνο έκθεσης.

Οι προϋποθέσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη περιλαμβάνουν ξηρό, βυθισμένο σε γλυκό νερό, βυθισμένο σε θαλασσινό νερό (ωκεανός) και ξηροί/υγροί κύκλοι σε γλυκό νερό και θαλασσινό νερό. Συνιστάται επίσης να συνεχίσετε τη δοκιμή αντοχής, λαμβάνοντας υπόψη άλλα περιβάλλοντα Συνθήκες όπως κύκλοι θέρμανσης και ψύξης ή κατάψυξη και απόψυξη. Οι χημικές αντιδράσεις είναι επίσης σημαντικές, συμπεριλαμβανομένων των αντιδράσεων θειικού, χλωριούχου ή αλκαλικού. Το θειικό άλας δεδομένου ότι ο γύψος παρέχει επιπλέον θειικό άλας, μπορεί να αυξήσει τη διάβρωση (SO₄).



Εικόνα 6.1

7. Σκυρόδεμα από ανακυκλωμένο αδρανές γυαλί

Ο ηλεκτρικός λαμπτήρας αποτελείται από 94% γυαλί, 5% μέταλλο-πλαστικό και 1% υδράργυρο και πούδρα φώσφορου. Ωστόσο, το γυαλί που δεν είναι βιοδιασπώμενο δεν μπορεί να καταλήξει σε χώρους υγειονομικής ταφής, επομένως θα πρέπει να εξεταστούν νέοι μέθοδοι ανακύκλωσης. Λόγω της υψηλής κατανάλωσης υλικών στον κατασκευαστικό κλάδο, η αντικατάσταση των φυσικών αδρανών με λεπτόκοκκο ανακυκλωμένο αδρανές γυαλί (ΑΑΓ) στο νέο σκυρόδεμα, φαίνεται σαν μία λογική λύση.



Εικόνα 7.1 Ανακυκλωμένο απόβλητο γυαλί Πηγή: Esraa Emam Ali , Sherif H. Al-Tersawy (2012)

7.1 Περιβαλλοντική προσέγγιση

Με την εφεύρεση του ηλεκτρισμού και τη γενική ηλεκτροδότηση της γης, η βιομηχανία φωτισμού έχει αναπτυχθεί. Η σχέση των ανθρώπων με τη χρήση Ηλεκτρικών και Ηλεκτρονικών Εξοπλισμών (ΗΗΕ) είναι αναπόσπαστη, για αυτό το λόγο τα Απόβλητα Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού (ΑΗΗΕ) αναφέρονται ως η ταχύτερη αναπτυσσόμενη μορφή αποβλήτων. Αν και οι υπάρχοντες πηγές φωτός, αποδίδουν ενεργειακά και έχουν μεγάλο κύκλο ζωής, τελικά θα φθαρθούν και θα πρέπει να αντικατασταθούν. Οι παλιοί λαμπτήρες αποτελούν βιομηχανικά απόβλητα που δεν είναι αρκετά εφικτό να αποβληθούν, ενώ επίσης ορισμένες πρώτες ύλες είναι ιδιαίτερα τοξικές με αποτέλεσμα τα απόβλητα να είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Έτσι, το θέμα αυτό των αποβλήτων χρήζει απαραίτητης προσοχής.

7.1.1 Επαναχρησιμοποίηση

Τα κύρια συστατικά των λαμπτήρων είναι τα στενά συνδεδεμένα στοιχεία γυαλιού και μετάλλου. Όσον αφορά την επαναχρησιμοποίηση των υλικών, αυτό είναι ένα

πρόβλημα, επειδή οι άμεσοι αποδέκτες αυτών των αποβλήτων δεν μπορούν να είναι κατασκευαστές στοιχείων φωτισμού, όπως συμβαίνει, π.χ., με τον τυπικά χάλυβα ή τη βιομηχανία γυαλιού (Zegardlo, B., et al., (2018)). Τα απορρίμματα διανέμονται σε έναν μεσάζοντα οργανισμό που καθιστά ικανό το υλικό για επαναχρησιμοποίηση. Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητας αυτών των διεργασιών, δημιουργείται οικονομικό ζήτημα. Για να παραχθούν αψεγάδιαστοι διαφανείς λαμπτήρες, τα απόβλητα δεν πρέπει να περιέχουν ακαθαρσίες προτού λιώσουν ξανά. Επιπλέον, διαδικασίες όπως η συλλογή, ο διαχωρισμός και η μεταφορά αυξάνουν το κόστος ανακύκλωσης (Zegardlo, B., et al., (2018)).

Για τους παραπάνω λόγους, αναζητούνται άλλες μέθοδοι ανακύκλωσης απορριμμάτων γυαλιού, στις οποίες δεν υπάρχει τόσο μεγάλη απαίτηση για τη νέα προσαρμοστικότητα παραγωγής των αποβλήτων. Ένας κλάδος που αναφέρεται συχνά σε αυτόν τον τομέα είναι η παραγωγή υλικών που προορίζονται για δομικές κατασκευές. Για παράδειγμα, η χρήση γυαλιού για την παραγωγή σύνθετων υλικών από σκυρόδεμα μπορεί έχει θετικά αποτελέσματα. Αν το γυαλί διαχωριστεί από τα χαλύβδινα στοιχεία που εμπεριέχονται στον λαμπτήρα, θα είναι πιο οικονομικό για τις κατασκευαστικές εταιρίες. Επιπλέον, λόγω της χρησιμοποίησης του ανακυκλωμένου γυαλιού ως αδρανές στο σκυρόδεμα, θα μειωθεί η ανάγκη εξόρυξης παραδοσιακών αδρανών.

Η χρήση γυαλιού για σκυρόδεμα είναι μια ευρέως γνωστή διαδικασία και οι διαφορετικές κατευθύνσεις αυτής της δραστηριότητας μπορούν να διακριθούν ανάλογα με τη μορφή χρήσης του γυαλιού. Η πρώτη είναι η χρήση ινών γυαλιού, ο ρόλος των οποίων είναι να βελτιώνουν τις αντοχές των σύνθετων υλικών, κάνοντάς τα πιο ανθεκτικά σε ατμοσφαιρικούς παράγοντες όπως υγρασία, ηλιοφάνεια ή παγετό. Ωστόσο, τέτοιες

δραστηριότητες απαιτούν τήξη γυαλιού και δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν τοπικά (Zegardlo, B., et al., (2018)). Μια άλλη κατεύθυνση είναι η χρήση σκόνης γυαλιού. Μελέτες έχουν δείξει ότι η σκόνη γυαλιού μπορεί να επιδράσει θετικά όσον αφορά τις αντοχές του σκυροδέματος. Ωστόσο, για να επιτευχθεί αυτό χρειάζεται γυαλί πολύ μικρής κοκκομετρίας, διαδικασία η οποία είναι αρκετά κοστοβόρα.

Πρόσφατα έχει αναπτυχθεί η τάση χρησιμοποίησης ανόργανων αποβλήτων με τη μορφή χονδρόκοκκων αδρανών, η οποία αποτελεί μια πιο οικονομική λύση. Μελέτες που βασίζονται σε απορρίμματα γυαλιού που εξάγονται π.χ. από οθόνες LCD δείχνουν ότι χαρακτηριστικά του σκυροδέματος που περιέχει γυαλί ως αδρανές (αντοχή σε εφελκυσμό και αντοχή σε θλίψη, απορρόφηση νερού), δεν διαφέρουν σημαντικά από αυτά του παραδοσιακού σκυροδέματος. Για την κατασκευή αδρανούς γυαλιού, χρησιμοποιούνται θραυστήρες όπως ακριβώς γίνεται και στα εργοστάσια σκυροδέματος καθώς επίσης και η παραγωγή του είναι ίδια με αυτή του παραδοσιακού αδρανούς. Ένα άλλο πλεονέκτημα αυτής της λύσης είναι το μηδαμινό κόστος μεταφοράς διότι δίνεται η δυνατότητα τοπικής χρήσης απορριμμάτων γυαλιού.

Άλλες μελέτες έχουν δείξει ότι τα τσιμεντοειδή υλικά που βασίζονται σε αδρανές γυαλί θα αντιδράσουν με πυριτικά άλατα αλκαλίων, κάτι που είναι επιζήμιο για την ανθεκτικότητα των υλικών.

7.1.2 Ανακύκλωση ηλεκτρικών λαμπτήρων

Το μηχάνημα ανακύκλωσης έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας, οι πρώτες ύλες να εμφανίζονται στην πιο αγνή τους μορφή. Η διαδικασία πραγματοποιείται σε δύο στάδια με τον διαχωριστή λαμπτήρων. Στο πρώτο στάδιο, συμβαίνει θραύση μετά το πέρας της οποίας έχουμε το γυαλί και τα υπόλοιπα υποπροϊόντα, ενώ στο δεύτερο στάδιο λαμβάνει χώρα ο διαχωρισμός των υλικών αυτών.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται φίλτρα ενεργού άνθρακα στα οποία περιορίζεται ο υδράργυρος. Αυτή είναι μια παγκοσμίως αναγνωρισμένη μέθοδος για τη σύλληψη υδραργύρου και την αποτροπή της απελευθέρωσής του στο χώρο εργασίας αλλά και στο περιβάλλον. Επίσης χρησιμοποιούνται φίλτρα για τον περιορισμό πούδρας φωσφόρου σε 2 ειδικούς κάδους.

Αναλυτικότερα, στην είσοδο του μηχανήματος, υπάρχει ένα βαρέλι στο οποίο κατατάσσονται ολόκληροι οι λαμπτήρες και εισάγονται στον θραυστήρα σε τρία στάδια για να εξασφαλιστεί η κατάλληλη ροή για την ομοιόμορφη σύνθλιψή τους. Ο λοξός θραυστήρας αποτελείται από έναν περιστρεφόμενο άξονα στον οποίο είναι εγκατεστημένος ένας διάτρητος κύλινδρος με οπές. Ενώ συμβαίνει η θραύση, υαλόθραυσμα και μεταλλικά στοιχεία θα αποδεσμευτούν από τις οπές. Τα πλαστικά

μέρη και οι κάλυκες που υπολείπονται από τους λαμπτήρες περνούν από τον κύλινδρο, λόγω της βαρύτητας, στο πρώτο σημείο συλλογής. Αυτός είναι ο πρώτος διαχωρισμός του γυαλιού από τα πλαστικά ή μεταλλικά μέρη του λαμπτήρα.



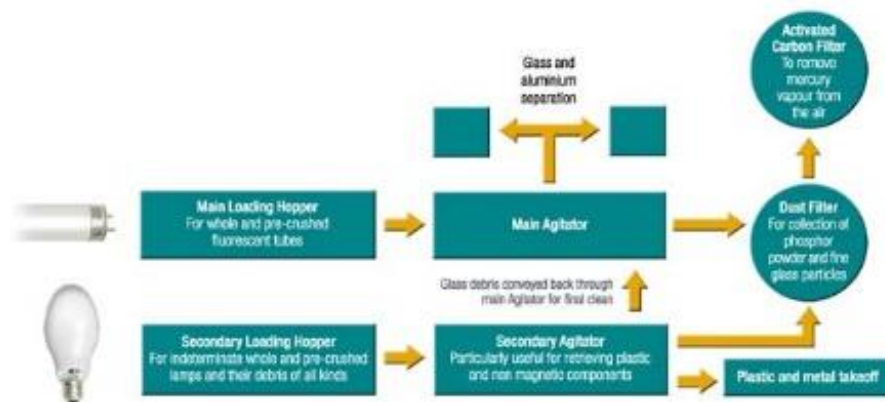
Εικόνα 7.2 Είσοδοι λαμπτήρων στο διαχωριστή Πηγή: Γαϊτανέλης, Δ. (2015)

Στη συνέχεια, μέσω ενός ειδικού μεταφορέα, το θρυμματισμένο γυαλί από τα δύο άκρα εισόδου οδηγούνται στον κύριο διαχωριστή, όπου ένας μαγνήτης χρησιμοποιείται για τη συλλογή σιδηρομαγνητικών στοιχείων. Επιπλέον, οποιοδήποτε υπόλειμμα από τους κάλυκες, συλλέγεται μέσω του δονούμενου πλέγματος, επιτρέποντας μόνο στο γυαλί να περάσει. Έτσι στο τέλος, το γυαλί συλλέγεται στην πιο αγνή του μορφή καθώς επίσης συλλέγονται και τα σιδηρομαγνητικά στοιχεία.



Εικόνα 7.3 Σημεία συλλογής υαλοθραύσματος και σιδηρομαγνητικών στοιχείων Πηγή: Γαϊτανέλης, Δ. (2015)

Η κατεργασία που αναλύθηκε προηγουμένως έχει ως αποτέλεσμα καθαρότερο θρυμματισμένο γυαλί χωρίς προσμείξεις, σε συγκεκριμένο μέγεθος κόκκων. Σύμφωνα με τον σκοπό της παραγωγής γυαλιού, η κάθε εταιρεία χρησιμοποιεί κόσκινο για να διασφαλίσει ότι το γυαλί έχει τη κοκκομετρία που απαιτείται.



Εικόνα 7.4 Σύστημα ανακύκλωσης γυαλιού Balcan Πηγή: <http://www.cfl-lamprecycling.com/>

7.2 Αλκαλοπυριτική Αντίδραση

Η αλκαλοπυριτική αντίδραση (ASR) είναι ένας ανασταλτικός παράγοντας στη χρήση γυαλιού. Αυτή η αντίδραση σχηματίζεται κυρίως από ακατέργαστα υλικά που περιέχουν πυρίτιο. Συγκεκριμένα, η διάλυση του πυριτικού δεσμού απελευθερώνει πυρίτιο και στη συνέχεια το πυρίτιο σχηματίζει δεσμούς με τα αλκάλια του τσιμέντου (Γαρδέλης, Γ. (2011)). Αυτό το γεγονός συνεχίζει να συμβαίνει στα προϊόντα που παράγονται, οδηγώντας σε διαστολές που επηρεάζουν ποιοτικά το νέο προϊόν.

Κατά την παραγωγή σκυροδέματος με αδρανή υψηλής περιεκτικότητας σε διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), είναι προτιμότερη η χρήση τσιμέντου με χαμηλή περιεκτικότητα σε αλκάλια όπως οξείδιο του νατρίου (Na_2O) και οξείδιο του καλίου (K_2O). Αυτά τα αλκάλια προάγουν την αντίδραση ASR με πυρίτιο, έτσι ώστε το υλικό να αποκτά γρήγορα πρώιμη αντοχή, αλλά η τελική αντοχή του προϊόντος να μειώνεται.

Επιπλέον, είναι αναγκαίο να τονιστεί ότι όταν χρησιμοποιείται ΑΑΓ σε προϊόντα τσιμέντου, δεν σημαίνει πάντα και αύξηση της αλκαλοπυριτικής αντίδρασης λόγω της αυξημένης περιεκτικότητας αλκαλίων που έχει το γυαλί. Ως εκ τούτου, ο βασικός στόχος για την αποφυγή των διαστολών που συμβαίνουν λόγω της ASR, είναι η λειτουργία του γυαλιού ως ποζολανικό υλικό.

7.2.1 Επίδραση της αλκαλοπυριτικής αντίδρασης στο σκυρόδεμα με ανακυκλωμένο αδρανές γυαλί

Διάφορες μελέτες έχουν δείξει ότι η προσθήκη θρυμματισμένου γυαλιού ως αδρανή στο σκυρόδεμα, δεν επηρεάζει την εργασιμότητα του σκυροδέματος. Ωστόσο, αποδεικνύεται ότι όσον αφορά τον περιεχόμενο αέρα, το πορώδες, τη πυκνότητα και την απορρόφηση του νερού, παρατηρείται κάποια μείωση. Η μείωση του πορώδες και η απορρόφηση νερού έχει ως αποτέλεσμα η διάρκεια ζωής του σκυροδέματος κάτω από σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες, να αυξηθεί. Επίσης, για τη παραγωγή σκυροδέματος με γυαλί, μεγαλύτερη ποσότητα νερού είναι αναγκαία. Οι μηχανικές ιδιότητες μειώνονται κυρίως με την αύξηση της ποσότητας ΑΑΓ.

7.2.1.1 Πυκνότητα

Καθώς προστίθεται μέρος γυαλιού στο σκυρόδεμα, η πυκνότητα του προϊόντος παρατηρείται ότι αυξάνεται. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στο υψηλό ειδικό βάρος του δεσμού ενυδατωμένου πυριτικού ασβεστίου (C-S-H). Ο υπάρχων δεσμός άνθρακα-υδρογόνου (C-H) μετατρέπεται στον παραπάνω δεσμό λόγω της ποζολανικής δράσης που συμβαίνει με τη προσθήκη θραυσμάτων γυαλιού. Τέλος, η προσθήκη θραυσμάτων γυαλιού θα επηρεάσει τη μικροδομή του νέου υλικού, καθιστώντας το πιο πυκνό και επομένως λιγότερο διαπερατό.

7.2.1.2 Κοκκομετρία

Από διάφορες μελέτες, τα ποικίλη μεγέθη κόκκων δεν φαίνεται να επηρεάζουν το γεγονός της ASR. Ωστόσο, αποδεικνύεται ότι η μείωση του μεγέθους του θρυμματισμένου γυαλιού που χρησιμοποιείται μπορεί να επιδράσει θετικά στη συμπεριφορά της αντίδρασης ASR και να αυξήσει το ποσοστό του γυαλιού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων.

Πιο συγκεκριμένα, κάποιοι ερευνητές χρησιμοποίησαν θραύσματα γυαλιού μεγέθους 4-16 mm αντικαθιστώντας το χονδρόκοκκο αδρανές, σε ποσοστό έως 60%. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η προσθήκη γυαλιού δεν επιδρά σημαντικά στην κατεργασιμότητα του προϊόντος αλλά όταν η ποσότητα του είναι μεγαλύτερη της τάξης του 20% παρατηρείται μείωση της αντοχής του. Συγκεκριμένα, η θλιπτική αντοχή, για ποσότητα γυαλιού 60%, μειώνεται κατά 49%.

Η τραχύτητα του θρυμματισμένου γυαλιού μειώνει τη συνοχή μεταξύ γυαλιού και τσιμέντου, με αποτέλεσμα προϊόντα με μειωμένο θλιπτικό φορτίο. Αντίθετα, το λεπτόκοκκο γυαλί φαίνεται πως λόγω γεωμετρίας, μειώνει την επίδραση της ASR.

Σε άλλη μελέτη, για διαφορετικές ποσότητες και μεγέθη γυαλιού, συμπεράθηκε ότι όσο αυξάνεται το μέγεθος του γυαλιού, τόσο αυξάνεται η εξάπλωση της ASR, ενώ ικανοποιητικά αποτελέσματα προέκυψαν για γυαλί κοκκομετρίας που δε ξεπερνά τα 1.18 mm και ποσοστό αντικατάστασης 20%.

Στην έρευνα του Idir et al.(2010) προέκυψε ότι το δείγμα με 20% γυαλί αντί για άμμο (<1mm) δεν εμφάνισε αποθαρρυντικά αποτελέσματα όσο αφορά την αντίδραση ASR. Όταν τα θραύσματα γυαλιού έχουν κοκκομετρία της τάξης μεγέθους του μm παρατηρείται αύξηση της ποζολανικής δραστηριότητας του γυαλιού, καθιστώντας περισσότερο εφικτή την χρήση παραπάνω ποσότητάς του στη νέα κατασκευή. Συγκεκριμένα, σε δείγματα τσιμέντου με μέγεθος κόκκων γυαλιού μικρότερο από 150μm, είναι επιτρεπτό ένα ποσοστό γυαλιού έως 40% να αντικαταστήσει την άμμο. Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες, καθώς μειώνεται το μέγεθος των σωματιδίων, η αντοχή σε θλίψη αυξάνεται. Για δείγματα μεγαλύτερα από 1 mm, η αντοχή είναι χαμηλότερη από την αντοχή αναφοράς (Γαϊτανέλης, Δ. (2015)).

Τέλος, μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι όταν χρησιμοποιείται λείο λεπτόκοκκο γυαλί, είναι πιο συμφέρουσα η χρήση γυαλιού ποσοστού 40% και μεγέθους 120μm από γυαλί 20% και 8μm αντίστοιχα, καθώς αποτελεί πιο κερδοφόρα λύση, δεδομένου ότι και τα δύο αυτά προϊόντα πληρούν τις απαιτούμενες προδιαγραφές.

7.2.1.3 Θερμοκρασιακός παράγοντας

Σε μια μελέτη που έγινε από τον Terro (2006), εξέτασε δείγματα σκυροδέματος στα οποία είχε προστεθεί λείο και τραχύ γυαλί, σε διάφορες θερμοκρασίες. Καθώς η θερμοκρασία αυξήθηκε στους 700°C, η θλιπτική αντοχή του δείγματος μειώθηκε κατά 20%. Αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί από το γεγονός ότι το όριο τήξης του γυαλιού είναι κοντά στους 700-800°C, όπου η μικροδομή του γυαλιού έχει υποστεί σημαντικό φυσικό και μηχανικό μετασχηματισμό.

Η μετάβαση σε αυτές τις θερμοκρασίες προκαλεί το γυαλί μέσα στο μίγμα να μαλακώσει, γεγονός το οποίο ευθύνεται για τη μείωση της αντοχής σε θλίψη. Ωστόσο, όταν ο ρυθμός αντικατάστασης είναι 10% και η θερμοκρασία σκλήρυνσης ανέρχεται στους 150°C, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος με θρυμματισμένο γυαλί, είναι υψηλότερη από εκείνη του δείγματος ελέγχου. Σε γενικές γραμμές, οι μηχανικές ιδιότητες δειγμάτων με γυαλί έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες αρκεί το ποσοστό αντικατάστασης γυαλιού να μη ξεπερνάει το 10%.



Εικόνα 7.5 Επίδραση της Αλκαλοπυριτικής Αντίδρασης ASR στο σκυρόδεμα Πηγή: Deschênes, R. Albert (2017)

7.3 Ιδιότητες σκυροδέματος με λεπτόκοκκο ανακυκλωμένο αδρανές γυαλί

Καθότι η ποζολανική δραστηριότητα εξαρτάται από την επιφάνεια του υλικού και τη μορφή του, από τις έρευνες προκύπτει ότι όσο πιο λεπτόκοκκο είναι το υλικό τόσο καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζει σε σχέση με την εξάπλωση της αλκαλοπυριτικής αντίδρασης (Γαϊτανέλης, Δ. (2015)).

7.3.1 Εργασιμότητα

Σε έρευνα των Adaway, M et al. (2015), η δοκιμή κάθισης τέθηκε ως κύριος δείκτης για τη μέτρηση της εργασιμότητας του σκυροδέματος. Μια αρχική καθίζηση των 65 mm παρατηρήθηκε στο μίγμα αναφοράς σκυροδέματος, ενώ στο μίγμα που περιείχε ΑΑΓ, το παρατηρούμενο εύρος καθίζησης ήταν 15% υψηλότερο έως 30% χαμηλότερο από το σκυρόδεμα αναφοράς. Ανεξάρτητα από αυτές τις διαφορές, φαίνεται ότι με την αύξηση ΑΑΓ, παρατηρείται μείωση της εργασιμότητας.

Και άλλες μελέτες συμφωνούν στο συμπέρασμα αυτό, αποδίδοντας τις ευθύνες στη κακή γεωμετρία γυαλιού και τον μειωμένο συντελεστή λεπτότητας. Ωστόσο, η συμβολή του παράγοντα λεπτότητας σε αυτήν την τάση μπορεί να αμφισβητηθεί επειδή αυτά τα αποτελέσματα λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάμιξη, ρυθμίζοντας την αναλογία μεταξύ χονδρόκοκκων αδρανών και λεπτόκοκκων αδρανών. Επομένως, προτείνεται ότι το γωνιακό σχήμα των ΑΑΓ είναι αυτό που επιδρά στη μείωση της καθίζησης οδηγώντας σε μικρή διάθεση τσιμεντόπαστας άρα και ρευστότητας του μίγματος. Παρόλο της μείωσης αυτής, η λειτουργικότητα δεν επηρεάστηκε σε κανένα από τα εξεταζόμενα δείγματα, με επίπεδο ανοχής 25 mm. Εν ολίγοις, συμπέραναν ότι η αντικατάσταση λεπτόκοκκων αδρανών σε ποσοστό λιγότερο από 50% έχει τις λιγότερες αρνητικές επιπτώσεις στην απόδοση του νέου σκυροδέματος.

