



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

## **Διπλωματική Εργασία**

**«ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΜΕ ΦΙΛΙΚΑ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΥΛΙΚΑ»**



**Φοιτητής: Γεώργιος Φαράντος  
ΑΜ: 45279**

**Επιβλέπουσα Καθηγήτρια**

**Σοφία Μεταξά  
Λέκτορας Εφαρμογών**

**ΑΘΗΝΑ, ΜΑΙΟΣ, 2024**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA  
FACULTY OF ENGINEERING  
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

**Diploma Thesis**

**«CONSTRUCTIONS WITH ENVIRONMENTALLY FRIENDLY  
MATERIALS»**



**Student: Georgios Farantos  
Registration Number: 45279**

**Supervisor**

**Sofia Metaxa  
Applications Lecturer**

**ATHENS, MAY, 2024**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**«ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΜΕ ΦΙΛΙΚΑ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΥΛΙΚΑ»**

**Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή**

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

<b>A/α</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ</b>	<b>ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ</b>	<b>ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ</b>

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Γεώργιος Φαράντος του Δημητρίου, με αριθμό μητρώου 45279 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα 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, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

*\*Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι ..... και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή*

Ο Δηλών  
Γεώργιος Φαράντος

**\* Ονοματεπώνυμο /Ιδιότητα**  
(Υπογραφή)

**Ψηφιακή Υπογραφή Επιβλέποντα**

*\* Σε εξαιρετικές περιπτώσεις και μετά από αιτιολόγηση και έγκριση του επιβλέποντα, προβλέπεται χρονικός περιορισμός πρόσβασης (embargo) 6-12 μήνες. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να υπογράψει ψηφιακά ο/η επιβλέπων/ουσα καθηγητής/τρια, για να γνωστοποιεί ότι είναι ενημερωμένος/η και συναινεί. Οι λόγοι χρονικού αποκλεισμού πρόσβασης περιγράφονται αναλυτικά στις πολιτικές του Ι.Α. (σελ. 6):*

*[https://www.uniwa.gr/wp-content/uploads/2021/01/%CE%A0%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%B5%CC%81%CF%82\\_%CE%99%CE%B4%CF%81%CF%85%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CF%85%CC%81\\_%CE%91%CF%80%CE%BF%CE%B8%CE%B5%CF%84%CE%B7%CF%81%CE%B9%CC%81%CE%BF%CF%85\\_final.pdf](https://www.uniwa.gr/wp-content/uploads/2021/01/%CE%A0%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%B5%CC%81%CF%82_%CE%99%CE%B4%CF%81%CF%85%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CF%85%CC%81_%CE%91%CF%80%CE%BF%CE%B8%CE%B5%CF%84%CE%B7%CF%81%CE%B9%CC%81%CE%BF%CF%85_final.pdf)*

## Περίληψη

Το συνεχώς ραγδαία αυξανόμενο φαινόμενο του θερμοκηπίου, η τρύπα του όζοντος και η κλιματική επιβάρυνση κρούουν διαρκώς τον κώδωνα του κινδύνου. Ένας καταλυτικός παράγοντας επιβάρυνσης είναι οι εκπομπές CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα, και κατά συνέπεια, όλες οι ανθρώπινες πρακτικές με αυξημένη παραγωγή CO<sub>2</sub> πρέπει να περιοριστούν. Στον κατασκευαστικό κλάδο, η τσιμεντοβιομηχανία προσπαθεί να συμβάλει σε αυτή την οικουμενική προσπάθεια μειώνοντας τις εκπομπές CO<sub>2</sub> από την παραγωγή τσιμέντου χρησιμοποιώντας βιομηχανικά υποπροϊόντα ως εναλλακτικά καύσιμα και αναπτύσσοντας δευτερογενή προϊόντα σκυροδέματος από απόβλητα κατασκευών. Με αυτές τις προσπάθειες, η τσιμεντοβιομηχανία προσπαθεί να γίνει πιο φιλική προς το περιβάλλον και να μειώσει την περιβαλλοντική επιβάρυνση. Στην παρούσα μελέτη αναλύθηκε η δυνατότητα χρήσης ανόργανων κατασκευαστικών αποβλήτων για την παραγωγή φιλικού προς το περιβάλλον ανακυκλωμένου τσιμέντου με τη διαδικασία της αναλογίας και για το σκοπό αυτό, αναλύθηκαν οι τύποι και οι τάσεις παραγωγής ανακυκλώσιμων οικοδομικών αποβλήτων για την ανάπτυξη ανακυκλωμένου τσιμέντου με τη χρήση τέτοιων οικοδομικών αποβλήτων (Adesanya & Raheem, 2009).

Για την συλλογή των δεδομένων της παρούσας μελέτης και με βάση αυτή την ανάλυση, επιλέχθηκαν ανακυκλώσιμα ανόργανα κατασκευαστικά απόβλητα και συλλέχθηκαν πραγματικά απόβλητα. Η χημική σύνθεση κάθε ανόργανου κατασκευαστικού αποβλήτου αναλύθηκε με τη χρήση φθορισμού ακτίνων X και η σύνθεση του συνηθισμένου εμπορικού τσιμέντου χρησιμοποιήθηκε ως βάση. Αφού αναμείχθηκαν τα συλλεχθέντα ανόργανα απόβλητα κατασκευών, ψήθηκαν χρησιμοποιώντας τον τύπο Bogue, ενώ εν συνεχεία τα ορυκτά συστατικά του κλίνκερ, το οποίο προέκυψε από τη διαδικασία της όπτησης, προβλέφθηκαν και αναλύθηκαν. Αποδείχθηκε ότι τα απόβλητα γυψοσανίδων και υλικών οροφής περιέχουν μεγάλες ποσότητες CaO, το οποίο θα μπορούσε να υποκαταστήσει τον ασβεστόλιθο - βασικό συστατικό του τσιμέντου και τα αποτελέσματα αυτά έδειξαν ότι, εάν η περιεκτικότητα σε ασβεστόλιθο ήταν μεγαλύτερη από 85 % κατά βάρος, η ανάμειξη ανόργανων κατασκευαστικών αποβλήτων σε κατάλληλες αναλογίες θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη διαφόρων τύπων τσιμέντου Πόρτλαντ (Adesanya & Raheem, 2009).

**Λέξεις-κλειδιά:** ανακυκλωμένο τσιμέντο, ανόργανα απόβλητα, απόβλητα κατασκευών, δευτερογενή υλικά

## Abstract

The ever-growing greenhouse effect, the ozone hole and the climate change altogether keep reminding us that we are in eminent danger. A crucial factor of the environmental crisis is the international CO<sub>2</sub> emissions in the atmosphere, and as a result, all human activities and practices with high CO<sub>2</sub> emissions need to be deteriorized. In the construction segment, the cement industry is trying to reduce CO<sub>2</sub> emissions in cement production by using industrial by-products as alternative fuels and developing secondary concrete products from construction waste. Through these efforts, the cement industry is trying to be more environmentally friendly and reduce its ecological footprint. This study examines the potential of using inorganic construction waste to produce environmentally friendly recycled cement through a blending process, and to this end, the types and trends in the production of recycled construction waste and previous studies on the development of recycled cement using such construction waste were analyzed (Adesanya & Raheem, 2009).

In purpose of data collection for this study and based on this analysis, inorganic construction waste suitable for recycling was selected and collected. The chemical composition of each inorganic construction waste was analyzed by X-ray fluorescence based on the composition of commercial cement. After mixing, the collected inorganic construction waste was incinerated according to Bogue's formula. The mineral constituents of the clinker resulting from the combustion process were predicted and analyzed. It was found that gypsum plasterboard and roofing waste contain large amounts of CaO, which could replace limestone, the main component of cement. These results showed that at limestone contents above 85% (wt), different types of Portland cement could be developed by mixing inorganic construction waste in appropriate proportions (Adesanya & Raheem, 2009).

**Keywords:** *recycled cement, inorganic waste, construction waste, secondary materials.*

<b>Περίληψη</b>	<b>1</b>
<b>Abstract</b>	<b>2</b>
<b>Εισαγωγή</b>	<b>4</b>
<b>1. Ανακύκλωση κατασκευαστικών αποβλήτων</b>	<b>6</b>
1. 1 Τύποι και τάσεις των κατασκευαστικών αποβλήτων	6
1. 2 Ανάλυση ανόργανων κατασκευαστικών αποβλήτων	8
1. 2. 1 Χημική σύνθεση	8
1. 2. 2 Θεωρητική προσέγγιση των χημικών συστατικών	9
1. 3 Συλλογή και χημική ανάλυση ανόργανων κατασκευαστικών αποβλήτων	9
<b>2. Μέθοδοι Πρόβλεψης</b>	<b>9</b>
2.1 Φόρμουλα Bogue	9
2.2 Άλλοι τύποι πρόβλεψης και χημικοί παράγοντες	10
2.3 Αναλύσεις ανόργανων κατασκευαστικών αποβλήτων και θεωρητικοί συνδυασμοί	11
2.4 Ανάλυση των ορυκτών κλίνκερ με τη χρήση του τύπου Bogue	12
2.5 Ανάλυση και συζήτηση των προβλέψεων της ορυκτής σύνθεσης	13
2.6 Αναμενόμενα αποτελέσματα από την ανάπτυξη ανακυκλωμένου τσιμέντου	13
<b>3. Ανάπτυξη δομικών υλικών από αγροτικά απόβλητα</b>	<b>14</b>
3.1 Πλάκες μορίων	14
3.2 Θερμομονωτικά υλικά	14
3.3 Σύνθετα υλικά τοιχοποιίας / τούβλα	15
3.4 Υλικά τσιμεντοποιίας / συνδετικά υλικά	16
3.5 Αδρανή (δομικό υλικό: μικρές πέτρες)	18
3.6 Ενίσχυση με ίνες	18
3.7 Ενίσχυση με άλλα υλικά	19
<b>Συζήτηση - Συμπεράσματα</b>	<b>20</b>
<b>Περαιτέρω μελέτη</b>	<b>23</b>
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>24</b>

## Εισαγωγή

Η συνεχής και όλο και πιο ραγδαία πληθυσμιακή αύξηση σε παγκόσμιο επίπεδο, σε συνδυασμό με την αύξηση του προσδόκιμου ζωής έχει οδηγήσει στην ολοένα αυξανόμενη ανάγκη στέγασης και δημιουργίας καταλυμάτων. Ως λογικό επόμενο η βιομηχανία δομικών υλικών παρουσιάζει μεγάλη ζήτηση, ιδίως την τελευταία δεκαετία. Προκειμένου να καλυφθεί η διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση κατοικιών, υπάρχει εκθετική ανάγκη παραγωγής δομικών υλικών όπως τούβλα, τσιμέντο, αδρανή υλικά, χάλυβας, αλουμίνιο, ξύλο, υλικά επένδυσης και διαχωριστικά, σε μεγάλη κλίμακα, καθώς πλέον οι πόλεις επεκτείνονται καθέτως, με κατασκευές μεγάλης κλίμακας, όπως οι ουρανοξύστες. Παράλληλα, η παραγωγή συμβατικών δομικών υλικών όπως το τσιμέντο, τα τούβλα και ο χάλυβας καταναλώνουν πολλή θερμική και ηλεκτρική ενέργεια και με τη σειρά τους ρυπαίνουν τον αέρα, το νερό και το έδαφος συμβάλλοντας έτσι με αρνητικό πρόσημο στην περιβαλλοντική κρίση που διαρκώς γιγαντώνεται (Alami, 2010).

Στην επίλυση αυτού του προβλήματος η χρήση των κατάλληλων δομικών υλικών δεν έχει τύχει επαρκούς προσοχής. Η διάθεση των στερεών αποβλήτων που παράγονται από τη γεωργική και βιομηχανική παραγωγική δραστηριότητα είναι ένα άλλο σοβαρό πρόβλημα στις αναπτυσσόμενες χώρες, ενώ η επαναχρησιμοποίηση αυτών των αποβλήτων ως βιώσιμο δομικό υλικό φαίνεται να αποτελεί βιώσιμη λύση όχι μόνο στο πρόβλημα της ρύπανσης αλλά και στο πρόβλημα της κατάληψης γης και του υψηλού κόστους των δομικών υλικών. Εν παραλλήλω, αύξηση του πληθυσμού, η αυξανόμενη αστικοποίηση, η άνοδος του βιοτικού επιπέδου λόγω των τεχνολογικών καινοτομιών έχουν συμβάλλει στην αύξηση της ποσότητας και της ποικιλίας των στερεών αποβλήτων που παράγονται από βιομηχανικές, εξορυκτικές, οικιακές και γεωργικές δραστηριότητες (Zhou, et. al., 2010).

Μόνο στην Ασία παράγονται ετησίως 4,4 δισεκατομμύρια τόνοι στερεών αποβλήτων, εκ των οποίων είναι υπεύθυνες οι γεωργικές πηγές για πάνω από 350 ΜΤ ετησίως. Ωστόσο, αναφέρεται ότι περίπου 600 ΜΤ αποβλήτων έχουν παραχθεί στην Ινδία μόνο από γεωργικές πηγές. Η μεγαλύτερη ποσότητα αποβλήτων που παράγονται από γεωργικές πηγές είναι η βαγάσση ζαχαροκάλαμου, το άχυρο και ο φλοιός του ορυζώνα και του σιταριού, τα απόβλητα λαχανικών, τα προϊόντα διατροφής, το τσάι, η παραγωγή λαδιού, οι ίνες γιούτας, το κέλυφος αραχίδας, τα απόβλητα των ξύλινων μύλων, ο φλοιός καρύδας, ο μίσχος βαμβακιού κ.λπ. Τα κυριότερα βιομηχανικά μη επικίνδυνα ανόργανα στερεά απόβλητα είναι τα υπολείμματα καύσης άνθρακα (CCR), η ερυθρά λάσπη βωξίτη, τα απόβλητα από τις διαδικασίες πρωτογενούς εξόρυξης αλουμινίου, σιδήρου, χαλκού και ψευδαργύρου (Rawat et. al., 2013).

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι εφαρμογές των τοπικά διαθέσιμων αγροτικών αποβλήτων με απώτερο στόχο την παραγωγή φιλικών προς το περιβάλλον δομικών υλικών (δηλαδή μοριοσανίδες, θερμομονωτικά υλικά, σύνθετα υλικά τοιχοποιίας/τουβλάκια, τσιμεντοειδή/συνδετικά υλικά, αδρανή υλικά κλπ.) Η διαδικασία σχεδιασμού και η φυσικομηχανική ιδιότητα του αναθεωρημένου βιώσιμου δομικού υλικού αναλύεται περαιτέρω (Zhou, et. al., 2010)

Τα δομικά υλικά είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά για αστικές υποδομές στην καθημερινή ζωή. Ωστόσο, από περιβαλλοντική άποψη, καταναλώνουν τεράστια ποσότητα φυσικών πόρων και παράγουν την πλειονότητα των αερίων του θερμοκηπίου. Ως εκ τούτου, πρόσφατα έχουν αναπτυχθεί πολλές νέες και καινοτόμες τεχνολογίες για τον σχεδιασμό οικολογικών δομικών υλικών φιλικών προς το περιβάλλον (Alami, 2010).

