

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**



**Παραγωγή κεραμικών από συν-αξιοποίηση αποβλήτων εκσκαφών  
κατασκευών και κατεδαφίσεων και βιομάζας.**

Διπλωματική Εργασία

Μανιουδάκη Ειρήνη

2014020013

Τριμελής εξεταστική επιτροπή

Κομνίτσας Κωνσταντίνος, Καθηγητής (Επιβλέπων)

Γαλετάκης Μιχαήλ, Καθηγητής

Κρητικάκη Άννα, ΕΔΙΠ

Χανιά

Ιούνιος, 2023

## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στη Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Κεραμικών & Υάλου. Το θέμα της διπλωματικής εργασίας είναι η παραγωγή κεραμικών από συν-αξιοποίηση αποβλήτων εκσκαφών κατασκευών και κατεδαφίσεων και βιομάζας.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Κομνίτσα Κωνσταντίνο, Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την ανάθεση του θέματος, την άριστη συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής καθώς και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ προς την Δρ. Κρητικάκη Άννα (ΕΔΙΠ) για την συμμετοχή της στην τριμελή εξεταστική επιτροπή καθώς επίσης και για το ενδιαφέρον της για το θέμα από την αρχή μέχρι το τέλος, συμβάλλοντας με υποδείξεις και κάθε τύπου υποστήριξη.

Ευχαριστώ επίσης τον κ. Γαλετάκη Μιχαήλ, Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης για την συμμετοχή του στην τριμελή εξεταστική επιτροπή, τον Δρ. Αντώνη Στρατάκη (ΕΔΙΠ) για την πραγματοποίηση των ορυκτολογικών αναλύσεων και τον κ. Στέλιο Μαυριγιαννάκη (ΕΤΕΠ) για την πραγματοποίηση των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου για την συνεχή συμπαράσταση και υποστήριξη και όλους όσους με βοήθησαν ηθικά και πρακτικά κατά τη διάρκεια φοίτησής μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αγροτικά απόβλητα και τούβλα, από απόβλητα εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ), έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή κεραμικών ως μία νέα φιλική προς το περιβάλλον λύση. Τα αγροτικά απόβλητα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κελύφη φυστικιού Αιγίνης, τα οποία προστέθηκαν σε δύο μορφές, ως έχουν και μετά από πυρόλυση στους 400 °C. Μελετήθηκε η προσθήκη 5% και 15% κ.β αγροτικών αποβλήτων (ως έχουν και μετά από πυρόλυση) επί του ποσοστού του απόβλητου τούβλου και ακολούθησε η μορφοποίηση τους με μονοαξονική συμπίεση και έπειτα η έψησή τους σε θερμοκρασίες 900 °C, 1000 °C και 1100 °C. Επιπλέον, μελετήθηκε και η επίδραση της προσθήκης διαφορετικών ποσοστών (5% και 10% κ.β) χαλαζιακής άμμου στις ιδιότητες των παραγόμενων κεραμικών.

Τα κεραμικά που προέκυψαν χαρακτηρίστηκαν με εκτέλεση μιας σειράς δοκιμών προσδιορισμού φαινομένου πορώδους, υδατοαπορροφητικότητας, αντοχής σε θλίψη και μέτρησης ειδικής επιφάνειας. Επίσης, πραγματοποιήθηκε χημική και ορυκτολογική ανάλυση των αρχικών πρώτων υλών και των παραγόμενων κεραμικών.

Βάσει των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, παράχθηκαν κεραμικά που παρουσιάζουν ικανοποιητικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες. Οι μεγαλύτερες τιμές της αντοχής παρατηρήθηκαν στα κεραμικά που παρασκευάστηκαν μετά από έψηση στους 1100 °C. Πιο συγκεκριμένα, τα κεραμικά που αποτελούνται από απόβλητο τούβλο παρουσίασαν αντοχή 12,5 MPa και με την προσθήκη μικρής ποσότητας 5% κ.β κελύφους φυστικιού (ως έχει) η αντοχή αυξήθηκε στα 16 MPa. Επιπλέον η προσθήκη και χαλαζιακής άμμου (σε ποσοστό 10% κ.β) οδήγησε σε ακόμη μεγαλύτερη αύξηση αντοχής σε 18,1 MPa.