7.3.2 Φρέσκια και ξηρή πυκνότητα

Η αντικατάσταση της άμμου με λεπτόκοκκο ΑΑΓ έχει μετρήσιμη επίδραση τόσο στην φρέσκια πυκνότητα όσο και στην ξηρή πυκνότητα του σκυροδέματος και έχει την τάση να μειώνεται λόγω της προσθήκης γυαλιού στο μίγμα. Σε ένα επίπεδο αντικατάστασης γυαλιού της τάξης του 40%, αυτό κορυφώνεται σε 2,4% και 2% σε νωπές και ξηρές πυκνότητες αντίστοιχα, σε σύγκριση με αυτό του ελέγχου (Adaway, M., et al., (2015)). Αυτό το γεγονός συμβαίνει διότι το ειδικό βάρος του αδρανούς γυαλιού είναι ελαφρύτερο, κατά 5,4% από αυτό της άμμου αναφοράς. Ωστόσο, η μείωση της αναλογίας μεταξύ των λεπτόκοκκων και των χονδρόκοκκων αδρανών μπορεί να επιδράσει θετικά στο παραπάνω πρόβλημα. Σε συμφωνία με άλλες έρευνες, φαίνεται πως η αντικατάσταση των παραδοσιακών αδρανών με λεπτόκοκκο ΑΑΓ, η μονάδα βάρους του σκυροδέματος μειώνεται.

7.3.3 Δοκιμή αντοχής σε θλίψη 7 ημερών

Με την προσθήκη ΑΑΓ, μπορεί να παρατηρηθεί μια αυξανόμενη τάση έως ότου να αναπτυχθεί η μέγιστη αντοχή σε θλίψη (46,5 MPa) με ποσοστό αντικατάστασης 30%. Με τη συγκεκριμένη αντικατάσταση του 30%, παρατηρείται υψηλότερη αντοχή σε θλίψη της τάξης του 9% συγκριτικά με αυτή του σκυροδέματος αναφοράς αλλά και γενικά συμπεραίνεται ότι τα σκυροδέματα με ποσοστό αντικατάστασης ΑΑΓ έως και 30% έχουν μεγαλύτερη θλιπτική δύναμη (7 ημερών). Μετά την αντικατάσταση του 40% γυαλιού, η επιτυγχανόμενη αντοχή σε θλίψη ήταν 17% χαμηλότερη από αυτή του παραδοσιακού σκυροδέματος και 25% χαμηλότερη από τη μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή.

7.3.4 Δοκιμή αντοχής σε θλίψη 28 ημερών

Τα αποτελέσματα συμφωνούν με τα αποτελέσματα της δοκιμής 7 ημερών. Με την προσθήκη απορριμμάτων γυαλιού, η αντοχή σε θλίψη τείνει να αυξάνεται με ποσοστό αντικατάστασης ξανά αυτό του 30%. Σε αυτή τη δοκιμή, η μέγιστη αντοχή σε θλίψη 28 ημερών είναι 6% υψηλότερη από αυτή του σκυροδέματος αναφοράς. Το γεγονός αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί από το γωνιακό σχήμα του αδρανούς γυαλιού άρα και της μεγαλύτερης επιφάνειάς του, σε σχέση με αυτό της άμμου που είναι στρογγυλο. Λόγω της μεγαλύτερης αυτής επιφάνειας, γίνεται δυνατή η βέλτιστη συγκόλλησή της με την τσιμεντόπαστα, δημιουργώντας έτσι μια δυνατότερη δομή σκυροδέματος. Διαπιστώθηκε ότι για ποσοστό 40% ΑΑΓ, η θλιπτική αντοχή ήταν 16% κάτω από αυτή του σκυροδέματος ελέγχου. Το γεγονός αυτό έρχεται σε συμφωνία με την δοκιμή 7 ημερών, από όπου και συμπεραίνεται για ποσοστά αντικατάστασης ΑΑΓ άνω της τάξης του 30%, η θλιπτική δύναμη φαίνεται πως επηρεάζεται αρνητικά.

7.3.5 Αντοχή σε κάμψη

Σε έρευνα των Du, H et al. (2014), η αντοχή σε κάμψη 28 ημερών αυξάνεται με ρυθμό αντικατάστασης άμμου γυαλιού, έως και 100%. Επιπλέον, παρατηρείται ότι για μεγαλύτερα ποσοστά αντικατάστασης, η καμπτική δύναμη αυξάνεται. Αυτό υποδεικνύει ότι όσο υψηλότερη είναι η περιεκτικότητα σε άμμο γυαλιού, τόσο πιο εμφανής είναι η επίδρασή της, όπου είναι πιο διακριτή η επίδραση αλληλοσύνδεσης μεταξύ των σωματιδίων γυαλιού. Σε άλλη έρευνα διαπιστώθηκε ότι σε σύγκριση με τη θλιπτική αντοχή, το γωνιώδες σχήμα των αδρανών γυαλιού σύμβαλε περισσότερο στην αύξηση της δύναμης σε κάμψη. Αυτές οι βελτιώσεις μπορούν να εξηγηθούν από τον μεγαλύτερο βαθμό μηχανικής αλληλεπίδρασης, την εσωτερική τριβή και την μεγάλη επιφάνεια που σχετίζεται με γωνιακά αδρανή (Chen, J., et al., (2011)).

7.3.6 Μέτρο ελαστικότητας

Ο δυναμικός παράγοντας στις 28 ημέρες φαίνεται ότι δεν είναι επηρεάστηκε από το βαθμό αντικατάστασης της άμμου γυαλιού και την αναλογία νερού-τσιμέντου. Αν και το μέτρο ελαστικότητας του γυαλιού είναι υψηλότερο από αυτό της φυσικής άμμου, η προσθήκη του λεπτόκοκκου αδρανούς στο σκυρόδεμα δεν αλλάζει τον συντελεστή. Επειδή η άμμος γυαλιού έχει πιο λεπτούς κόκκους, μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη συσσώρευση των κόκκων. Τα ομοιόμορφα κατανεμημένα σωματίδια αδρανών μπορεί να αυξήσουν το συντελεστή του σκυροδέματος λόγω αλληλοσύνδεσης και παρεμβολής σωματιδίων (Chen, J., et al., (2011)). Ωστόσο, επειδή η σύνδεση μεταξύ των σωματιδίων γυαλιού και του πολτού τσιμέντου δεν είναι μεγάλη, μπορεί να επιφέρει προβλήματα στο σκυρόδεμα, γεγονός που θα επηρεάσει σε ένα βαθμό το μέτρο ελαστικότητας.

7.3.7 Συστολή ξήρανσης

Έχει βρεθεί ότι η συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος με ΑΑΓ στα κτίρια, είναι 600×10^6 mm/mm ή 0,06% (ACI Committee 244). Στη μελέτη του Du, H et al. (2014) όλα τα μίγματα σκυροδέματος έδειξαν ότι η συστολή ξήρανσης δεν μεταβάλλεται και είναι μικρότερη από 0,06%, για δοκιμή πάνω των 90 ημερών. Για μίγματα σκυροδέματος με αντοχή σε θλίψη 45 MPa και 60 MPa, ειδικά στο τελευταίο, επειδή η άμμος γυαλιού έχει μηδαμινή απορρόφηση νερού και έχει μεγάλο μέτρο ελαστικότητας, η χρήση της μπορεί να μειώσει τη συστολή ξήρανσης. Ωστόσο, το σκυρόδεμα με θλιπτική αντοχή 30 MPa, λόγω του ότι έχει υψηλότερη αναλογία w/c, η τσιμεντόπαστα είναι πιο πορώδης, γεγονός που θα θέσει σε κίνδυνο τη μείωση της συστολής της ξήρανσης, λόγω της προσθήκης άμμου γυαλιού. Ως αποτέλεσμα, η συστολή της ξήρανσης αυτού του σκυροδέματος είναι ασυνεπής ή ακόμη και αυξημένη λόγω της γεωμετρίας των κόκκων, όπου για την άμμο γυαλιού είναι πιο λεπτοί σε σύγκριση με τη φυσική άμμο.

7.4 Πολυμερές σκυροδέματος με ανακυκλωμένο αδρανές γυαλί

Το πρόβλημα της αντίδρασης πυριτικού αλκαλίου δεν ισχύει για σκυροδέματα που περιέχουν μόνο συνδετικό υλικό πολυμερούς. Το σκυρόδεμα με πολυμερή παράγεται με αντικατάσταση του τσιμέντου με πολυμερές χρησιμοποιώντας ρητίνες πολυεστέρα ή εποξειδικές ρητίνες.

7.4.1 Φυσικά χαρακτηριστικά

Η πυκνότητα του πολυμερούς σκυροδέματος αυξάνεται καθώς αυξάνεται το περιεχόμενο του ΑΑΓ στο σκυρόδεμα. Τόσο τα ΑΑΓ όσο και τα παραδοσιακά αδρανή έχουν πολύ παρόμοιες ειδικές πυκνότητες. Ωστόσο, λόγω του ότι τα δεύτερα έχουν υψηλότερο πορώδες, η διαφορά είναι στη χύδην πυκνότητα.

Στην περίπτωση απορρόφησης νερού, όσο αυξάνεται το περιεχόμενο του ΑΑΓ στο σκυρόδεμα, ο ρυθμός απορρόφησης του νερού μειώνεται. Το πολυμερές σκυρόδεμα με 100% παραδοσιακά αδρανή είχε ποσοστό απορρόφησης νερού κατά 27% υψηλότερο (Zegardło, B., et al., (2018)). Ανάλογα με τη σύνθεση, ο ρυθμός απορρόφησης νερού του σκυροδέματος με τσιμέντο είναι δύο έως τέσσερις φορές υψηλότερος του πολυμερούς σκυροδέματος. Το γεγονός αυτό αιτιολογεί η απορροφητικότητα της πολυεστερικής ρητίνης που εμπεριέχεται στο πολυμερές σκυρόδεμα. Η δομή του πολυμερούς είναι πολύ συμπαγής, με αποτέλεσμα να εμποδίζει το νερό να περάσει στο σύνθετο υλικό.

7.4.2 Αντοχή εφελκυσμού

Καθώς το περιεχόμενο ΑΑΓ αυξάνεται στο 50%, η εφελκυστική δύναμη αυξάνεται. Ωστόσο, για υψηλότερη περιεκτικότητα ΑΑΓ στο μίγμα, παρατηρείται μείωση. Το σύνθετο υλικό με 50% περιεκτικότητα ΑΑΓ έχει την υψηλότερη τιμή αντοχής σε εφελκυσμό στα 15,44 MPa, το οποίο είναι 14% υψηλότερο από το σύνθετο υλικό αναφοράς ενώ, η τιμή αντοχής του σύνθετου υλικού με 100% περιεκτικότητα σε ΑΑΓ είναι ίση με 6,61 MPa (Zegardło, B., et al., (2018)).

Εξετάζοντας τα κατάγματα των δειγμάτων μετά τη δοκιμή, παρατηρήθηκε ότι τα παραδοσιακά αδρανή ελλειπτικά σωματίδια, διαχωρίστηκαν σε μεγάλο βαθμό από τη δομή του πολυμερούς. Όσον αφορά την περίπτωση σωματιδίων ΑΑΓ, παρατηρήθηκαν δύο μηχανισμοί αστοχίας. Στην πρώτη περίπτωση, τα σωματίδια ΑΑΓ τραβιούνται έξω από τη μήτρα πολυμερούς (λόγω της λείας επιφάνειας των σωματιδίων, η πρόσφυση στη μήτρα είναι χαμηλή), ενώ στη δεύτερη περίπτωση, όταν οι κόκκοι ΑΑΓ περιβάλλονταν από ένα συνδετικό υλικό σε κάθε πλευρά, η πρόσφυση τους στη μήτρα ήταν μεγαλύτερη και ο ίδιος ο κόκκος έσπασε λόγω της ευθραυστότητάς του (Zegardło, B., et al., (2018)).

Σε σύνθετα υλικά με 10%, 30% και 50% ΑΑΓ, η πρόσφυση των κόκκων ΑΑΓ στη δομή είναι υψηλή και οι κόκκοι είναι διατεταγμένοι κάθετα προς την κατεύθυνση της δύναμης κάμψης, η οποία λειτουργεί σαν μερική ενίσχυση, όπου μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της αντοχής εφελκυσμού. Οι κόκκοι γυαλιού εμποδίζουν την καταστροφή των δειγμάτων μέχρι να ξεπεραστεί η τοπική τους αντοχή σε εφελκυσμό. Ωστόσο, σε σύνθετα υλικά με 70% και 100% περιεκτικότητα ΑΑΓ, τα σωματίδια ΑΑΓ προσκολλήθηκαν το ένα με το άλλο, με αποτέλεσμα η ρητίνη να μη μπορεί να περιβάλλει πλήρως το καθένα ξεχωριστά. Σε αυτή την περίπτωση, λόγω της χαμηλής πρόσφυσης, τα σωματίδια ΑΑΓ αποσπώνται από τη ρητίνη ή σπάνε, με αποτέλεσμα τη μείωση της εφελκυστικής δύναμης.

7.4.3 Θλιπτική αντοχή

Όπως και στην περίπτωση της αντοχής σε εφελκυσμό, εξετάζοντας κυβικά δοκίμια, καθώς η περιεκτικότητα ΑΑΓ στο μίγμα αυξάνεται από 0% σε 50%, παρατηρείται αύξηση της θλιπτικής αντοχής. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος που περιέχει 100% ΑΑΓ, είναι 21% χαμηλότερη από το παραδοσιακό σκυροδέμα.

Καθώς οι κόκκοι του ΑΑΓ περιβάλλονται από τη ρητίνη, λειτουργούν σαν συνδετικό των ρωγμών που δημιουργούνται λόγω της θλιπτικής δύναμης στη δομή της ρητίνης. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να είναι ο λόγος για την αύξηση της αντοχής σε θλίψη του σκυροδέματος με ποσοστά ΑΑΓ 10%, 30% και 50%. Ωστόσο, στα δείγματα σκυροδέματος με περιεκτικότητα ΑΑΓ 70% και 100%, η αντοχή μειώθηκε και σημειώθηκε ότι η διάτμηση συχνά προκαλούσε αστοχία του δείγματος (Zegardlo, B., et al., (2018)).

Επιπλέον, η αντοχή σε θλίψη μπορεί επίσης να δοκιμαστεί σε επιμήκη δείγματα, πέρα από κυβικά. Η καταστροφή των κυβικών δειγμάτων στη δοκιμή θλίψης προκαλείται κυρίως από διατμητική τάση, ενώ στην περίπτωση επιμηκυμένων δειγμάτων, η τροχιά της συμπίεσης παίρνει μια σχεδόν κάθετη κατεύθυνση, ενώ έχει παρατηρηθεί ότι η μονοαξονική θλιπτική αντοχή τους (σε παραδοσιακά σκυροδέματα) είναι 20% μεγαλύτερη από αυτή των πρώτων (Zegardlo, B., et al., (2018)). Αυτό συμβαίνει επειδή η γεωμετρία του δείγματος επιδρά στον μηχανισμό αστοχίας.

7.4.4 Αισθητική προσέγγιση

Στη μελέτη του Zegardlo, B et al. (2018), οι διαφανείς βαφές σε δείγματα με περιεκτικότητα ΑΑΓ 100%, 50% και 30% τόνισαν την αισθητική που αυτά προσφέρουν. Λόγω της διαφανής πολυμερικής δομής, τόσο οι κόκκοι των παραδοσιακών αδρανών όσο και των ΑΑΓ είναι πιο εμφανείς. Το πολυμερές σκυροδέμα με την προσθήκη ΑΑΓ, μπορεί να προταθεί για στοιχεία όπως π.χ. περβάζια παραθύρων, πάγκοι κουζίνας και δομικά εξαρτήματα από εκτεθειμένα σύνθετα υλικά, σύμφωνα πάντα με τις ιδιότητες του. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση του ανακυκλωμένου γυαλιού συμβαδίζει με τις νέες οικοδομικές τεχνολογίες καθώς και με τις αρχές της αειφόρου ανάπτυξης (Zegardlo, B., et al., (2018)).



Εικόνα 7.6 Αισθητική των πολυμερών σκυροδεμάτων σε διαφορετικές περιεκτικότητες ΑΑΓ, (α) 100% περιεκτικότητα, (β) 50% περιεκτικότητα, (γ) 30% περιεκτικότητα Πηγή: Zegardo, B et al. (2018)

8. Σκυρόδεμα από ανακυκλωμένο αδρανές ξύλο

8.1 Γενικά

Ξύλο, το στερεό, σκληρό και ινώδες κυτταρικό υλικό στους φυτικούς ιστούς. Η χημική σύνθεση της κυτταρίνης ξύλου, της λιγνίτης και της ημικυτταρίνης έχει διαφορετικά αποτελέσματα στην πυκνότητα του ξύλου. Επίσης αποτελούνται από οργανικές ουσίες είναι τα λεγόμενα εκχυλίσματα όπως λιπαρά οξέα, ρητίνικά οξέα, κεριά και τερπένια.

Το ξύλο είναι το πρώτο υλικό που χρησιμοποιούν οι άνθρωποι για την κατασκευή σπιτιών, οχημάτων, όπλων, εργαλείων, κτιρίων και πολλών άλλων. Αν και υπάρχουν πολλά φυσικά και τεχνητά υλικά διαθέσιμα για ανθρώπινη χρήση σήμερα, το ξύλο εξακολουθεί να χρησιμοποιείται ευρέως από τον άνθρωπο λόγω των χρήσιμων ιδιοτήτων του. Ως φυσικό προϊόν, το ξύλο δεν είναι ομοιόμορφο. Οι ιδιότητές του ποικίλλουν από είδος σε είδος, αλλά και σε διαφορετικά μέρη του ίδιου ξύλου. Το ξύλο υψηλής πυκνότητας (όπως η βελανιδιά) είναι πιο σκληρό, πιο λείο και λιγότερο απορροφητικό, ενώ το μαλακό ξύλο είναι πιο απορροφητικό. Το ξύλο παρουσιάζει επίσης ανισοτροπία στις διαστάσεις κάθετες και παράλληλες με το νερό. Τέλος, έχει συχνά ελαττώματα όπως ροδόχρου ακμή, ραγάδες, εκκένωση ρητίνης κ.λπ.

Το ξύλο παρουσιάζει σημαντικές διαστατικές αλλαγές: αν και ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι μικρός, το μέγεθός του ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με την περιεκτικότητα σε υγρασία. Κατά μέσο όρο, ανάλογα με τον τύπο του ξύλου, μια εκατοστιαία αλλαγή στην περιεκτικότητα σε υγρασία έχει ως αποτέλεσμα μια γραμμική διαστατική αλλαγή περίπου 0,2%, πράγμα που σημαίνει αμέσως ότι όλα τα επιχρίσματα ξύλου πρέπει να έχουν επαρκή ελαστικότητα.

8.2 Κατηγορίες ξύλου

Τα είδη ξυλείας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες

1. στην πριστή (πρωτογενή και δευτερογενή) και
2. την βιομηχανική (π.χ. κόντρα πλακέ, νοβοπάν κ.α.). (ΚΑΜΕΛΙΔΗΣ Α.Φ.,2020)

Συνήθως, μετά την υλοτομία, η περιοχή του δασοκομμένου δάσους, ή ακόμη και μια μεγαλύτερη δασική έκταση, θα πρέπει να αποκατασταθεί με αναφύτευση δέντρων για την αποφυγή των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της αποδάσωσης. Δυστυχώς, αυτή η κατάσταση συμβαίνει σήμερα σε μερικές χώρες (όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Σουηδία, η Φινλανδία) και η Ελλάδα δεν είναι μία από αυτές. Στην Ελλάδα, οι κύριοι τύποι ξύλου είναι το έλατο, το πεύκο, η οξιά, η ελιά, το καρύδι και το κάστανο, από τα οποία τα πρώτα τέσσερα χρησιμοποιούνται μόνο για καυσόξυλα(<https://www.allinwood.gr>). Σε γενικές γραμμές, ακόμη και αν προέρχεται από τον ίδιο κορμό δέντρου, οι ιδιότητες του ξύλου είναι πολύ διαφορετικές. Αυτό οφείλεται στην προέλευσή του σε οργανισμούς, στην ανομοιογένεια και στην παρουσία προφανών ή αόρατων ελαττωμάτων. Για να χρησιμοποιηθεί ως δομικό υλικό, τα χαρακτηριστικά του ξύλου πρέπει να ληφθούν υπόψη η πυκνότητα, το ειδικό βάρος, η

σκληρότητα, η μηχανική αντοχή σε θλίψη, η αντοχή σε εφελκυσμό, η κάμψη και η διάτμηση, η ελαστικότητα και η ευκαμψία, η απορρόφηση υγρασίας και η συρρίκνωση. Εν ολίγοις, η χρήση του ξύλου ως διακοσμητικού υλικού σε κουφώματα και έπιπλα είναι πολύ σημαντική, οπότε ακόμη και αν όχι σε όλα τα έργα κατασκευής και κατεδάφισης και τις φυσικές καταστροφές, θα υπάρξουν περισσότερα απόβλητα

8.3 Ανακύκλωση ξύλου

Το ξύλο ως πρώτη ύλη και τα απόβλητά τους έχουν δύο χρήσεις:

- ως καύσιμο και
- ως πρώτη ύλη για ποικίλα προϊόντα.

Το ανακυκλωμένο ξύλο είναι το ξύλο που υπάρχει σε οικοδομικά απόβλητα και υλικά κατεδάφισης. Για την Ελλάδα, δεδομένου ότι η χώρα μας είναι σημαντική αφού υπάρχει τεράστια εισαγωγή μεγάλων ποσοτήτων ξυλείας, για αυτό η διαχείριση της ξυλείας είναι πολύ σημαντική ώστε να βοηθηθεί η εγχώρια βιομηχανία. Ο κλάδος (Shelman A.E) είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός προϊόντων ξύλου στην Ελλάδα, που παράγει πριστή ξυλεία, παρκέ, κόντρα πλακέ, μοριοσανίδες, καπλαμά και άλλα προϊόντα.

Υπάρχουν δύο μονάδες παραγωγής: η μία βρίσκεται στον Βασιλικό, Εύβοιας και η άλλη στη βιομηχανική περιοχή Κομοτηνής. Τα εργοστάσια του Βασιλικού είναι μεγαλύτερα και καταλαμβάνουν μεγαλύτερες παράκτιες περιοχές. Κάθε μία από αυτές τις δύο μονάδες αναπτύχθηκε από ξεχωριστό δίκτυο ανακύκλωσης απορριμμάτων ξύλου, στο δίκτυο της Shelman AE. Είναι ενδιαφέρον ότι η Shelman AE χρησιμοποιεί απορρίμματα ξύλου. Πολλά ξυλουργεία περιέχουν απορρίματα ξύλου διαφορετικών ποικιλιών και δευτερεύοντος σκραπ σιδήρου, το οποίο στη συνέχεια αφαιρείται. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για την παραγωγή άλλων προϊόντων (εάν περιλαμβάνονται), ή ως ενεργειακό υλικό σε λέβητα για την παραγωγή υπερθερμασμένου νερού, καυτού λαδιού και καυσαερίων που απαιτούνται στη διαδικασία παραγωγής. Το ποσοστό ενσωμάτωσης στο προϊόν είναι περίπου 20% του προϊόντος (το 80% εξακολουθεί να είναι το αρχικό ξύλο) για τη διατήρηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του τελικού προϊόντος.

Οι κύριες μέθοδοι ανακύκλωσης ξύλου κατεδάφισης είναι οι εξής:

- Κατασκευή σανίδων πάνελ καθώς και MDF μεσαίας πυκνότητας (MEDIUM-DESTINY FIBERBOARD) που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κατοικιών. (Εικόνα 8.1)
- Θρυμματισμός ξύλου (ροκανίδια-σκόνη), ώστε να παραχθούν προϊόντα συμπίεσης (σανίδες, κόντρα πλακέ, ξύλινα δάπεδα, κτλ.)
- Χρήση της θερμογόνου δύναμης χωρίς διάφορες ακαθαρσίες (καύση ελέγχου)
- Προϊόντα από ξύλο-σκυρόδεμα από τα οποία μπορούν να παραχθούν υλικά από τα υπολείμματά τους καθώς θα αποκτήσουν θερμομονωτικές και αντιπυρικές ιδιότητες.

- Χρησιμοποίηση τους μαζί με ανακυκλωμένα πλαστικά υλικά, ώστε να παραχθούν συνθετικά υλικά τα οποία θα επιφέρουν θετικά αποτελέσματα και μεγάλη απόδοση.

Η συνολική ποσότητα αποβλήτων ξύλου που δημιουργήθηκαν στην ΕΕ το 2004 εκτιμήθηκε σε 70,5 εκατομμύρια τόνους, εκ των οποίων το 65% ανακυκλώθηκε. Τα καλύτερα διαθέσιμα δεδομένα οδήγησαν σε εκτίμηση 10 έως 20 εκατομμυρίων τόνων απορριμμάτων ξύλου στα ΑΕΚΚ ανα έτος στην ΕΕ-27.

Η εταιρεία SELMAN SA ανακύκλωσε 151 τόνους απορριμμάτων συσκευασίας ξύλου στη Χαλκίδα και την Κομοτηνή το 2000, φτάνοντας τους 20.854 τόνους (12.861 τόνοι στη Χαλκίδα και 7.993 τόνοι στην Κομοτηνή).