Η πρόβλεψη της διάρκειας ζωής είναι ιδιαίτερος σημαντική για το σχεδιασμό δομικών υλικών σε σημείο που ερευνητές σε όλο τον κόσμο ασχολούνται με την ανάλυση της πρόβλεψης διάρκειας ζωής. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν φιλικές προς το περιβάλλον ίνες για τη βελτίωση της απόδοσης των μειγμάτων ενώ πραγματοποιήθηκε μελέτη των ιξωδοελαστικών μηχανικών αποκρίσεων



ασφαλοτάτητα υψηλής τιμής με αριθμητική προσομοίωση με κινούμενο φορτίο. Σε τρία άρθρα αναφέρθηκαν οι αντιστάσεις γήρανσης της ασφάλτου, συμπεριλαμβανομένου του βάθους γήρανσης που προκύπτει από την υπεριώδη ακτινοβολία, της ανάλυσης γήρανσης με φάσμα φθορισμού και της βελτίωσης της γήρανσης με την τροποποίηση SBS/CRP (πολυμερές στυρενίου-βουταδιενίου-στυρενίου/σκόνη καουτσούκ ψίχας). Ένα ερευνητικό άρθρο επικεντρώθηκε στη χημική εξέλιξη και τις ρεολογικές ιδιότητες της ασφάλτου υπό έκθεση σε υδατοδιαλυτή ουσία από την οποία προέκυψε ότι οι κορεσμένοι και οι αρωματικοί διαλύθηκαν εν μέρει στο νερό και στη συνέχεια μετακινήθηκαν προς τα έξω (Zhou, et. al., 2010)

Κατά συνέπεια, σε πολλά ερευνητικά ινστιτούτα πραγματοποιούνται τροποποιήσεις στα δομικά υλικά για το σχεδιασμό ανθεκτικών πολιτικών υποδομών. Οι ίνες είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο ενισχυτικό πρόσθετο στα ασφαλτικά μίγματα με αποτέλεσμα, οι φιλικές προς το περιβάλλον ίνες βασάλτη ενσωματώθηκαν με SBS και διατομίτη. Ένα άλλο άρθρο παρουσίασε μηχανισμούς βελτίωσης των τροποποιημένων με διατομίτη ασφαλτομιγμάτων, μέσω της αντίστασης σε μόνιμη παραμόρφωση και της αντίστασης στην υγρασία. Το υδροξείδιο του αργιλίου και το διπλάσιο υδροξείδιο με στρώσεις προτάθηκαν για τη βελτίωση της πυραντίστασης της ασφάλτου ενώ ένα άλλο νανοϋλικό, που ονομάστηκε νανοπυρίτιο, αξιολογήθηκε (Yoshizawa, 2004).

Η βελτίωση των χαρακτηριστικών της μορφολογίας των αδρανών υλικών είναι ένας άλλος αποτελεσματικός τρόπος για την απόκτηση ανθεκτικών ασφαλτομιγμάτων. Διαπιστώθηκε η σχέση μεταξύ της μορφολογίας των λεπτών αδρανών και της αντοχής σε ολίσθηση της μικροεπιφάνειας, ενώ έγινε αναφορά στην επίδραση των μορφολογικών χαρακτηριστικών των αδρανών στα ασφαλομίγματα. Αναλυτικότερα, τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των αδρανών που μελετήθηκαν περιλαμβάνουν τη στρογγυλότητα, τον δείκτη περιμέτρου, τον λόγο περιοχής διάβρωσης-διαστολής, τη γωνιότητα και την επιφανειακή υφή. Η επιρροή των χαρακτηριστικών των αδρανών στην ταχύτητα αποδιάταξης του ασφαλικού γαλακτώματος παρουσιάστηκε και επιπλέον, προτάθηκε η χρήση υποπροϊόντος τέφρας για τη βελτίωση των ιδιοτήτων πρόσφυσης ασφάλτου-αδρανών (Ling & Teo, 2011).

Η τσιμεντοβιομηχανία ωστόσο εξακολουθεί να έχει μεγάλο αντίκτυπο στη βιομηχανική και οικονομική ανάπτυξη και κατά συνέπεια, καταβάλλονται σημαντικές προσπάθειες για τη μετατροπή της τσιμεντοβιομηχανίας σε μια βιώσιμη βιομηχανία από περιβαλλοντική άποψη. Ωστόσο, παρά τις προσπάθειες αυτές, η κατασκευαστική βιομηχανία εξακολουθεί να αντιμετωπίζει κοινωνικά προβλήματα, τα οποία σχετίζονται με τις αυξανόμενες ποσότητες αποβλήτων και τα ζητήματα επεξεργασίας, καθώς και περιβαλλοντικές προκλήσεις που προκύπτουν ως αποτέλεσμα της εξάντλησης των πόρων και της παγκόσμιας ρύπανσης που προκαλείται από τα αέρια του θερμοκηπίου που παράγονται από την παραγωγή δομικών υλικών (Yoshizawa, 2004).

Αναλυτικότερα, η παραγωγή τσιμέντου είναι μια ιδιαίτερα ενεργοβόρα παραγωγική διαδικασία. Η κατανάλωση ενέργειας από την τσιμεντοβιομηχανία εκτιμάται σε περίπου 2% της παγκόσμιας κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας ή σχεδόν 5% της συνολικής παγκόσμιας βιομηχανικής κατανάλωσης ενέργειας. Η Κίνα παράγει το περισσότερο τσιμέντο παγκοσμίως με μεγάλη διαφορά, με εκτιμώμενους 2,4 δισεκατομμύρια μετρικούς τόνους το 2017, ακολουθούμενη από την Ινδία με 270 εκατομμύρια μετρικούς τόνους το ίδιο έτος. Αναφέρθηκε επίσης ότι η Κίνα, η Ινδία, οι Ηνωμένες Πολιτείες και η Νότια Κορέα παράγουν τις μεγαλύτερες ποσότητες τσιμέντου παγκοσμίως (Ghavami, 1995).

Στον τομέα της τσιμεντοβιομηχανίας, αναπτύσσονται ενεργά φιλικά προς το περιβάλλον υλικά προκειμένου να μειωθεί η ποσότητα των πόρων που απαιτούνται ως εισροές και των αποβλήτων που παράγονται ως παραπροϊόντα. Στη Νότια Κορέα, θεσπίστηκε ένα "βασικό σχέδιο για την ανακύκλωση των κατασκευαστικών αποβλήτων" για την ενίσχυση της επαναχρησιμοποίησης των κατασκευαστικών αποβλήτων. Ωστόσο, οι μελέτες σχετικά με την ανακύκλωση κατασκευαστικών αποβλήτων που έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία μέχρι σήμερα έχουν επικεντρωθεί κυρίως στα απόβλητα σκυροδέματος.

Δεδομένου ότι τα απόβλητα σκυροδέματος είναι σε μεγάλο βαθμό διαθέσιμα για τη βελτίωση του ποσοστού ανακύκλωσης, έχουν επισημανθεί τα ανακυκλωμένα αδρανή και η τσιμεντοειδής σκόνη. Αντίθετα, μόνο λίγες μελέτες έχουν ασχοληθεί με δευτερογενή προϊόντα που προκύπτουν από ανόργανα κατασκευαστικά απόβλητα, όπως απόβλητα κεραμιδιών, απόβλητα τσιμεντόλιθων και απόβλητα γυψοσανίδων (Ling & Teo, 2011).

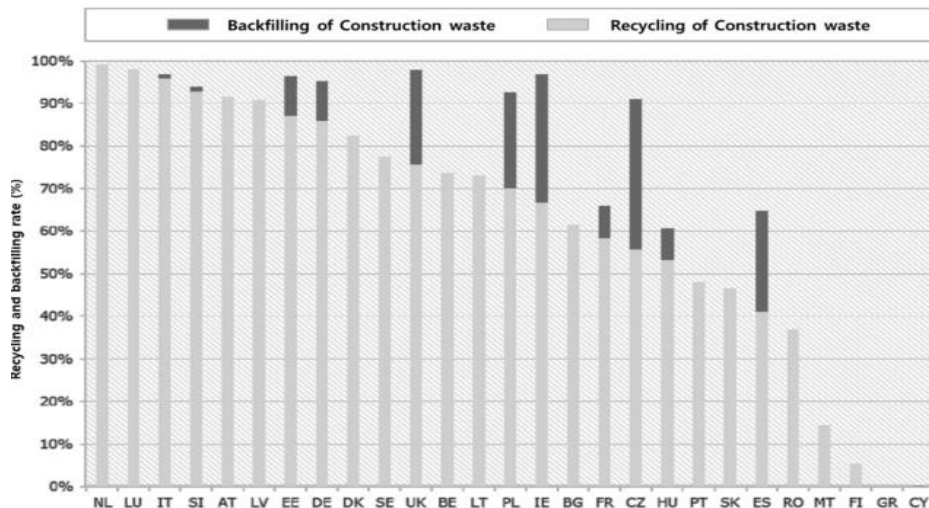
Στόχος της παρούσας μελέτης ήταν να προτείνει μια θεωρητική αναλογία για την ανάπτυξη φιλικού προς το περιβάλλον ανακυκλωμένου τσιμέντου με τη χρήση ανόργανων οικοδομικών αποβλήτων ως δευτερογενών υλικών. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, η μελέτη αυτή ανέλυσε διάφορα ανόργανα απόβλητα κατασκευών που θα μπορούσαν να αποκαταστήσουν τις υπάρχουσες πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή τσιμέντου. Επιπλέον, συλλέχθηκαν πραγματικά ανόργανα κατασκευαστικά απόβλητα και αναλύθηκε η χημική τους σύνθεση. Προέκυψε θεωρητικά μια αναλογία φιλικού προς το περιβάλλον ανακυκλωμένου τσιμέντου που περιέχει ανόργανα κατασκευαστικά απόβλητα. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε ο τύπος Bogue για την πρόβλεψη των χημικών παραγόντων και την ανάλυση των ορυκτών συστατικών που παράγονται από την πύρωση του κλίνκερ (Ling & Teo, 2011).

## 1. Ανακύκλωση κατασκευαστικών αποβλήτων

### 1. 1 Τύποι και τάσεις των κατασκευαστικών αποβλήτων

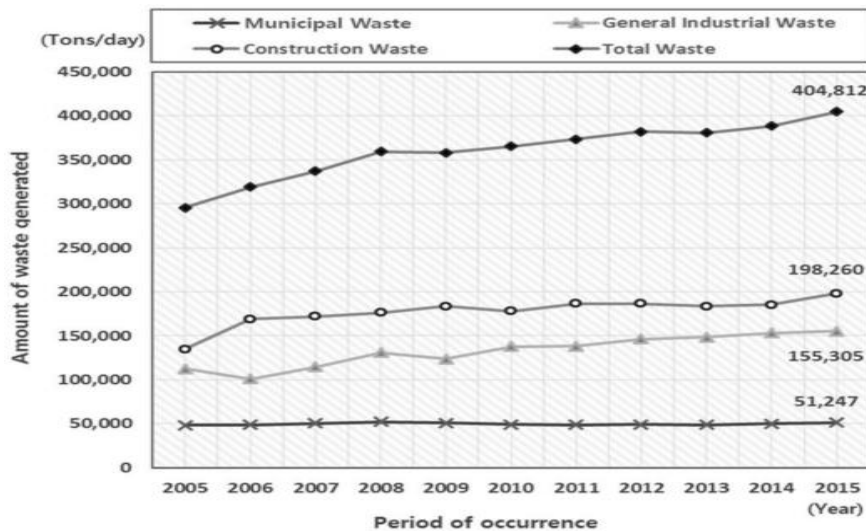
Η προσπάθεια για την ανάπτυξη κάθε ανθρώπινης δραστηριότητας σε ένα πιο βιώσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον πλαίσιο, αναδεικνύει την υψηλή χρηστικότητα της ανακύκλωσης των υλικών που υπάρχουν ήδη σε διαθεσιμότητα και ιδιαίτερα των αποβλήτων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο κατασκευαστικός χώρος απορροφά περίπου το 40% των υλικών που εξορύσσονται σε ετήσια βάση, η αξιοποίηση των κατασκευαστικών αποβλήτων αντιπροσωπεύει την αξιοποίηση ενός μεγάλου ποσοστού καταλοίπων της ανθρώπινης δραστηριότητας τα όποια επιβαρύνουν το περιβάλλον. Τα κατασκευαστικά απόβλητα αντιπροσωπεύουν περίπου το 25-30% του συνόλου των αποβλήτων που παράγονται στην ΕΕ. Αυτός ο τύπος αποβλήτων περιέχει υλικά με υψηλή αξία πόρων, όπως μέταλλα, ξύλο, γυαλί, σκυρόδεμα κ.λπ. Ως εκ τούτου, υπάρχει υψηλό δυναμικό για ανακύκλωση και ανάκτηση υλικών από τα απόβλητα κατασκευών, το οποίο μέχρι στιγμής δεν αξιοποιείται επαρκώς. Το επίπεδο ανακύκλωσης ποικίλλει σημαντικά -από 10% έως 90%- στην ΕΕ (Alami, 2010).

Οι δυνατότητες αύξησης της αποδοτικότητας των πόρων στον κατασκευαστικό τομέα με την αύξηση του ποσοστού ανακύκλωσης των αποβλήτων κατασκευών είναι σημαντικές. Τα κατασκευαστικά απόβλητα προκύπτουν από δραστηριότητες όπως η κατασκευή κτιρίων και πολιτικών υποδομών, η ολική ή μερική κατεδάφιση κτιρίων και πολιτικών υποδομών, καθώς και ο σχεδιασμός και η συντήρηση δρόμων. Ωστόσο, τα κατασκευαστικά απόβλητα που παράγονται από τα εργοτάξια παρέχουν μόνο άνισες ποιότητες ανάλογα με τον χρόνο και τον τόπο. Λόγω της κοινωνικής αναγνώρισης του ζητήματος της ποιότητας, καθώς και της υποβάθμισης της ποιότητας κατά την εφαρμογή σε προϊόντα σκυροδέματος, οι μελέτες ήταν πειραματικές και δεν οδηγούσαν σε εφαρμογή στο πεδίο. Επιπλέον, οι περισσότερες μελέτες έχουν διεξαχθεί σε απόβλητα σκυροδέματος, για παράδειγμα, σε ανακυκλωμένα αδρανή και σε λεπτή σκόνη απόβλητα σκυροδέματος, ενώ απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για δομικά υλικά που ανακυκλώνουν διάφορα απόβλητα κατασκευών (Alami, 2010).



**Εικόνα 1. Το επίπεδο ανακύκλωσης και ανάκτησης υλικών από τα απόβλητα κατασκευών στην ΕΕ.**

Η εξέταση της συνολικής ποσότητας των αποβλήτων που παράγονται στη Νότια Κορέα αποκάλυψε ότι τα ποσοστά των αστικών αποβλήτων και των γενικών βιομηχανικών αποβλήτων αυξήθηκαν σταδιακά. Τα κατασκευαστικά απόβλητα αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μέρος των συνολικών αποβλήτων και το ποσοστό τους έφτασε το 48,9% το 2015. Επιπλέον, καθώς η προθεσμία ανακατασκευής για τις σειρές κατοικιών και τα διαμερίσματα έχει μειωθεί από 40 σε 30 έτη, ο αριθμός των εργασιών ανακατασκευής και αναδιαμόρφωσης σε κτίρια που κατασκευάστηκαν τη δεκαετία του 1990 αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά. Κατά συνέπεια, η ποσότητα και το ποσοστό των κατασκευαστικών αποβλήτων θα αυξηθούν πιθανότατα αναλογικά (Alami, 2010).