Επίσης, άλλη μία φυσική ιδιότητα που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, είναι το πορώδες. Η προσθήκη κελύφους φυστικιού και του παραγόμενου εξ' αυτού βιοεξανθρακώματος οδήγησε σε σημαντική αύξηση του πορώδους, που κυμάνθηκε από 12,8%-44,0%, ενώ μετά την προσθήκη της χαλαζιακής άμμου οι τιμές κυμάνθηκαν μεταξύ 12,8%-73,5% .

Με βάση τα ευρωπαϊκά και αμερικανικά πρότυπα έγινε κατάταξη των κεραμικών, ώστε να καθοριστούν οι χρήσεις τους ως τελικά προϊόντα σε διάφορους τομείς της κατασκευαστικής βιομηχανίας (παρασκευή τούβλων, κεραμιδιών, πλακιδίων) για την παραγωγή κεραμικών φίλτρων και κεραμικών προϊόντων για καθημερινές χρήσεις π.χ. κεραμικά είδη εστίασης.

Τέλος, ο κύριος στόχος αυτής της εργασίας είναι η αξιολόγηση νέων συνθέσεων προκειμένου να παραχθούν νέα προϊόντα με υψηλή προστιθέμενη αξία ή με σημαντικά μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

## Abstract

In the present thesis agricultural residues and wastes from constructions and demolitions (C&D) have been used for the production of ceramics. Valorization of wastes is an environmental priority of high importance. The agricultural residues used were peanut shells, which were added in two forms, as such and after pyrolysis at 400 °C. The addition of 5 wt.% and 15 wt.% of agricultural residues (raw and pyrolyzed) of the mass of brick (C&D) was studied. In addition, the use of different percentages (5% and 10%) of silica sand on the properties of the produced ceramics has also studied.

All samples were uniaxially pressed at 10 MPa, dried at 110 °C and then fired for two hours between 900 °C and 1100 °C, with a heating rate of 3 °C/min. The compressive strength was measured using a MTS 815 machine. Porosity, bulk density and water absorption were determined by the Archimedes principle.

Ceramics with sufficient mechanical and physical properties have been developed. In particular, at a firing temperature of 1100 °C, the highest strength was observed. More specifically, ceramics produced from brick obtained compressive strength value of 12,5 MPa, while after the addition of peanut shell (without pyrolysis), at a rate of 5 wt.% the compressive strength increased up to 16 MPa. Furthermore, with the addition of 10% silica sand and peanut shells a higher value of compressive strength of 18,1 MPa was achieved.

Furthermore, the ceramics produced from brick and peanut shells (as such and after pyrolysis) exhibited high porosity ranging between 12,8%-44%. The addition of silica sand also resulted in high porosity between 12,8%-73,5%.

Ceramics were classified using European and American standards, in order to determine their possible uses as final products in various sectors on the construction and building industry (for the production of bricks, roof and floor tiles) as well as filter for environmental applications.

Finally, the main objective of this work is to evaluate new compositions that improve the performance of ceramic bricks in order to obtain new products with high added value or with significantly lower environmental impact.

## Περιεχόμενα

Πρόλογος .....	2
Περίληψη.....	3
Abstract .....	4
Κατάλογος Πινάκων .....	6
Κατάλογος Εικόνων.....	7
Κατάλογος Διαγραμμάτων .....	7
1.1. Πρωτογενείς και Δευτερογενείς Πρώτες Ύλες.....	9
1.1.1. ΑΕΚΚ .....	9
1.1.2. Αγροτικά Απόβλητα .....	10
1.2. Τεχνικές και Αξιοποίησή τους.....	11
1.3. Κεραμικά .....	13
1.3.1. Εισαγωγή.....	13
1.3.2. Παραγωγή-Κατάταξη-Ιδιότητες .....	13
1.3.3. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Κεραμικών Υλικών .....	16
1.3.4. Παρασκευή Κεραμικών από Απόβλητα .....	17
1.4. Πρώτες Ύλες – Απόβλητα που Χρησιμοποιήθηκαν .....	18
1.4.1. Απόβλητο Τούβλο.....	18
1.4.2. Κέλυφος από Φυστίκι.....	19
1.4.3. Βιοεξανθράκωμα .....	20
1.4.4. Χαλαζιακή Άμμος .....	21
1.4.5. Βιο-τούβλα (bio-bricks).....	22
Κεφάλαιο 2-Πειραματική Μεθοδολογία .....	23
2.1. Προετοιμασία και Παρασκευή Κεραμικών.....	23
2.1.1. Ψυρόλυση Κελύφους Φυστικιού .....	23
2.1.2. Λειοτρίβηση Αποβλήτων Τούβλων-Κέλυφος από Φυστίκι-Χαλαζιακή Άμμος .....	23
2.1.3. Προετοιμασία Συστάσεων - Αναμίξεις Πρώτων Υλών .....	25
2.1.4. Μορφοποίηση Δοκιμίων.....	27
2.1.5. Παραγωγή Κεραμικών .....	28
2.2. Προσδιορισμός Ιδιοτήτων .....	30
2.2.1. Πυκνότητα-Πορώδες-Υδατοαπορροφητικότητα .....	30
2.2.2. Αντοχή σε Θλίψη.....	31
2.2.3. Ορυκτολογικές και Χημικές Αναλύσεις (XRD και XRF) .....	33
2.2.4. Μέτρηση Ειδικής Επιφάνειας.....	34
Κεφάλαιο 3-Αποτελέσματα, Επεξεργασία και Συζήτηση .....	36