Η χωρητικότητα του εργοστασίου ανακύκλωσης απορριμμάτων ξύλου στη Χαλκίδα είναι 150 τόνους/ημέρα σε επεξεργαζόμενο ξηρό βάρος αποβλήτων ξύλου και 140 m³/βάρδια για την Κομοτηνή. Η συνολική ανακυκλώσιμη ποσότητα απορριμμάτων ξύλου από τα εργοστάσια Χαλκίδας και Κομοτηνής αυξήθηκε από 75.000 κυβικά μέτρα το 2004 σε 198.000 κυβικά μέτρα το 2008

8.3.1 Ανακύκλωση

Προκειμένου να συνεχίσει να ανακυκλώνεται το μείγμα απορριμμάτων που περιέχει ξύλο από την ΑΕΚΚ, τα απόβλητα αυτά πρέπει να υποβληθούν σε προκαταρκτική επεξεργασία.

Προεπεξεργασία ξύλου:

Η τεχνολογία δείκτη χρώματος 18 χρησιμοποιείται σε εργοτάξια για την ανίχνευση χημικής μόλυνσης των απορριμμάτων ξύλου προκειμένου να ανακυκλωθεί σε κάθε δείγμα ξύλου.

- Διαχωρισμός επεξεργασμένων ή μη επεξεργασμένων απορριμμάτων ξύλου στο εργοτάξιο.
- Μετά από ένα, δύο ή τρία βήματα σύνθλιψης, χειροκίνητη ταξινόμηση για την αφαίρεση ακαθαρσιών.
- Χρησιμοποιήστε μαγνήτη ή κυκλώνα για να διαχωρίσετε σίδηρο (χάλυβα μαγνητικό μέταλλο) και μη σιδηρούχα μέταλλα (χαλκός-μόλυβδο-αλουμίνιο).
- Διαχωρισμός ορυκτών (σκυροδέματος) με κοσκίνισμα.
- Διαλογή αέρα που διαχωρίζει τα ελαφριά στοιχεία (πλαστικά) σε ένα ή περισσότερα στάδια

Η εφαρμογή της τεχνολογίας δείκτη χρώματος στην ανίχνευση χημικής μόλυνσης των απορριμμάτων ξύλου, έτσι ώστε το ξύλο να μπορεί να υποστεί σωστή επεξεργασία κατά την ανακύκλωση.

Τα τελευταία χρόνια, με την ανάπτυξη εταιρειών που ασχολούνται με αυτήν τη δραστηριότητα, η ανακύκλωση ξύλου έχει βελτιωθεί (Sawyer & Irlle, 2005). Η ανακύκλωση του ξύλου οδηγεί σε: Άλλα προϊόντα ξύλου, όπως πλακέ από κόντρα πλακέ που περιέχουν ίνες ξύλου, όπως το λεγόμενο (MDF). Το ανακυκλωμένο ξύλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εξωραϊσμό και κήπους, επιφάνειες ιππασίας σε εξωτερικούς και εσωτερικούς χώρους και κλινοσκεπάσματα για ζώα. Μέθοδος λιπασματοποίησης ή τροποποίησης εδάφους μετά την κομποστοποίηση.

8.3.2 Διάθεση Ανακύκλωσης από εταιρείες

Μέσω της ανακύκλωσης ξύλου, έχουμε ενισχύσει την προστασία των φυσικών πόρων, μειώσαμε τον όγκο των χώρων υγειονομικής ταφής και δημιουργήσαμε τροποποιήσεις εδάφους υψηλής ποιότητας.

Αναλυτικότερα, υπάρχει πλήθος εταιρειών οι οποίες λαμβάνουν τα παρακάτω απόβλητα για ανακύκλωση:

- Φθαρμένες παλέτες: παλέτες που φοριούνται, αποσυναρμολογούνται ή έχουν υποστεί ζημιά και δεν μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν
- Διάφορα κουτιά συσκευασίας
- Το υλικό ξυλείας του κτιρίου, κυρίως ξυλεία από κατεδάφιση
- Κλάδεμα κλάδων
- Κατάλοιπα σε εργαστήρια επίπλων, ξυλουργικές εργασίες κ.λπ.
- Σύνθετο βιομηχανικό ξύλο

Πρώτον, το ξένο υλικό αφαιρείται με χειροκίνητη ταξινόμηση και, στη συνέχεια, τα καθαρά κομμάτια ξύλου συνθλίβονται από ειδικό τεμαχιστή. Κατά την εξαγωγή του λεπτού διαχωρισμένου υλικού από τον τεμαχιστή, υπάρχει ένας μαγνήτης που βοηθά στην απομόνωση και τη συλλογή όλων των υπόλοιπων μικρών μεταλλικών κομματιών (καρφιά, βίδες, σιδερένια δαχτυλίδια κ.λπ.).

8.3.3 Εμπόδια ανακύκλωσης

Προκειμένου να διασφαλιστεί η ποιότητα των προϊόντων δευτερογενούς ξύλου, τα τυπικά όρια των τοξικών στοιχείων στο ανακυκλωμένο ξύλο είναι τα ίδια με αυτά των πρώτων υλών. Το όριο χημικής μόλυνσης πρέπει να συμμορφώνεται με τους ισχύοντες κανονισμούς. Στο πλαίσιο της ορθολογικής διαχείρισης αποβλήτων, η ανακύκλωση υλικών και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι οι στρατηγικοί στόχοι της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Τα απόβλητα ξύλου είναι μια πολύτιμη βοηθητική πρώτη ύλη που μπορεί να αντικαταστήσει αποτελεσματικά πρώτες ύλες δασικών ή ορυκτών καυσίμων.

Φυσικά, αυτό προϋποθέτει ένα κατάλληλο σύστημα διαχείρισης απορριμμάτων ξύλου που χρησιμοποιεί τις ιδιότητες ενέργειας και υλικών του ανακυκλωμένου ξύλου που περιέχεται σε αυτό, παρά μια πρακτική που προκαλεί σοβαρά περιβαλλοντικά

προβλήματα (υγειονομική ταφή, αποτέφρωση που δεν παράγει ενέργεια). Όλο και περισσότερο ξύλο ανακυκλώνεται για την παραγωγή μορισανίδων και ινών γυαλιού, συνδυάζοντας το διοξείδιο του άνθρακα σε προϊόντα ξύλου, συμβάλλοντας στην επίλυση του προβλήματος της έλλειψης ξύλου στη βιομηχανία και μειώνοντας την πίεση στα δάση.

Ομοίως, στην Ευρώπη σήμερα, υπάρχει μια αυξανόμενη τάση χρήσης ανακυκλωμένου ξύλου για παραγωγή ενέργειας. Δυστυχώς, αυτό έχει εντείνει την τάση να το χρησιμοποιεί για ανάκτηση ενέργειας και να καθαρίζει ξύλο σε μεγάλες ποσότητες. Αποφύγετε τη χρήση ξύλου κατάλληλου για άμεση παραγωγή προϊόντων ξύλου για την παραγωγή ενέργειας. Όπως και με την υπόλοιπη ΑΕΚΚ, πρέπει να δοθεί προτεραιότητα στην επαναχρησιμοποίηση, την ανακύκλωση και την τελική ανάκτηση ενέργειας με τη μορφή ξύλου που δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε προηγούμενες μεθόδους.

Ο αρνητικός αντίκτυπος της άμεσης χρήσης του ξύλου στην ανάκτηση ενέργειας οδηγεί:

- σε έλλειψη ξύλου στη βιομηχανία ξύλου αφού η περιβαλλοντική φήμη της βελτιώθηκε περαιτέρω.
- στην πιθανή χρήση εναλλακτικών προϊόντων, τα οποία ενδέχεται να μην προέρχονται από ανανεώσιμους πόρους, ανακυκλώσιμα και ενεργειακά αποδοτικά, όπως το ξύλο.
- Εκτός από την κύρια ζημιά στη βιοποικιλότητα, αυτό οδηγεί επίσης σε αυξημένη πίεση στις δασικές πηγές.

Ως εκ τούτου, παρόλο που η ανάκτηση ενέργειας είναι μια καλή επιλογή για την ανακύκλωση απορριμμάτων ξύλου από την ΑΕΚΚ, εξακολουθεί να παρουσιάζει κινδύνους ως προς τη μοναδική ή πρωταρχική μέθοδο ανακύκλωσης. Ευτυχώς, αυτό οφείλεται εν μέρει στο γεγονός ότι ο ποσοτικός στόχος (70% της ανάκτησης της ΑΕΚΚ) δεν περιλαμβάνει την ανάκτηση ενέργειας, η οποία διατηρείται.



Εικόνα 8.1 Θρυμματισμός ξύλου και παραγωγή MDF

8.3.4 Καταλληλότητα αποβλήτων ανακύκλωσης ξύλου

Το εάν τα απόβλητα είναι κατάλληλα για ανακύκλωση ξύλου εξαρτάται από το βαθμό ρύπανσης. Οι ακόλουθες κατηγορίες χωρίζονται συνήθως σε:

- Καταγραφές (επαναχρησιμοποίηση-ανακύκλωση)
- Επικάλυψη ξύλου που δεν περιέχει αλογονωμένες οργανικές ενώσεις. (Επαναχρησιμοποίηση-Ανακύκλωση)
- Επικαλυμμένο ξύλο που περιέχει οργανικές ενώσεις (επαναχρησιμοποίηση ενέργειας)
- Το ξύλο που έχει υποστεί επεξεργασία με συντηρητικά ξύλου (επαναχρησιμοποίηση ενέργειας)
- Το ξύλο που περιέχει επιβλαβείς ουσίες (χαλκός, αρσενικό, χρώμιο κ.λπ.). (Ανάκτηση επαναχρησιμοποίησης ενέργειας)

8.4 Διάθεση υγειονομικής ταφής

Όπως και άλλα οργανικά υλικά, ο χώρος υγειονομικής ταφής / διάθεση απορριμμάτων ξύλου από την ΑΕΚΚ θα προκαλέσει εκπομπές μεθανίου (CH₄), ένα αέριο θερμοκηπίου που εμφανίζει δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη 72, ενώ το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) έχει 1. Η υγειονομική ταφή του ξύλου σχετίζεται με περιττή χρήση γης. Ο υδροφορέας μπορεί να μολυνθεί από χημικά στην επιφάνεια του ξύλου που χρησιμοποιείται ως κόλλα, βερνίκι, μπογιά ή συντηρητικό ξύλου για να αυξήσει την αντοχή του υλικού.

8.5 Επαναχρησιμοποίηση

Μετά την υιοθέτηση κατάλληλων μεθόδων αποδόμησης, το ξύλο από εγκαταλελειμμένα κτίρια μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί αμέσως. Στην Ευρώπη και την Ευρώπη, υπάρχει μια καλά αναπτυγμένη αγορά / δίκτυο για την αγορά και πώληση ξυλείας στο Διαδίκτυο μετά την κατεδάφιση και τη ζήτηση, επομένως είναι εύκολο να αναζητήσετε τέτοια υλικά. Μεγάλο μέρος του επαναχρησιμοποιήσιμου ξύλου είναι οι παλέτες χειρισμού υλικών, οι οποίες μπορούν να επιστραφούν και να επαναχρησιμοποιηθούν από προμηθευτές με μικρή μόνο επισκευή. Επιπλέον, οι κατασκευαστές παλετών μπορούν να εξοπλίσουν τις εταιρείες τους με τεμαχιστές ξύλου, έτσι ώστε να μπορούν να κατευθύνονται σε μικρότερες περιοχές για να παράγουν άλλους τύπους ξύλου.

8.6 Ανάκτηση ενέργειας

Η ανάκτηση ενέργειας είναι συχνά η μόνη διαθέσιμη επιλογή για απορρίμματα ξύλου μολυσμένα με επικίνδυνες ουσίες. Η μέθοδος παραγωγής ενέργειας από απορρίμματα ξύλου μπορεί να είναι: Σε ένα μικρό σύστημα θέρμανσης. (Κομάρου) Σε συστήματα θέρμανσης που απαιτούν έγκριση μονάδας αεριοποίησης. Σε εγκαταστάσεις που παράγουν τσιμέντο και τσιμέντο κλίνκερ. Στον αποτεφρωτήρα αστικών αποβλήτων (Αναστασοπούλου κ.ά., 2012).

8.7 Προσθήκη ξύλου στο σκυρόδεμα και αντοχή

Η παραγωγή του τσιμέντου που χρησιμοποιείται στο σκυρόδεμα είναι μια τεράστια πηγή εκπομπών CO₂, έτσι όσο περισσότερο μπορούμε να ανακυκλώσουμε το υπάρχον σκυρόδεμα, τόσο το καλύτερο. Εκεί μπαίνει μια νέα μελέτη, η οποία δείχνει ότι το απορριπτόμενο σκυρόδεμα γίνεται ακόμη πιο δυνατό από ότι ήταν πριν, όταν προστίθενται απορρίμματα ξύλου. Το σκυρόδεμα κατασκευάζεται με ανάμιξη ενός αδρανούς όπως χαλίκι με νερό και τσιμέντο. Μόλις σκληρυνθεί το μίγμα, το τσιμέντο σκληραίνει και συνδέεται με το συσσωμάτωμα για να σχηματίσει ένα στερεό μπλοκ υλικού. Το μίγμα στη συνέχεια θερμάνθηκε ταυτόχρονα και τοποθετήθηκε υπό υψηλή πίεση. Διαπιστώθηκε ότι με ακρίβεια μεταβλητές όπως η αναλογία σκυροδέματος / λιγνίνης, η περιεκτικότητα σε νερό, η θερμοκρασία, συν το ποσό και η διάρκεια της

πίεσης, η λιγνίνη σχηματίστηκε σε μια πολύ αποτελεσματική κόλλα, συνδέοντας τα κομμάτια σκυροδέματος σε σκόνη μεταξύ τους

Όταν στη συνέχεια δοκιμάστηκε, το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα βρέθηκε να έχει μεγαλύτερη αντοχή κάμψης από το αρχικό σκυρόδεμα από το οποίο κατασκευάστηκε. Ως πρόσθετο μπόνους, λόγω της περιεκτικότητάς του σε λιγνίνη, το υλικό θα πρέπει πιθανώς να βιοαποικοδομηθεί μόλις απορριφθεί.

Επιπλέον, οι επιστήμονες πιστεύουν ότι η λιγνίνη που λαμβάνεται από άλλες φυτικές πηγές (όπως γεωργικά απόβλητα) θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί αντ' αυτού. Ίσως τελικά είναι δυνατό να δημιουργηθεί νέο "παρθένο" σκυρόδεμα, στο οποίο η λιγνίνη χρησιμοποιείται αντί του τσιμέντου.

"Αυτά τα ευρήματα μπορούν να προωθήσουν μια κίνηση προς μια πιο πράσινη, πιο οικονομική οικοδομική βιομηχανία που όχι μόνο μειώνει τα αποθέματα σκυροδέματος και ξύλου, αλλά βοηθά επίσης στην αντιμετώπιση του ζητήματος της κλιματικής αλλαγής", λέει ο Sakai.

Ως ενδιαφέρουσα σημείωση, μια μελέτη του 2018 που πραγματοποιήθηκε στο Εθνικό Πανεπιστήμιο της Σιγκαπούρης κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η προσθήκη απορριμμάτων ξύλου στο τσιμέντο και το κονίαμα τους έκανε τόσο ισχυρότερα όσο και πιο στεγανά.

8.8 Πλεονεκτήματα ξυλείας

➤ Εφελκυστική αντοχή

Ως σχετικά ελαφρύ δομικό υλικό, το μήκος θραύσης (ή αυτο-υποστηριζόμενο μήκος) του ξύλου υπερβαίνει ακόμη και αυτό του χάλυβα. Εν ολίγοις, μπορεί να υποστηρίξει καλύτερα το δικό του βάρος, παρέχοντας έτσι περισσότερο χώρο και λιγότερο απαραίτητη υποστήριξη σε ορισμένα αρχιτεκτονικά σχέδια.

➤ Αντοχή και θερμότητα

Όταν στεγνώνει σε τυπική περιεκτικότητα υγρασίας (MC), έχει μια φυσική αντίσταση στην ηλεκτρική αγωγιμότητα, η οποία συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 7% -12% για τους περισσότερους τύπους ξύλου. Η αντοχή και το μέγεθός του δεν επηρεάζονται επίσης σημαντικά από τη θερμότητα, μπορούν να παρέχουν σταθερότητα στο ολοκληρωμένο κτίριο και ακόμη και να διασφαλίσουν την ασφάλεια σε ορισμένες καταστάσεις πυρκαγιάς.

➤ Απορροφητικός ήχος

Οι ακουστικές του ιδιότητες το καθιστούν ιδανικό για ελαχιστοποίηση της ηχούς σε οικιακούς ή γραφειακούς χώρους. Το ξύλο απορροφά τον ήχο αντί να τον αντανακλά ή να τον ενισχύει και μπορεί να μειώσει σημαντικά τα επίπεδα θορύβου, παρέχοντας έτσι επιπλέον άνεση.

➤ Τοπική πηγή.

Το ξύλο είναι ένα δομικό υλικό που μπορεί να φυτευτεί και να αναπτυχθεί εκ νέου μέσω φυσικών διεργασιών και μέσω σχεδίων αναφύτευσης και διαχείρισης δασών. Οι επιλογές συγκομιδής και άλλες πρακτικές μπορούν να συνεχίσουν να αυξάνονται κατά τη συγκομιδή μεγάλων δέντρων.

➤ Την προστασία του περιβάλλοντος

Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις για πολλά οικοδομικά υλικά (συμπεριλαμβανομένων σκυροδέματος, μετάλλου και πλαστικού) είναι ότι η απόρριψη αυτών των υλικών απαιτεί πολύ χρόνο για την αποσύνθεση. Όταν εκτίθεται στο φυσικό κλίμα, το ξύλο θα αποσυντίθεται ταχύτερα και θα αναπληρώνει πραγματικά το έδαφος κατά τη διαδικασία.

8.9 Μειονεκτήματα ξυλείας

Η συρρίκνωση και η διόγκωση του ξύλου είναι ένα από τα κύρια μειονεκτήματά της. Το ξύλο είναι ένα υγροσκοπικό υλικό. Αυτό σημαίνει ότι απορροφά τους συμπυκνώσιμους ατμούς γύρω του και χάνει υγρασία στον αέρα κάτω από το σημείο κορεσμού της ίνας. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η υποβάθμισή του. Οι παράγοντες που προκαλούν την υποβάθμιση και την καταστροφή του ξύλου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: βιολογικά και μη βιολογικά. Οι βιολογικοί παράγοντες περιλαμβάνουν σήψη και μούχλα, βακτήρια και έντομα. Οι μη βιολογικοί παράγοντες περιλαμβάνουν το ηλιακό φως, τον άνεμο, το νερό, ορισμένα χημικά και φωτιά.

8.10 Τέφρα ξύλου

Η τέφρα ξύλου είναι ένα υποπροϊόν της διαδικασίας καύσης. Προϊόντα ξύλου για παραγωγή ενέργειας χαρτοπολτού και χαρτιού, πριονιστήρια και εγκαταστάσεις παραγωγής ξυλείας. Τα απορρίμματα ξύλου αποτεφρώνονται με άλλα καύσιμα, όπως π.χ. άνθρακας, πετρελαϊκός οπτάνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Η τέφρα ξύλου σχηματίζεται τόσο από οργανικές όσο και από ανόργανες ενώσεις. Οι φυσικές οι χημικές ιδιότητες της τέφρας ξύλου, που καθορίζει τις ευεργετικές χρήσεις, επηρεασμένες από τα είδη του ξύλου και τις μεθόδους καύσης, συμπεριλαμβανομένης της καύσης θερμοκρασίας, της απόδοσης λέβητα και συμπληρωματικότητα καυσίμων που θα χρησιμοποιηθούν.

8.10.1 Ιδιότητες της τέφρας ξύλου

Ο Naik προσδιόρισε τις φυσικές και χημικές ιδιότητες της τέφρας ξύλου πάνω από 15 διαφορετικά ξύλα λέβητα. Οι μικρογραφίες σάρωσης ηλεκτρονίων δείχνουν πως η τέφρα ξύλου είναι ένα ετερογενές μείγμα σωματιδίων διαφόρων μεγεθών με συνηθέστερο το γωνιακό τους σχήμα. Άκαυστα ή μερικώς φλεγόμενα σωματίδια που υπάρχουν στην τέφρα ξύλου έχουν κυτταρική δομή.

Για τη στάχτη του ξύλου που μελετήθηκε, η μέση περιεκτικότητα σε υγρασία, της ιπτάμενης τέφρας είναι περίπου 13% και η κατώτατη τιμή, στον πυθμένα, είναι περίπου 22%., αλλά κυμαίνεται από 0 έως 79%. Η μέση τιμή

μαζικής πυκνότητα (ASTM C 29) είναι 490 kg / m³ (31 lb / ft³) για την ιπτάμενη τέφρα και 827 kg / m³ (52 lb / ft³) για την τέφρα στον πυθμένα. Το μέσο ειδικό βάρος (ASTM C 188) για την τέφρα ξύλου είναι 2,48. Η χαμηλότερη περιεκτικότητα σε τέφρα έχει ένα μέσο ειδικό βάρος 1,65. Η μέση τιμή απορρόφησης (ASTM C 128) είναι 10,3% για την χοντρή ιπτάμενη τέφρα και 7,5% για τον πυθμένα. Ο δείκτης μέσης δραστηριότητας ισχύος ASTM C311/C109 στην ηλικία των 28 ημερών της ιπτάμενης τέφρας είναι κατά μέσο όρο περίπου 66%. Η απαίτηση νερού του ξύλου ιπτάμενης τέφρας (ASTM C 311) είναι 116%. Η δοκιμή διαστολής αυτόκλειστου για ιπτάμενη τέφρα (ASTM C 618) παρουσιάζει μέση χαμηλή τιμή επέκτασης που κυμαίνεται στο 0,2%.

Γενικά, η ιπτάμενη τέφρα ξύλου έχει ιδιότητες ανάμεσα της ιπτάμενης τέφρας άνθρακα Γ κατηγορίας και ποζολάνης(ηφαιστειακή τέφρα). Μίγματα που παράχθηκαν με μίγματα τέφρας ξύλου και ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας Γ.

8.10.2 Χρήσεις τέφρας ξύλου

Περίπου το 70% της τέφρας ξύλου παράγεται από τις Ηνωμένες Πολιτείες και τοποθετούνται σε χωματερές. Το επιπλέον 20% χρησιμοποιείται για συμπληρώματα εδάφους. Το υπόλοιπο 10% έχει χρησιμοποιηθεί για διάφορες άλλες εφαρμογές.

Με βάση τις φυσικές, χημικές και μορφολογικές του ιδιότητες. Ο Naik και ο Kraus αναφέρουν ότι η τέφρα ξύλου έχει μεγάλες δυνατότητες, αφού χρησιμοποιείται ως πρόσθετο ορυκτών ποζολάνης και ως ενεργοποιητής σε υλικά με βάση το τσιμέντο.

Πραγματοποίησαν εκτεταμένες μελέτες για την εφαρμογή της τέφρας ξύλου στην κατασκευή σκυροδέματος και CLSM. Σκυρόδεμα με αέρα, με έως 35% αντικαθίσταται από τέφρα ξύλου, αντί για υλικό τσιμέντου, επιτυγχάνοντας έτσι αντοχή σε θλίψη 35 MPa (5 ksi), εκ των οποίων είναι κατάλληλο για πολλές δομικές εφαρμογές.

Ο Naik παράγαγε μίγματα σκυροδέματος αναμιγνύοντας ιπτάμενη τέφρα ξύλου. Σε αυτά τα μείγματα, χρησιμοποιείται η τέφρα ξύλου αντικαθιστώντας περίπου το 15%, το 25% και το 35% του τσιμέντου. Δύο επίπεδα αντικατάστασης μικτής τέφρας (Περίπου 25% και 35%) χρησιμοποιήθηκαν με φρέσκο σκυρόδεμα, έχοντας κατάλληλους δεσμούς και αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό.

Τα χαρακτηριστικά του νωπού σκυροδέματος, κατά της συμπίεσης και της σήψης

μετρημένα σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών, από τον Naik, έχουν το εξής συμπέρασμα:

- Οι ποζολανικές συνεισφορές της τέφρας ξύλου ήταν σημαντικές.
- Αναμειγνύοντας την τέφρα ξύλου με την ιπτάμενη τέφρα κατηγορίας Γ, η απόδοση του σκυροδέματος βελτιώθηκε σημαντικά
- Το σκυρόδεμα που κατασκευάστηκε από την ανάμειξη ιπτάμενης τέφρας ξύλου και τα μείγματά της πέτυχαν αντοχή σε θλίψη έως 50 MPa
- Η επίδειξη κατασκευής πραγματοποιείται με την παραγωγή δομικής ποιότητας σκυροδέματος στο Rothschild, Wis., το 2001 (Εικ. 8.2 και 8.3).