**Εικόνα 2. Τρέχουσα κατάσταση της παραγωγής αποβλήτων.**

Κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός κτιρίου, δηλαδή των διαδικασιών που περιλαμβάνουν το σχεδιασμό, την κατασκευή, τη συντήρηση και την καταστροφή ενός πραγματικού κτιρίου, παράγεται μεγάλη ποσότητα κατασκευαστικών αποβλήτων. Αυτά τα απόβλητα μπορούν να υποστούν την ακόλουθη επεξεργασία. Αρχικά, οι κάτοχοι αδειών συλλογής και μεταφοράς αποβλήτων παραλαμβάνουν τα απόβλητα κατασκευών από τα εργοτάξια και ταξινομούν τα απόβλητα στη δική τους αυλή συλλογής. Τα ανακυκλώσιμα απόβλητα αποστέλλονται σε ενδιάμεσα κέντρα συλλογής, τοπικά κέντρα εφοδιασμού, κέντρα ανακύκλωσης και άλλες εξειδικευμένες εγκαταστάσεις. Στη

συνέχεια, τα εν λόγω απόβλητα ανακυκλώνονται ως δευτερογενή προϊόντα σκυροδέματος. Άλλα απόβλητα αποστέλλονται σε εγκαταστάσεις τελικής επεξεργασίας, όπως εγκαταστάσεις αποτέφρωσης ή επίχωσης οικοδομικών αποβλήτων. Τα διάφορα ανακυκλώσιμα ανόργανα απόβλητα κατασκευών ταξινομούνται ως επί το πλείστον ως μη καύσιμα απόβλητα και υλικά οικοδομικών αποβλήτων (Sales & Lima, 2010).

Τα άκαυστα απόβλητα και τα υλικά οικοδομικών αποβλήτων, τα οποία απορρίπτονται, αναμειγνύονται και αποθηκεύονται σε κυλινδρικά κουτιά. Όταν μεταφέρονται σε χώρους συλλογής, συνήθως θάβονται σε χώρους υγειονομικής ταφής χωρίς ακριβή ταξινόμηση. Κατά συνέπεια, η διαχείριση και η αποτελεσματική ταξινόμηση αυτών των ανακυκλώσιμων ανόργανων κατασκευαστικών αποβλήτων θα επιτρέψει τη δημιουργία φιλικών προς το περιβάλλον συστημάτων κατασκευής και παραγωγής, τα οποία θα ελαχιστοποιήσουν τα κατασκευαστικά απόβλητα και θα μεγιστοποιηθούν τα ποσοστά ανακύκλωσης (Madurwar et. al., 2013). Συμπερασματικά, ο μεγάλος όγκος των κατασκευαστικών αποβλήτων καθιστά επιτακτική ανάγκη την προτεραιότητα της ενσωμάτωσής τους σε μία γενικότερη στρατηγική ανακύκλωσης που θα επιτρέψει μία πιο ορθολογική χρήση πόρων, καθώς και την ελάττωση της εκπομπής ρύπων και της παραγωγής τοξικών υλικών.

## 1. 2 Ανάλυση ανόργανων κατασκευαστικών αποβλήτων

### 1. 2. 1 Χημική σύνθεση

Τα διάφορα ανακυκλώσιμα ανόργανα κατασκευαστικά απόβλητα ταξινομούνται κυρίως ως μη καύσιμα απόβλητα και υλικά οικοδομικών αποβλήτων. Η ανάλυση των ιδιοτήτων και της σύνθεσής τους είναι απαραίτητη προκειμένου να μπορέσουν να αξιοποιηθούν ως ανακυκλώσιμα υλικά. Το τσιμέντο είναι μια ανόργανη σκόνη που παράγεται από τον συνδυασμό κονιοποιημένου ασβεστόλιθου και αργίλου. Όταν συνδυάζεται με νερό, λαμβάνει χώρα μια χημική αντίδραση και το τσιμέντο σκληραίνει. Από την άποψη αυτή, το τσιμέντο είναι ένα κρίσιμο δομικό υλικό. Ανάλογα με τους ρυθμούς ανάμιξης των χημικών συστατικών, η ορυκτολογική σύνθεση του τσιμέντου μετά την πύρωση μπορεί να ποικίλει. Δεδομένου ότι οι ρυθμοί ανάμιξης μεταβάλλουν τις ιδιότητες του τσιμέντου, είναι πολύ σημαντικό να αξιολογούνται ποσοτικά οι χημικές συνθέσεις των υλικών πριν από την πύρωση και να αντιστοιχίζεται η τελική σύνθεση με εκείνη του συμβατικού τσιμέντου (Sales & Lima, 2010).

Τα μη εύφλεκτα απόβλητα και τα υλικά οικοδομικών αποβλήτων, όπως τα κεραμίδια, το γυαλί, τα τούβλα, οι γυψοσανίδες και η σκόνη σκυροδέματος, περιέχουν μεγάλη ποσότητα CaO(οξειδίο του ασβεστίου) και SiO<sub>2</sub>(διοξειδίο του πυριτίου). Κατά συνέπεια, η γυψοσανίδα φαίνεται να είναι το πιο χρήσιμο υποκατάστατο του (φυσικού) ασβεστόλιθου. Όσον αφορά το SiO<sub>2</sub>, το οποίο αποτελεί το δεύτερο μεγαλύτερο συστατικό του τσιμέντου, επιλέχθηκαν ως πιθανά υποκατάστατα τα απορρίμματα κεραμιδιών, τα απορρίμματα γυαλιού και τα απορρίμματα πήλινων τούβλων. Το ελαφρύ αφρώδες σκυρόδεμα και η σκόνη σκυροδέματος αποδείχθηκε επίσης ότι περιέχουν επαρκείς αναλογίες τόσο SiO<sub>2</sub> όσο και CaO. Ωστόσο, τα υλικά αυτά περιλαμβάνουν πολλές προσμίξεις που εμποδίζουν τη χρήση τους ως υποκατάστατα ασβεστόλιθου και αργίλου - τα υλικά αυτά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή τσιμέντου χωρίς περαιτέρω επεξεργασία (Rahman, 1987).

Τα απόβλητα κατασκευών επιλέχθηκαν να μην έχουν μολυσματικές ουσίες. Μέσω διήμερης ξήρανσης, η υγρασία στο εσωτερικό των οικοδομικών αποβλήτων εξατμίστηκε. Τα απόβλητα κατασκευών θρυμματίζονται μέσω του σιαγόνου σπαστήρα και του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα. Τέλος, τα απόβλητα κατασκευών αλέθονται σε μέγεθος δείγματος 90 μm με τη χρήση δονητικού μικρομύλου (Rahman, 2011).

## 1. 2. 2 Θεωρητική προσέγγιση των χημικών συστατικών

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα τέσσερα κύρια χημικά συστατικά του τσιμέντου συνδυάζονται χημικά σε θερμοκρασία περίπου 1450 °C σε κλίβανο, με αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων στερεών ορυκτών. Αυτά τα νέα ορυκτά που προκύπτουν είναι C3S (3CaO-SiO<sub>2</sub>), β-C2S (2CaO-SiO<sub>2</sub>), C3A (3CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) και C4AF (4CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) και ονομάζονται αλίτης, μπελίτης, αργιλικός και φερρίτης αντίστοιχα. Ως διερεύνηση με βάση τη διαδικασία αναλογίας, η παρούσα μελέτη εξέτασε τους ακόλουθους χημικούς παράγοντες (Mark & Russell, 2011).

## 1. 3 Συλλογή και χημική ανάλυση ανόργανων κατασκευαστικών αποβλήτων

Στην παρούσα μελέτη, αναλύσαμε τις χημικές συνθέσεις ανόργανων κατασκευαστικών αποβλήτων που θεωρήθηκαν, με βάση τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, ως βιώσιμα υποκατάστατα των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή τσιμέντου. Με βάση την ανάλυση, επισκεφθήκαμε πραγματικά εργοτάξια, αδειούχους ενδιάμεσου και τελικού σταδίου επεξεργασίας και εργοστάσια ανακύκλωσης για να συλλέξουμε έξι τύπους αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένων πλακιδίων, υλικών οροφής και τσιμεντόλιθων. Καθώς τα 100% ανόργανα κατασκευαστικά απόβλητα δεν φάνηκε να είναι πλήρως διαθέσιμα για την κατασκευή ανακυκλωμένου τσιμέντου, ο ασβεστόλιθος και η σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου ελήφθησαν από κατασκευαστές τσιμέντου και εγκαταστάσεις επεξεργασίας βιομηχανικών υποπροϊόντων (Yarbrough, 2005).

Τα απόβλητα κεραμιδιών και τα απόβλητα τούβλων βρέθηκαν να είναι βιώσιμα υποκατάστατα των πυριτικών υλικών. Ωστόσο, το SiO<sub>2</sub> (διοξείδιο του πυριτίου) και το Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (οξείδιο του αργιλίου) αντιπροσώπευαν πάνω από το 80 % κ.β. των αποβλήτων τούβλου, ενώ η περιεκτικότητα σε CaO ήταν πολύ μικρή. Αυτή η σύνθεση θα μπορούσε να οδηγήσει σε τσιμέντο με υδραυλικές ιδιότητες. Επιπλέον, τα τούβλα ως απόβλητα περιείχαν υψηλότερο ποσοστό αλκαλίων, όπως Na<sub>2</sub>O (υδροξείδιο του νατρίου) και K<sub>2</sub>O (οξείδιο του καλίου), σε σχέση με άλλα υλικά- έτσι, αυτός ο τύπος αποβλήτων θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως υλικό τσιμέντου μόνο σε περιορισμένη αναλογία. Παρόλο που τα απόβλητα τσιμέντου και η σκόνη σκυροδέματος περιέχουν μόνο μια μικρή ποσότητα CaO, περιέχουν μεγάλη ποσότητα SiO<sub>2</sub>. Η μεγάλη ποσότητα SiO<sub>2</sub> υποδηλώνει υψηλή περιεκτικότητα σε άμμο- κατά συνέπεια, μόνο μια μικρή ποσότητα αποβλήτων τσιμέντου και σκυροδέματος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη ρύθμιση της σύνθεσης του υλικού (Amin, 2011). Από τα παραπάνω προκύπτει ούτε τα συγκεκριμένα υλικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά ανακύκλωσης εφόσον υποστούν επεξεργασία, έστω και σε περιορισμένη κλίμακα.

## 2. Μέθοδοι Πρόβλεψης

### 2.1 Φόρμουλα Bogue

Η ανάμιξη και η καύση των πρώτων υλών που απαιτούνται για την παραγωγή τσιμέντου σε κλίβανο στους 1450 °C έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων στερεών ορυκτών. Ο τύπος Bogue χρησιμοποιείται συμβατικά για την πρόβλεψη των ενώσεων αυτών των ορυκτών κλίνκερ. Ο τύπος

Bogue προτάθηκε τη δεκαετία του 1920 από τον Robert Herman Bogue και έχει εφαρμοστεί ευρέως ως τύπος πρόβλεψης της ορυκτολογικής σύνθεσης του τσιμέντου. Το κορεατικό πρότυπο για τα προϊόντα τσιμέντου καθορίζει την εφαρμογή του τύπου Bogue. Σύμφωνα με αυτό το πρότυπο, η χημική σύνθεση του τσιμέντου υπολογίζεται ανάλογα με την αναλογία περιεκτικότητας της αλουμίνης και του οξειδίου του σιδήρου. Ο τύπος Bogue υπολογίζει συνήθως το ποσοστό κάθε ορυκτού του τσιμέντου ως εξής: C3S (αλίτης) (64.7 % κ.β.), C2S (μπελίτης) (12.9 % κ.β.), C3A (αργιλικός) (9.0% κ.β.) και C4AF (φερρίτης) (8.5% κ.β.). Το πρότυπο ASTM καθορίζει τις μέσες τιμές κάθε ορυκτού. Ωστόσο, το πρότυπο KS δεν καθορίζει τέτοιες τιμές και κάθε κατασκευαστής εφαρμόζει κάπως διαφορετικά κριτήρια (Cordeiro et. al., 2009). Πρόκειται για έναν τύπο που μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για την ποιότητα και την σύσταση υλικών, τα οποία στη συνέχεια μπορούν να ανακυκλωθούν ανάλογα με τις δυνατότητες επεξεργασίας και αξιοποίησης που προκύπτουν από τη σύνθεση τους.

## 2.2 Άλλοι τύποι πρόβλεψης και χημικοί παράγοντες

Εκτός από τις ποσοστιαίες τιμές κάθε ορυκτού του τσιμέντου, ιδιότητες όπως ο συντελεστής κορεσμού ασβέστη (LSF), το μέτρο πυριτίας (SM) και το μέτρο σιδήρου (IM) πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την κατασκευή και διαχείριση του κλίνκερ στην παραγωγή τσιμέντου και ανακυκλωμένου τσιμέντου. Ο LSF εκφράζει τη μέγιστη ποσότητα CaO που μπορεί να συνδυαστεί με όξινα συστατικά, όπως SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, κατά τη διάρκεια της κανονικής καύσης και ψύξης ενός κλίνκερ. Ο βαθμός καύσης του κλίνκερ υποδεικνύεται από την ποσότητα του μη αντιδρώντος CaO, δηλαδή του ελεύθερου ασβέστη (Amin, 2011).

Εάν υπάρχει μικρή ποσότητα ελεύθερου ασβέστη, μπορεί να εκτιμηθεί ότι η πύρωση ήταν επαρκής. Όταν ο LSF είναι χαμηλός, ακόμη και αν η πύρωση στον κλίβανο ήταν επαρκής, η μείωση του C3S μπορεί επίσης να μειώσει την αρχική αντοχή. Αντίθετα, όταν ο LSF είναι υψηλός, ακόμη και αν αυξηθεί η θερμοκρασία ή η περίοδος πύρωσης, η πύρωση μπορεί να είναι δύσκολη και να παραμείνει ελεύθερος ασβέστης. Ωστόσο, η αύξηση του C3S βελτιώνει την αρχική αντοχή και ο LSF πρέπει να είναι αρκετά υψηλός για την κατασκευή τσιμέντου με υψηλή περιεκτικότητα σε C3S. Το κατάλληλο εύρος του LSF είναι 0,92-0,96 και το καλής ποιότητας κλίνκερ περιέχει 1,0-1,5 % κ.β. ελεύθερου ασβέστη (Sampathrajan et. al., 1992).

Το SM είναι μια σημαντική τιμή που επηρεάζει την ποιότητα του κλίνκερ καθώς και τη συμπεριφορά του μίγματος στον περιστροφικό κλίβανο όπου το κλίνκερ πυρώνεται. Εάν το SM αυξάνεται, το μείγμα των υλικών καθίσταται δύσκολο να πυρωθεί, με αποτέλεσμα την ανεπαρκή δημιουργία σβόλων και προκαλεί την πτήση της σκόνης στον κλίβανο. Επιπλέον, καθώς η διαδικασία πύρωσης είναι δύσκολη, απαιτείται υψηλότερη θερμοκρασία και καταναλώνεται περισσότερο καύσιμο, γεγονός που καθιστά δύσκολη την κατασκευή τσιμέντου με σταθερή ποιότητα. Όταν το τσιμέντο διαβρώνει τα πυρίμαχα υλικά του κλιβάνου, περιέχει μεγάλη ποσότητα C2S, η οποία καθυστερεί την ανάπτυξη της αντοχής του τσιμέντου. Το βέλτιστο εύρος του SM είναι από 2,3 έως 2,8 (Mahzuz et. al., 2011).