<b>3.1. Χαρακτηρισμός και Ανάλυση Πρώτων Υλών .....</b>	<b>36</b>
<b>3.1.1. Χημική Σύσταση-XRF .....</b>	<b>36</b>
<b>3.1.2. Ορυκτολογική Σύσταση-XRD .....</b>	<b>37</b>
<b>3.1.3. Προσδιορισμός Κοκκομετρίας Πρώτων Υλών .....</b>	<b>39</b>
<b>3.2. Χαρακτηρισμός Παραγόμενων Κεραμικών .....</b>	<b>40</b>
<b>3.2.1. Ορυκτολογική Σύσταση-XRD.....</b>	<b>40</b>
<b>3.2.2. Φυσικομηχανικές Ιδιότητες.....</b>	<b>43</b>
<b>3.2.3. Πιθανές Εφαρμογές Παραγόμενων Προϊόντων .....</b>	<b>58</b>
<b>Συμπεράσματα-Μελλοντικές Σκέψεις για Περαιτέρω Έρευνα.....</b>	<b>61</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>64</b>
<b>Ελληνική.....</b>	<b>64</b>
<b>Διεθνής.....</b>	<b>64</b>

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Εφαρμογές και χρήσεις παραδοσιακών κεραμικών.....	15
Πίνακας 1.2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κεραμικών υλικών.....	17
Πίνακας 3.1: Χημική σύσταση απόβλητου τούβλου και χαλαζιακής άμμου.....	36
Πίνακας 3.2: Στοιχειακή ανάλυση βιομάζας και βιοεξανθρακώματος.....	36
Πίνακας 3.3: Προσεγγιστική ανάλυση κελύφους φυσιτικού και βιοεξανθρακώματος.....	37
Πίνακας 3.4: Μεγέθη κοκκομετρίας πρώτων υλών.....	39
Πίνακας 3.5: Μέσες τιμές ιδιοτήτων παραγόμενων κεραμικών ομάδας Α.....	44
Πίνακας 3.6 : Μέσες τιμές ιδιοτήτων παραγόμενων κεραμικών ομάδας Β.....	50
Πίνακας 3.7: Προϋποθέσεις φυσικών ιδιοτήτων για την παρασκευή τούβλων τοιχοποιίας με βάση το πρότυπο ASTM C62.....	58
Πίνακας 3.8: Έλεγχος χρήσης παραγόμενων κεραμικών για την παρασκευή τούβλων τοιχοποιίας με βάση το πρότυπο ASTM C62.....	59
Πίνακας 3.9: Προϋποθέσεις φυσικών ιδιοτήτων για την παρασκευή τούβλων τοιχοποιίας με βάση το πρότυπο EN 711-1.....	59
Πίνακας 3.10: Έλεγχος χρήσης παραγόμενων κεραμικών για την παρασκευή τούβλων τοιχοποιίας με βάση το πρότυπο EN 771-1.....	60
Πίνακας 3.11: Προϋποθέσεις φυσικών ιδιοτήτων για την παρασκευή κεραμικών πλακιδίων με βάση το πρότυπο EN 14411.....	60
Πίνακας 3.12: Έλεγχος χρήσης παραγόμενων κεραμικών για την παρασκευή κεραμικών πλακιδίων με βάση το πρότυπο EN 14411.....	61