Εικόνα 8.2 Εργάτες έτοιμοι να τοποθετήσουν φρέσκο σκυρόδεμα ξύλινης τέφρας δομικής ποιότητας



Εικόνα 8.3 Ολοκλήρωση της πλάκας επίδειξης σκυροδέματος δομικής ποιότητας ενσωματώνει τέφρα ξύλου, τοποθετήθηκε το 2001

8.11 Εισαγωγή

Κάποιοι στη βιομηχανία τοιχοποιίας σκυροδέματος σημειώνουν με υπερηφάνεια ότι το τσιμεντόντο μπλοκ μερικές φορές θεωρείται έτοιμος και πρόθυμος παραλήπτης απορριμμάτων. Καθώς αυξάνονται τα τέλη υγειονομικής ταφής, καθίσταται σημαντικότερη η εκτροπή υλικών σε εναλλακτικές χρήσεις, και η ενσωμάτωση των απορριμμάτων στα δομικά υλικά αντιπροσωπεύει μια λύση. Διάφορες μορφές υπολειμματικών υλικών από καύση άνθρακα, σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, για παράδειγμα, κυκλοφορούν σήμερα ως ελαφριά αδρανή για την τοιχοποιία σκυροδέματος και για συμβατικό σκυρόδεμα για τις βιομηχανίες. Ο στόχος της εργασίας που αναφέρεται σε αυτό το έγγραφο ήταν η χρήση ανακυκλωμένων σωματιδίων ξύλου σε μια ελαφριά μονάδα τοιχοποιίας από σκυρόδεμα CMU που πληροί τις απαιτήσεις του ASTM C129 (ASTM 1999b) για τοιχοποιία από μη φέροντα σκυρόδεμα. Ένας πιο λεπτός, αλλά ζωτικής σημασίας στόχος ήταν η τροποποίηση του τυπικού διαφημιστικού μηχανήματος και τις διαδικασίες παραγωγής-μπλοκ όσο το δυνατόν λιγότερο.

8.12 Σύνθετα ξύλου-τσιμέντου

Το ξύλο και το τσιμέντο συνδυάζονται σε μια ποικιλία από σύνθετα πάνελ, προϊόντα που χρησιμοποιούνται εκτενώς εκτός των Ηνωμένων Πολιτειών. Το σχετικά χαμηλής πυκνότητας τσιμέντο ή αλλιώς «ξύλινο μαλλί» χρησιμοποιείται στην Ευρώπη και στην Ιαπωνία για πάνελ με στρεσαρισμένη επιδερμίδα και παραμένους στην συγκεκριμένη θέση τους από την μορφή εργασίας « Shigekura 1989». Σε αναπτυσσόμενες περιοχές της Λατινικής Αμερικής (Ramirez-Coretti et al. 1998) και αλλού, αυτό χρησιμοποιείται για επένδυση γενικής χρήσης. Η βιοαποικοδόμηση δεν είναι θέμα, καθώς το υλικό τσιμέντου εγκλωβίζει αποτελεσματικά το ξύλο. Η χρήση του ξύλου ως αδρανή στο CMU είναι λιγότερο καλά τεκμηριωμένη. Το προϊόν Durisol, που διατίθεται στην Ευρώπη και

τον Καναδά δεκαετίες, χρησιμοποιεί το ξύλο ως αδρανή σε ένα τσιμεντόλιθο, δηλαδή χρησιμοποιείται ως μόνιμος ξυλότυπος για δομικό σκυρόδεμα. Ένα παρόμοιο προϊόν έχει κατασκευαστεί στις Ηνωμένες Πολιτείες στο πλαίσιο της εμπορικής ονομασίας Faswal. Επειδή το μέγεθος και οι εφαρμογές αυτών των προϊόντων δεν συνάδουν με τις σταθερά καθιερωμένες πρακτικές στις Ηνωμένες Πολιτείες (VanderWerf 1999), και το κόστος τους δεν δικαιολογεί μια ριζική αλλαγή στις κατασκευαστικές πρακτικές, η χρήση στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι εξαιρετικά περιορισμένη. Ο Rashwan et al (1992) πειραματίστηκε με τη χρήση πριονιδιού από πριονιστήριο ως αδρανές για CMU. Παρήγαγαν CMU σε τυπικά μηχανήματα σχηματισμού μπλοκ και πέτυχαν συνάντηση αντοχών σε θλίψη με απαιτήσεις ASTM C129. Δεν πειραματίστηκαν με μικτά είδη ξύλου και τα είδη σωματιδίων από τα οποία θα μπορούσε κανείς να λάβει την λείανση απορριμμάτων ξύλου. Οι Anderson and Rolle (“Recycling industrial waste wood as cement/wood construction block,” unpublished report and addendum to University of Wisconsin System Solid Waste Research Program, 1996) χρησιμοποίησε ανακυκλωμένα σωματίδια ξύλου ως χονδροειδές αδρανές σε CMU που παράγεται σε

τυποποιημένα μηχανήματα, αλλά δεν ήταν σε θέση να παράγουν μπλοκ με επαρκείς αντοχές για πρότυπα ASTM C129. Έδειξαν ότι οι θερμικές ιδιότητες είναι καλύτερες από τις τυπικές CMU και ότι οι ιδιότητες αντοχής στη φωτιά είναι συγκρίσιμες.

8.13 Ζητήματα συμβατότητας με ξύλο-τσιμέντο

Η χημική ασυμβατότητα μεταξύ ξύλου και τσιμέντου είναι ένα σημαντικό πρόβλημα. Τα απλά σάκχαρα, γνωστά επιβραδυντικά του τσιμέντου, υπάρχουν σε διάφορες ποσότητες στα περισσότερα ξύλα. Η ημικυτταρίνη είναι διαλυτό σε αλκαλικό περιβάλλον, όπως η υγρή πάστα τσιμέντου, και μπορεί να μειώσει την αντοχή και τον ρυθμό ενυδάτωσης του τσιμέντου (Miller και Muslemi 1991). Άλλα εκχυλιστικά, όπως τερπένια και ρητίνες μπορεί να "μεταναστεύσουν" στην επιφάνεια των σωματιδίων του ξύλου κατά την ξήρανση και να δημιουργήσουν ένα στρώμα στην επιφάνεια που εμποδίζει τη σύνδεση μεταξύ του ξύλου και του τσιμέντου (Hachmi and Campbell 1989).

Αρκετές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για να ξεπεραστεί αυτή η ασυμβατότητα. Ο Moslemi et al. (1983) έδειξε η συμβατότητα του Western Larch με τσιμέντο μειώθηκε σημαντικά με εκτεταμένη επεξεργασία με ζεστό νερό. Το πλύσιμο δεν βοήθησε το Lodgepole Pine, το οποίο είναι γνωστό, ότι είναι λιγότερο ασυμβίβαστο από το Larch στην αρχή. Ο Ρασβάν et al (1992) έδειξε ότι το μούλιασμα και το ξέπλυμα σε κρύο νερό λειτούργησε καθώς και το ζεστό νερό για το White Spruce. Ο Faswal χρησιμοποιεί, κατοχυρωμένη με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας, διαδικασία [H. Walter and L. M. Walter-Gurzelir, "Coated free aggregate usable in wood concrete technology and method of making the same," U.S. Patent No. 5,019,170 ~1989!)] για τη θεραπεία των σωματιδίων ξύλου πρώτα με διάλυμα θειικού αργιλίου και μετά με

διάλυμα πηλού καολίνη. Μια άλλη κατοχυρωμένη, με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας διαδικασία, επεξεργασία χρησιμοποιεί "τουλάχιστον ένα διαλυτό πυριτικό άλας" [F. Halwani, "Lightweight block containing stabilized wood aggregates," U.S. Patent, No. 5,405,211 ~1993!], πιθανότατα για να επιτευχθεί ο ίδιος σκοπός όπως ο πηλός. Οι Lee and Short (1989) έδειξε ότι η θεραπεία με εμβάπτιση 30 δευτερολέπτων σε διάλυμα πυριτικού νατρίου 3% βελτίωσε τη δύναμη της τσιμεντοειδούς σανίδας που κατασκευάστηκε με πολλά σκληρά ξύλα. Οι παραδοσιακοί επιταχυντές μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τα αποτελέσματα χημικής ασυμβατότητας επιτρέποντας περισσότερη ενυδάτωση πριν οι ανασταλτικές ενώσεις διασκορπίζονται πλήρως στην πάστα. Ο πιο κοινός παραδοσιακός επιταχυντής είναι το χλωριούχο ασβέστιο, αλλά είναι η πιο βλαβερή επίδραση στην ανθεκτικότητα των μεταλλικών ενσωματώσεων σε τσιμέντο και τοιχοποιία είναι καλά τεκμηριωμένη. Οι Zhengtian και Moslemi (1985) έδειξε ότι αρκετά χλωρίδια ήταν αποτελεσματικά στη βελτίωση του ρυθμού ενυδάτωσης του τσιμέντου με σωματίδια Larch. Οι Lee and Short (1989) έδειξε ότι βυθίζοντας το ξύλο σε χλωριούχο ασβέστιο το διάλυμα βελτίωσε την αντοχή του τσιμέντου.

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες χρησιμοποιείται η ανθράκωση για να αυξηθεί εντυπωσιακά η ταχύτητα παραγωγής σύνθετων υλικών από ξύλο-τσιμέντο. Η βασική αντίδραση είναι ο συνδυασμός διοξειδίου του άνθρακα και υδροξειδίου του καλίου για τη δημιουργία ανθρακικού ασβεστίου και νερού. Το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να προστεθεί ως αέριο ή ως διαλυτό ανθρακικό. Ο Simatu pang et al.(1991) σημείωσε ότι η αποτελεσματικότητα της προσθήκης αερίου, το CO₂ εξαρτάται από την πρόσβασή του σε όλα τα τμήματα του σύνθετου υλικού. Για παράδειγμα, είναι αποτελεσματικό με τα προϊόντα πάνελ επειδή μπορεί να εγχυθεί σε όλη την επιφάνεια και των δύο όψεων των τηγανιών. Το τσιμεντένιο μπλοκ, από την άλλη πλευρά, έχει ένα δυσκίνητο σχήμα για την έγχυση CO₂. Ο Simaturang et al.(1991) ανέφερε ότι οποιοδήποτε από τα πολλά υδατοδιαλυτά ανθρακικά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθούν ως πηγή CO₂, αποφεύγοντας την ανάγκη άμεσης προσθήκης αερίου. Χρησιμοποίησαν ποικιλία ανθρακικών σε συνδυασμό με θερμαινόμενα πιάτα για δημιουργία σανιδών από ξύλο-τσιμέντο που ανέπτυξαν σημαντική αντοχή σε μόλις πέντε λεπτά.

Η μακροχρόνια ασυμβατότητα ξύλου και τσιμέντου μπορεί να είναι ένα τελείως διαφορετικό θέμα. Περιμένει κανείς τη δύναμη και την ακαμψία των προϊόντων τσιμέντου να αυξηθούν με την πάροδο του χρόνου, καθώς η αντίδραση ενυδάτωσης συνεχίζει επ 'αόριστον με αργούς ρυθμούς. Αλλά ακριβώς όπως το ξύλο αλληλεπιδρά με το τσιμέντο σε πρώιμα στάδια, το τσιμέντο μπορεί να βλάψει το ξύλο καθώς το σύνθετο παλαιώνει. Οι Bergstrom και Gram (1984) έδειξαν ότι, με την πάροδο του χρόνου, οι ίνες sisal επηρεάστηκαν επιβλαβώς από το αλκαλικό περιβάλλον μιας σανίδας τσιμέντου. Βρήκαν αυτή τη δύναμη και η ολκιμότητα μειώθηκε με μια δοκιμή επιταχυνόμενης γήρανσης της υγρασίας. Τροποποιώντας το τσιμέντο για να μειώσει την αλκαλικότητά του (με την προσθήκη καπνού πυριτίου) μείωσε δραματικά το επιβλαβές αποτέλεσμα. Οι Bentur and Akers (1989) χρησιμοποίησαν εικόνες μικροσκοπίου σάρωσης elec tron από επιφάνειες αστοχίας για να δείξουν ότι η γήρανση οδηγεί σε αλλαγή του κυρίαρχου τρόπου αστοχίας για τα τσιμέντα, ενισχυμένα με ίνες από την απομάκρυνση ινών στα φρακτούς ινών, η ιδέα ότι το αλκαλικό περιβάλλον τσιμέντου υποβαθμίζει τις ίνες.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Εφελκυστική αντοχή ➤ Αντοχή και θερμότητα ➤ Απορροφητικός ήχος ➤ Τοπική πηγή ➤ Την προστασία του περιβάλλοντος 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Συρρίκνωση ξύλου ➤ Διόγκωση ξύλου ➤ Υποβάθμιση ξύλου

Πίνακας 8.1

9. Σκυρόδεμα από ανακυκλωμένα αδρανή πετρώματα

Η χρήση αποβλήτων λατομείων για την αντικατάσταση της άμμου στο σκυρόδεμα θα λύσει τα περιβαλλοντικά προβλήματα που προκαλούνται από την εξάντληση των φυσικών πόρων των ποταμών και την εξόρυξη άμμου. Ορισμένες βιομηχανίες και λατομεία διαθέτουν μεγάλη ποσότητα απορριμμάτων, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υποκατάστατο ολόκληρου ή μέρους αδρανών υλικών σκυροδέματος.

9.1 Γρανίτης

Τα εργοστάσια γρανίτη παράγουν υπέρογκα ποσά αποβλήτων. Ποσοστό των απόβλητων αυτών θα μπορούσαν να ανακυκλωθούν και να χρησιμοποιηθούν ως χονδρόκοκκα ή λεπτόκοκκα αδρανή αντί για τα φυσικά αδρανή στο σκυρόδεμα, λόγω των κατάλληλων φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του γρανίτη.



Εικόνα 9.1 : Ανακύκλωση αποβλήτων γρανίτη Πηγή: Ostrowski, K., Stefaniuk, D., Sadowski, Ł., Krzywiński, K., Gicala, M., & Róžańska, M. (2020)

9.1.1 Εργασιμότητα

Από την μελέτη των Sharma, N. K et al. (2017) παρατηρήθηκε ότι καθώς αυξάνεται η αναλογία νερού-τσιμέντου και το ποσοστό αντικατάστασης του ανακυκλωμένου γυαλισμένου γρανίτη, τόσο αυξάνεται και η εργασιμότητα. Η βελτίωση αυτή της εργασιμότητας του σκυροδέματος με την προσθήκη γυαλισμένων αποβλήτων γρανίτη μπορεί να δικαιολογηθεί από το χαμηλότερο ποσοστό απορρόφησης νερού του αδρανούς γρανίτη σε σύγκριση με τα παραδοσιακά αδρανή. Ωστόσο, άλλες μελέτες

έχουν δείξει ότι η προσθήκη αποβλήτων μη γυαλισμένου γρανίτη μπορεί να φέρει μη επιθυμητά αποτελέσματα στη λειτουργικότητα του νέου σκυροδέματος.

9.1.2 Πυκνότητα χύδην σκληρυμένου σκυροδέματος

Παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται η ποσότητα των απορριμμάτων γρανίτη με διαφορετικές αναλογίες νερού-τσιμέντου, αυξάνεται η πυκνότητα του σκληρυμένου σκυροδέματος. Αυτή η αύξηση μπορεί να συμβαίνει λόγω του ότι τα απόβλητα γρανίτη έχουν μεγαλύτερο ειδικό βάρος σε σύγκριση με τη φυσικά αδρανή.

9.1.3 Αντοχή σε θλίψη

Στην ίδια μελέτη των Sharma, N. K et al. (2017), η αύξηση της ποσότητας του ανακυκλωμένου αδρανούς γρανίτη φαίνεται ότι στις αντοχές σε θλίψη 7 ημερών και 28 ημερών ωρίμανσης, προκαλεί μείωσή τους. Για το δείγμα με αναλογία νερού-τσιμέντου 0,38, η θλιπτική αντοχή 28 ημερών του παραδοσιακού δείγματος είναι 42,1 MPa. Όταν το ποσοστό αντικατάστασης από απόβλητα γυαλισμένου γρανίτη είναι 10%, 20%, 30% και 40%, η θλιπτική δύναμη μειώνεται στα 41,4, 38,8, 35,4 και 32,8 MPa, αντίστοιχα. Σε όλα τα μίγματα ελήφθη αντοχή σε θλίψη μεγαλύτερη από 30 MPa. Στην περίπτωση δειγμάτων σκυροδέματος με αναλογία νερού-τσιμέντου 0,40 και 0,42, παρατηρήθηκαν αντοχές άνω των 30 MPa σε μίγματα με αντικατάσταση απόβλητου γυαλισμένου γρανίτη έως και 30%.

Η παραπάνω μείωση εξηγείται από το γεγονός της στίλβωσης του γρανίτη όπου κάνει τα σωματίδιά του να έχουν ομοιόμορφες και γυαλισμένες επιφάνειες. Έτσι, η αλληλοσύνδεση της επιφάνειάς τους με την δομή τσιμέντου θα είναι πιο ισχυρή, κάτι το οποίο δεν ικανοποιείται αρκετά από τα φυσικά αδρανή λόγω της τραχιάς επιφάνειάς τους. Ωστόσο, οι Bacarji, E., et al. (2013) δεν παρατήρησαν σημαντικές αλλαγές στην αντοχή θλίψης του σκυροδέματος, όταν χρησιμοποίησαν πολύ χαμηλό επίπεδο προσθήκης (5%) των μη γυαλισμένου γρανίτη αλλά και μαρμάρου. Οι Binici et al. (2007) τόνισαν ότι όταν το φυσικό αδρανές αντικαταστάθηκε με απόβλητα γρανίτη υψηλότερου ειδικού βάρους, παρατηρήθηκαν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και χημική αντοχή, καθώς αυξανόταν το ποσοστό αντικατάστασης.

9.1.4 Δοκιμή αντοχής σε κάμψη

Φαίνεται πως η αντοχή κάμψης συμβαδίζει με τη συμπεριφορά της αντοχής σε θλίψη. Καθώς η ποσότητα των απορριμμάτων γρανίτη αυξάνεται και η αναλογία νερού-τσιμέντου αυξάνεται, η αντοχή κάμψης μειώνεται σταδιακά. Όταν η αναλογία νερού-τσιμέντου είναι 0,38, η αντοχή σε κάμψη του παραδοσιακού σκυροδέματος είναι 5,5 MPa και όταν η αντικατάσταση ανακυκλωμένου αδρανούς γρανίτη είναι 10%, 20%, 30% και 40%, η αντοχή κάμψης είναι 5,41, 5,29, 5,02, και 4,85 MPa, αντίστοιχα. Η μείωση αυτή μπορεί να οφείλεται στον μη ισχυρό δεσμό των αποβλήτων γρανίτη.

9.1.5 Αντοχή στην τριβή

Σε μεγαλύτερα ποσοστά αντικατάστασης αποβλήτων γρανίτη, φαίνεται πως η αντοχή στη τριβή είναι καλύτερη. Για αναλογία νερού-τσιμέντου 0,38, το βάθος τριβής του δείγματος ελέγχου είναι 1.501 mm (Sharma, N. K., et al., (2017)). Για ποσοστά αντικατάστασης 10%, 20%, 30% και 40% τα βάθη είναι 1.418, 1.349, 1.269 και 1.215 mm, αντίστοιχα. Όταν η αναλογία νερού-τσιμέντου είναι 0,40 και 0,42, φαίνεται ότι τα δείγματα ακολουθούν την προηγούμενη τάση αλλά με περισσότερες απώλειες.

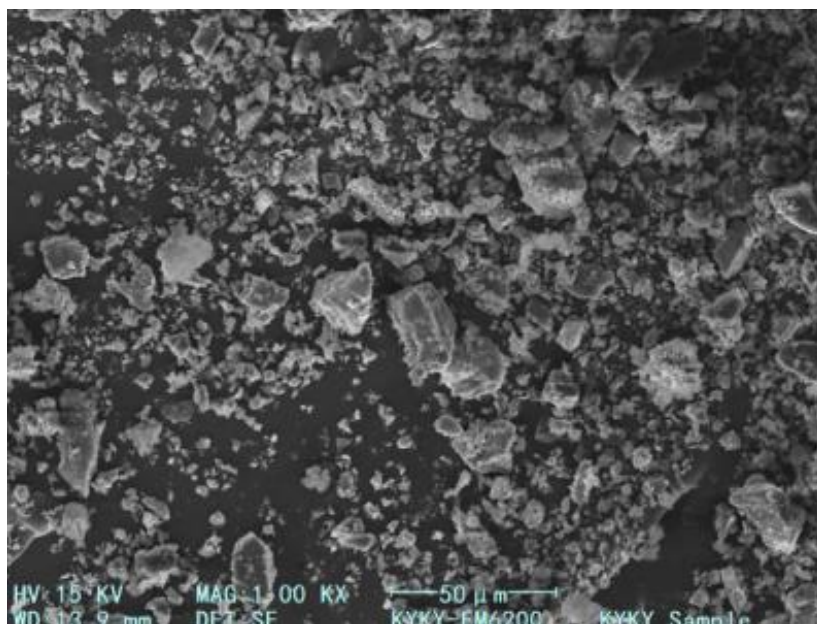
9.1.6 Δοκιμή απορρόφησης νερού

Καθώς αυξάνεται η αντικατάσταση φυσικών αδρανών με απόβλητα γρανίτη, ο ρυθμός απορρόφησης του νερού μειώνεται σταδιακά. Για λόγο νερού-τσιμέντου 0,38, η απορρόφηση νερού του σκυροδέματος ελέγχου είναι 3% ενώ για αντικαταστάσεις της τάξης των 10, 20, 30 και 40%, το ποσοστό απορρόφησης εμφάνισε πτώση με τιμές 2,9, 2,6, 2,2 και 1,9%, αντίστοιχα. Ο λόγος για τη χαμηλή τιμή της απορρόφησης νερού για τη μεγαλύτερη αντικατάσταση με απόβλητα γρανίτη μπορεί να οφείλεται στο χαμηλότερο ποσοστό απορρόφησης νερού των τελευταίων σε σύγκριση με τα παραδοσιακά αδρανή.

9.1.7 Δοκιμή διείσδυσης νερού

Η υδατοπερατότητα του σκυροδέματος καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την αντοχή του σκυροδέματος. Εφόσον υπάρχει επαρκής περιεκτικότητα σε τσιμέντο, σωστή αναλογία νερού-τσιμέντου και σωστή σκλήρυνση του δείγματος, το πορώδες στο σκυροδέμα, που σχετίζεται με την διαπερατότητα, μπορεί να μειωθεί.

Τα απόβλητα γρανίτη στο μίγμα του σκυροδέματος φέρουν θετικά αποτελέσματα στην υδατοπερατότητα και ακολουθούν το μοτίβο της απορρόφησης νερού. Καθώς αυξάνεται η απορρόφηση νερού, η διείσδυση υδατοπερατότητας μειώνεται. Για αναλογία νερού-τσιμέντου 0,38, το βάθος διείσδυσης του σκυροδέματος ελέγχου είναι 5,44 cm ενώ για δείγματα που περιέχουν 10%, 20%, 30% και 40% γυαλισμένα απόβλητα γρανίτη, οι τιμές είναι 5,1, 4,84, 4,54 και 4,45, αντίστοιχα (Sharma, N. K., et al., (2017)). Για αναλογίες νερού-τσιμέντου 0,40 και 0,42, μπορεί να παρατηρηθούν παρόμοιες τιμές. Η μείωση στο βάθος διείσδυσης νερού μπορεί να προέλθει με την αντικατάσταση φυσικών αδρανών με ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή γρανίτη τα οποία ίσως μειώνουν το πορώδες, συμβάλλοντας έτσι στη βελτίωση της συμπύκνωσης της πυκνότητας.



Εικόνα 9.2 Εικόνα SEM απόβλητα γυαλισμένου γρανίτη Πηγή: Chen, J. J., Li, B. H., Ng, P. L., & Kwan, A. K. H. (2021)

9.2 Μάρμαρο

Τα εργοστάσια μαρμάρου παράγουν τεράστιες ποσότητες απορριμμάτων. Σχεδόν το 70% του μαρμάρου σπαταλάται κατά τις διαδικασίες πριονίσματος, διαμόρφωσης, εξόρυξης, επεξεργασίας και στίλβωσης δημιουργώντας μεγάλα προβλήματα στο περιβάλλον απειλώντας τον υδροφόρο ορίζοντα. Για αυτό το λόγο, είναι απαραίτητο να επαναχρησιμοποιηθούν αυτά τα απόβλητα, ειδικά στην κατασκευή προϊόντων σκυροδέματος για κατασκευαστικούς σκοπούς. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι μηχανικές ιδιότητες των δειγμάτων σκυροδέματος στα οποία προστίθενται απόβλητα μαρμάρου, πληρούν τις προδιαγραφές για την παραγωγή σκυροδέματος και ότι η αντικατάσταση φυσικών αδρανών με τα απόβλητα αυτά έως και 75%, αποφέρει θετικά αποτελέσματα για το νέο σκυρόδεμα.