Το IM δείχνει την ποσοτική σχέση μεταξύ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(οξείδιο του αργιλίου) και Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(οξείδιο του σιδήρου). Οποιοδήποτε υλικό με χαμηλό IM διευκολύνει την παραγωγή κλίνκερ, ακόμη και σε χαμηλή θερμοκρασία πύρωσης. Επιπλέον, εάν η τιμή του IM είναι χαμηλή, η περιεκτικότητα σε C3A(αργιλικό) μειώνεται και η περιεκτικότητα σε C4AF(φερρίτη) αυξάνεται, μειώνοντας έτσι την αρχική αντοχή του

τσιμέντου. Ωστόσο, η θερμότητα ενυδάτωσης μειώνεται και η χημική αντοχή αυξάνεται. Αντίθετα, εάν μια ένωση υλικού έχει υψηλό IM, είναι δύσκολο να πυρωθεί, γεγονός που αυξάνει την κατανάλωση καυσίμου, όπως στην περίπτωση υλικού με υψηλό SM. Επιπλέον, δεδομένου ότι το παραγόμενο κλίνκερ είναι σκληρό, απαιτείται σημαντική ενέργεια για τη κονιοποίηση του, αυξάνοντας έτσι το κόστος παραγωγής. Το βέλτιστο εύρος του IM είναι 1,6-2,0. Εκτός από το LSF, το SM και το IM, το οξείδιο του μαγνησίου (MgO), το οποίο περιέχεται στα υλικά, διευκολύνει τη διαδικασία τήξης (από στερεό σε υγρό) ή μειώνει τη θερμοκρασία τήξης, προάγοντας έτσι την πύρωση. Ωστόσο, εάν η περιεκτικότητα σε MgO είναι πολύ υψηλή, μπορεί να εμφανιστεί διαστολή της υγρασίας κατά τη σκλήρυνση του σκυροδέματος. Για το λόγο αυτό, το πρότυπο KS ορίζει ως ανώτατο όριο MgO το 5 % κ.β (Xu et. al., 2012).

Τα ανόργανα κατασκευαστικά απόβλητα που αναλύθηκαν στην παρούσα μελέτη δεν παρουσίασαν σημαντικές διαφορές στη χημική τους σύνθεση από εκείνα που συλλέχθηκαν σε προηγούμενες μελέτες. Κάθε ανόργανο απόβλητο κατασκευών περιείχε κυρίως τα κύρια χημικά συστατικά του τσιμέντου, συμπεριλαμβανομένων των CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Τα απόβλητα υλικών οροφής και τα απόβλητα γυψοσανίδων φάνηκαν να είναι κατάλληλα υποκατάστατα του CaO για την παρασκευή τσιμέντου, γεγονός που συμφωνούν με τα αποτελέσματα που αναφέρθηκαν σε προηγούμενες μελέτες (Xu et. al., 2012).

### 2.3 Αναλύσεις ανόργανων κατασκευαστικών αποβλήτων και θεωρητικοί συνδυασμοί

Η παρούσα μελέτη συνδύασε διάφορα ανόργανα κατασκευαστικά απόβλητα με έμφαση στην επίτευξη βέλτιστων περιεκτικότητας CaO και C<sub>2</sub>S, οι οποίες σχετίζονται στενά με την αντοχή του τσιμέντου και αποτελούν σημαντικούς παράγοντες επιρροής στη δημιουργία πυριτικών ενώσεων ασβεστίου, όπως C<sub>3</sub>S και C<sub>2</sub>S. Στόχος της παρούσας μελέτης ήταν η ανάπτυξη φιλικού προς το περιβάλλον, ανακυκλωμένου τσιμέντου με συνδυασμό ανόργανων κατασκευαστικών αποβλήτων σε κατάλληλες αναλογίες. Κατά συνέπεια, εξετάσαμε θεωρητικούς συνδυασμούς ανόργανων κατασκευαστικών αποβλήτων στους οποίους οι αναλογίες ασβεστόλιθου ορίστηκαν σε 75, 80 και 85 % κ.β. προκειμένου να καθορίσουμε πως ο ασβεστόλιθος που περιέχει σημαντικό ποσοστό CaCO<sub>3</sub>(ανθρακικό ασβέστιο) θα μπορούσε θεωρητικά να μειωθεί, ώστε να μειωθούν οι εκπομπές CO<sub>2</sub> που παράγονται από την αποκαρβοξυλίωση. Σε σύγκριση με τον ασβεστόλιθο (φυσικός πόρος), τα απόβλητα υλικών οροφής και τα απόβλητα γυψοσανίδων αποδείχθηκε ότι περιέχουν παρόμοια επίπεδα CaO (Nair et. al., 2006).

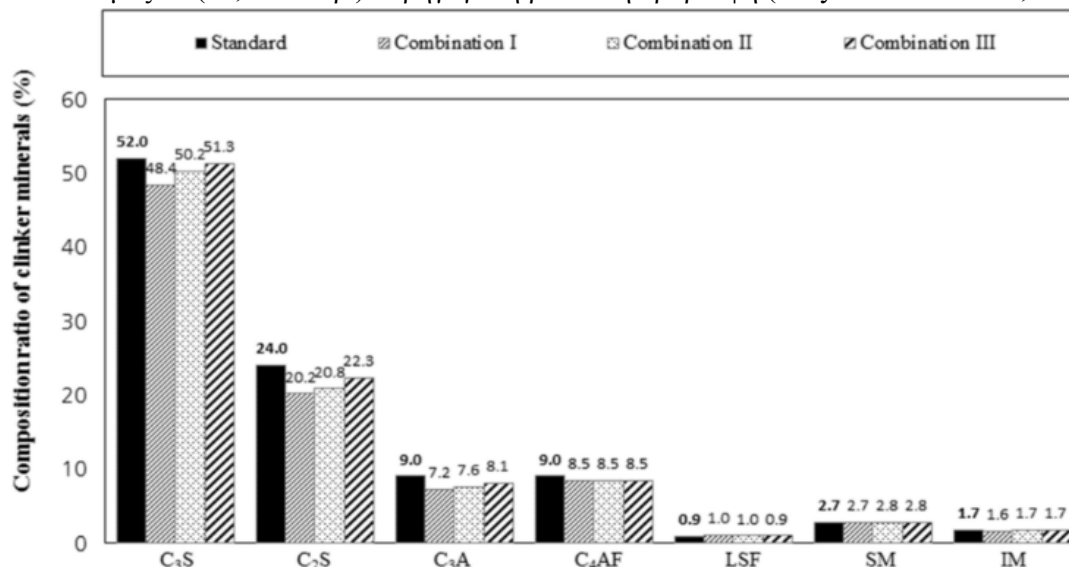
Ωστόσο, τα υλικά αυτά περιείχαν σημαντικά περισσότερο τριοξείδιο του θείου (SO<sub>3</sub>) από ό,τι άλλα ανόργανα απόβλητα κατασκευών. Το ζήτημα αυτό έπρεπε να ληφθεί υπόψη ως μεταβλητή κατά την πρόβλεψη της ορυκτολογικής σύνθεσης με τη χρήση του τύπου Bogue. Κατά συνέπεια, η υποκατάσταση του ασβεστόλιθου με απόβλητα υλικών οροφής και απόβλητα γυψοσανίδων ήταν κατώτερη των προσδοκιών μας. Τα απόβλητα τσιμεντόλιθων και τα απόβλητα σκυροδέματος σε σκόνη περιείχαν μικρή ποσότητα CaO, όπως αποδείχθηκε σε προηγούμενες μελέτες, αλλά περιείχαν σημαντική ποσότητα SiO<sub>2</sub>. Για το λόγο αυτό, τα υλικά αυτά δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στους θεωρητικούς συνδυασμούς (Suvimol & Daunguedee, 2008).

Τα απόβλητα κεραμιδιών και τα απόβλητα τούβλων αναμενόταν να έχουν και τα δύο μεγάλη ποσότητα πυριτικών υλικών. Ωστόσο, στην παρούσα μελέτη, το απόβλητο κεραμίδι εφαρμόστηκε στον θεωρητικό συνδυασμό, καθώς περιείχε περισσότερο CaO και λιγότερο SiO<sub>2</sub>. Όταν πραγματοποιήσαμε

τις προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας τα τέσσερα κύρια ορυκτά (C3S, C2S, C3A και C4AF), δεν παρουσιάστηκαν προβλήματα παρά την προσθήκη ενός βιομηχανικού υποπροϊόντος, όπως η σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου. Ωστόσο, οι τιμές των LSF, SM και IM, οι οποίες χρησιμοποιούνται συμβατικά στην κατασκευή και διαχείριση τσιμέντου, προβλέφθηκε ότι θα υπερβούν τα βέλτιστα εύρη τους. Κατά συνέπεια, έπρεπε να εξεταστεί η χρήση σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου, η οποία περιέχει μεγάλη ποσότητα διοξειδίου του σιδήρου (Fe2O3), ως τροποποιητή σύνθεσης, προκειμένου να μειωθούν οι LSF, SM και IM. Όταν προστέθηκαν περίπου 2,7 % κ.β. σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου στο μείγμα, οι τιμές των παραμέτρων-στόχων σταθεροποιήθηκαν με συνέπεια η σκωρία να συμπεριληφθεί σε σταθερή τιμή σε κάθε συνδυασμό (Li, Y. et. al., 2000). Με την δυνατότητα ελέγχου των μεγίστων τιμών LSF, SM και IM, προκύπτει ότι τα απόβλητα κεραμιδιών και τούβλων μπορούν να αξιοποιηθούν ως ανακυκλώσιμα υλικά για την παραγωγή τσιμέντου.

## 2.4 Ανάλυση των ορυκτών κλίνκερ με τη χρήση του τύπου Bogue

Η παρούσα μελέτη συνδύασε διαφορετικά ανόργανα απόβλητα κατασκευών εφαρμόζοντας τις τιμές ορυκτής σύστασης που καθορίζονται για το κοινό τσιμέντο Πόρτλαντ, οι οποίες είναι ευρέως αποδεκτές από τους κατασκευαστές τσιμέντου της Νότιας Κορέας. Η ορυκτολογική σύνθεση του κλίνκερ, η οποία θα παραγόταν από μια πραγματική διαδικασία πύρωσης χρησιμοποιώντας τις αναλογίες ανάμιξης, προβλέφθηκε και αναλύθηκε χρησιμοποιώντας τον τύπο Bogue. Όσον αφορά το C3S, το οποίο είναι ο παράγοντας με τη μεγαλύτερη επιρροή όσον αφορά την αρχική αντοχή, ο συνδυασμός III (51,27 % κ.β.) παρήγαγε τη βέλτιστη πρόβλεψη (Panyakaew & Fotios, 2008).



**Εικόνα 3. Οι προβλεπόμενες συνθέσεις των ορυκτών συστατικών του κλίνκερ.**

Οι υπόλοιποι δύο συνδυασμοί (συνδυασμός I: 48,38 % κ.β., συνδυασμός II: 50,23 % κ.β.) δεν πληρούσαν την τιμή αναφοράς για C3S (52 % κ.β.). Ο C2S συμβάλλει πιο σημαντικά στη μακροπρόθεσμη αντοχή από ό,τι στην αρχική αντοχή και έχει τόσο χαμηλή αντιδραστικότητα όσο και χαμηλές θερμίδες. Και οι τρεις προσομοιωμένοι συνδυασμοί δεν κατάφεραν να επιτύχουν την τιμή αναφοράς του C2S (συνδυασμός I: 20,15 % κ.β., συνδυασμός II: 20,82 % κ.β., συνδυασμός III: 22,34 % κ.β.). Επιπλέον, η τιμή αναφοράς του C3A, το οποίο είναι ιδιαίτερα αντιδραστικό και έχει πολύ υψηλές θερμίδες, δεν ικανοποιήθηκε σε κανέναν από τους τρεις συνδυασμούς (συνδυασμός I: 7,15 % κ.β., συνδυασμός II: 7,61 % κ.β., συνδυασμός III: 8,12 % κ.β.). Αντίθετα, το C4AF προβλεπόταν να



υπερβεί την τιμή αναφοράς του. Όσον αφορά το LSF και το IM, ο συνδυασμός III (LSF: 0,94, IM: 1,74) παράγαγε την καλύτερη πρόβλεψη σε σύγκριση με τις τιμές αναφοράς. Όσον αφορά το SM, ο συνδυασμός I (SM: 2,7) παρουσίασε το καλύτερο αποτέλεσμα. Συνολικά, ο συνδυασμός III παρείχε τα καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την προσέγγιση του κοινού τσιμέντου Πόρτλαντ, το οποίο ελήφθη ως πρότυπο, επειδή προέβλεψε τα υψηλότερα επίπεδα C3S και C2S, τα οποία επηρεάζουν την αρχική και τη μακροπρόθεσμη αντοχή, αντίστοιχα. Ο συνδυασμός II κατατάχθηκε δεύτερος, ενώ ο συνδυασμός I ήρθε τελευταίος (Pappu et. al., 2007).

## 2.5 Ανάλυση και συζήτηση των προβλέψεων της ορυκτής σύνθεσης

Η ορυκτολογική σύνθεση του κλίνκερ, το οποίο παράγεται με πύρωση, προβλέφθηκε και αναλύθηκε με την εφαρμογή του τύπου Bogue και τα αποτελέσματα αποκάλυψαν ότι, εκτός εάν η περιεκτικότητα του τσιμέντου σε ασβεστόλιθο ήταν μεγαλύτερη από 85 % κ.β., οι τιμές αναφοράς της ορυκτολογικής σύστασης που απαιτούνται από τους κατασκευαστές τσιμέντου δεν μπορούσαν να επιτευχθούν στις θεωρητικές προσομοιώσεις. Με άλλα λόγια, ήταν απαραίτητη η αύξηση του ποσοστού του φυσικού ασβεστόλιθου ή των ανόργανων οικοδομικών αποβλήτων που περιείχαν κάποια ποσότητα CaO, προκειμένου να επιτευχθούν ικανοποιητικές αναλογίες ανάμιξης C3S και C2S (Lertsatitthanakorn et. al., 2009).

Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκαν απόβλητα υλικών οροφής και απόβλητα γυψοσανίδων ως υποκατάστατα του ασβεστόλιθου. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, παρόλο που αυτά τα απόβλητα υλικά περιείχαν σχεδόν το ίδιο επίπεδο CaO με τον ασβεστόλιθο, περιείχαν επίσης υπερβολική ποσότητα SO<sub>3</sub>. Για το λόγο αυτό, ο τύπος Bogue δεν μπορούσε να προβλέψει επαρκή τιμή C3S. Κατά συνέπεια, το ζήτημα του SO<sub>3</sub> πρέπει να εξεταστεί σε μεγαλύτερο βάθος σε μελλοντικές μελέτες σχετικά με το ανακυκλωμένο τσιμέντο. Εάν το SO<sub>3</sub> απομακρυνθεί από αυτά τα υλικά με περαιτέρω επεξεργασία και αυξηθεί η περιεκτικότητα σε CaO, η δυνατότητα εφαρμογής των αποβλήτων υλικών οροφής και των αποβλήτων γυψοσανίδων στην ανάπτυξη ανακυκλωμένου τσιμέντου θα αυξηθεί σημαντικά (Suvimol & Daungruedee, 2008).

## 2.6 Αναμενόμενα αποτελέσματα από την ανάπτυξη ανακυκλωμένου τσιμέντου

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενες μελέτες, τα ανόργανα απόβλητα κατασκευών περιέχουν τα κύρια χημικά συστατικά του τσιμέντου και μπορούν να αποτελέσουν καλά υποκατάστατα των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή τσιμέντου. Ωστόσο, κάθε ανόργανο κατασκευαστικό απόβλητο παράγεται σε διαφορετικό χρόνο και τόπο με διαφορετικές μεθόδους. Κατά συνέπεια, αυτά τα απόβλητα δεν παρουσιάζουν ομοιόμορφη χημική σύνθεση και συχνά περιέχουν πολλές προσμίξεις. Παρόλο που παράγεται ήδη ανακυκλωμένο τσιμέντο, οι εν λόγω προσμίξεις θα αποτελέσουν εμπόδιο στην επίτευξη ομοιόμορφης ποιότητας του προϊόντος και μπορεί να καταστήσουν τη διαχείριση της ποιότητας δύσκολη (Korjenic et. al., 2011).