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Σωρός από απόβλητα τούβλα.....	19
Εικόνα 1.2: Κελύφη φυσιτικών τύπου Αιγίνης.....	20
Εικόνα 2.1: Σκόνη βιοεξανθρακώματος από την έψηση λειοτριβημένου κελύφους φυσιτικού.....	23
Εικόνα 2.2: Ειδικός σπαστήρας-Ραβδόμυλος.....	24
Εικόνα 2.3: Πλανητικός μύλος Bico Pulverizer.....	24
Εικόνα 2.4: Κέλυφος φυσιτικού (ως έχει).....	24
Εικόνα 2.5: Μείγμα από απόβλητο τούβλο και κέλυφος φυσιτικού (μετά από πυρόλυση).....	25
Εικόνα 2.6: Δοκίμια πριν την έψηση.....	26
Εικόνα 2.7: Δοκίμια πριν την έψηση στους 900 °C.....	26
Εικόνα 2.8: Δοκίμια πριν την έψηση στους 1000 °C.....	27
Εικόνα 2.9: Δοκίμια πριν την έψηση στους 1100 °C.....	27
Εικόνες 2.10: α) Καλούπια μορφοποίησης μείγματος και β) εξώθησης.....	28
Εικόνα 2.11: Υδραυλική πρέσα συμπίεσης.....	28
Εικόνα 2.12: Κλίβανος υψηλών θερμοκρασιών.....	29
Εικόνα 2.13: Δοκίμια μετά την έψηση.....	29
Εικόνα 2.14: α) Δοκίμια απόβλητου τούβλου-κελύφους φυσιτικού μετά την έψηση, β) Δοκίμια απόβλητου τούβλου μετά την έψηση και γ) Δοκίμια απόβλητου τούβλου-κελύφους φυσιτικού (μετά από πυρόλυση).....	29
Εικόνα 2.15: Δοκίμια με απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού-χαλαζιακή άμμο μετά την έψηση.....	30
Εικόνα 2.16: Ζυγός ακριβείας.....	31
Εικόνα 2.17: α) Ξηραντήρας κενού και β) Δοκίμια βυθισμένα σε απιονισμένο νερό.....	31
Εικόνα 2.18: Μηχανή φόρτισης MTS 815.....	32
Εικόνα 2.19: Περιθλασίμετρο ακτίνων Χ (XRD) και β) Δειγματοφορείς περιθλασίμετρου...33	
Εικόνα 2.20: Φασματομέτρο φθορισμού ακτίνων-Χ( XRF).....	34
Εικόνα 2.21: Ποροσίμετρο Αζώτου NOVA 2200.....	35

## Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 3.1: Ορυκτολογική σύσταση-XRD απόβλητου τούβλου.....	37
--	----

Διάγραμμα 3.2: Ορυκτολογική σύσταση-XRD κελύφους φυσιτικού και του παραγόμενου βιοεξανθρακώματος.....	38
Διάγραμμα 3.3: Ορυκτολογική σύσταση παραγόμενων κεραμικών ομάδας Α (1000 °C).....	40
Διάγραμμα 3.4: Ορυκτολογική σύσταση παραγόμενων κεραμικών ομάδας Α (1100 °C).....	41
Διάγραμμα 3.5: Ορυκτολογική σύσταση παραγόμενων κεραμικών ομάδας Β με προσθήκη 5% χαλαζιακής άμμου σε όλες τις θερμοκρασίες έψησης.....	42
Διάγραμμα 3.6: Ορυκτολογική σύσταση παραγόμενων κεραμικών ομάδας Β με προσθήκη 10% χαλαζιακής άμμου σε όλες τις θερμοκρασίες έψησης.....	43
Διάγραμμα 3.7: Τιμές πυκνότητας παραγόμενων κεραμικών (ως έχουν) ομάδας Α.....	45
Διάγραμμα 3.8: Τιμές πυκνότητας παραγόμενων κεραμικών (μετά από πυρόλυση) ομάδας Α.....	45
Διάγραμμα 3.9: Τιμές πορώδους παραγόμενων κεραμικών (ως έχουν) ομάδας Α.....	46
Διάγραμμα 3.10: Τιμές πορώδους παραγόμενων κεραμικών (μετά από πυρόλυση) ομάδας Α.....	46
Διάγραμμα 3.11: Τιμές υδατοαπορροφητικότητας παραγόμενων κεραμικών (ως έχουν) ομάδας Α.....	47
Διάγραμμα 3.12: Τιμές υδατοαπορροφητικότητας παραγόμενων κεραμικών (μετά από πυρόλυση) ομάδα Α.....	48
Διάγραμμα 3.13: Τιμές αντοχής παραγόμενων κεραμικών (ως έχουν) ομάδας Α.....	49
Διάγραμμα 3.14: Τιμές αντοχής παραγόμενων κεραμικών (μετά από πυρόλυση) ομάδας Α.....	49
Διάγραμμα 3.15: Τιμές πυκνότητας παραγόμενων κεραμικών ομάδας Β.....	51
Διάγραμμα 3.16: Τιμές πορώδους παραγόμενων κεραμικών ομάδας Β.....	52
Διάγραμμα 3.17: Τιμές υδατοαπορροφητικότητας παραγόμενων κεραμικών ομάδας Β.....	53
Διάγραμμα 3.18: Τιμές αντοχής παραγόμενων κεραμικών ομάδας Β.....	54
Διάγραμμα 3.19: Τιμές πυκνότητας παραγόμενων κεραμικών ομάδας Β.....	55
Διάγραμμα 3.20: Τιμές πορώδους παραγόμενων κεραμικών ομάδας Β.....	56
Διάγραμμα 3.21: Τιμές υδατοαπορροφητικότητας παραγόμενων κεραμικών ομάδας Β.....	57
Διάγραμμα 3.22: Τιμές αντοχής παραγόμενων κεραμικών ομάδας Β.....	58