Εικόνα 9.3 Ανακύκλωση αποβλήτων μαρμάρου Πηγή: Seghir, N. T., Mellas, M., Sadowski, Ł., & Žak, A. (2018)

9.2.1 Πυκνότητα

Το ανακυκλωμένο αδρανές υλικό μπορεί να έχει αντίκτυπο στην πυκνότητα του σκυροδέματος. Ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης, οι τιμές της πυκνότητας διαφέρουν. Οι τιμές που λαμβάνονται για την πυκνότητα του μίγματος που περιέχει ανακυκλωμένα αδρανή χαλίκια και άμμο μαρμάρου σε ποσοστό αντικατάστασης των φυσικών αδρανών χαλικιού και άμμου 50%, είναι ισοδύναμες με εκείνες των τελευταίων. Σε έρευνα των Hebhou, H et al. (2011), τα δείγματα που περιείχαν μόνο ανακυκλωμένο αδρανές χαλίκι μαρμάρου ως αντικατάσταση του φυσικού αδρανούς χαλικιού, εμφάνισαν τις ελάχιστες τιμές πυκνότητας.

9.2.2 Περιεκτικότητα σε αέρα

Ο καθορισμός της πυκνότητας σε αέρα γίνεται για να γίνει γνωστή η παρουσία εισροής αέρα για την αντοχή ψύξης –απόψυξης και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του μίγματος. Οι τιμές που προκύπτουν για την περιεκτικότητα σε αέρα είναι συγκρίσιμες με αυτές του παραδοσιακού σκυροδέματος και η μεγαλύτερη τιμή καταγράφεται από δείγματα με ποσοστό αντικατάστασης 100% με απόβλητη άμμο μαρμάρου. Είναι αναγκαία η γνώση της διαφοράς περιεκτικότητας αέρα από τον εισερχόμενο αέρα στο σκυρόδεμα διότι η παράμετρος αυτή μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τα χαρακτηριστικά του σκληρυμένου σκυροδέματος. Ως εκ τούτου, χρήζει απαραίτητης προσοχής η περιεκτικότητα σε αέρα η οποία χαρακτηρίζεται σαν μέτρο ασφαλείας εξαιτίας των ιδιοτήτων των ανακυκλωμένων αδρανών. Η περιεκτικότητα σε αέρα μπορεί να διαφέρει

για ένα μεγάλο αριθμό λόγων, όπως η διαβάθμιση των λεπτόκοκκων αδρανών υλικών, το ποσοστό αντικατάστασης των αδρανών και η επίδραση αυτών των ανακυκλωμένων αδρανών στο φρέσκο και σκληρυμένο σκυρόδεμα (Hebhouh, H., et al., (2011)). Για αυτό στα ποσοστά αντικατάστασης 25%, 50% και 75% παρατηρείται μείωση της περιεκτικότητας σε αέρα.

9.2.3 Εργασιμότητα

Η δοκιμή κάθισης τίθεται σαν κύρια διαδικασία για τον προσδιορισμό της εργασιμότητας του νέου σκυροδέματος, ελέγχοντας έτσι την ποιότητά του. Όσο αυξάνεται το ποσοστό αντικατάστασης με απόβλητα μαρμάρου τόσο μειώνεται η εργασιμότητα. Αυτό παρατηρήθηκε και στα μίγματα με προσθήκη μόνο ανακυκλωμένου αδρανούς χαλικιού μαρμάρου και σε αυτά μόνο με ανακυκλωμένη αδρανή άμμο μαρμάρου αλλά και σε αυτά που περιείχαν και τα δύο αδρανή. Οι διαφορές που προκύπτουν στις τιμές εργασιμότητας οφείλονται στη διαβάθμιση και το σχήμα των λεπτόκοκκων αδρανών, την αναλογία των λεπτόκοκκων προς τα χονδρόκοκκα αδρανή και τα χαρακτηριστικά των αδρανών. Τα ανακυκλωμένα αδρανή μαρμάρου απορροφούν λιγότερο νερό σε σύγκριση με τα φυσικά αδρανή και ως εκ τούτου η ποσότητα νερού στα δείγματα χρειάζεται ρύθμιση ανάλογα με το μίγμα.

9.2.4 Αντοχή σε εφελκυσμό και θλίψη

Για συγκεκριμένα ποσοστά αντικατάστασης παρατηρείται τροποποίηση των αντοχών εφελκυσμού και θλίψης με αντικατάσταση αποβλήτων μαρμάρου. Τα δείγματα με προσθήκη ανακυκλωμένης αδρανούς άμμου μαρμάρου με αναλογίες αντικατάστασης 25%, 50% και 75%, δείχνουν αύξηση των αντοχών σε σχέση με τα φυσικά αδρανή. Ωστόσο για ποσοστό αντικατάστασης 100%, υπάρχει μείωση των αντοχών. Τα μίγματα με ανακυκλωμένο αδρανές χαλίκι μαρμάρου καθώς και τα μίγματα με ανακυκλωμένο αδρανές χαλίκι και άμμο μαρμάρου ακολουθούν το ίδιο μοτίβο. Με αντικατάσταση 25%, 50% και 75%, οι αντοχές σε εφελκυσμό και θλίψη δείχνουν βελτίωση. Ακόμα, μετά από 28 ημέρες ωρίμανσης, η εφελκυστική δύναμη δείχνει και πάλι βελτιωμένη.

Η ανάπτυξη της αντοχής σε θλίψη μπορεί να σχετίζεται με τα χημικά και φυσικά αποτελέσματα της άμμου μαρμάρου. Επιπλέον, μπορεί ακόμα να οφείλεται στο ότι το ενεργό διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) στη σκόνη μαρμάρου μπορεί να αντιδράσει με το υδροξείδιο του ασβεστίου (Ca(OH)_2) στο σκυρόδεμα για να σχηματίσει δευτερογενές ενυδατωμένο πυριτικό ασβέστιο και το καθιστά χημικά σταθερό και δομικά πυκνό (Omar, O. M., et al., (2012)).

Άρα, υπάρχει το συμπέρασμα ότι η μερική αντικατάσταση φυσικών αδρανών με ανακυκλωμένα αδρανή υλικά μαρμάρου έχει ευεργετικά αποτελέσματα στις αντοχές του σκυροδέματος. Ωστόσο αυτό δεν ισχύει για ολική αντικατάσταση.



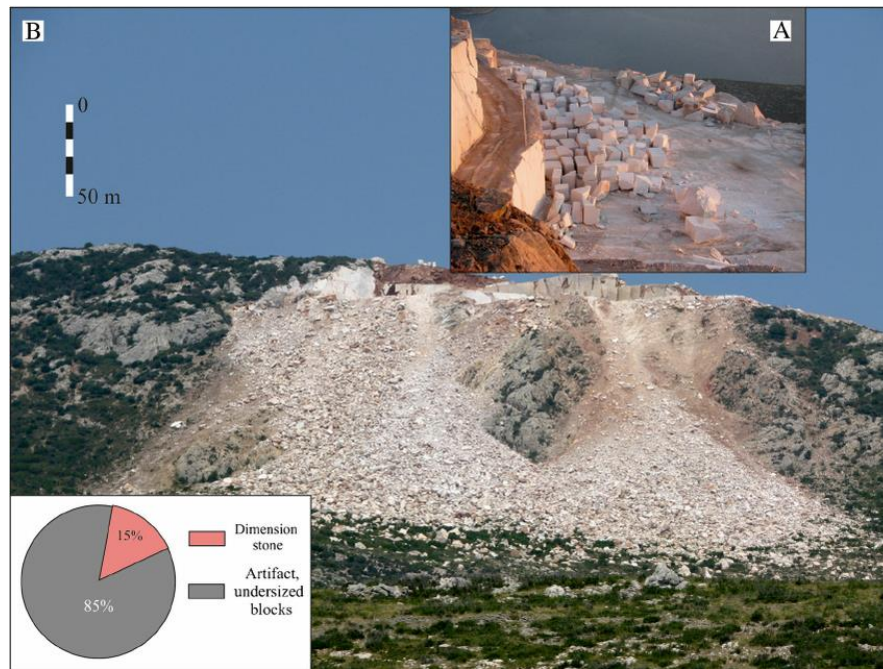
Εικόνα 9.5 Απόβλητα μαρμάρου Πηγή: Kore, S. D., & Vyas, A. K. (2016)



Εικόνα 9.4 Σκόνη απόβλητων μαρμάρου Πηγή: Ashish, D. K. (2019)

9.3 Ασβεστόλιθος

Τα ασβεστολιθικά απόβλητα αποτελούν υποπροϊόν που προκύπτει από τη παραγωγή αδρανών υλικών μέσω της διαδικασίας σύνθλιψης πετρωμάτων. Η χρήση ανακυκλωμένου αδρανούς ασβεστόλιθου ως αντικατάστατο φυσικών αδρανών στο σκυρόδεμα μπορεί να επιφέρει θετικά αποτελέσματα στις ιδιότητές του, ειδικά με την επιπλέον προσθήκη ανακυκλωμένου αδρανούς μαρμάρου.



Εικόνα 9.6 (Α) τεμάχια ασβεστόλιθου , (Β) απόβλητα ασβεστόλιθου Πηγή: Eilçi, H., Türk, N., & İşintek, İ. (2015)

9.3.1 Θλιπτική δύναμη

Σε σύγκριση με το παραδοσιακό σκυρόδεμα, η χρήση απορριμμάτων ασβεστόλιθου σε ποσοστά 25% και 50% αύξησε τη θλιπτική αντοχή στις 7, 28 και 90 ημέρες ωρίμανσης. Η χρήση ασβεστολιθικών αποβλήτων βαθμού 75% αύξησε τη θλιπτική αντοχή κατά περίπου 6% στις 7 ημέρες. Από την άλλη πλευρά, για το ίδιο επίπεδο αντικατάστασης (75%), μειώνεται κατά περίπου 5% και 4% στις 28 ημέρες και 90 ημέρες, αντίστοιχα, σε σύγκριση με το παραδοσιακό σκυρόδεμα. Η απώλεια αυτή μπορεί να σχετίζεται με τις φυσικές και χημικές επιδράσεις της σκόνης ασβεστόλιθου. Επιπλέον, όταν αυξάνεται η περιεκτικότητα σε σκόνη των ασβεστολιθικών αποβλήτων, αυξάνεται το ποσοστό του ελεύθερου υδροξειδίου του ασβεστίου κατά τη διάρκεια της αντίδρασης του τσιμέντου.

9.3.2 Αντοχή σε θλίψη σκυροδέματος με απόβλητα ασβεστόλιθου και σκόνης μαρμάρου

Στη μελέτη των Omar, O. M et al. (2012) παρατηρείται ότι με αναλογίες αντικατάστασης 25%, 50% και 75% με απόβλητα ασβεστόλιθου και 15% σκόνης μαρμάρου η θλιπτική αντοχή βελτιώθηκε περίπου 15%, 16% και 27% αντίστοιχα, σε σύγκριση με το παραδοσιακό μείγμα στις 28 ημέρες.

9.3.3 Αντοχή σε εφελκυσμό σκυροδέματος με απόβλητα ασβεστόλιθου και σκόνης μαρμάρου

Σε σύγκριση με το φυσικό μείγμα σκυροδέματος με περιεκτικότητα σε τσιμέντο 350 kg/m³, η αντοχή εφελκυσμού με χρήση 50% ασβεστολιθικών αποβλήτων και 15% σκόνης μαρμάρου έχει αυξηθεί κατά περίπου 17%. Από την άλλη πλευρά, με περιεκτικότητα σε τσιμέντο 450 kg/m³, η αντοχή σε εφελκυσμό 50% ασβεστολιθικών αποβλήτων και 15% σκόνη μαρμάρου βελτιώνεται κατά περίπου 8%. Η αύξηση αυτή οφείλεται στην ομοιόμορφη διασπορά και αποδιοργάνωση του σχήματος των αποβλήτων ασβεστόλιθου καθώς επίσης επωφελείται από τις ιδιότητες του δεσμού αντοχής των αποβλήτων ασβεστόλιθου.

Μπορεί να φανεί ότι η αναλογία της έμμεσης αντοχής σε εφελκυσμό προς τη θλιπτική αντοχή ενός μίγματος που περιέχει 50% ασβεστολιθικά απόβλητα ως υποκατάστατο άμμου και 15% σκόνη μαρμάρου είναι βασικά παρόμοια με την αντίστοιχη τιμή του παραδοσιακού μίγματος σκυροδέματος στην ίδια περιεκτικότητα σε τσιμέντο.

9.3.4 Αντοχή σε κάμψη σκυροδέματος με απόβλητα ασβεστόλιθου και σκόνης μαρμάρου

Χρησιμοποιώντας 50% απόβλητα ασβεστόλιθου και 15% σκόνη μαρμάρου, η αντοχή στην κάμψη αυξάνεται κατά περίπου 7% σε σύγκριση με το σκυρόδεμα ελέγχου με περιεκτικότητα σε τσιμέντο 350 kg/m³. Από την άλλη πλευρά, με περιεκτικότητα σε τσιμέντο 450 kg/m³, η αντικατάσταση 50% με ασβεστολιθικά απόβλητα και 15% σκόνη μαρμάρου βελτιώνουν την αντοχή σε κάμψη κατά περίπου 8%.

9.3.5 Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος με απόβλητα ασβεστόλιθου και σκόνης μαρμάρου

Το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται καθώς αυξάνεται η προσθήκη αποβλήτων ασβεστόλιθου και σκόνης μαρμάρου. Σε σύγκριση με το παραδοσιακό μίγμα σκυροδέματος με περιεκτικότητα σε τσιμέντο 350 kg/m³, τα όρια βελτίωσης του ελαστικού συντελεστή είναι 1,2% και 5,3%. Αυξάνοντας την περιεκτικότητα σε τσιμέντο στα 450 kg/m³, τα όρια αύξησης του ελαστικού συντελεστή είναι 1,5% και 3,8%.

9.3.6 Υδατοπερατότητα

Όσο αυξάνεται η προσθήκη σκόνης στο σκυρόδεμα, τόσο μειώνεται ο συντελεστής διαπερατότητας. Στο παραδοσιακό δείγμα με περιεκτικότητα τσιμέντου 350 kg/m³, ο συντελεστής διαπερατότητας είχε τη τιμή $6,8 \times 10^{-10}$ cm/sec ενώ με τη προσθήκη 15% σκόνης μαρμάρου, για ίδια περιεκτικότητα τσιμέντου, ήταν $4,62 \times 10^{-10}$ cm/sec. Για τα

μίγματα με προσθήκη 50% ασβεστολιθικών αποβλήτων και 15% σκόνης μαρμάρου η τιμή ήταν $4,87 \times 10^{-10}$ cm/sec. Παρόμοιες τιμές ισχύουν και για περιεκτικότητα σε τσιμέντο 450 kg/m^3 .

Με τη προσθήκη αποβλήτων, οι δίοδοι που συνδέουν τους πόρους με τα κανάλια νερού μπλοκάρονται με αποτέλεσμα την βελτίωση της ανεπάρκειας διαπερατότητας του σκυροδέματος. Η σκόνη που περιέχεται στα απόβλητα ασβεστόλιθου μπλοκάρει τα κανάλια νερού, και όσο περισσότερα από αυτά μπλοκάρονται τόσο μειώνεται και η υδατοπερατότητα που παρατηρείται στα δείγματα.



Εικόνα 9.7 Απόβλητα ασβεστόλιθου Πηγή: Sudarshan Reddy, Y., Suvarna, B., Prasad, M., Sunitha, V., & Ramakrishna Reddy, M. (2020)

9.4 Βασάλτης

Τα απόβλητα βασάλτη ως λεπτόκοκκα αδρανή στο σκυρόδεμα λειτουργούν ευεργετικά στις ιδιότητες σκυροδέματος σε σύγκριση με τα φυσικά λεπτόκοκκα αδρανή. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι η ολική αντικατάσταση των φυσικών αδρανών με απόβλητα βασάλτη φέρει θετικά αποτελέσματα στις αντοχές του σκυροδέματος.



Εικόνα 9.8 Απόβλητα βασάλτη σε λατομείο Πηγή:
<https://www.stonecontact.com/>

9.4.1 Διαπερατότητα

Σε έρευνα που έγινε χρησιμοποιώντας διάφορα ανακυκλωμένα πετρώματα σαν αντικατάστατα φυσικών αδρανών, το δείγμα με τη χαμηλότερη απορρόφηση νερού είναι το δείγμα με προσθήκη απόβλητης σκόνης βασάλτη ως λεπτόκοκκο αδρανές. Για ποσοστό αντικατάστασης 10% με απόβλητη σκόνη βασάλτη, παρατηρείται πτώση του συντελεστή διαπερατότητας κατά 32% σε σύγκριση με αυτόν του παραδοσιακού σκυροδέματος. Ωστόσο, για 100% αντικατάσταση, ο συντελεστής διαπερατότητας είναι 10 φορές χαμηλότερος από αυτόν του δείγματος ελέγχου.

9.4.2 Αντοχή σε θλίψη

Παρατηρήθηκε ότι η αντοχή σε θλίψη του δείγματος με προσθήκη 10% απόβλητης σκόνης βασάλτη ήταν 18% υψηλότερη από εκείνη του δείγματος ελέγχου, στις 7 ημέρες ωρίμανσης. Ενώ στις 28 και 90 ημέρες το ποσοστό αυτό ήταν 22% και 20%, αντίστοιχα. Για 100% αντικατάσταση φαίνεται πως η θλιπτική αντοχή είναι κατά 38% μεγαλύτερη από το φυσικό σκυροδέμα. Γενικά, δείγματα με χαμηλότερη απορρόφηση νερού άρα και πορώδης δομής, έχουν μικρότερη αντοχή σε θλίψη. Επίσης, σημαντικό ρόλο έχει και η κοκκομετρία των αδρανών.

9.4.3 Αναλογίες τριβής

Παρατηρήθηκε πτώση των λόγων τριβών στις 7, 28 και 90 ημέρες ωρίμανσης, σε σχέση με αυτών των δειγμάτων ελέγχου. Έχει παρατηρηθεί ότι η χρήση ανακυκλωμένης σκόνης βασάλτη ως λεπτόκοκκο αδρανές, έχει θετικά αποτελέσματα στην αντοχή του σκυροδέματος. Ιδιαίτερα η τριβή σκυροδέματος, δρόμων, φραγμάτων, μαζών σκυροδέματος με μεγάλες επιφάνειες δημιουργούν σημαντικά προβλήματα αντοχής (Binici, H., & Aksogan, O. (2018)). Η σκληρή δομή του ανακυκλωμένου αδρανούς βασάλτη τον κάνει πιο ανθεκτικό στην μηχανική τριβή. Το ίδιο ισχύει και για την πούδρα μαρμάρου.

Καθώς η προμήθεια πέτρινων τσιπς γίνεται δύσκολη, επειδή αυξάνει το κόστος λόγω του ότι έχουν υψηλότερη λειαντική δράση, το σκυρόδεμα που περιέχει μόνο λεπτόκοκκα αδρανή μπορεί να έχει μόνο θετική επίδραση όσον αφορά τα επίπεδα τριβής.

9.4.4 Επίδραση θειικού άλατος

Έχει παρατηρηθεί ότι η χρήση αποβλήτων βασάλτη ως λεπτόκοκκου αδρανούς στο σκυρόδεμα μπορεί να βελτιώσει την αντοχή του στη θειική δράση. Η σχετική αντοχή σε θλίψη (ο λόγος της θλιπτικής αντοχής σε θειικό προς την θλιπτική αντοχή σε καθαρό νερό) στο δείγμα με πρόσθετα απόβλητα βασάλτη μειώνεται καθώς αυξάνεται η έκθεση σε διάλυμα θειικού μαγνησίου $MgSO_4$. Λόγω της επίδρασης του θειικού άλατος, η απώλεια θλιπτικής δύναμης στο παραδοσιακό σκυρόδεμα ήταν 42% και 25% υψηλότερη από εκείνη των δειγμάτων που περιείχαν απόβλητη πούδρα μαρμάρου και απόβλητο βασάλτη, αντίστοιχα. Για αναλογίες αντικατάστασης 20%, 50% και 100% με απόβλητη πούδρα μαρμάρου και απόβλητο βασάλτη, η σχετική θλιπτική αντοχή ήταν 9%, 8% και 10% και 5%, 4% και 7%, αντίστοιχα. Το δείγμα με 100% αντικατάσταση με ανακυκλωμένο αδρανές βασάλτη παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή σε θειικό άλας σε σχέση με άλλα δείγματα από ανακυκλωμένα αδρανή πετρώματα.

9.4.5 Συνδυασμός απόβλητης πούδρας μαρμάρου και απόβλητου βασάλτη

Ο συνδυασμός απόβλητης πούδρας μαρμάρου και απόβλητου βασάλτη έχει σημαντικά οφέλη στις αντοχές του σκυροδέματος. Η χρήση αυτών των δύο ανακυκλωμένων αδρανών στο σκυρόδεμα φαίνεται πως βοηθάει στη βελτίωση της αντοχής του σκυροδέματος. Η βελτίωση αυτή μπορεί να εξηγηθεί από τη αυξημένη πρόσφυση μεταξύ των προσμίκτων, του τσιμέντου και των αδρανών, η οποία έχει ως αποτέλεσμα μια πιο συμπαγής δομή. Ο ρυθμός ενυδάτωσης των κατασκευαστικών υλικών με απόβλητη πούδρα μαρμάρου και απόβλητου βασάλτη είναι ταχύτερος από αυτόν του δείγματος ελέγχου, γεγονός που θα βελτιώσει την αντοχή του σκυροδέματος. Οι ιδιότητες του ανακυκλωμένου αδρανούς βασάλτη μπορεί να επηρεάζουν την αντιδραστικότητά του.

Γενικά, τα δείγματα με πρόσθετα απόβλητης πούδρας μαρμάρου και απόβλητου βασάλτη είχαν χαμηλότερη διαπερατότητα, υψηλότερη θλιπτική αντοχή, χαμηλότερη αναλογία τριβής, χαμηλότερη ταχύτητα διείδυσης υπερήχων και υψηλότερη θλιπτική αντοχή μετά το φαινόμενο ψύξης-απόψυξης και μεγαλύτερη αντοχή σε θειικό άλας (31). Τα παραπάνω μπορούν να δικαιολογηθούν στον καλό ποζολανικό χαρακτήρα τους και στις συμπυκνωμένες δομές τους. Επομένως, η απόδοση του σκυροδέματος με πρόσθετα απόβλητης πούδρας μαρμάρου και απόβλητου βασάλτη είναι καλύτερη από το παραδοσιακό σκυρόδεμα και τα σκυροδέματα που περιέχουν άλλα πρόσθετα ποζολάνης.

10. Σκυρόδεμα από ανακυκλωμένο αδρανές πλαστικό

10.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, οι άνθρωποι δίνουν όλο και περισσότερη προσοχή στη ρύπανση από πλαστικά. Ταυτόχρονα, υπάρχει η κατανόηση των ανθρώπων πως οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι βαθαίνουν σταδιακά. Τα πλαστικά πολυτετραφθοροαιθυλενίου είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα στις βιομηχανίες ατομικής ενέργειας, εθνικής άμυνας, αεροδιαστημικής, ηλεκτρονικής, ηλεκτρικής, χημικής, σε μηχανήματα, όργανα, αρχιτεκτονική, κλωστοϋφαντουργία, επεξεργασία επιφανειών μετάλλων, φαρμακείο, ιατρική περίθαλψη, τρόφιμα, μεταλλουργία και τήξη κ.λπ., Ως υλικά ανθεκτικά σε υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες, ανθεκτικά στη διάβρωση, υλικά μόνωσης, αντικολλητική επίστρωση κ.λπ., καθιστώντας το αναντικατάστατο προϊόν. Όπως και το πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE) χρησιμοποιήθηκε ευρέως σε αυτές τις βιομηχανίες, αναπόφευκτα θα οδηγούσε σε αύξηση των αποβλήτων PTFE. Τα απόβλητα PTFE θα παράγονται στη διαδικασία σύνθεσης, επεξεργασίας, δευτερεύουσα επεξεργασία και εφαρμογή PTFE. Το PTFE έχει εξαιρετική απόδοση, υψηλή τιμή και αξία ανακύκλωσης και η ανακύκλωσή του έχει εκτιμηθεί ιδιαίτερα. Μελετητές σε όλο τον κόσμο έχουν πραγματοποιήσει ενεργή έρευνα για το πρόβλημα αυτό, και πρότεινε διάφορες προτάσεις και μεθόδους για τη θεραπεία και τη χρήση απορριμμάτων πλαστικών. Ως πολιτικός μηχανικός, είναι πολύ καλή επιλογή, η εφαρμογή πλαστικών απορριμμάτων σε συνηθισμένο σκυρόδεμα μετά από ορισμένο βαθμό επεξεργασίας. Δεν μπορεί μόνο να λύσει τη ρύπανση του περιβάλλοντος και να επιτυγχάνεται στη βιώσιμη ανάπτυξη, αλλά βοηθά και στο να βελτιώνει την απόδοση του σκυροδέματος.