Για να αντιμετωπιστεί το ζήτημα αυτό, πρέπει να βελτιωθεί το σύστημα διαχείρισης για όλους τους εμπλεκόμενους φορείς που εμπλέκονται στη διαδικασία, από τα εργοτάξια που απορρίπτουν τα απόβλητα μέχρι τις αϋλές συλλογές και το στάδιο της μεταφοράς. Οι βελτιώσεις αυτές θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν ένα νέο εγχειρίδιο και ένα σύστημα κινήτρων που θα προωθούσε την αποτελεσματική ταξινόμηση των αποβλήτων κατασκευών και τη μετέπειτα διάθεση με βάση τις

ιδιότητες τους. Εάν τα κατασκευαστικά απόβλητα ταξινομηθούν αποτελεσματικότερα και η συλλογή τους γίνει ταχύτερα, θα είναι δυνατόν να εξασφαλιστούν ομοιόμορφα υποκατάστατα τσιμέντου με μεγαλύτερη προβλεψιμότητα. Επιπλέον, όταν αναπτυχθούν σχετικές τεχνικές για την αξιοποίηση των οικοδομικών αποβλήτων, θα είναι δυνατή η παραγωγή και ανάπτυξη μιας ποικιλίας δευτερογενών δομικών προϊόντων εκτός από το ανακυκλωμένο τσιμέντο στη βιομηχανία δομικών υλικών (Turgut & Algin, 2007).

### 3. Ανάπτυξη δομικών υλικών από αγροτικά απόβλητα

#### 3.1 Πλάκες μορίων

Για την ανάδειξη φιλικών προς το περιβάλλον πλακών μορίων κατασκευάστηκε μία ινοσανίδα χωρίς συνδετικό υλικό από στελέχη βαμβακιού (BCSF) χωρίς χημικά πρόσθετα, της οποίας οι τιμές της θερμικής αγωγιμότητας είχαν ισχυρή γραμμική συσχέτιση με την πυκνότητά της. Επιπρόσθετα, η αντοχή εσωτερικής συγκόλλησης (IBS) των πλακών ήταν καλή στο σχετικά χαμηλό επίπεδο πυκνότητας. Ως φιλικό προς το περιβάλλον και ανανεώσιμο υλικό, το BCSF είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογή σε οροφές και τοίχους για εξοικονόμηση ενέργειας.

Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε παραγωγή ινοσανίδας με την προεπεξεργασία σε δέσμες μπανάνας χρησιμοποιώντας μη συνθετικά συνδετικά. Το λιγνοκυτταρινούχο υλικό ανατινάχθηκε με ατμό με θερμομηχανική διεργασία υδατικών ατμών σε αντιδραστήρα παρτίδας. Σε περαιτέρω μελέτη, αναπτύχθηκαν σύνθετες μοριοσανίδες με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα που παράγονται από ένα μείγμα στερεών αποβλήτων από την παραγωγή χαρτιού ιστού και φλούδας καλαμποκιού, καθώς επίσης και μοριοσανίδες χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας με βελτιστοποιημένη αναλογία μίγματος φλούδας ντούριαν και κοκοφοίνικα (Turgut & Algin, 2007).

Διερευνήθηκαν δύο παράμετροι, η αναλογία μίγματος φλούδας ντούριαν και κοκοφοίνικα/καρύδα και η πυκνότητα της πλάκας. Στα αποτελέσματα παρατηρήθηκε ότι το μείγμα των μοριοσανίδων με βάση είτε την durian είτε την καρύδα έχει καλύτερες θερμικές και μηχανικές ιδιότητες. Κατασκευάστηκαν μοριοσανίδες από πέντε διαφορετικά αγροτικά απόβλητα (φλοιός αραβοσίτου, άχυρο, κολοκύθα αραβοσίτου, κοκοφοίνικα/καρύδα και κέλυφος αραχίδας) χρησιμοποιώντας ως συνδετικό υλικό ρητίνη ουρίας-φορμαλδεΰδη (ρητίνη UF ή κόλλα UF) επίσης γνωστή και ως καουρίτης και αξιολογήθηκαν οι μηχανικές και θερμικές ιδιότητες των σανίδων. Αρκετοί ερευνητές είχαν αναπτύξει διάφορες μοριοσανίδες με βάση τα αγροτικά απόβλητα και ως εκ τούτου τα αξιολογούμενα φυσικά μηχανικά αποτελέσματα – όπως η πυκνότητα, το πάχος, το μέτρο ελαστικότητας (MOE), το μέτρο θραύσης (MOR), η απορρόφηση νερού και η θερμική αγωγιμότητα – να έχουν μελετηθεί περαιτέρω (Korjenic et. al., 2011).

#### 3.2 Θερμομονωτικά υλικά

Τα κτίρια είναι λιγότερο ικανά να ελέγχουν το εσωτερικό περιβάλλον σε άνετες συνθήκες χωρίς μηχανικό κλιματισμό με αποτέλεσμα η μοναδική τεχνική για τη μείωση της κλίμακας του κλιματισμού να είναι η εφαρμογή θερμομόνωσης στους τοίχους και τις οροφές. Πραγματοποιήθηκε

μελέτη της κατασκευής *tabique* (πορτογαλικές παραδοσιακές τεχνικές δόμησης) και μια πειραματική εργασία κατέληξε στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν σημαντικές ομοιότητες μεταξύ του κόκκου του καλαμποκιού και του υλικού εξηλασμένης πολυστερίνης όσον αφορά τη μικροδομή και τη χημική σύνθεση (Sundarraaj & Ranganathan, 2018).

Επιπλέον, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο κόκκος του καλαμποκιού μπορεί να έχει επαρκείς θερμικές ιδιότητες για οικοδομικούς σκοπούς. Διεξήχθη έρευνα για την ανάπτυξη ενός νέου μονωτικού υλικού από ανανεώσιμες πηγές (λινάρι και κάνναβη) με συγκρίσιμες οικοδομικές, φυσικές και μηχανικές ιδιότητες με τα συνήθως χρησιμοποιούμενα μονωτικά υλικά. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι ο σωστός συνδυασμός φυσικών υλικών είναι απολύτως συγκρίσιμος με τα συμβατικά υλικά και για τον σκοπό αυτό ελέγχθηκαν οι θερμικές ιδιότητες σύνθετων υλικών τσιμέντου ενισχυμένων με ίνες φυτικής βαγιάσης (Sundarraaj & Ranganathan, 2018).

Οι πειραματικές έρευνες αποκάλυψαν ότι η προσθήκη ινών από ραφινάρισμα βιάσης μειώνει τη θερμική αγωγιμότητα των σύνθετων υλικών και αποδίδει ασθενέστερη ειδική θερμότητα. Υπάρχουν διάφορα πιθανά υλικά, όπως μπαγάση, φλοιός ρυζιού, κοκοφοίνικας καρύδας, μίσχος καλαμποκιού, φλούδα ντούριαν και φύλλα φοινικέλαιου. Μεταξύ των αγροτικών αποβλήτων που μελετήθηκαν παρατηρήθηκε ότι η μπαγάση, ο φλοιός ρυζιού και ο κοκοφοίνικας έχουν χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα και καθίστανται ως προτιμότερα (Sundarraaj & Ranganathan, 2018).

### 3.3 Σύνθετα υλικά τοιχοποιίας / τούβλα

Για την δημιουργία σύνθετων υλικών τοιχοποιίας και τούβλων χρησιμοποιήθηκαν απόβλητα χαρτοβιομηχανίας και βαμβακερά απόβλητα, όπου παρασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν με διαφορετική περιεκτικότητα σε βαμβακερά απόβλητα από 1% έως 5% κατά βάρος, ανακυκλωμένα απόβλητα χαρτοβιομηχανίας από 85% έως 89% κατά βάρος και σταθερή περιεκτικότητα σε τσιμέντο Πόρτλαντ. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα τούβλα είναι θερμικά σταθερά και πληρούν το πρότυπο ενώ διερευνήθηκε η επίδραση της προσθήκης άκαυστου φλοιού ελιάς σε αργιλικά τούβλα ως προς τις θερμομηχανικές τους ιδιότητες. Για τον σκοπό αυτό, η ποσότητα του φλοιού που προστέθηκε μεταβλήθηκε, μαζί με τη θερμοκρασία ξήρανσης (Sundarraaj & Ranganathan, 2018).

Το δοκίμιο σημείωσε χαμηλότερα αποτελέσματα θερμικής αγωγιμότητας από τα συμβατικά τούβλα αργίλου. Παράχθηκαν ελαφριά τούβλα από τα μίγματα πυροσυσσωμάτωσης αποξηραμένης ιλύος επεξεργασίας νερού και φλοιού ρυζιού. Τα δείγματα που περιείχαν έως και 20 % φλοιό ρυζιού είχαν ψηθεί χρησιμοποιώντας ένα πρόγραμμα θέρμανσης που επιτρέπει την αποτελεσματική οργανική καύση. Παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη φλοιού ρυζιού κάτω του 15% και η πυροσυσσωμάτωση στους 1100° C (βαθμούς κελσίου) παρήγαγε τούβλα χαμηλής πυκνότητας και σχετικά υψηλής αντοχής που συμμορφώνονται με τα σχετικά πρότυπα της Ταϊβάν για τα ελαφριά τούβλα. Στην συνέχεια, αναπτύχθηκαν τούβλα από τα απόβλητα τέφρας φλοιού ρυζιού (RHA-Rice Husk Ash) και σφαιρίδια διογκωμένης πολυστερίνης (EPS-Styropan Graphite). Η RHA χρησιμοποιήθηκε ως μερική αντικατάσταση του τσιμέντου, ενώ το EPS χρησιμοποιήθηκε ως μερική αντικατάσταση των αδρανών στα μίγματα. Διερευνήθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες των τούβλων κι διαπιστώθηκε ότι οι ιδιότητες των τούβλων επηρεάστηκαν κυρίως από την περιεκτικότητα του EPS και του RHA στο μίγμα, καθώς και από τις συνθήκες ωρίμανσης που χρησιμοποιήθηκαν (Sundarraaj & Ranganathan, 2018).

Αναπτύχθηκε ένας συνδυασμός άμμου-τσιμέντου με βάση την τέφρα φλοιού ρυζιού και η απόδοσή του συγκρίθηκε με εκείνη ενός τυπικού εμπορικού τούβλου από άργιλο. Προέκυψε ότι το μπλοκ άμμου-τσιμέντου με βάση το RHA μειώνει τη μεταφορά ηλιακής θερμότητας κατά 46 W με

αποτέλεσμα να χρησιμοποιηθούν διάφορα οργανικά υπολείμματα που έχουν μακριές ίνες κυτταρίνης, όπως πριονίδι, υπολείμματα καπνού σε τούβλα αργίλου (Quintana et. al., 2009).

Το αποτέλεσμα έδειξε ότι η θερμομονωτική ικανότητα του τούβλου αυξάνεται με την αύξηση του πορώδους αργιλικού σώματος και επίσης παρατηρήθηκε ότι η ινώδης φύση του υπολείμματος δεν δημιουργούσε προβλήματα εξώθησης. Ως αποτέλεσμα, τα πριονίδια, τα υπολείμματα καπνού και το γρασίδι μπορούν να χρησιμοποιηθούν με περιβαλλοντικά ασφαλή τρόπο ως οργανικοί παράγοντες σχηματισμού πόρων σε τούβλα από άργιλο. Χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός αποβλήτων βαμβακιού (CWs) - αποβλήτων ασβεστολιθικής σκόνης (LPWs) και ένας συνδυασμός αποβλήτων πριονιδιού ξύλου (WSWs) για την παραγωγή χαμηλού κόστους και ελαφρού σύνθετου υλικού ως δομικό υλικό. Οι λαμβανόμενες τιμές θλιπτικής αντοχής, αντοχής σε κάμψη, ταχύτητας παλμού υπερήχων (UPV), μοναδιαίου βάρους και απορρόφησης νερού ικανοποιούν τα σχετικά διεθνή πρότυπα (Sundarraaj & Ranganathan, 2018).

Το αποτέλεσμα είναι ένα ανθεκτικό σύνθετο υλικό ελαφρύτερου βάρους που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τοίχους, υποκατάστατο ξύλινων σανίδων, οικονομικά εναλλακτική λύση για τους τσιμεντόλιθους, πάνελ οροφής, πάνελ ηχοπετάσματος κ.λπ. Αναπτύχθηκαν τούβλα από μίγματα πηλού-άμμου με διαφορετικά ποσοστά τέφρας φλοιού ρυζιού και διερευνήθηκαν οι επιδράσεις της περιεκτικότητας της τέφρας φλοιού ρυζιού στην περιεκτικότητα σε νερό ανάμιξης, στη γραμμική συρρίκνωση, στην πυκνότητα, στη θλιπτική αντοχή και στην απορρόφηση νερού των τούβλων. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι η αντοχή σε θλίψη των τούβλων ήταν υψηλότερη με την περιεκτικότητα σε τέφρα φλοιού ρυζιού. Οι επιδόσεις των διαφόρων αγροτικών αποβλήτων που αξιολογήθηκαν από τις κοινές δοκιμές της αντοχής σε θλίψη, της απορρόφησης νερού και του ειδικού βάρους μελετώνται περαιτέρω (Rahman et. al., 2011).

### 3.4 Υλικά τσιμεντοποιίας / συνδετικά υλικά

Ως υλικό τσιμεντοποιίας περιγράφεται αρχικά το απόβλητο προϊόν των βιομηχανιών ζάχαρης ως υποκατάστατο τσιμέντου στο σκυρόδεμα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η τέφρα μαπαγάσης (BA) είναι ένα αποτελεσματικό ορυκτό πρόσμικτο και ποζολάνης με αρχική αναλογία 20% τσιμέντου που μείωσε τη διάχυση χλωριόντων κατά περισσότερο από 50% χωρίς δυσμενείς επιπτώσεις σε άλλες ιδιότητες του σκληρωμένου σκυροδέματος. Αναφορές δείχνουν ότι η αλεσμένη τέφρα, με ποσοστά κατακράτησης στο κόσκινο αριθμού 325 στο εύρος 3-28, χρησιμοποιήθηκαν ως υποκατάστατο τσιμέντου στο εύρος 20-40%. Επιπρόσθετα, σύμφωνα με έρευνες η διαστολή και η απώλεια της θλιπτικής αντοχής μειώθηκαν όταν αυξήθηκε η λεπτότητα της τέφρας από καύσιμο φοινικέλαιο (POFA – Palm Oil Fuel Ash) (Sengupta, 2002).