Στο παρελθόν, πολλοί μελετητές εισήγαγαν το ανακυκλωμένο αδρανές υλικό στο σκυρόδεμα για να μελετήσουν τις βασικές του ιδιότητες. Μερικοί μελετητές εισήγαγαν τις

ίνες στο σκυρόδεμα για να αυξήσουν την αντοχή σε εφελκυσμό και άλλες ιδιότητες από σκυρόδεμα. Μερικοί μελετητές εισήγαγαν κάποιο ελαφρύ αδρανή σε σκυρόδεμα για τη μελέτη και την απόδοση του ελαφρού σκυροδέματος. Ταυτόχρονα, ορισμένοι ειδικοί εισήγαγαν στερεά απόβλητα και πλαστικά σωματίδια σε σκυρόδεμα. Ο Marzouk et al. Marzouk, O. Y., Dheilly, R. M., Queneudec, M. (2007)) εισήγαγε απόβλητα πλαστικά μπουκάλια σε σκυρόδεμα, μελέτησε την πυκνότητα όγκου και τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού και μελέτησε τη σχέση μεταξύ των μηχανικών ιδιοτήτων και της μικροδομής του υλικού μέσω SEM. Το συμπιεστικό, η αντοχή και η κάμψη του σύνθετου δεν επηρεάστηκαν από την αντικατάσταση της άμμου με κλάσμα όγκου μικρότερο από 50% κατά PET με ανώτερο όριο μεγέθους σωματιδίων 5 mm.

Οι Panyakaro κ.ά. εισήγαγε την εφαρμογή θερμοσκληρυνόμενων πλαστικών ως προσμίξεων στην αναλογία μικτού βάρους για το σκυρόδεμα. Το πλαστικό όχι μόνο οδήγησε σε σκυρόδεμα χαμηλής ξηρότητας, αλλά και σε χαμηλή αντοχή.

Ο Saikia et al. μελέτησε την επίδραση του μεγέθους και του σχήματος του ανακυκλωμένου τερεφθαλικού πολυαιθυλενίου (PET) στις ιδιότητες ανάμιξης και σκλήρυνσης του σκυροδέματος. Με την προσθήκη αδρανών PET, η αντοχή σε θλίψη, η αντοχή σε διάσπαση, το ελαστικό μέτρο και η αντοχή στην κάμψη του σκυροδέματος μειώθηκε, και με την αύξηση του περιεχομένου του αδρανούς PET, η μείωση αυτών των ιδιοτήτων αυξήθηκε.

Ο de Oliveira et al. μελέτησε τις βασικές μηχανικές ιδιότητες του ενισχυμένου με ίνες κονιάματος προσθέτοντας ίνες φιαλών PET κομμένες με απλή μηχανή σε αυτό το κονίαμα. Η προσθήκη ινών PET θα μπορούσε να βελτιώσει την αντοχή στην κάμψη και την αντοχή του κονιάματος.

Ο Iucolano et al. μελέτησε την επίδραση του ανακυκλωμένου πλαστικού αδρανών στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του κονιάματος. Η αντικατάσταση ανακυκλωμένων πλαστικών αύξησε το πορώδες, μείωσε την αντοχή σε κάμψη και σε συμπίεση, και αύξησε τη διαπερατότητα των υδρατμών.

Ο Agulrajah et al. αξιολόγησε τρία είδη ανακυκλωμένων αποβλήτων:

- πλαστικά σωματίδια με γραμμικό πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας γεμάτο με ανθρακικό ασβέστιο, υψηλής πυκνότητας
- πολυαιθυλένιο και
- πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας ως πρώτες ύλες και με θρυμματισμένο τούβλο και ανακυκλωμένο ασφαλτόδρομο ως μείγματα.

Η δύναμη, η ακαμψία και το ελαστικό συντελεστή του τα μίγματα αξιολογήθηκαν.

Ο Corroia et al. χρησιμοποίησε ένα νέο πολυμερές συσσωμάτωμα με ειδικές ιδιότητες για αντικαταστήσει τη φυσική άμμο για να προετοιμάσετε ελαφρύ κονίαμα. Αυτό το

κονίαμα έχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως η μείωση κατανάλωση φυσικής άμμου, μείωση του δομικού βάρους του εαυτού και βελτίωση του πολτού αδρανών και τσιμέντου. Κατά την αύξηση της ποσότητας αντικατάστασης άμμου, παρατηρήθηκε ότι η συνοχή του κονιάματος μειώθηκαν, όπως αναμενόταν, μειώθηκαν επίσης οι μηχανικές ιδιότητες. Οι Thorneycroft et al. διαπίστωσαν ότι αυτό ήταν εφικτό να αντικατασταθεί η άμμος 10% με ανακυκλωμένο πλαστικό, το οποίο θα μπορούσε να εξοικονομήσει 820 εκατομμύρια τόνους άμμου κάθε φορά έτος. Μέσω του κατάλληλου σχεδιασμού μίγματος, θα μπορούσε να διατηρηθεί η δομική απόδοση των απορριμμάτων πλαστικού σκυροδέματος.

Μέσω προηγούμενων μελετών, θα μπορούσε να διαπιστωθεί ότι η έρευνα σε άλλα ανακυκλωμένα αδρανή για σκυρόδεμα ήταν πολύ ληξιπρόθεσμες. Ο τύπος πολυτετραφθοροαιθυλενίου (PTFE) δεν χρησιμοποιήθηκε, στην παραγωγή σκυροδέματος, συχνά στις προηγούμενες μελέτες. Λόγω της διαφορετικής επιλογής υλικών, υπήρξαν κάποιες διαφορές στα συμπεράσματα του κάθε μελετητή. Σε αυτήν την εργασία, εισήχθη απόβλητα από ανακυκλωμένο πλαστικό πολυτετραφθοροαιθυλενίου σε σκυρόδεμα. Μέσω μηχανικών δοκιμών, οι ιδιότητες εφελκυσμού θλίψης και διάσπασης των ανακυκλωμένων υλικών μελετήθηκαν για το πλαστικό σκυρόδεμα πολυτετραφθοροαιθυλενίου. Η ιδιότητα απορρόφησης νερού αυτού του είδους σκυροδέματος μελετήθηκε με τη δοκιμή αλλαγής βάρους στο νερό. Τέλος, διαπιστώθηκε ότι οι ιδιότητες του ως ανακυκλωμένο πλαστικό σκυρόδεμα βελτιώθηκε σε κάποιο βαθμό. Ως εκ τούτου, έχει μεγάλη δυνατότητα εισαγωγής ανακυκλωμένου πλαστικού πολυτετραφθοροαιθυλενίου σε σκυρόδεμα.

10.2 Υλικά και μέθοδοι

10.2.1 Υλικά

Σε αυτή τη δοκιμή, το σύνθετο τσιμέντο Portland P.C 32.5R χρησιμοποιήθηκε ως τσιμέντο, με συγκεκριμένες παραμέτρους όπως εμφανίζεται στην καρτέλα (1). Λεπτό αδρανή ήταν η άμμος του ποταμού, με συγκεκριμένες παραμέτρους όπως φαίνεται στην καρτέλα (2), χονδροειδές το αδρανές ήταν θρυμματισμένη πέτρα, με συγκεκριμένες παραμέτρους όπως φαίνεται στην καρτέλα (3). Κοσκινίζει καμπύλες του προστίμου και το χοντρό συσσωμάτωμα παρουσιάστηκε στο Σχ. 10.1. Τα πλαστικά σωματίδια ήταν πολυτετραφθοροαιθυλενίου (βλέπε Σχ.10. 2), με διάμετρο σωματιδίων 1–2 mm, με συγκεκριμένες παραμέτρους όπως φαίνεται στην καρτέλα(4). Ο παράγοντας σύζευξης Silane ήταν KH560, με συγκεκριμένες παραμέτρους όπως φαίνεται στην καρτέλα(5).

Καρτέλα 1

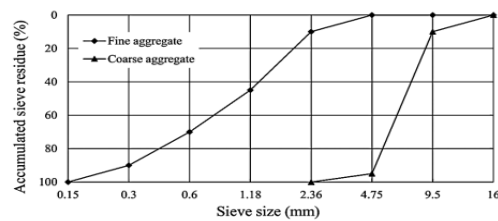
Factory standard	Strength grade	Compressive strength (MPa)	Initial setting time (h)	Final setting time (h)	Cement fineness (%)	Hydration heat	Sulfate resistance	MgO (%)	SO ₃ (%)	Stability
P.C 32.5R	32.5R	40.4	3	3.88	3	Qualified	moderate heat	high	2.85	2.57

Καρτέλα 2

Apparent density (g/cm ³)	Bulk density (g/cm ³)	Void fraction (%)	Fineness modulus	Water absorption rate (%)
2.540	1.469	42.17	2.47	1.3

Καρτέλα 3

Apparent density (g/cm ³)	Bulk density (g/cm ³)	Void fraction (%)	Particle size range (mm)	Water absorption rate (%)
2.550	1.574	38.27	5–10	0.4



Σχήμα 10.1 Καμπύλες κόσκινου του λεπτού και χονδροειδές αδρανούς

10.2.2 Μέθοδοι

Η αναλογία μίγματος ανακυκλωμένου πλαστικού σκυροδέματος ήταν νερό/τσιμέντο = 0,40. Η αναλογία άμμου ήταν 0,3. Τα πλαστικά σωματίδια προστέθηκαν στο σκυρόδεμα και η πρόσμιξη δεν αντικατέστησε κανένα συστατικό του σκυροδέματος. Η ποσότητα πρόσμιξης πήρε την άμμο ως αναφορά, αντιπροσωπεύοντας το 0, 3%, 5% και 7% της μάζας αναλογία τσιμέντου και η ποσότητα παράγοντα σύζευξης σιλάνης ήταν 0,5% της αναλογίας μάζας των πλαστικών σωματίδιων. Το μίγμα σκυροδέματος παρουσιάστηκε στην καρτέλα(6) σχ.10.2. Χρησιμοποιήθηκε οριζόντιος αναμκτήρας σκυροδέματος ΗJW-30 ανάμιξη σκυροδέματος.



Σχήμα 10.2 Πλαστικά σωματίδια πολυτετραφθοροαιθυλενίου

Καρτέλα 4

Density (g/cm ³)	Friction coefficient	Heat resistance (°C)	Corrosion resistance	Tensile strength (MPa)	Bending strength (MPa)	Modulus of elasticity in bending (MPa)	Compressive strength (MPa)	Modulus of elasticity in compression (MPa)	Elongation (%)	Tensile modulus of elasticity (MPa)	Water absorption rate	Poisson's ratio
2.1–2.3	≤0.1	240–260	strong	≥30	20.7	700	12.9	280	250–350	≥3.92	<0.01	0.4

10.3 Αποτελέσματα και συζήτηση

10.3.1 Αντοχή σε θλίψη

Τα ανακυκλωμένα πλαστικά δείγματα σκυροδέματος χωρίστηκαν σε τέσσερις ομάδες ανάλογα με την ποσότητα που είχε το κάθε μίγμα. Τα αποτελέσματα της δοκιμής αντοχής σε θλίψη παρουσιάζονται στην καρτέλα(7)

Καρτέλα 5

Appearance	Density (g/cm ³)	Molecular weight	Flash point (°C)	Boiling point (°C)	Solubility	Refractive index (ND25)
Transparent liquid	1.068~1.075	236	110	290	Soluble in water with pH = 3.4~4	1.4275~1.4300

Καρτέλα 6

Cement	Water	Fine aggregate	Coarse aggregate	Recycled plastic	Silane coupling agent
466.7	186.68	520.58	1214.68	0	0
466.7	186.68	520.58	1214.68	14	0.07
466.7	186.68	520.58	1214.68	23.34	0.12
466.7	186.68	520.58	1214.68	32.69	0.16

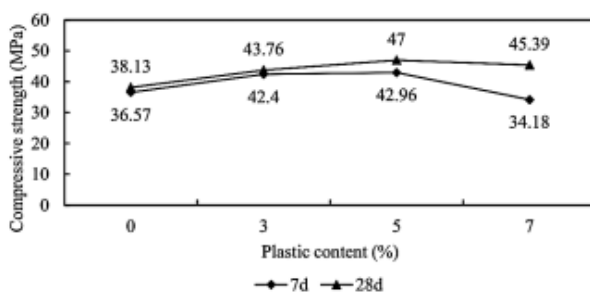
Καρτέλα 7

Plastic content (%)	Pa)		
	7 d (coupling agent)	28 d (coupling agent)	28 d (normal)
0	36.57	38.13	38.13
3	42.4	43.76	39.90
5	42.96	47.00	40.78
7	34.18	45.39	43.38

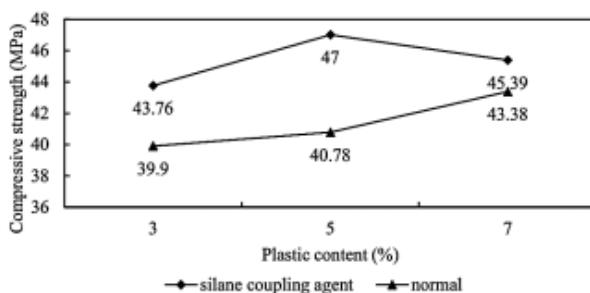
Το Σχ. 10.5.1 δείχνει τη θλιπτική αντοχή του ανακυκλωμένου πλαστικού σκυροδέματος στις 7 και 28 ημέρες. Όταν η αναλογία των σωματιδίων πλαστικού ήταν 0, 3% και 5%, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος αυξανόταν, ενώ όταν το αναλογία πλαστικών σωματιδίων ήταν 7%, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος μειώθηκε απότομα και η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος με 5% πλαστικά σωματίδια έφτασε στο αποκορύφωμα. Επιπλέον, η συμπίεστική αντοχή του σκυροδέματος με πρόσμιξη 3% και 5% για 7 και 28 ημέρες ήταν υψηλότερη από αυτήν από το συνηθισμένο σκυροδέμα. Ωστόσο, η θλιπτική αντοχή των 7 ημερών σκλήρυνση σκυροδέματος με 7% πλαστικά σωματίδια ήταν μικρότερη από εκείνη του συνηθισμένου σκυροδέματος, ενώ η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σκλήρυνσης 28 ημερών ήταν μεγαλύτερη από αυτή του συνηθισμένου σκυροδέματος. Ταυτόχρονα, θα μπορούσε να φανεί ότι η θλιπτική αντοχή του συνηθισμένου σκυροδέματος σε περίοδο ωρίμανσης 7 ημερών είναι 95% από αυτό σε 28 ημέρες, σε 7 ημέρες με 3%. Το ανακυκλωμένο πλαστικό σκυροδέμα ήταν 96% από αυτό σε 28 ημέρες, σε διάστημα 7 ημερών με 5% ανακυκλώθηκε. Το πλαστικό σκυροδέμα ήταν 91% σε 28 ημέρες και αυτό σε 7 ημέρες με 7% ανακυκλωμένο πλαστικό. Το σκυροδέμα ήταν το 75% αυτού σε 28 ημέρες.

Θα μπορούσε να φανεί ότι με την αύξηση του περιεχομένου πλαστικών, η ταχύτητα ανάπτυξης της πρώιμης δύναμης επιβραδύνθηκε. Στις προηγούμενες μελέτες, η αντοχή σε θλίψη θα μειωνόταν με την αύξηση της περιεκτικότητας σε πλαστικό. Αλλά σε αυτό το έργο, επειδή το πλαστικό δεν το έκανε, αντικαταστάθηκε το υλικό από σκυρόδεμα, συνεπώς ήταν μόνο η καθαρή χρήση πλαστικών απορριμμάτων, αφού ισοδυναμούσε με προσθήκη περισσότερων υλικών σε σκυρόδεμα, γεγονός που οδήγησε τελικά στην αύξηση της αντοχής σε σύγκριση με το συνηθισμένο σκυρόδεμα.

Το σχήμα 10.5.2 δείχνει τη θλιπτική αντοχή του ανακυκλωμένου πλαστικού σκυροδέματος με ή χωρίς παράγοντα σύζευξης σιλάνης. Από τη γενική τάση, η θλιπτική αντοχή του ανακυκλωμένου πλαστικού σκυροδέματος με παράγοντα σύζευξης σιλάνης ήταν γενικά υψηλότερη από εκείνη του σκυροδέματος χωρίς παράγοντα σύζευξης σιλάνης. Όταν το περιεχόμενο του ανακυκλωμένου πλαστικού ήταν 3%, η αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος με παράγοντα σύζευξης σιλάνης ήταν 1,09 φορές από εκείνη χωρίς σιλάνιο.



Σχήμα 10.5.1 Σύγκριση θλιπτικής αντοχής ανακυκλωμένου πλαστικού σκυροδέματος στις 7 και 28 ημέρες



Σχήμα 10.5.2 Σύγκριση θλιπτικής αντοχής ανακυκλωμένου πλαστικού σκυροδέματος με ή χωρίς σύζευξη σιλανίου

Όταν η περιεκτικότητα σε ανακυκλωμένο πλαστικό ήταν 5%, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος με παράγοντα σύζευξης σιλανίου ήταν 1,15 φορές από εκείνο χωρίς

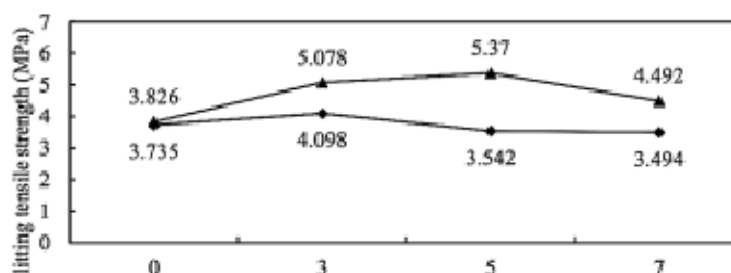
παράγοντα σύζευξης σιλανίου. Όταν το περιεχόμενο του ανακυκλωμένου πλαστικού ήταν 7%, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος με παράγοντα σύζευξης σιλάνης ήταν 1,05 φορές από αυτό χωρίς παράγοντα σύζευξης σιλανίου. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος αναμειγνύεται με παράγοντα σύζευξης σιλανίου έφτασε στη μέγιστη τιμή όταν η ποσότητα πλαστικού ήταν 5%, και η καμπύλη αντοχής σε θλίψη του σε σκυρόδεμα χωρίς παράγοντα σύζευξης σιλανίου παρουσίασε σταδιακή αυξανόμενη τάση. Φαίνεται ότι το σιλάνιο με παράγοντα σύζευξης παίζει θετικό ρόλο στη θλιπτική αντοχή του ανακυκλωμένου πλαστικού σκυροδέματος. Σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες, ο παράγοντας σύζευξης σιλάνης θα μπορούσε να βελτιώσει την επιφανειακή πρόσφυση μεταξύ των υλικών, οπότε η προσθήκη παράγοντα σύζευξης σιλάνου θα μπορούσε να βελτιώσει τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.

10.3.2 Αντοχή εφελκυσμού διάσπασης

Τα αποτελέσματα της δοκιμής αντοχής σε διάσπαση παρουσιάζονται στην καρτέλα(8). Το Σχ. 10.6 δείχνει τη σύγκριση της αντοχής σε διάσπαση του ανακυκλωμένου πλαστικού σκυροδέματος με την ηλικία ωρίμανσης 7 ημέρες και 28 ημέρες. Θα μπορούσε να φανεί από τη συνολική τάση της καμπύλης αντοχής ότι η διάσπαση εφελκυσμού και η αντοχή του ανακυκλωμένου πλαστικού σκυροδέματος στις 28 ημέρες ήταν γενικά υψηλότερη από εκείνη του συνηθισμένου σκυροδέματος, ενώ η αντοχή σε διάσπαση του σκυροδέματος στις 7 ημέρες ήταν χαμηλότερη από εκείνη του συνηθισμένου σκυροδέματος όταν το η περιεκτικότητα σε πλαστικό ήταν 5% και 7%. Θα μπορούσε να φανεί ότι με την αύξηση του περιεχομένου πλαστικών, η ανάπτυξη της αντοχής εφελκυσμού του σκυροδέματος σε πρώιμη διάσπαση δεν ήταν τέλεια. Η αντοχή εφελκυσμού διάσπασης του σκυροδέματος με ηλικία ωρίμανσης 7 ημερών έφτασε τη μέγιστη τιμή όταν η περιεκτικότητα σε ανακυκλωμένο πλαστικό ήταν 3%, και η αντοχή σε διάσπαση του σκυροδέματος με περιεκτικότητα σε ανακυκλωμένο πλαστικό 5% και 7% σταδιακά μειώθηκε. Η αντοχή σε διάσπαση του σκυροδέματος με περιεκτικότητα σε ανακυκλωμένο πλαστικό 5% έφτασε τη μέγιστη τιμή στην περίοδο σκλήρυνσης των 28 ημερών, και η αντοχή σε διάσπαση του σκυροδέματος με περιεκτικότητα σε ανακυκλωμένο πλαστικό 7% άρχισε να μειώνεται. Όταν η περιεκτικότητα σε ανακυκλωμένο πλαστικό ήταν 0, 3%, 5% και 7%, η αντοχή εφελκυσμού του σκυροδέματος μπορεί να φτάσει το 97%, 80%, 66% και 77% της αντοχής των 28 ημερών όταν η ηλικία ωρίμανσης είναι 7 ημέρες.

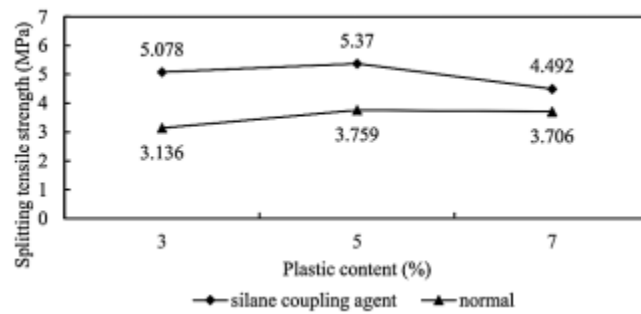
Καρτέλα 8

Plastic content (%)	7 d (coupling agent)	28 d (coupling agent)	28 d (no)
0	3.735	3.826	3.826
3	4.098	5.078	3.136
5	3.542	5.370	3.759
7	3.494	4.492	3.706



Σχήμα 10.6 Σύγκριση αντοχής σε διάσπαση του ανακυκλωμένου πλαστικού σκυροδέματος με ηλικία ωρίμανσης 7 ημερών και 28 ημέρες

Θα μπορούσε να φανεί ότι η πρώιμη αντοχή σε εφελκυσμό σκυροδέματος αναμειγνύεται με το πλαστικό μειώθηκε γενικά. Σε προηγούμενες μελέτες, οι περισσότεροι άνθρωποι διαπίστωσαν ότι με την αύξηση της περιεκτικότητας σε πλαστικά, η αντοχή σε διάσπαση μειώθηκε. Ωστόσο, σε αυτή τη μελέτη, η αντοχή σε διάσπαση του σκυροδέματος είναι ισχυρότερη από αυτό του συνηθισμένου σκυροδέματος. Υπάρχουν δύο κύριοι λόγοι: αφενός το σιλάνιο ως παράγοντας σύζευξης αυξάνει τη συνοχή πλαστικών και σκυροδέματος, αφετέρου η εφελκυστική ιδιότητα του ίδιου του πλαστικού είναι εξαιρετική. Το Σχ. 10.7 δείχνει την αντίθεση της αντοχής σε διάσπαση του ανακυκλωμένου πλαστικού σκυροδέματος με ή χωρίς σιλάνιο ως παράγοντα σύζευξης. Από τη συνολική τάση της καμπύλης αντοχής, θα μπορούσε να φανεί ότι η αντοχή σε εφελκυσμό διαχωρισμού του σκυροδέματος με παράγοντα σύζευξης σιλάνης ήταν γενικά υψηλότερη από αυτήν χωρίς παράγοντα σύζευξης σιλανίου και η αντοχή σε διάσπαση του σκυροδέματος έφτασε στην κορυφαία τιμή όταν η περιεκτικότητα σε πλαστικό ήταν 5%. Όταν η περιεκτικότητα σε ανακυκλωμένο πλαστικό ήταν 3%, η αντοχή σε διάσπαση του σκυροδέματος με παράγοντα ασύζευξης σιλάνης ήταν 1,61 φορές από αυτό του σκυροδέματος χωρίς παράγοντα σύζευξης σιλανίου. Όταν το περιεχόμενο ανακυκλωμένου πλαστικού



Σχήμα 10.7 Σύγκριση αντοχής σε διάσπαση του ανακυκλωμένου πλαστικού σκυροδέματος με ή χωρίς σιλάνιο

παράγοντα σύζευξης ήταν 5%, η αντοχή σε διάσπαση του σκυροδέματος με παράγοντα σύζευξης σιλάνης ήταν 1,42 φορές από αυτή του σκυροδέματος χωρίς παράγοντα σύζευξης σιλανίου. Όταν το περιεχόμενο του ανακυκλωμένου πλαστικού ήταν 7%, η αντοχή σε διάσπαση του σκυροδέματος με παράγοντα σύζευξης σιλάνης ήταν 1,21 φορές από αυτό του σκυροδέματος χωρίς παράγοντα σύζευξης σιλανίου. Θα μπορούσε όπως φαίνεται, ο παράγοντας σύζευξης σιλανίου να έπαιξε θετικό ρόλο στην αντοχή σε διάσπαση του ανακυκλωμένου πλαστικού με σκυροδέμα. Καθώς ο παράγοντας σύζευξης σιλάνης μπορεί να βελτιώσει τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, είναι το ίδιο με το ότι ο παράγοντας σύζευξης σιλανίου μπορεί να βελτιώσει την αντοχή σε διάσπαση του σκυροδέματος.

Η σχέση μεταξύ αντοχής σε θλίψη και αντοχής σε διάσπαση του ανακυκλωμένου πλαστικού σκυροδέματος αναλύθηκε. Θα μπορούσε να φανεί ότι η θλιπτική αντοχή του ανακυκλωμένου πλαστικού σκυροδέματος με σύζευξη σιλανίου με παράγοντα ήταν 9,79 φορές, 10,34 φορές, 12,12 φορές και 9,78 φορές της αντοχής εφελκυσμού διαχωρισμού αντίστοιχα όταν η ηλικία σκλήρυνσης ήταν 7 ημέρες, η περιεκτικότητα σε πλαστικό ήταν 0, 3%, 5% και 7%. Η θλιπτική αντοχή του ανακυκλωμένου πλαστικού σκυροδέματος με παράγοντα σύζευξης σιλάνης στις 28 ημέρες ήταν 9,96 φορές, 8,62 φορές, 8,75 φορές και 10,10 φορές της αντοχής σε διάσπαση εφελκυσμού αντίστοιχα. Όταν η περιεκτικότητα σε πλαστικά ήταν 3%, 5% και 7%. Το συμπιεστικό και η αντοχή του ανακυκλωμένου πλαστικού σκυροδέματος χωρίς παράγοντα σύζευξης σιλάνης ήταν 12,72 φορές, 10,85 φορές και 11,71 σε χρόνο διάσπασης της εφελκυστικής αντοχής στην ηλικία ωρίμανσης των 28 ημερών. Στις προηγούμενες μελέτες, η συμπιεστική αντοχή του σκυροδέματος ήταν περίπου 10 φορές της αντοχής σε διάσπαση εφελκυσμού. Σε αυτή τη μελέτη, διαπιστώθηκε ότι ο νόμος του ανακυκλωμένου πλαστικού σκυροδέματος ήταν βασικά συνεπής με προηγούμενες μελέτες.

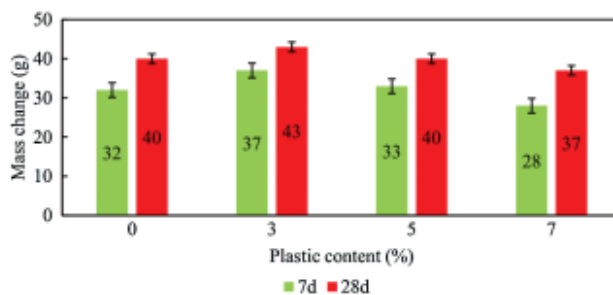
10.3.3 Αλλαγή μάζας

Τα αποτελέσματα αλλαγής μάζας εμφανίζονται στην καρτέλα(9). Το Σχ. 10,8 δείχνει τη μαζική αλλαγή του ανακυκλωμένου πλαστικού σκυροδέματος σε 7 και 28 ημέρες. Σύμφωνα με τη γενική τάση του ιστογράμματος, όταν η περιεκτικότητα σε πλαστικά σωματίδια ήταν 3%, η ποιότητα απορρόφησης νερού στο σκυρόδεμα θα αλλάξει

περισσότερο όταν φύγει από το καλούπι, δηλαδή “ όταν απορροφηθεί όλο το νερό. Με την αύξηση του περιεχομένου των πλαστικών σωματιδίων, η αλλαγή της απορρόφησης του νερού σταδιακά μειώνεται και όταν η περιεκτικότητα σε πλαστικά σωματίδια ήταν 7%, η απορρόφηση νερού ήταν μικρότερη από εκείνη του συνηθισμένου σκυροδέματος. Σύμφωνα με τη σύγκριση 7 ημερών και 28 ημερών η απορρόφηση νερού σκυροδέματος, η απορρόφηση νερού από σκυρόδεμα 7 ημερών ήταν γενικά μικρότερη από 28 ημέρες, στην οποία η απορρόφηση νερού από το σκυρόδεμα 7 ημερών με σωματίδια πλαστικού 0,3%, 5% και 7% ήταν 8 g, 6 g, 7 g και 9 g χαμηλότερο από αυτό απ’ τις 28 ημέρες αντίστοιχα. Θα μπορούσε να φανεί ότι ο κορεσμός απορρόφησης νερού από σκυρόδεμα ήταν βασικά ολοκληρωμένη στο πρώιμο στάδιο, με μικρή αλλαγή στο μεταγενέστερο στάδιο

Καρτέλα 9

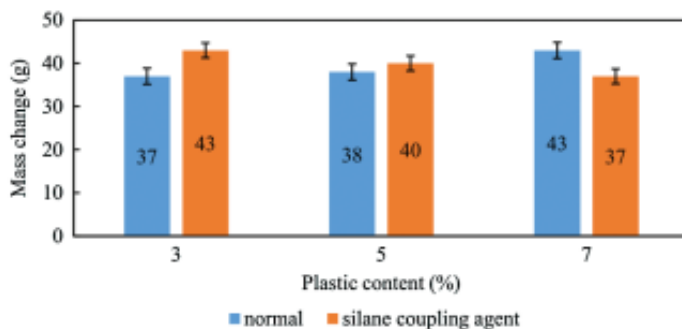
Plastic content (%)	7 d (coupling agent)	28 d (coupling agent)	28 d (normal)
0	32	40	40
3	37	43	37
5	33	40	38
7	28	37	43



Σχήμα 10.8: Σύγκριση αλλαγής μάζας 7 ημερών και 28 ημερών ανακυκλωμένου πλαστικού σκυροδέματος

Το Σχ. 10.9 δείχνει τη μεταβολή μάζας ανακυκλωμένου πλαστικού σκυροδέματος με ή χωρίς παράγοντα σύζευξης σιλάνης. Από την γενική τάση, η απορρόφηση νερού του σκυροδέματος με παράγοντα σύζευξης σιλάνης μειώθηκε με την αύξηση του σε περιεκτικότητα σε πλαστικό, ενώ εκείνο του σκυροδέματος χωρίς παράγοντα σύζευξης σιλανίου αυξήθηκε με την αύξηση του πλαστικού σε περιεχόμενο. Θα μπορούσε να φανεί ότι με την αύξηση του παράγοντα σύζευξης σιλανίου, το πορώδες του

ανακυκλωμένου πλαστικού το σκυρόδεμα μειώθηκε και η απορρόφηση του νερού έγινε κακή. Σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες, το σιλάνιο με παράγοντας σύζευξης θα μπορούσε να βελτιώσει την επιφανειακή πρόσφυση μεταξύ των υλικών. Με την αύξηση του σιλανίου με παράγοντας σύζευξης, η συμπαγής σκυρόδεμα γίνεται καλύτερη και η μάζα αλλάζει λιγότερο



Σχήμα 10.9 Σύγκριση μεταβολής μάζας ανακυκλωμένου πλαστικού σκυροδέματος με ή χωρίς συνδετικό παράγοντα σιλανίου

11. Συμπεράσματα

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της χρήσης ανακυκλωμένων αδρανών στο σκυρόδεμα ανά κατηγορία. Συγκεκριμένα, παρατίθενται τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα αλλά και οι τρόποι αντιμετώπισης των προβλημάτων που προκύπτουν στο νέο σκυρόδεμα.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ					
	ΑΔΡΑΝ Η ΥΛΙΚΑ	ΕΙΔΟΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤ ΟΣ	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜ ΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗ ΜΑΤΑ	ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ
1	Σκυρόδεμα	Portland	Μειώνει τις επιπτώσεις στο περιβάλλον στο 70% περίπου σε σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα.	Η παρουσία παλαιού κονιάματος στις επιφάνειες των σωματιδίων του ΑΑΣ επηρεάζει την ποιότητα του νέου σκυροδέματος.	Συστήνεται η ελαχιστοποίηση της ποσότητας του προσκολλημένου παλιού κονιάματος στις επιφάνειες των σωματιδίων του χονδρόκοκκου ή/και λεπτόκοκκου ΑΑΣ. Επιπλέον, η προσέγγιση μίξης δύο σταδίων θα επιφέρει επιθυμητά αποτελέσματα.
			Διατηρεί την κατανάλωση φυσικών αδρανών μειώνοντας την ανάγκη ανοίγματος νέων περιοχών εξόρυξης και κατανάλωσης ενέργειας ή καυσίμου που σχετίζεται με τις μεταφορές. Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται οι εκπομπές οργανικών υλικών και η απελευθέρωση σκόνης στην ατμόσφαιρα.		
				Χαμηλές αντοχές σε εφελκυσμό και κάμψη	Χρήση 20% ΑΑΣ (80% φυσικό σκυρόδεμα) και με χρήση ποσοστού 1% και 1,5% ινών βασάλτη.

		Ιπτάμενη τέφρα	Προσθέτοντας 20% ιπτάμενη τέφρα αντί τσιμέντου Portland, η 28 ημερών αντοχή σε θλίψη από σκυρόδεμα κατασκευασμένο με χονδρόκοκκο ΑΑΣ σε ποσοστά 50% και 100%, ενισχύθηκε κατά περισσότερο από 10% και 5%, αντίστοιχα		
		Σκωρία υψικαμίνου	Η χρήση σκωρίας υψικαμίνου σε συνδυασμό με ενεργοποιητές μπορεί να παράγει σκυρόδεμα υψηλής ποιότητας.		
2	Κεραμικά	Portland	Μείωση της κατανάλωση ενέργειας και της εκπομπής αερίων στην ατμόσφαιρα, που συμβαίνουν συνήθως κατά την παραγωγή τους.	Μειωμένη εργασιμότητα	Αλλαγή της φαινομενικής αναλογίας νερού/τσιμέντου.
				Χαμηλές αντοχές εφελκυσμού και θλίψης	Τα λεπτόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή είδη υγιεινής είναι ιδανικό να χρησιμοποιούνται

			Δεν επηρεάζει σημαντικά τη θλιπτική αντοχή και την αντοχή σε εφελκυσμό σε σχέση με το παραδοσιακό σκυρόδεμα.		μαζί με υπερπλαστικοποιητές.
3	Γυαλί	Portland	Έχει μεγάλη περιβαλλοντική σημασία καθώς οι παλιοί λαμπτήρες αποτελούν βιομηχανικά απόβλητα που δεν είναι αρκετά εφικτό να αποβληθούν, ενώ επίσης ορισμένες πρώτες ύλες είναι ιδιαίτερα τοξικές επιβαρύνοντας την υγεία του ανθρώπου.	Η αλκαλοπυριτική ή αντίδραση (ASR) είναι ένας ανασταλτικός παράγοντας.	Λειτουργία γυαλιού ως ποζολανικό υλικό, κάτι το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με τη μείωση του μεγέθους του θρυμματισμένου γυαλιού.
			Αν το γυαλί διαχωριστεί από τα χαλύβδινα στοιχεία που εμπεριέχονται στον λαμπτήρα, θα είναι πιο οικονομικό για τις κατασκευαστικές εταιρίες.	Σε υψηλές θερμοκρασίες (700-800 °C), η θλιπτική αντοχή μειώνεται.	Όταν ο ρυθμός αντικατάστασης είναι 10% και η θερμοκρασία σκλήρυνσης ανέρχεται στους 150°C, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος με θρυμματισμένο γυαλί, είναι υψηλότερη από εκείνη του δείγματος ελέγχου.

			<p>Λόγω της χρησιμοποίησης του ανακυκλωμένου γυαλιού ως αδρανές στο σκυρόδεμα, θα μειωθεί η ανάγκη εξόρυξης παραδοσιακών αδρανών.</p>		
			<p>Οι μηχανικές ιδιότητες δειγμάτων με γυαλί έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες αρκεί το ποσοστό αντικατάστασης γυαλιού να μη ξεπερνάει το 10%. Η θλιπτική δύναμη αυξάνεται με ποσοστό αντικατάστασης 30% καθώς επίσης παρατηρείται αυξημένη αντοχή κάμψης λόγω του γωνιώδους σχήματος των αδρανών γυαλιού.</p>		

		Πολυμερές σκυρόδεμα	Χρησιμοποιώντ ας πολυμερές σκυρόδεμα, το πρόβλημα της αντίδρασης πυριτικού αλκαλίου δεν υφίσταται. Ακόμα με ποσοστό αντικατάστασης 50%, οι αντοχές εφελκυσμού και θλίψης είναι βελτιωμένες.		
4	Πετρώμ ατα	Portland	Η χρήση αποβλήτων λατομείων για την αντικατάσταση της άμμου στο σκυρόδεμα θα λύσει τα περιβαλλοντικά προβλήματα που προκαλούνται από την εξάντληση των φυσικών πόρων των ποταμών και την εξόρυξη άμμου.	Μειωμένη θλιπτική δύναμη παρατηρείται με τη χρήση μη γυαλισμένου γρανίτη.	Μπορεί να αντιμετωπιστεί όταν το ποσοστό αντικατάστασης δε ξεπερνά το 5%.
			Βελτίωση της εργασιμότητας του σκυροδέματος με την προσθήκη γυαλισμένων αποβλήτων γρανίτη.		

			<p>Η αντικατάσταση φυσικών αδρανών με απόβλητα μαρμάρου έως και 75%, αποφέρει θετικά αποτελέσματα για το νέο σκυρόδεμα.</p>		
			<p>Οι τιμές που λαμβάνονται για την πυκνότητα του μίγματος που περιέχει ανακυκλωμένα αδρανή χαλίκια και άμμο μαρμάρου σε ποσοστό αντικατάστασης των φυσικών αδρανών χαλικιού και άμμου 50%, είναι ισοδύναμες με εκείνες των τελευταίων.</p>		

			<p>Τα δείγματα με προσθήκη ανακυκλωμένης αδρανούς άμμου μαρμάρου με αναλογία αντικατάστασης έως και 75%, δείχνουν αύξηση των αντοχών θλίψης και εφελκυσμού σε σχέση με τα φυσικά αδρανή. Ο συνδυασμός μάρμαρου και ασβεστολίθου έχει εξίσου θετικά αποτελέσματα.</p>		
			<p>Η ολική αντικατάσταση των φυσικών αδρανών με απόβλητα βασάλτη φέρει θετικά αποτελέσματα στις αντοχές του σκυροδέματος καθώς και ο συνδυασμός αυτών με απόβλητη πούδρα μαρμάρου</p>		
5	ΑΣΦΑΛΤΙ ΚΑ ΥΛΙΚΑ	PORTLAND	<p>Εξαιρετικά σύντομη διάρκεια λόγω ολοκλήρωσης εργασιών σε μία μόνο διέλευση</p>	Έλλειψη μηχανημάτων για τα απαραίτητα μηχανήματα	
			<p>Μεγάλη μείωση κόστους λόγω</p>	Έλλειψη χρημάτων για	

			έλλειψης μεταφοράς υλικών	τις κατάλληλες διεργασίες	
			Χρήση σύγχρονων μηχανημάτων με αποτέλεσμα την καλύτερη ποιότητα κατασκευής		
			Μειωμένη ρύπανση και κατανάλωση ενέργειας		
			Αυξημένη οδική ασφάλεια λόγω μικρής διάρκειας εργασιών		
6	ΓΥΨΟΣ	Portland τέφρα και	Μελέτες έχουν δείξει ότι η αντοχή σε θλίψη των μειγμάτων που περιέχουν σκόνη γύψου είναι χαμηλή, ιδιαίτερα σε πολύ νεαρή ηλικία. Ωστόσο, η αντικατάσταση του τσιμέντου με συνδυασμό ιπτάμενης τέφρας και γύψου είναι πιο αποτελεσματική από την αντικατάσταση του τσιμέντου μόνο με γύψο	Όταν το σκυρόδεμα αναμιγνύεται με γύψο και σκόνη λατομείου, η αντοχή σε θλίψη του μείγματος στο ελεγχόμενο υλικό χαμηλής αντοχής μειώνεται και η ζήτηση νερού αυξάνεται και η μέγιστη αντοχή σε θλίψη εμφανίζεται στις 28 ημέρες.	
				Η σκοπιμότητα επαναχρησιμοποίησης γύψου από απόβλητα	

				<p>κατασκευών και κατεδαφίσεων ως αδρανούς υποκατάστατο υ της τσιμεντοκονίας Portland. Το συμπέρασμα είναι ότι μετά από 28 ημέρες χρησιμοποιούνται ως μερικό πλήρες υποκατάστατο απόβλητα γύψου με μηχανική αντοχή έως και 30%.</p>	
				<p>Ο γύψος είναι ένας ενεργοποιητής θειικού ασβεστίου, αλλά λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς του σε θειικό άλας. Πιστεύεται ότι η παρουσία μεγάλων ποσοτήτων θειικού άλατος στο σκυρόδεμα μπορεί να προκαλέσει υπερβολική διαστολή και ρωγμές</p>	<p>Μείωση ποσότητας γύψου στο σκυρόδεμα</p>
		Portland	το απορριπτόμενο σκυρόδεμα	<p>συρρίκνωση και η</p>	

			γίνεται ακόμη πιο δυνατό από ότι ήταν πριν, όταν προστίθενται απορρίμματα ξύλου.	διόγκωση του ξύλου	
		Portland και λιγνίνη	μεταβλητές όπως η αναλογία σκυροδέματος / λιγνίνης, η περιεκτικότητα σε νερό, η θερμοκρασία, συν το ποσό και η διάρκεια της πίεσης, η λιγνίνη σχηματίστηκε σε μια πολύ αποτελεσματική κόλλα, συνδέοντας τα κομμάτια σκυροδέματος σε σκόνη μεταξύ τους		
7	ΞΥΛΟ	Portland	το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα με αδρανή ξύλο βρέθηκε να έχει μεγαλύτερη αντοχή κάμψης από το αρχικό σκυρόδεμα από το οποίο κατασκευάστηκε .	Το ξύλο απορροφά τους συμπυκνώσιμους ατμούς γύρω του και χάνει υγρασία στον αέρα κάτω από το σημείο κορεσμού της ίνας.	η θεραπεία με εμφάπτιση 30 δευτερολέπτων σε διάλυμα πυριτικού νατρίου 3% βελτίωσε τη δύναμη της τσιμεντοειδούς σανίδας που κατασκευάστηκε με πολλά σκληρά ξύλα.
			Δημιουργείται μια πιο πράσινη, πιο οικονομική	Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η υποβάθμισή	Τις τελευταίες δύο δεκαετίες χρησιμοποιείται η ανθράκωση για να

			οικοδομική βιομηχανία που όχι μόνο μειώνει τα αποθέματα σκυροδέματος και ξύλου, αλλά βοηθά επίσης στην αντιμετώπιση του ζητήματος της κλιματικής αλλαγής.	του. Οι παράγοντες που προκαλούν την υποβάθμιση και την καταστροφή του ξύλου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: βιολογικά και μη βιολογικά. Οι βιολογικοί παράγοντες περιλαμβάνουν τη σήψη και μούχλα, βακτήρια και έντομα. Οι μη βιολογικοί παράγοντες περιλαμβάνουν το ηλιακό φως, τον άνεμο, το νερό, ορισμένα χημικά και φωτιά.	αυξηθεί εντυπωσιακά η ταχύτητα παραγωγής σύνθετων υλικών από ξύλο-τσιμέντο
			η προσθήκη απορριμμάτων ξύλου στο τσιμέντο και το κονίαμα τους έκανε τόσο ισχυρότερα όσο και πιο στεγανά.		Χρήση ποικιλία ανθρακικών σε συνδυασμό με θερμαινόμενα πιάτα για δημιουργία σανιδών από ξύλο-τσιμέντο που αναπτύσσουν σημαντική αντοχή σε μόλις πέντε λεπτά.
		Τέφρα ξύλου	Οι ποζολανικές συνεισφορές	Η χημική ασυμβατότητα	Η συμβατότητα με το τσιμέντο

			της τέφρας ξύλου ήταν σημαντικές	μεταξύ ξύλου και τσιμέντου	μειώνεται σημαντικά με εκτεταμένη επεξεργασία με ζεστό νερό.
			Αναμειγνύοντας την τέφρα ξύλου με την ιπτάμενη τέφρα κατηγορίας Γ, η απόδοση του σκυροδέματος βελτιώθηκε σημαντικά	Άλλα εκχυλιστικά, όπως τερπένια και ρητίνες μπορεί να "μεταναστεύσουν" στην επιφάνεια των σωματιδίων του ξύλου κατά την ξήρανση και να δημιουργήσουν ένα στρώμα στην επιφάνεια που εμποδίζει τη σύνδεση μεταξύ του ξύλου και του τσιμέντου	το μούλιασμα και το ξέπλυμα σε κρύο νερό λειτουργεί. Τροποποιώντας το τσιμέντο για να μειώσει την αλκαλικότητά του (με την προσθήκη καπνού πυριτίου) μειώνει δραματικά το επιβλαβές αποτέλεσμα
			Το σκυρόδεμα που κατασκευάστηκε από την ανάμειξη ιπτάμενης τέφρας ξύλου και τα μείγματά της πέτυχαν αντοχή σε θλίψη έως 50 MPa		Η διαδικασία για τη θεραπεία των σωματιδίων ξύλου εκτελείται πρώτα με διάλυμα θειικού αργιλίου και μετά με διάλυμα πηλού καολίνη
8	ΠΛΑΣΤΙΚΟ	Portland	Με την προσθήκη αδρανών PET, η αντοχή σε	Εισαγωγή εφαρμογής θερμοσκληρυνόμενων	Χρήση αδρανών πλαστικών καταλλήλων για

			θλίψη, η αντοχή σε διάσπαση, το ελαστικό μέτρο και η αντοχή στην κάμψη του σκυροδέματος μειώθηκε, και με την αύξηση του περιεχομένου του αδρανούς PET, η μείωση αυτών των ιδιοτήτων αυξήθηκε.	πλαστικών ως προσμίξεων στην αναλογία μικτού βάρους για το σκυρόδεμα. Το πλαστικό αυτό όχι μόνο οδήγησε σε σκυρόδεμα χαμηλής ξηρότητας, αλλά και σε χαμηλή αντοχή.	πρόσμιξη με το σκυρόδεμα
			Η προσθήκη ινών PET βελτιώσει την αντοχή στην κάμψη και την αντοχή του κονιάματος.		
			Η αντικατάσταση ανακυκλωμένων πλαστικών αύξησε το πορώδες και τη διαπερατότητα των υδρατμών.	μείωση της αντοχής σε κάμψη και σε συμπίεση.	