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το αλεσμένο POFA θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως ποζολανικό υλικό και θα μπορούσε επίσης να βελτιώσει την αντοχή του σκυροδέματος στα θεϊκά άλατα. Χρησιμοποιήθηκε τέφρα φλοιού ρυζιού (RHA – Rice Husk Ash) ως υλικό αντικατάστασης του τσιμέντου και τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι η βέλτιστη ποσότητα RHA αυξάνει τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος. Κατά συνέπεια, μελετήθηκε η μικροδομή του RHA από την ανάλυση της περίθλασης ακτίνων X (XRD) όπως και τα αποτελέσματα των δοκιμών αντοχής σε θλίψη, ενώ παρατηρήθηκε ότι η βέλτιστη θερμοκρασία καύσης για την απόκτηση υψηλής αντιδραστικότητας RHA είναι 600° C. Έτσι, το RHA μπορεί να αντικαταστήσει εν μέρει το τσιμέντο ως ορυκτό πρόσμικτο για κατασκευαστικούς σκοπούς. Άλλες έρευνες επίσης αναφέρουν ότι η προσθήκη RHA ενισχύει την αντοχή και μειώνει την απορρόφηση νερού του σκυροδέματος (Sengupta, 2002).

Αξίζει επίσης να αναφέρουμε ότι χρησιμοποιήθηκε τέφρα από κόκκους καλαμποκιού (CCA – Corn Cob Ash) ως ποζολανικό υλικό για την παραγωγή τσιμέντου. Η εργοστασιακή παραγωγή του τσιμέντου με μείγμα CCA πραγματοποιήθηκε με την αντικατάσταση του συνηθισμένου κλίνκερ τσιμέντου πόρτλαντ με CCA. Το τσιμέντο που αναπτύχθηκε ικανοποιεί τόσο τις απαιτήσεις της NIS 439:2000 όσο και της ASTM C 150. Διερευνήθηκαν οι επιδράσεις της περιεκτικότητας σε τέφρα μπαγάσας BA ως μερικής αντικατάστασης του τσιμέντου στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος. Οι ιδιότητες του σκυροδέματος που διερευνήθηκαν περιλαμβάνουν την αντοχή σε θλίψη, την αντοχή σε εφελκυσμό διάσπασης, την απορρόφηση νερού, τη χαρακτηριστική διαπερατότητα, τη διάχυση χλωριόντων και την αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων (Ramamamy & Biswas 2008).

Τα αποτελέσματα των δοκιμών δείχνουν ότι η τέφρα μπαγάσας BA είναι ένα αποτελεσματικό ορυκτό πρόσμικτο, με 20% ως βέλτιστη αναλογία αντικατάστασης του τσιμέντου και κατά συνέπεια διερευνήθηκαν οι φυσικές ιδιότητες του σκυροδέματος που περιέχει εδαφικό BA, συμπεριλαμβανομένης της θλιπτικής αντοχής, της υδατοδιαπερατότητας και της εξέλιξης της θερμότητας. Η τέφρα μπαγάσας από ένα εργοστάσιο ζάχαρης αλέστηκε με τη χρήση σφαιρόμυλου μέχρι τα σωματίδια να συγκρατηθούν σε ένα κόσκινο αριθμού 325 τα οποία ήταν μικρότερα από 5 %. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν ως υποκατάστατο του τσιμέντου Πόρτλαντ τύπου Ι σε 10%, 20% και 30 % του συνδετικού υλικού. Ο λόγος νερού προς συνδετικό υλικό (W/B) και η περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε συνδετικό υλικό διατηρήθηκαν σταθερές σε 0,50 και 350 kg/m<sup>3</sup>, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, στην ηλικία των 28 ημερών, τα δοκίμια σκυροδέματος που περιείχαν 10%-30 % κατά βάρος του συνδετικού υλικού από αλεσμένη μπαγάσα είχαν μεγαλύτερες θλιπτικές αντοχές από το σκυρόδεμα ελέγχου (σκυρόδεμα χωρίς αλεσμένη μπαγάσα), ενώ η υδατοπερατότητα ήταν χαμηλότερη από το σκυρόδεμα ελέγχου. Το σκυρόδεμα που περιείχε 20% αλεσμένη τέφρα μπαγάσας είχε την υψηλότερη αντοχή σε θλίψη στο 113% του σκυροδέματος ελέγχου (Sengupta, 2002).

Η υδατοπερατότητα του σκυροδέματος μειώνεται όσο αυξάνεται η κλασματική αντικατάσταση της τέφρας από αλεσμένη μπαγάσα. Για την εξέλιξη της θερμότητας, η μέγιστη αύξηση της θερμοκρασίας του σκυροδέματος που περιέχει τέφρα από αλεσμένη μπαγάσα ήταν χαμηλότερη από το σκυρόδεμα ελέγχου, γεγονός που οδήγησε στην διαπίστωση ότι η μέγιστη αύξηση της θερμοκρασίας του σκυροδέματος μειώθηκε κατά 13%, 23% και 33% σε σύγκριση με το σκυρόδεμα ελέγχου όταν το τσιμέντο αντικαταστάθηκε από τέφρα αλεσμένης μπαγάσας σε ποσοστό 10%, 20% και 30 % κατά βάρος συνδετικού υλικού, αντίστοιχα (Sengupta, 2002).

Σύμφωνα με έρευνες η ενσωμάτωση μιας εξαιρετικά λεπτόκοκκης τέφρας σε ένα σκυρόδεμα υψηλών επιδόσεων για μερική αντικατάσταση του τσιμέντου Πόρτλαντ δεν είχε ως αποτέλεσμα καμία μετρήσιμη αλλαγή στη μηχανική συμπεριφορά, αλλά βελτίωσε τη ρεολογία και την αντίσταση στη διείσδυση ιόντων χλωρίου. Διερευνήθηκαν οι επιδράσεις της ποζολάνης αγροτοβιομηχανικού υποπροϊόντος στις μηχανικές ιδιότητες σκυροδέματος υψηλής αντοχής και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα αγροτικά απόβλητα και τα υποπροϊόντα τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υποκατάστατο του τσιμέντου πορτλάντ για την παραγωγή σκυροδέματος υψηλής αντοχής χωρίς μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος (Sengupta, 2002).

Χρησιμοποιήθηκε τέφρα μπαγάσας (BA) ως ποζολανικό υλικό για την παραγωγή σκυροδέματος υψηλής αντοχής. Τα μίγματα σκυροδέματος, εν μέρει, αντικαταστάθηκαν με 10%, 20% και 30% BA αντίστοιχα. Προσδιορίστηκαν η αντοχή σε θλίψη, το πορώδες, ο συντελεστής απορρόφησης νερού, η ταχεία διείσδυση χλωριόντων και η διάχυση χλωριόντων του σκυροδέματος και τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι η ενσωμάτωση BA μέχρι 30% επίπεδο αντικατάστασης όχι

μόνο αυξάνει την αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων, αλλά αυξάνει επίσης εύλογα την αντοχή σε θλίψη. Εξετάστηκε η μακροπρόθεσμη αντοχή των διαφόρων σταχτών φλοιού ρυζιού ως ποζολάνη με ασβέστη ή τσιμέντο για να προτείνουν μια βιώσιμη προσιτή επιλογή για αγροτικές κατοικίες στην Ινδία (Raut et. al., 2011).

Σύμφωνα με έρευνες οι θλιπτικές αντοχές που αναπτύχθηκαν από τα μίγματα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με τέφρα μπαγάσας στις 28 ημέρες συγκρίθηκαν με το σκυρόδεμα ελέγχου και η ανάλυση κόστους έδειξε ότι το κόστος των συστατικών του συγκεκριμένου μίγματος αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος ήταν 35,63% μικρότερο από αυτό του σκυροδέματος ελέγχου, και τα δύο είχαν αντοχή σε θλίψη πάνω από 34 MPa. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε τέφρα φλοιού ρυζιού ως παράγοντας τροποποίησης ιξώδους σε αυτοσυμπυκνόμενο σκυρόδεμα (SCC) (Sengupta, 2002).

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα παρατηρήθηκε ότι η δυνατότητα ανάπτυξης SCC χαμηλού κόστους με χρήση RHA είναι εφικτή, και για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε προσομοίωση για να εκτιμηθεί η δυνατότητα μείωσης των εκπομπών CO<sub>2</sub> και η βιωσιμότητα της έκδοσης πιστοποιημένων μονάδων μείωσης εκπομπών (CER). Η προσομοίωση αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της μεθοδολογίας που καθιέρωσε η Σύμβαση-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή (UNFCCC) για τον Μηχανισμό Καθαρής Ανάπτυξης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το τσιμέντο που αναμιγνύεται με τέφρα από μπαγάσας ζαχαροκάλαμου (SCBA) μειώνει τις εκπομπές CO<sub>2</sub> και γενικά βελτιώνει τη συμπεριφορά των τσιμεντοειδών δομικών υλικών. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι αρκετοί ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει διάφορα υποπροϊόντα αγροτικών αποβλήτων ως ποζολανικό/τσιμεντοειδές υλικό σε διάφορες ταξινομήσεις σκυροδέματος, για να αξιολογήσουν φυσικομηχανικές ιδιότητες όπως αντοχή σε θλίψη και απορρόφηση νερού (Sengupta, 2002).

### 3.5 Αδρανή (δομικό υλικό: μικρές πέτρες)

Χρησιμοποιήθηκε το Oil Palm Shell (OPS) ως χονδρόκοκκο αδρανές για δομικό σκυρόδεμα και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χύδην πυκνότητα (η μονάδα όγκου μάζας που μετράται αμέσως μετά το γέμισμα σκόνης σε ένα δοχείο) του σκυροδέματος OPS είναι περίπου 1850 kg/m<sup>3</sup> και η αντοχή σε θλίψη ήταν μεταξύ 20 και 24 N/mm<sup>2</sup> για 28 ημέρες που ικανοποιεί την απαίτηση αντοχής του δομικού ελαφρού σκυροδέματος. Παρασκευάστηκαν κονιάματα και σκυρόδεμα με τέφρα ζαχαροκάλαμου (SCBA) ως υποκατάστατο άμμου και πραγματοποιήθηκαν δοκιμές απόδοσης με τα αποτελέσματα να δείχνουν ότι τα δείγματα SCBA παρουσίασαν φυσικές ιδιότητες παρόμοιες με εκείνες της φυσικής άμμου και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα κονιάματα που παρασκευάστηκαν με SCBA αντί για άμμο παρουσίασαν καλύτερα μηχανικά αποτελέσματα από το συμβατικό κονίαμα (Mannan & Ganapathy, 2004).

### 3.6 Ενίσχυση με ίνες

Οι φυτικές ίνες περιέχουν κυτταρίνη, ένα φυσικό πολυμερές, ως κύριο υλικό ενίσχυσης, της οποίας οι αλυσίδες σχηματίζουν μικροϊνίδια, τα οποία συγκρατούνται από άμορφες ημικυτταρίνες και λιγνίνη που σχηματίζουν ινίδια. Τα ινίδια συναρμολογούνται σε διάφορα στρώματα για τη δημιουργία της δομής της ίνας. Οι ίνες ή τα κύτταρα συγκολλούνται μεταξύ τους στο φυτό από τη λιγνίνη, η οποία μπορεί να διαλυθεί από την αλκαλικότητα της μήτρας του τσιμέντου. Οι φυτικές ίνες μπορούν να

χρησιμοποιηθούν είτε μόνες τους είτε ως ενίσχυση σε διάφορους τύπους μητρών, όπως σύνθετα υλικά εδάφους και τσιμέντου. Κατά γενική ομολογία, συστήνεται η χρήση ινών σιζάλ ως υποσχόμενη ενίσχυση για χρήση σε σύνθετα υλικά λόγω του χαμηλού κόστους, της χαμηλής πυκνότητας, της υψηλής ειδικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας, της μη ύπαρξης κινδύνου για την υγεία, της εύκολης διαθεσιμότητας σε ορισμένες χώρες και της ανανεωσιμότητας (Mannan & Ganapathy, 2004).

Για την περαιτέρω διερεύνηση της καταλληλότητάς τους μελετήθηκε η μεταβολή της χημικής σύνθεσης και η αντοχή σε εφελκυσμό των ινών κοκοφοίνικα, σιζάλ, γιούτα και ιβίσκου, όταν υποβάλλονται σε εναλλασσόμενη διαβροχή και ξήρανση και συνεχή εμβάπτιση για 60 ημέρες σε τρία διαφορετικά μέσα: νερού, κορεσμένου ασβέστη και υδροξειδίου του νατρίου αντίστοιχα. Από τα αποτελέσματα παρατηρήθηκε ότι υπάρχει ουσιαστική μείωση στη χαρακτηριστική χημική σύνθεση και των τεσσάρων ινών, μετά την έκθεση στα διάφορα μέσα. Οι ίνες κοκοφοίνικα βρέθηκε ότι διατηρούν υψηλότερα ποσοστά της αρχικής τους αντοχής από όλες τις άλλες ίνες, μετά την καθορισμένη περίοδο έκθεσης στα διάφορα μέσα (Ganesan et. al., 2007). Οι αντοχές σε θλίψη και κάμψη όλων των δοκιμίων κονιάματος ενισχυμένου με φυσικές ίνες με χρήση διαβρωμένων ινών (δηλαδή των ινών που υποβλήθηκαν σε συνεχή εμβάπτιση/ εναλλασσόμενη διαβροχή και ξήρανση στα παραπάνω μέσα) είναι μικρότερες από τις αντοχές του κονιάματος αναφοράς (δηλαδή χωρίς ίνες) και του δοκιμίου κονιάματος ενισχυμένου με ίνες ενισχυμένου με ξηρές φυσικές ίνες. Χρησιμοποιήθηκε το άχυρο ως ίνα ενίσχυσης σε υλικό σοβά για σοβά τοίχου, συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τρεις τύποι άχυρου, όπως άχυρο σιταριού, άχυρο κριθαριού και ξυλοτεμαχίδια (Mannan & Ganapathy, 2004). Το αποτέλεσμα έδειξε ότι η θερμική αγωγιμότητα των υλικών μειώθηκε με την αύξηση της περιεκτικότητας σε ίνες άχυρου και μειώθηκε με την αύξηση της περιεκτικότητας σε άμμο. Οι ίνες άχυρου έχουν μεγαλύτερη επίδραση στη μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας από την επίδραση της άμμου. Το αποτέλεσμα έδειξε επίσης ότι ο σοβάς ενισχυμένος με ίνες άχυρου κριθαριού έχει τις υψηλότερες τιμές θερμομόνωσης (Mannan & Ganapathy, 2004).

### 3.7 Ενίσχυση με άλλα υλικά

Μελετήθηκε η συμπεριφορά σε τελική φόρτιση δοκών ελαφρού σκυροδέματος ενισχυμένων με μπαμπού και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εφελκυστική αντοχή του μπαμπού είναι σχετικά υψηλή και μπορεί να φτάσει τα 370 MPa, γεγονός που καθιστά το μπαμπού μια ελκυστική εναλλακτική λύση έναντι του χάλυβα σε εφαρμογές εφελκυστικής φόρτισης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο λόγος της εφελκυστικής αντοχής προς το ειδικό βάρος του μπαμπού είναι έξι φορές μεγαλύτερος από αυτόν του χάλυβα. Πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της απόδοσης δοκού οπλισμένου σκυροδέματος από μπαμπού και από τις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης του μπαμπού και παρατηρήθηκε ότι το μπαμπού διαθέτει χαμηλό μέτρο ελαστικότητας σε σύγκριση με τον χάλυβα και δεν μπορεί να αποτρέψει τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος υπό τελική φόρτιση. Όμως, από τη δοκιμή κάμψης της δοκού ενισχυμένης με μπαμπού, παρατηρήθηκε ότι η χρήση μπαμπού ως οπλισμού στο σκυρόδεμα μπορεί να αυξήσει τη φέρουσα ικανότητα της δοκού που έχει τις ίδιες διαστάσεις. Για δοκό από σκυρόδεμα ενισχυμένο με μόνο μπαμπού, η φέρουσα ικανότητα αυξήθηκε περίπου 2 φορές και για δοκό από σκυρόδεμα ενισχυμένο με διπλό μπαμπού περίπου 2,5 φορές σε σχέση με εκείνη της δοκού από απλό σκυρόδεμα που έχει τις ίδιες διαστάσεις (Mannan & Ganapathy, 2004).