Πίνακας 11.1 Συμπεράσματα σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή ανά κατηγορία

Βιβλιογραφία

1. Αναστασίου, Γ., & Μπέλλος, Μ. (2013). Πρόταση για σχεδιασμό εργοστασίου ανακύκλωσης δομικών υλικών στην περιοχή της Αττικής. Διερεύνηση του απαιτούμενου μηχανολογικού εξοπλισμού. Προτάσεις-Συμπεράσματα.
2. Γαϊτανέλης, Δ. (2015). Διερεύνηση και αξιολόγηση μεθόδων επαναχρησιμοποίησης γυαλιού από ανακύκλωση ηλεκτρικών λαμπτήρων (No. GRI-2015-15390). Aristotle University of Thessaloniki.
3. Γαρδέλης, Γ. (2011). Διαχείριση οικοδομικών αποβλήτων, περίπτωση Ν. Αττικής (Master's thesis).
4. Ευρωπαϊκή κοινότητα 2000, κοινοτική απόφαση 2000/532/ΕΚ, τροποποιήθηκε περαιτέρω με τις αποφάσεις 2001/118/ΕΚ και 2001/119/ΕΚ της Επιτροπής και την απόφαση 2001/573/ΕΚ του Συμβουλίου.
5. Εφραιμίδης Χ., (2008), «Παραγωγή αδρανών υλικών από ανακύκλωση παλαιών σκυροδεμάτων», 1 ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, Αθήνα.
6. Ιορδανίδης, Μ. (2016). Ανακατασκευή οδοστρωμάτων με την μέθοδο της θερμής ανακύκλωσης.
7. Κακλόπουλος, Σ. (2015). Ανακύκλωση και διαχείριση αδρανών υλικών. Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Χανιά
8. Καμελίδης, Α. Φ. (2020). Ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση αποβλήτων εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων (No. GRI-2020-27429). Aristotle University of Thessaloniki.
9. Κυριακόπουλος, Δ., & Παυλόπουλος, Ν. (2016). Διερεύνηση αντοχών σκυροδέματος παρασκευασμένο από 100% ανακυκλωμένα αδρανή υλικά.
10. Μπελιτσάκος, Γ. (2018). Διαχείριση προϊόντων εκσκαφής και καθαιρέσεων σε εταιρίες διαχείρισης και επαναχρησιμοποίησή τους.
11. Νικολαΐδης Αθ. Φ., 2011. “Οδοποιία: Οδοστρώματα – Υλικά, Έλεγχος Ποιότητας”, 3η Έκδοση
12. Πότση, Σ. (2019). Διερεύνηση της χρήσης ανακυκλωμένων υλικών σε εύκαμπτα οδοστρώματα μέσω της Αξιολόγησης του Κύκλου Ζωής (No. GRI-2019-24748). Aristotle University of Thessaloniki.
13. Χριστοδουλίδου, Α. (2015). Εφαρμογές και προτάσεις χρήσης ανακυκλώσιμων υλικών-αποβλήτων ως δομικά στοιχεία σε κατασκευές.
14. 241. DOI 10.1016/j.jclepro.2019.118155
15. Abdulmatin, A., Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C. (2019). Environmentally friendly interlocking concrete paving block containing new cementing material and recycled concrete aggregate. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 23(12), 1467–1484. DOI 10.1080/19648189.2017.1355265.

16. Abdulmatin, A., Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C. (2019). Environmentally friendly interlocking concrete paving block containing new cementing material and recycled concrete aggregate. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 23(12), 1467–1484. DOI 10.1080/19648189.2017.1355265.
17. Abou-Zeid, M., Fowler, D. W., Nawy, E. G., Allen, J. H., Halvorsen, G. T., Poston, R. W., ... & Frosch, R. J. (2001). Control of cracking in concrete structures. Report, ACI Committee, 224, 12-16.
18. Adaway, M., & Wang, Y. J. E. J. O. S. E. (2015). Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete—Effects on compressive strength. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 14(1), 116-122.
19. Afroughsabet, V., Biolzi, L., & Ozbakkaloglu, T. (2017). Influence of double hooked-end steel fibers and slag on mechanical and durability properties of high performance recycled aggregate concrete. *Composite Structures*, 181, 273-284.
20. Alves, A. V., Vieira, T. F., De Brito, J., & Correia, J. R. (2014). Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates. *Construction and Building Materials*, 64, 103-113.
21. Amorim Junior, N. S., Silva, G. A. O., Dias, C. M. R., Ribeiro, D. V. (2019). Concrete containing recycled aggregates: estimated lifetime using chloride migration test. *Construction and Building Materials*, 222, 108– 118. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.136.
22. Amorim Junior, N. S., Silva, G. A. O., Dias, C. M. R., Ribeiro, D. V. (2019). Concrete containing recycled aggregates: estimated lifetime using chloride migration test. *Construction and Building Materials*, 222, 108– 118. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.136.
23. Antunes, M. L., A. Botignon de Sa, P. S. Oliveira, and E. C. Rangel. 2019. "Utilization of 635 gypsum from construction and demolition waste in Portland cement mortar." *Ceramica*, 65 (1): 1-6. <https://doi.org/10.1590/0366-6913201965s12588>.
24. Aprianti, E. S. 2017. "A huge number of artificial waste material can be supplementary 638 cementitious material (SCM) for concrete production - a review part II." *Journal of 639 Cleaner Production*, 142: 4178-4194. <http://dx.doi.10.1016/j.jclepro.2015.12.115>.
25. Arulrajah, A., Yaghoubi, E., Wong, Y. C., Horpibulsuk, S. (2017). Recycled plastic granules and demolition wastes as construction materials: resilient moduli and strength characteristics. *Construction and Building Materials*, 147, 639–647. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.178.
26. ASTM. ~1999b!. "Standard specification for nonloadbearing concrete masonry units." C129-99, West Conshohocken, Pa.
27. Bacarji, E., Toledo Filho, R. D., Koenders, E. A. B., Figueiredo, E. P., & Lopes, J. L. M. P. (2013). Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. *Construction and Building materials*, 45, 1-10.
28. Bajpai, Rishhabh, Kailash Choudhary, Anshuman Srivastava, Kuldip Sangwan, and Manpreet Singh. 2020. "Environmental impact assessment of fly ash and

- silica fume based geopolymer concrete." *Journal of Cleaner Production*, 254: 120147. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120147>.
29. Beltrán, M. G., Barbudo, A., Agrela, F., Galvín, A. P., & Jiménez, J. R. (2014). Effect of cement addition on the properties of recycled concretes to reach control concretes strengths. *Journal of Cleaner Production*, 79, 124-133.
 30. Bergstrom, S. G., and Gram, H.-E. ~1984!. "Durability of alkali-sensitive fibers in concrete." *Int. J. Cem. Comp. and Lightweight Conc.*, 6~2!, 75–80
 31. Binici, H., & Aksogan, O. (2018). Durability of concrete made with natural granular granite, silica sand and powders of waste marble and basalt as fine aggregate. *Journal of Building Engineering*, 19, 109–121.
 32. Binici, H., Kaplan, H., & Yilmaz, S. (2007). Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete. *Scientific Research and Essays*, 2(9), 372-379.
 33. Braga, A. M., Silvestre, J. D., de Brito, J. (2017). Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 162, 529–543. DOI 10.1016/j.jclepro.2017.06.057
 34. Braga, A. M., Silvestre, J. D., de Brito, J. (2017). Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 162, 529–543. DOI 10.1016/j.jclepro.2017.06.057.
 35. Brand, A. S., Amirkhanian, A. N., & Roesler, J. R. (2014). Flexural capacity of full-depth and two-lift concrete slabs with recycled aggregates. *Transportation Research Record*, 2456(1), 64-72.
 36. Chen, J., Su, Y. W., Lei, T., Gu, S. (2011). Study on strength estimating of recycled concrete based on rebound method and ultrasonic-rebound combined method. *Advanced Materials Research*, 243–249, 5470–5474.
 37. Chen, J., Su, Y. W., Lei, T., Gu, S. (2011). Study on strength estimating of recycled concrete based on rebound method and ultrasonic-rebound combined method. *Advanced Materials Research*, 243–249, 5470–5474.
 38. Colangelo, F., Cioffi, R., Liguori, B., Iucolano, F. (2016). Recycled polyolefins waste as aggregates for lightweight concrete. *Composites Part B: Engineering*, 106, 234–241. DOI 10.1016/j.compositesb.2016.09.041.
 39. Coppola, B., Courard, L., Michel, F., Incarnato, L., Di Maio, L. (2016). Investigation on the use of foamed plastic waste as natural aggregates replacement in lightweight mortar. *Composites Part B: Engineering*, 99, 75–83. DOI 10.1016/j.compositesb.2016.05.058.
 40. de Oliveira, L. A. P., Castro-Gomes, J. P. (2011). Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1712–1717. DOI 10.1016/j. conbuildmat.2010.11.044.
 41. Dhanumalayan, E., Joshi, G. M. (2018). Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE)—a review. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 1(2), 247–268. DOI 10.1007/s42114-018- 0023-8.

42. Dhanumalayan, E., Joshi, G. M. (2018). Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE)—a review. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 1(2), 247–268. DOI 10.1007/s42114-018- 0023-8.
43. Ding, Y., Dai, J. G., Shi, C. J. (2016). Mechanical properties of alkali-activated concrete: a state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 127, 68–79. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.121.
44. Du, H., & Tan, K. H. (2014). Concrete with recycled glass as fine aggregates. *ACI Materials Journal*, 111(1), 47-58.
45. EAPA and NAPA, 2011. “The Asphalt Paving Industry: A Global Perspective”, 2nd ed. European Asphalt Pavement Association, National Asphalt Pavement Association, Rue de Commerce 77, Brussels–Belgium, 5100 Forbes Boulevard, Lanham, Maryland, U.S.A
46. Evangelista, L., Guedes, M., De Brito, J., Ferro, A. C., & Pereira, M. F. (2015). Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste. *Construction and building materials*, 86, 178-188.
47. Fan, C. C., Huang, R., Hwang, H., & Chao, S. J. (2015). The effects of different fine recycled concrete aggregates on the properties of mortar. *Materials*, 8(5), 2658-2672.
48. Faraj, R. H., Ali, H. F. H., Sherwani, A. F. H., Hassan, B. R., Karim, H. (2020). Use of recycled plastic in selfcompacting concrete: a comprehensive review on fresh and mechanical properties. *Journal of Building Engineering*, 30, 101283. DOI 10.1016/j.job.2020.101283.
49. Faraj, R. H., Sherwani, A. F. H., Daraei, A. (2019). Mechanical, fracture and durability properties of selfcompacting high strength concrete containing recycled polypropylene plastic particles. *Journal of Building Engineering*, 25, 12. DOI 10.1016/j.job.2019.100808.
50. Foti, D. (2011). Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1906–1915. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.066.
51. Fuks, S. L., Khitrin, S. V., Vologzhanina, Y. V., Pinaeva, L. N., Mikhailitsyna, Y. S. et al. (2015). Closed cycle of production of ultrafine polytetrafluoroethylene and new areas of use of fluoropolymer manufacture waste. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 88(11), 1800–1807. DOI 10.1134/S10704272150110105.
52. Gao, D., Zhang, L., & Nokken, M. (2017). Mechanical behavior of recycled coarse aggregate concrete reinforced with steel fibers under direct shear. *Cement and Concrete Composites*, 79, 1-8.
53. Ghomi, S., El-Salakawy, E. F. (2019). Seismic behavior of GFRP-reinforced concrete interior beam-column-slab subassemblies. *Journal of Composites for Construction*, 23(6). DOI 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000980.
54. Gu, L., Ozbakkaloglu, T. (2016). Use of recycled plastics in concrete: a critical review. *Waste Management*, 51, 19–42. DOI 10.1016/j.wasman.2016.03.005.

55. Hachmi, M., and Campbell, A. G. ~1989!. "Wood-cement chemical relationships." Proc., Fiber and Particle Boards Bonded With Inorganic Binders, Forest Products Research Society, Madison, Wis., 43–47.
56. Hansen, S., & Sadeghian, P. (2020). Recycled gypsum powder from waste drywalls combined with fly ash for partial cement replacement in concrete. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122785.
57. Hebhouh, H., Aoun, H., Belachia, M., Houari, H., & Ghorbel, E. (2011). Use of waste marble aggregates in concrete. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1167-1171.
58. Hironaka, S. (2004). Characteristics and applications of PTFE composites. *Journal of Japanese Society of Tribologists*, 49(7), 573–577.
59. Hironaka, S. (2004). Characteristics and applications of PTFE composites. *Journal of Japanese Society of Tribologists*, 49(7), 573–577. 4. Fuks, S. L., Khitrin, S. V., Vologzhanina, Y. V., Pinaeva, L. N., Mikhalitsyna, Y. S. et al. (2015). Closed cycle of production of ultrafine polytetrafluoroethylene and new areas of use of fluoropolymer manufacture waste. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 88(11), 1800–1807. DOI 10.1134/S10704272150110105.
60. Hossain, M. U., Poon, C. S., Lo, I. M., & Cheng, J. C. (2016). Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA. *Resources, Conservation and Recycling*, 109, 67-77.
61. Hruringza, J., Topic, J., Hlubocky, L., Plachy, T. (2016). Development of mechanical properties of cement based composites with recycled concrete aggregate. *Applied Mechanics and Materials*, 825, 11–14. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.825.11.
62. Hruringza, J., Topic, J., Hlubocky, L., Plachy, T. (2016). Development of mechanical properties of cement based composites with recycled concrete aggregate. *Applied Mechanics and Materials*, 825, 11–14. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.825.11.
63. Idir, R., Cyr, M., & Tagnit-Hamou, A. (2010). Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1309-1312.
64. Iucolano, F., Liguori, B., Caputo, D., Colangelo, F., Cioffi, R. (2013). Recycled plastic aggregate in mortars composition: effect on physical and mechanical properties. *Materials & Design (1980–2015)*, 52, 916–922. DOI 10.1016/j.matdes.2013.06.025. *JRM*, 2020, vol.8, no.7 737
65. James, M. N., Choi, W., Abu-Lebdeh, T. (2011). Use of recycled aggregate and fly ash in concrete pavement. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4(2), 201–208. DOI 10.3844/ajeassp.2011.201.208.
66. James, M. N., Choi, W., Abu-Lebdeh, T. (2011). Use of recycled aggregate and fly ash in concrete pavement. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4(2), 201–208. DOI 10.3844/ajeassp.2011.201.208.
67. Katkhuda, H., & Shatarat, N. (2017). Improving the mechanical properties of recycled concrete aggregate using chopped basalt fibers and acid treatment. *Construction and Building Materials*, 140, 328-335.

68. Kisku, N., Joshi, H., Ansari, M., Panda, S. K., Nayak, S., & Dutta, S. C. (2017). A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. *Construction and building materials*, 131, 721-740.
69. Kubissa, W., Jaskulski, R., Reiterman, P. (2017). Ecological concrete based on blast-furnace cement with incorporated coarse recycled concrete aggregate and fly ash addition. *Journal of Renewable Materials*, 5(1), 53–61. DOI 10.7569/JRM.2017.634103.
70. Kurad, R., Silvestre, J. D., de Brito, J., & Ahmed, H. (2017). Effect of incorporation of high volume of recycled concrete aggregates and fly ash on the strength and global warming potential of concrete. *Journal of Cleaner Production*, 166, 485-502.
71. Kurda, R., de Brito, J., & Silvestre, J. D. (2017). Influence of recycled aggregates and high contents of fly ash on concrete fresh properties. *Cement and Concrete Composites*, 84, 198-213.
72. Kurpinska, M., Grzyl, B., Kristowski, A. (2019). Cost analysis of prefabricated elements of the ordinary and lightweight concrete walls in residential construction. *Materials (Basel, Switzerland)*, 12(21), 3629. DOI 10.3390/ma12213629.
73. Lee, A. W. C., and Short, P. H. ~1989!. "Pretreating hardwood for cement-bonded excelsior board." *Forest Products. J.*, 39~10!, 68–70. Means Assemblies Cost Data 1998. ~1997!. R. S. Means Company, Kingston, Mass.
74. Li, B., Ling, T. C., Yu, J. G., Wu, J., Chen, W. (2019). Cement pastes modified with recycled glass and supplementary cementitious materials: properties at the ambient and high temperatures. *Journal of Cleaner Production*,
75. Li, B., Ling, T. C., Yu, J. G., Wu, J., Chen, W. (2019). Cement pastes modified with recycled glass and supplementary cementitious materials: properties at the ambient and high temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 241. DOI 10.1016/j.jclepro.2019.118155. 736 JRM, 2020, vol.8, no.7
76. Li, W., Huang, Z., Wang, X. C., Wang, J. W. (2014). Proportion of tensile strength and compressive strength of the crumb rubber concrete modified by silane coupling agent. *Advanced Materials Research*, 953–954, 1520–1523. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.953-954.1520.
77. Liang, Y. C., Ye, Z. M., Vernerey, F., & Xi, Y. (2015). Development of processing methods to improve strength of concrete with 100% recycled coarse aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(5), 04014163.
78. Liu, X., Wu, T., Liu, Y. (2019). Stress-strain relationship for plain and fibre-reinforced lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 225, 256–272. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.135.
79. Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and concrete research*, 41(12), 1244-1256.
80. Marinković, S. B., Malešev, M., & Ignjatović, I. (2014). Life cycle assessment (LCA) of concrete made using recycled concrete or natural aggregates. In *Eco-Efficient construction and building materials* (pp. 239-266). Woodhead Publishing.

81. Martins, P., Brito, J. D., Rosa, A., & Pedro, D. (2014). Mechanical performance of concrete with incorporation of coarse waste from the marble industry. *Materials Research*, 17, 1093-1101.
82. Marzouk, O. Y., Dheilly, R. M., Queneudec, M. (2007). Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste Management*, 27(2), 310–318. DOI 10.1016/j.wasman.2006.03.012.
83. Meyer, C. 2009. "The greening of the concrete industry." *Cement and Concrete Composites*, 31: 601-605. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010>.
84. Miller, D. P., and Moslemi, A. A. ~1991!. "Wood-cement composites: effect of model compounds on hydration characteristics and tensile strength." *Wood Fiber Sci.*, 23~4!, 472–482.
85. Mohammadinia, A., Wong, Y. C., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S. (2019). Strength evaluation of utilizing recycled plastic waste and recycled crushed glass in concrete footpaths. *Construction and Building Materials*, 197, 489– 496. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.192.
86. Mohit, S. A., El-Salakawy, E. (2019). Rehabilitation of reinforced concrete circular columns with sprayed-glass fiber-reinforced polymer composites. *Journal of Composites for Construction*, 23(6). DOI 10.1061/(ASCE) CC.1943-5614.0000973.
87. Mohseni, E., Tang, W., Wang, S. (2019). Development of thermal energy storage lightweight structural cementitious composites by means of macro-encapsulated PCM. *Construction and Building Materials*, 225, 182–195. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.136.
88. Naik, T. R. (2002). Greener concrete using recycled materials. *Concrete international*, 24(7), 45-49.
89. Naik, Tarun, Rakesh Kumar, Yoon-moon Chun, and Rudolph Kraus. 2010. "Utilization of Powdered Gypsum-Wallboard in Concrete". UWM Center for By-Products Utilization: University of Wisconsin-Milwaukee, WI, USA
90. Omar, O. M., Abd Elhameed, G. D., Sherif, M. A., & Mohamadien, H. A. (2012). Influence of limestone waste as partial replacement material for sand and marble powder in concrete properties. *HBRC Journal*, 8(3), 193–203.
91. Panyakapo, P., Panyakapo, M. (2008). Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete. *Waste Management*, 28(9), 1581–1588. DOI 10.1016/j.wasman.2007.08.006.
92. Parthiban, K., & Mohan, K. S. R. (2017). Influence of recycled concrete aggregates on the engineering and durability properties of alkali activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, 133, 65-72.
93. Raghavendra, T., and B.C. Udayashankar. 2015. "Engineering properties of controlled low strength materials using flyash and waste gypsum wall boards." *Construction and Building Materials*, 101: 548-557. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.070>.

94. Ramirez-Coretti, A., Eckelman, C. A., and Wolfe, R. W. ~1998!. "Inorganic-bonded composite wood panel systems for low-cost housing: a Central American perspective." *Forest Products. J.*, 48~4!, 62– 68
95. Rashwan, M. S., Hatzinikolas, M., and Zmavc, R. ~1992!. "Development of a lightweight, low-cost concrete block using wood residue." *Forest Products. J.*, 42~5!, 57–64
96. Sahani, A. K., Samanta, A. K., Singharoy, D. K. (2019). Mechanical behaviour of fire-exposed fibre-reinforced sustainable concrete. *Journal of Structural Fire Engineering*, 10(4), 482–503.
97. Saikia, N., de Brito, J. (2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: a review. *Construction and Building Materials*, 34, 385–401. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066.
98. Saikia, N., de Brito, J., (2014). Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials*, 52, 236– 244. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049.
99. Serres, N., Braymand, S., & Feugeas, F. (2016). Environmental evaluation of concrete made from recycled concrete aggregate implementing life cycle assessment. *Journal of Building Engineering*, 5, 24-33.
100. Sharma, N. K., Kumar, P., Kumar, S., Thomas, B. S., & Gupta, R. C. (2017). Properties of concrete containing polished granite waste as partial substitution of coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 151, 158– 163.
101. Shigekura, Y. ~1989!. "Wood fiberboards bonded with inorganic binders in Japan." *Proc., Fiber and Particle Boards Bonded With Inorganic Binders*, Forest Products Research Society, Madison, Wis., 141–150.
102. Silva, R. V., De Brito, J., & Dhir, R. K. (2016). Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2171-2186.
103. Solak, A. M., Tenza-Abril, A. J., Baeza-Brotons, F., Benavente, D. (2019). Proposing a new method based on image analysis to estimate the segregation index of lightweight aggregate concretes. *Materials (Basel, Switzerland)*, 12(21), 3642. DOI 10.3390/ma12213642.
104. Stahl, D. C., Skoraczewski, G., Arena, P., & Stempski, B. (2002). Lightweight concrete masonry with recycled wood aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(2), 116-121.
105. Suarez, Sindy, Xavier Roca, and Santiago Gasso. 2016. "Product-specific life cycle assessment of recycled gypsum as a replacement for natural gypsum in ordinary Portland cement: application to the Spanish context." *Journal of Cleaner Production*, 117: 150-159. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.044>.
106. Tam, V. W., & Tam, C. M. (2007). Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach. *Journal of Materials Science*, 42(10), 3592-3602.

107. Tanabe, T., Sugie, S. (1977). Application of expanded polytetrafluoroethylene for construction of cardiovascular shunts. *Artificial Organs*, 1(1), 144.
108. Tanabe, T., Sugie, S. (1977). Application of expanded polytetrafluoroethylene for construction of cardiovascular shunts. *Artificial Organs*, 1(1), 144.
109. Terro, M. J. (2006). Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures. *Building and environment*, 41(5), 633-639.
110. Thorneycroft, J., Orr, J., Savoikar, P., Ball, R. J. (2018). Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand. *Construction and Building Materials*, 161, 63–69. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.127.
111. VanderWerf, P. ~1999!. "Mortarless block systems." *Masonry Construction*, 12~2!, 20–24.
112. Verian, K. P., Ashraf, W., & Cao, Y. (2018). Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. *Resources, Conservation and Recycling*, 133, 30-49.
113. Wang, G. M., Kong, Y., Shui, Z. H. (2015). Influence of surface treated metakaolin with coupling agent on the properties of concrete. *Materials and Structures*, 48(1–2), 261–267. DOI 10.1617/s11527-014-0471-8.
114. Wang, L. B., Cheng, Q. L., Qin, H. F., Li, Z. C., Lou, Z. S. et al. (2017). Synthesis of silicon carbide nanocrystals from waste polytetrafluoroethylene. *Dalton Transactions*, 46(9), 2756–2759. DOI 10.1039/C6DT04865J.
115. Wang, L. B., Cheng, Q. L., Qin, H. F., Li, Z. C., Lou, Z. S. et al. (2017). Synthesis of silicon carbide nanocrystals from waste polytetrafluoroethylene. *Dalton Transactions*, 46(9), 2756–2759. DOI 10.1039/C6DT04865J.
116. Wang, L., Lenormand, H., Zmamou, H., Leblanc, N. (2019). Effect of soluble components from plant aggregates on the setting of the lime-based binder. *Journal of Renewable Materials*, 7(9), 903–913. DOI 10.32604/jrm.2019.06788.
117. Wu, H., Liu, C., Shi, S., & Chen, K. (2020). Experimental research on the physical and mechanical properties of concrete with recycled plastic aggregates. *Journal of Renewable Materials*, 8(7), 727.
118. Xiang, D. H., Tao, K. M. (2007). The mechanical and tribological properties of PTFE filled with PTFE waste powders. *Journal of Applied Polymer Science*, 103(2), 1035–1041. DOI 10.1002/app.25296.
119. Xiang, D. H., Tao, K. M. (2007). The mechanical and tribological properties of PTFE filled with PTFE waste powders. *Journal of Applied Polymer Science*, 103(2), 1035–1041. DOI 10.1002/app.25296.
120. Xiao, J. Z., Li, J. B., Zhang, C. (2005). Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1187–1194. DOI 10.1016/j.cemconres.2004.09.020.

121. Zegardło, B., Szeląg, M., Ogrodnik, P., & Bombik, A. (2018). Physico-mechanical properties and microstructure of polymer concrete with recycled glass aggregate. *Materials*, 11(7), 1213.
122. Zhengtian, L., and Moslemi, A. A. ~1985!. "Influence of chemical additives on the hydration characteristics of western larch wood-cementwater mixtures." *Forest Products. J.*, 35~7!, 37–43.
123. <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/20509/attachments/1/translations/el/renditions/native>
124. <https://skyciv.com/el/technical/commonly-used-materials-in-structural-engineering/?fbclid=IwAR3Alkwz5d2m8-SV5pvfnDk8jE6vcOSQ7P6TCJ6as0nxXI2JA88c9Z89uU0>
125. <https://www.allinwood.gr>
126. <https://www.siakandaris.gr/recycle/%ce%b1%ce%bd%ce%b1%ce%ba%cf%8d%ce%ba%ce%bb%cf%89%cf%83%ce%b7-%ce%be%cf%8d%ce%bb%ce%bf%cf%85/>