Η μέγιστη παραμόρφωση της μονής και της διπλής ενισχυμένης δοκού είναι περίπου 4,5 και 8 φορές μεγαλύτερη αντίστοιχα σε σχέση με εκείνη του απλού σκυροδέματος. Για τον λόγο αυτό μελετήθηκαν οι ιδιότητες αντοχής σύνθετων μελών που αποτελούνται από μπαμπού ενώ

προσδιορίστηκε η αντοχή σε θλίψη του μπαμπού, η αντοχή του σύνθετου υποστρώματος που αποτελείται από μπαμπού και κονίαμα στην κοίλη περιοχή του και η αντοχή του σύνθετου υποστρώματος από μπαμπού και σκυρόδεμα. Για τη διεξαγωγή της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές αναλογίες ανάμιξης και περιοχές διατομής και από τα αποτελέσματα της μελέτης παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν ως βοήθημα από μπαμπού μπορούν να προσφέρουν σεβαστή ποσότητα αντοχής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια για κατοικίες χαμηλού κόστους. Διεξήχθη συγκριτική μελέτη δοκών οπλισμένου σκυροδέματος από μπαμπού με διατμητικούς συνδέσμους από διαφορετικά υλικά. Τα διαφορετικά υλικά συνδετήρων που εξετάστηκαν ήταν το μπαμπού, το μπαστούνι και ο χάλυβας ενώ από τα αποτελέσματα προτάθηκε η ενίσχυση δοκών σκυροδέματος από μπαμπού με χαλύβδινους αναβολείς για να βελτιωθεί η συμπεριφορά τους ως προς τη μεταφορά φορτίων (Ramakrishna & Sundararajan, 2005).

## Συζήτηση - Συμπεράσματα

Παρατηρείται ότι οι ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει διάφορα αγροτικά απόβλητα σε διαφορετικές αναλογίες και έχουν υιοθετήσει διάφορες μεθοδολογίες για την παραγωγή διαφόρων δομικών και σύνθετων υλικών, όπως μοριοσανίδες, θερμομονωτικά πάνελ τοίχου και οροφής, τούβλα και τσιμεντοειδή ποζολάνη για σκυροδέματα. Πραγματοποιήθηκαν διάφορες θερμομηχανικές δοκιμές σε διάφορα υλικά και σύνθετα υλικά σύμφωνα με τα διάφορα διαθέσιμα πρότυπα και οι κοινές παράμετροι που υπολογίστηκαν για τις μοριοσανίδες και τις μονωτικές πλάκες ήταν η πυκνότητα, η MOE, η MOR και η θερμική αγωγιμότητα (Sata et. al., 2007).

Παρατηρείται ότι οι πυκνότητες των μοριοσανίδων που κατασκευάζονται από την ενσωμάτωση αγροτικών αποβλήτων πληρούν τις ελάχιστες απαιτήσεις των προτύπων με τις τιμές θερμικής αγωγιμότητας αυτών των υλικών και των σύνθετων υλικών να κυμαίνονται στο τυπικό εύρος 0,054-0,143 W/mK και να ικανοποιούν τις απαιτήσεις των μονωτικών υλικών. Οι κοινές παράμετροι δοκιμής που υπολογίζονται από τους διάφορους ερευνητές για το τούβλο ή την τοιχοποιία είναι η απορρόφηση νερού και η αντοχή σε θλίψη ενώ το ελάχιστο εύρος που συνιστάται για τη χαρακτηριστική αντοχή σε θλίψη για μη φέροντα και φέροντα συμπαγή οπτόπλινθους είναι 3-5 MPa και 5-10 MPa αντίστοιχα. Ο κώδικας IS ορίζει επίσης ότι η υδατοαπορροφητικότητα του τούβλου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 20% κατά βάρος (Sata et. al., 2007).

Παρατηρείται ότι όλα τα τούβλα που ενσωματώνουν αγροτικά απόβλητα ικανοποιούν το κριτήριο της αντοχής σε θλίψη, ενώ η τιμή απορρόφησης νερού υπερβαίνει ελαφρώς την απαίτηση του IS 1077:1992 και χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση. Η κοινή παράμετρος που απαιτείται για τη χρήση οποιουδήποτε υλικού ως ορυκτού πρόσμικτου ή ποζολάνης εξαρτάται από το ποσοστό πυριτίου στο παραπροϊόν του. Τα υποπροϊόντα καμένων υπολειμμάτων ποιότητας σύμφωνα με το πρότυπο IS 456:2000 μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ποζολάνη στην κατασκευή σκυροδέματος, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχουν ικανοποιητικά στοιχεία για την καταλληλότητά τους, όπως δοκιμή επιδόσεων σε σκυρόδεμα που περιέχει το εν λόγω υπόλειμμα (Sata et. al., 2007).

Η δοκιμή απόδοσης που διεξήχθη σε σκυροδέματα που περιέχουν διάφορες αναλογίες διαφόρων υπολειμμάτων αγροτικών αποβλήτων έδειξε ότι η χαρακτηριστική αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος ενισχύεται, ενώ η επίδραση χημικών επιθέσεων όπως τα χλωριούχα και θειικά άλατα μειώνεται. Η συνολική απόδοση και η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος ενισχύεται με την προσθήκη καμένων υπολειμμάτων αγροτικών αποβλήτων και ο σκοπός της ενίσχυσης με ίνες είναι η βελτίωση



των ιδιοτήτων ενός δομικού υλικού, ενώ το κύριο μειονέκτημα της χρήσης των φυσικών ινών είναι η ανθεκτικότητα των ινών αυτών σε μια τσιμεντοειδή μήτρα.

Τα αλκαλικά μέσα αποδυναμώνουν τις πιο φυσικές ίνες, ιδίως τις φυτικές, οι οποίες είναι στην πραγματικότητα κλώνοι από μεμονωμένα νήματα που μπορούν να διαχωριστούν μεταξύ τους. Η σοβαρή υποβάθμιση των εκτεθειμένων σύνθετων υλικών μπορεί επίσης να αποδοθεί σε επιφανειακές βλάβες που οφείλονται στις συνεχείς μεταβολές του όγκου των πορωδών φυτικών ινών στο εσωτερικό της μήτρας τσιμέντου. Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις για τη βελτίωση της ανθεκτικότητας των φυτικών ινών: μία βασίζεται στην προστασία των ινών με επικάλυψη ή σφράγιση του ξηρού σύνθετου υλικού για την αποφυγή της επίδρασης του νερού, κυρίως της αλκαλικότητας ενώ η άλλη προσέγγιση είναι η μείωση των ελεύθερων αλκαλίων στη μήτρα με την ανάπτυξη συνδετικών υλικών χαμηλής αλκαλικότητας με βάση βιομηχανικά και γεωργικά υποπροϊόντα. Η κατανάλωση δομικών στοιχείων από ινοπλισμένο τσιμέντο αυξάνεται ραγδαία ειδικά στις αναπτυσσόμενες χώρες, διότι με αυτό το είδος υλικού είναι δυνατή η παραγωγή ελαφρών δομικών στοιχείων, με καλές μηχανικές επιδόσεις, κατάλληλη θερμο-ηχομόνωση και οικονομική βιωσιμότητα.

Παραδοσιακά ο χάλυβας χρησιμοποιείται ως οπλισμός στο σκυρόδεμα, όμως, λόγω του κόστους και της διαθεσιμότητάς του, η αντικατάσταση του χάλυβα με άλλα κατάλληλα υλικά ως οπλισμό αποτελεί πλέον μείζον ζήτημα. Το μπαμπού είναι φυσικό, φθινό, ευρέως διαθέσιμο και κυρίως ισχυρό τόσο σε εφελκυσμό όσο και σε θλίψη. Η μέγιστη αντοχή του μπαμπού σε εφελκυσμό φτάνει τα 370 MPa ενώ η δοκιμή θλίψης του μπαμπού δίνει μέση τάση 41,02 MPa, που είναι η καλή τιμή για να αντισταθεί σε μέτρια φορτία, ειδικά σε κτίρια χαμηλού κόστους.

Τα δομικά υλικά είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά για αστικές υποδομές στην καθημερινή μας ζωή. Ωστόσο, από περιβαλλοντική άποψη, καταναλώνουν τεράστια ποσότητα φυσικών πόρων και παράγουν την πλειονότητα των αερίων του θερμοκηπίου. Ως εκ τούτου, πρόσφατα έχουν αναπτυχθεί πολλές νέες και καινοτόμες τεχνολογίες για τον σχεδιασμό οικολογικών δομικών υλικών φιλικών προς το περιβάλλον.

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο προς μελέτη είναι η πρόβλεψη της διάρκειας ζωής για το σχεδιασμό δομικών υλικών με ερευνητές σε όλο τον κόσμο να ασχολούνται με την ανάλυση πρόβλεψης διάρκειας ζωής. Χρησιμοποιήθηκε μια τιμή πλατώ και τον λόγο μόνιμης παραμόρφωσης από δοκιμές κόπωσης σε κάμψη τριών σημείων με κυκλική φόρτιση για να προβλέψουν τη διάρκεια ζωής λόγω κόπωσης του ασφαλτομίγματος. Η εξίσωση κόπωσης που βασίζεται σε μια τιμή πλατώ μπορεί να προβλέψει καλά τη διάρκεια ζωής λόγω κόπωσης. Μελετήθηκε η απόδοση σε κόπωση συνδυασμένων κατασκευών με μίγματα θερμού ασφαλτομίγματος και τσιμεντοποιημένου ασφαλτομίγματος και χρησιμοποιήθηκε ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο για να καθοριστούν οι εξισώσεις κόπωσης για την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής κόπωσης. Τέλος, αναφέρθηκαν οι εναπομένουσες ιδιότητες κόπωσης του ασφαλτικού οδοστρώματος μετά από μακροχρόνια υπηρεσία πεδίου, η απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες και τα χαρακτηριστικά βλάβης (Demir, 2008).

Για τη βελτίωση των επιδόσεων των μειγμάτων χρησιμοποιήθηκαν ίνες φιλικές προς το περιβάλλον και μελετήθηκαν οι ιξωδοελαστικές μηχανικές αποκρίσεις ασφαλτοτάπητα υψηλής τιμής με αριθμητική προσομοίωση με κινούμενο φορτίο. Σε τρία άρθρα αναφέρθηκαν οι αντιστάσεις γήρανσης της ασφάλτου, συμπεριλαμβανομένου του βάθους γήρανσης που προκύπτει από την υπεριώδη ακτινοβολία, της ανάλυσης γήρανσης με φάσμα φθορισμού και της βελτίωσης της γήρανσης με την τροποποίηση SBS/CRP (πολυμερές στυρενίου-βουταδιενίου-στυρενίου/σκόνη καουτσούκ

ψίχας). (Sampathrajan et. al., 1992).

Σε πολλά ερευνητικά ινστιτούτα διεξάγονται τροποποιήσεις στα δομικά υλικά για το σχεδιασμό ανθεκτικών πολιτικών υποδομών. Οι ίνες είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο ενισχυτικό πρόσθετο στα ασφαλτικά μίγματα και ως εκ τούτου οι φιλικές προς το περιβάλλον ίνες βασάλτη ενσωματώθηκαν με SBS και διατομίτη. Ένα άλλο άρθρο παρουσίασε μηχανισμούς βελτίωσης των τροποποιημένων με διατομίτη ασφαλτομιγμάτων, μέσω της αντίστασης σε μόνιμη παραμόρφωση και της αντίστασης στην υγρασία. Το υδροξείδιο του αργιλίου και το διπλάσιο υδροξείδιο με στρώσεις προτάθηκαν για τη βελτίωση της πυραντίστασης της ασφάλτου ενώ τέλος, ένα άλλο νανοϋλικό, που ονομάστηκε νανοπυρίτιο (το νανοπυρίτιο έχει μικρό μέγεθος σωματιδίων, πορώδη, μεγάλη επιφάνεια, υψηλή περιεκτικότητα σε υδροξύλια επιφάνειας, υπεριώδη, ορατή και υπέρυθη ανάκλαση), αξιολογήθηκε.

Η βελτίωση των χαρακτηριστικών της μορφολογίας των αδρανών είναι ένας άλλος αποτελεσματικός τρόπος για την παραγωγή ανθεκτικών ασφαλτομιγμάτων. Διαπιστώθηκε η σχέση μεταξύ της μορφολογίας των λεπτών αδρανών και της αντίστασης στην ολίσθηση των μικροεπιφανειών, ενώ αναφέρθηκε η επίδραση των μορφολογικών χαρακτηριστικών των αδρανών στα ασφαλτομίγματα. Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των αδρανών που μελετήθηκαν περιλαμβάνουν τη στρογγυλότητα, τον δείκτη περιμέτρου, τον λόγο περιοχής διάβρωσης-διαστολής, τη γωνιότητα και την επιφανειακή υφή. Η επιρροή των χαρακτηριστικών των αδρανών στην ταχύτητα αποδιάταξης του ασφαλτικού γαλακτώματος παρουσιάστηκε και επιπλέον, προτάθηκε η χρήση υποπροϊόντος τέφρας για τη βελτίωση των ιδιοτήτων πρόσφυσης ασφάλτου-αδρανών (Al-Juruf et. al., 1988).

Το αναζωογονητικό, ένας θεραπευτικός παράγοντας για την ανάκτηση του γερασμένου ασφαλτικού συνδετικού υλικού, είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό στην προληπτική συντήρηση των οδοστρωμάτων· υπάρχουν πολλά διαφορετικά αναζωογονητικά, όπως για παράδειγμα αναζωογονητές με βάση το σογιέλαιο, με βάση το δωδεκυλοβενζολικό σουλφονικό οξύ, με βάση το βιόέλαιο, με βάση το πετρέλαιο, με βάση ισοκυανικές και εποξειδικές ουσίες.

Η θεραπευτική συμπεριφορά των ασφαλτικών υλικών είναι ένα άλλο βασικό ζήτημα στην προληπτική συντήρηση των οδοστρωμάτων, με άλλες έρευνες να επικεντρώνονται στην επίδραση του παράγοντα επούλωσης, στην επαγόμενη αποτελεσματικότητα επούλωσης της επαγωγικής θέρμανσης και της θέρμανσης με μικροκύματα και στην αρχική θερμοκρασία αυτοθεραπείας (Coutts, 1992).

Τα απόβλητα σκυροδέματος σε σκόνη, τα αδρανή χαμηλής ποιότητας, τα απόβλητα ελαστικών σε ψίχα και τα ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος επαναχρησιμοποιήθηκαν επίσης με επιτυχία ως υλικά κατασκευής. Το ανακτημένο ασφαλτόστρωμα επαναχρησιμοποιήθηκε κατά 100% σε ψυχρά ανακυκλωμένα ασφαλτομίγματα και το γαλάκτωμα ασφάλτου και το τσιμέντο χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτίωση της διεπιφανειακής σύνδεσης μεταξύ των συνδετικών υλικών και των πληρωτικών υλικών, με στόχο την ενίσχυση της αντίστασης στην υγρασία και της σταθερότητας σε υψηλές θερμοκρασίες (Al-Juruf et. al., 1988).

Αρκετές άλλες μελέτες αφορούσαν την αξιολόγηση φιλικών προς το περιβάλλον σιδηροδρομικών στρωτήρων από σκυρόδεμα και σύνθετων υλικών από τσιμέντο. Στην έρευνα του πρώτου άρθρου, τα απόβλητα καουτσούκ επαναχρησιμοποιήθηκαν για ελαστικοποιημένο σκυρόδεμα υψηλής αντοχής και διαπιστώθηκε ότι μπορεί να αναμένεται μείωση της αντοχής σε θλίψη όταν αυξάνεται η περιεκτικότητα σε καουτσούκ και συνεπώς το 10% συνιστάται ως βέλτιστη περιεκτικότητα επαναχρησιμοποίησης. Στο τελευταίο άρθρο, προστέθηκαν τροποποιημένες ίνες πολυβινυλικής αλκοόλης σε μηχανικά τσιμεντοειδή σύνθετα υλικά για την ενίσχυση της μηχανικής απόδοσης. Τέλος, συζητήθηκαν επίσης

έρευνες σχετικά με το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, το σκυρόδεμα υπερυψηλών επιδόσεων, την πάστα τσιμέντου πλαστικοποιημένη με πολυκαρβοξυλικό υπερρυστοποιητή και το ποζολανικό πρόσθετο στο τσιμέντο (Algin & Turgut, 2008).

Τα ανόργανα απόβλητα κατασκευών συλλέχθηκαν με βάση τις περιεκτικότητες που καθορίζονται για το κοινό τσιμέντο Πόρτλαντ. Οι χημικές συνθέσεις των αποβλήτων τέθηκαν στον τύπο Bogue για να προβλεφθεί η παραγωγή ορυκτών μετά την ύρωση του κλίνκερ. Τα αποτελέσματα αυτών των προβλέψεων έδειξαν ότι εάν η περιεκτικότητα σε ασβεστόλιθο ήταν μεγαλύτερη από 85 % κατά βάρος, θα μπορούσε να αναπτυχθεί ένας νέος τύπος τσιμέντου με το ίδιο ποιοτικό επίπεδο με αυτό του τσιμέντου Πόρτλαντ. Η ανάλυση αποκάλυψε επίσης ότι τα απόβλητα υλικών οροφής και τα απόβλητα γυψοσανίδων περιέχουν σημαντικές ποσότητες SO<sub>3</sub> -εάν η ποσότητα αυτή μπορούσε να μειωθεί μέσω περαιτέρω επεξεργασίας- τα απόβλητα αυτά θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν τον ασβεστόλιθο στην κατασκευή ανακυκλωμένου τσιμέντου. Συμπερασματικά, επειδή τα περισσότερα από τα εξεταζόμενα ανόργανα κατασκευαστικά απόβλητα περιέχουν μεγάλες ποσότητες SiO<sub>2</sub>, θα μπορούσαν να αναπτυχθούν πολλοί νέοι τύποι τσιμέντου εκτός από το συνηθισμένο τσιμέντο Πόρτλαντ (Akram et. al., 2009).

Κατά συνέπεια, η παρούσα μελέτη επιβεβαίωσε ότι τα ανόργανα απόβλητα κατασκευών περιέχουν αρκετά σημαντικά χημικά συστατικά του τσιμέντου. Χρησιμοποιούμε τον τύπο Bogue για να εξετάσουμε τους πιθανούς συνδυασμούς αυτών των αποβλήτων και χρησιμοποιήσαμε τη χημική σύνθεση του συνηθισμένου τσιμέντου Πόρτλαντ ως αναφορά. Η εξέταση αυτή έδειξε ότι η ανάπτυξη ανακυκλωμένου τσιμέντου είναι θεωρητικά δυνατή. Ωστόσο, δεδομένου ότι η μελέτη αυτή ήταν θεωρητική, πρέπει να διεξαχθούν περαιτέρω πειραματικές μελέτες που θα περιλαμβάνουν φυσικές και χημικές εκτιμήσεις για να προχωρήσει η ανάπτυξη ανακυκλωμένου τσιμέντου και δευτερογενών προϊόντων κατασκευών από ανόργανα απόβλητα κατασκευών (Akram et. al., 2009).

Τα αγροτικά απόβλητα έχουν δείξει τη δυνατότητα ανάπτυξης ενεργειακά αποδοτικών και οικονομικά βιώσιμων δομικών υλικών με βελτιωμένη θερμομηχανική συμπεριφορά. Από τις διάφορες βιβλιογραφίες παρατηρείται ότι τα δομικά προϊόντα/σύνθετα υλικά που παράγονται από διάφορα αγροτικά απόβλητα είναι συγκριτικά φθηνότερα, έχουν χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα και είναι ανθεκτικά, ελαφριά και πιο φιλικά προς το περιβάλλον από τα συμβατικά. Η εφαρμογή των αγροτικών αποβλήτων και των υποπροϊόντων τους ως πρώτη ύλη έχει πρακτική σημασία για την ανάπτυξη υλικών συστατικών ως υποκατάστατα των παραδοσιακών δομικών υλικών και είναι φιλικά προς το περιβάλλον (Ashour et. al., 2010).

## Περαιτέρω μελέτη

Η αναθεωρημένη βιβλιογραφία υποδηλώνει σε γενικές γραμμές την εφαρμογή διαφόρων στερεών αγροτικών αποβλήτων για καινοτόμα δομικά υλικά. Οι αναθεωρημένες φυσικές, χημικές και μηχανικές ιδιότητες αυτών των καινοτόμων υλικών υποδηλώνουν ευρεία διαφοροποίηση στη συμπεριφορά τους. Μια διεθνής συγκριτική αξιολόγηση μπορεί να γίνει περαιτέρω για την καλύτερη εφαρμογή αυτών των καινοτόμων δομικών υλικών (Manohar et. al., 2006).

Η απορρόφηση του νερού αποτελεί σοβαρή ανησυχία για τα περισσότερα από τα προϊόντα που εξετάστηκαν και χρειάζεται περαιτέρω έρευνα. Τα επιδεικτικά πρότυπα σπίτια μπορούν να σχεδιαστούν και να αναπτυχθούν στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιδόσεων. Η τεχνοοικονομική σκοπιμότητα του προϊόντος που αναπτύχθηκε θα πραγματοποιηθεί για πιθανή εμπορική εφαρμογή. Μια βάση δεδομένων σε εθνικό επίπεδο μπορεί να

καταρτιστεί με βάση την παραγωγή αγροτικών αποβλήτων μαζί με την πιθανή εφαρμογή τους στην κατασκευαστική βιομηχανία. Η βάση δεδομένων που θα δημιουργηθεί θα είναι τελικά επωφελής για τους κατασκευαστές ώστε να αναπτύξουν καινοτόμα δομικά υλικά (Sampathrajan et. al., 1992).

## Βιβλιογραφία

Adesanya, D. A., & Raheem, A. A. (2009). Development of corn cob ash blended cement. *Construction and Building Materials*, 23(1), 347-352.

Akram, T., Memon, S. A., & Obaid, H. (2009). Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 23(2), 703-712.

Al-Juruf, R. S., Ahmed, F. A., Alam, I. A., & Abdel-Rahman, H. H. (1988). Development of heat insulating materials using date palm leaves. *Journal of Thermal Insulation*, 11(3), 158-164.

Alami, A. H. (2010). Experiments on olive husk-addition to masonry clay bricks on their mechanical properties, and their application and manufacturability as an insulating material. In *Advanced Materials Research* (Vol. 83, pp. 874-880). Trans Tech Publications Ltd.

Algin, H. M., & Turgut, P. (2008). Cotton and limestone powder wastes as brick material. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1074-1080.

Amin, N. U. (2011). Use of bagasse ash in concrete and its impact on the strength and chloride resistivity. *Journal of materials in civil engineering*, 23(5), 717-720.

Ashour, T., Wieland, H., Georg, H., Bockisch, F. J., & Wu, W. (2010). The influence of natural reinforcement fibres on insulation values of earth plaster for straw bale buildings. *Materials & Design*, 31(10), 4676-4685.

Asokan, P., Saxena, M., Aparna, A., & Asoletar, S. R. (2004). Characteristics variation of coal combustion residues in an Indian ash pond. *Waste Management & Research*, 22(4), 265-275.

Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K. (2009). Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. *Construction and Building Materials*, 23(11), 3352-3358.

Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M., & Fairbairn, E. D. M. R. (2009). Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. *Cement and concrete research*, 39(2), 110-115.

Coutts, R. S. P. (1992, July). From forest to factory to fabrication. In *RILEM PROCEEDINGS* (pp. 31-31). CHAPMAN & HALL.

Demir, I. (2008). Effect of organic residues addition on the technological properties of clay bricks. *Waste management*, 28(3), 622-627.

Dutta, E. A. B., & Sengupta, I. Sustainable Application of Agro-Waste as Substitute for Construction Materials: A Review.

Ganesan, K., Rajagopal, K., & Thangavel, K. (2007). Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cement and concrete composites*, 29(6), 515-524.

Ghavami, K. (1995). Ultimate load behaviour of bamboo-reinforced lightweight concrete beams. *Cement and concrete composites*, 17(4), 281-288.

Ghavami, K. (2005). Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. *Cement and concrete composites*, 27(6), 637-649.

Gupta, T. N. (1998). *Building materials in India: 50 years*. Build. Mater. Technol. Promot. Counc.(New Delhi Minist. Urban Aff. Employment, Gov. India).

Johnson, O. A., Napiyah, M., & Kamaruddin, I. (2014). Potential uses of waste sludge in the construction industry: a review. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 8(4), 565-570.

Khedari, J., Nankongnab, N., Hirunlabh, J., & Teekasap, S. (2004). New low-cost insulation particleboards from mixture of durian peel and coconut coir. *Building and environment*, 39(1), 59-65.

Korjenic, A., Petránek, V., Zach, J., & Hroudová, J. (2011). Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. *Energy and Buildings*, 43(9), 2518-2523.

Lertsatitthanakorn, C., Atthajariyakul, S., & Soponronnarit, S. (2009). Techno-economical evaluation of a rice husk ash (RHA) based sand–cement block for reducing solar conduction heat gain to a building. *Construction and Building Materials*, 23(1), 364-369.

Lertsutthiwong, P., Khunthon, S., Siralermukul, K., Noomun, K., & Chandkrachang, S. (2008). New insulating particleboards prepared from a mixture of solid wastes from tissue paper manufacturing and corn peel. *Bioresource technology*, 99(11), 4841-4845.

Li, Y., Mai, Y. W., & Ye, L. (2000). Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. *Composites science and technology*, 60(11), 2037-2055.

Ling, I. H., & Teo, D. C. L. (2011). Properties of EPS RHA lightweight concrete bricks under different curing conditions. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3648-3655.

Madurwar, M. V., Ralegaonkar, R. V., & Mandavgane, S. A. (2013). Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review. *construction and Building materials*, 38, 872-878.

Mahzuz, H. M. A., Ahmed, M., Ashrafuzzaman, M., Karim, R., & Ahmed, R. (2011). Performance evaluation of bamboo with mortar and concrete. *Journal of Engineering and Technology Research*, 3(12), 342-350.

Mannan, M. A., & Ganapathy, C. (2004). Concrete from an agricultural waste-oil palm shell (OPS). *Building and environment*, 39(4), 441-448.

- Manohar, K., Ramlakhan, D., Kochhar, G., & Haldar, S. (2006). Biodegradable fibrous thermal insulation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 28(1), 45-47.
- Mark, A. A., & Russell, A. O. (2011). A comparative study of Bamboo reinforced concrete beams using different stirrup materials for rural construction. *International Journal of Civil & Structural Engineering*, 2(2), 407-423.
- Memon, S. A., Shaikh, M. A., & Akbar, H. (2011). Utilization of rice husk ash as viscosity modifying agent in self compacting concrete. *Construction and building materials*, 25(2), 1044-1048.
- Nair, D. G., Jagadish, K. S., & Fraaij, A. (2006). Reactive pozzolans from rice husk ash: An alternative to cement for rural housing. *Cement and Concrete Research*, 36(6), 1062-1071.
- Panyakaew, S., & Fotios, S. (2008, October). 321: Agricultural waste materials as thermal Insulation for dwellings in Thailand: Preliminary results. In *Proceedings of the 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture* (pp. 22-24).
- Pappu, A., Saxena, M., & Asolekar, S. R. (2007). Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials. *Building and environment*, 42(6), 2311-2320.
- Quintana, G., Velasquez, J., Betancourt, S., & Ganan, P. (2009). Binderless fiberboard from steam exploded banana bunch. *Industrial crops and products*, 29(1), 60-66.
- Rahman, M. A. (1987). Properties of clay-sand-rice husk ash mixed bricks. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 9(2), 105-108.
- Rahman, M. M., Rashid, M. H., Hossain, M. A., Hasan, M. T., & Hasan, M. K. (2011). Performance evaluation of bamboo reinforced concrete beam. *International Journal of Engineering & Technology*, 11(4), 142-146.
- Ramakrishna, G., & Sundararajan, T. (2005). Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of mortar. *Cement and Concrete Composites*, 27(5), 575-582.
- Ramasamy, V., & Biswas, S. (2008). Performance of rice husk ash concrete with superplasticizers. *ICI J*, 4, 27-34.
- Raut, S. P., Ralegaonkar, R. V., & Mandavgane, S. A. (2011). Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid waste: A review of waste-created bricks. *Construction and building materials*, 25(10), 4037-4042.
- Rawat, M., Ramanathan, A. L., & Kuriakose, T. (2013). Characterisation of municipal solid waste compost (MSWC) from selected Indian cities—a case study for its sustainable utilisation.
- Rukzon, S., & Chindapasirt, P. (2012). Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. *Materials & Design*, 34, 45-50.
- Sales, A., & Lima, S. A. (2010). Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. *Waste management*, 30(6), 1114-1122.

- Sampathrajan, A., Vijayaraghavan, N. C., & Swaminathan, K. R. (1992). Mechanical and thermal properties of particle boards made from farm residues. *Bioresource technology*, 40(3), 249-251.
- Sata, V., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K. (2007). Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 21(7), 1589-1598.
- Sengupta, J. (2002). Recycling of agro-industrial wastes for manufacturing of building materials and components in India. An overview. *Civil Engineering & Construction Review*, 15(2), 23-33.
- Sundarraaj, A. A., & Ranganathan, T. V. (2018). A review on cellulose and its utilization from agro-industrial waste. *Drug Invent. Today*, 10(1), 89-94.
- Suvimol, S., & Daungruedee, C. (2008, May). Bagasse ash: effect of pozzolanic activity and application in cement use aspect. In *The 3rd ACF international conference-ACF/VCA (Vol. 8, pp. 165-173)*.
- Turgut, P., & Algin, H. M. (2007). Limestone dust and wood sawdust as brick material. *Building and Environment*, 42(9), 3399-3403.
- Xu, W., Lo, T. Y., & Memon, S. A. (2012). Microstructure and reactivity of rich husk ash. *Construction and Building Materials*, 29, 541-547.
- Yarbrough, D. W., Wilkes, K. E., Olivier, P. A., Graves, R. S., & Vohra, A. (2005). Apparent thermal conductivity data and related information for rice hulls and crushed pecan shells. *Thermal Conductivity*, 27, 222-230.
- Yoshizawa, S. (2004). Global trends in waste generation. REWAS2004, Madrid Spain.
- Zhou, X. Y., Zheng, F., Li, H. G., & Lu, C. L. (2010). An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. *Energy and Buildings*, 42(7), 1070-1074.