## **Κεφάλαιο 1-Θεωρητικό Μέρος**

### **1.1. Πρωτογενείς και Δευτερογενείς Πρώτες Ύλες**

#### **1.1.1. ΑΕΚΚ**

Τα στερεά απόβλητα που παράγονται από δραστηριότητες κατασκευών και κατεδαφίσεων ανέρχονται σε αρκετά εκατομμύρια τόνους παγκοσμίως και ένα από τα σημαντικότερα απόβλητα είναι τα απόβλητα τούβλων. Γενικά, η αύξηση του πληθυσμού είναι ένας παράγοντας που συμβάλλει στην αύξηση των κατασκευαστικών δραστηριοτήτων. Αυτό επιταχύνει σημαντικά την παραγωγή αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων (Constructions and Demolitions, C&D), τα οποία προκύπτουν ως αποτέλεσμα των δραστηριοτήτων εκσκαφής, συντήρησης δρόμων, κατασκευής, επισκευής, ανακαίνισης και κατεδάφισης.

Σύμφωνα με τους Yahya και Boussabaine (2010), έως και 145 εκατομμύρια τόνοι αποβλήτων C&D δημιουργούνται στις Ηνωμένες Πολιτείες ετησίως και αυτό το ποσό είναι το ένα τρίτο των συνολικών υλικών που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής.

Ομοίως, σύμφωνα με το Τμήμα Προστασίας περιβάλλοντος στο Χονγκ Κονγκ (2017), τα απόβλητα C&D αποτελούν περίπου το 28% των στερεών αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής. Η έκθεση ανέφερε επίσης ότι στο Χονγκ Κονγκ, υπήρχαν περίπου 1,53 εκατομμύρια τόνοι αποβλήτων C&D το έτος 2015, αυξημένοι κατά 6,6% σε σύγκριση με το προηγούμενο έτος. Γενικά, το τούβλο θεωρείται το δεύτερο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο δομικό υλικό μετά το σκυρόδεμα και αντιμετωπίζεται ως απόβλητο C&D εάν υπάρχουν ζημιές κατά τη διάρκεια των δραστηριοτήτων κατασκευής και κατεδάφισης.

Στην Κίνα, πολλά παλιά κτίρια κατεδαφίστηκαν τα τελευταία χρόνια λόγω των δραστηριοτήτων ανοικοδόμησης και οι δραστηριότητες κατεδάφισης δημιούργησαν μια τεράστια ποσότητα αποβλήτων τούβλων, που ανέρχονται σε περίπου 0,4 δισεκατομμύρια τόνους ετησίως.

Η Ινδία είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος παραγωγός τούβλων στον κόσμο και τα απόβλητα τούβλων ήταν το 31% των συνολικών αποβλήτων C&D που παράγονται ετησίως, το οποίο είναι υψηλότερο από τα απόβλητα σκυροδέματος. Επίσης, τα απόβλητα αυτά περιλαμβάνουν άμμο, χαλίκι, ασφαλτο, τούβλα, τοιχοποιία και σκυρόδεμα ενώ στην Ταϊβάν, 0,24 εκατομμύρια τόνοι αποβλήτων τούβλων αναφέρθηκε ότι παράγονται ετησίως.

Τα στατιστικά στοιχεία από την Υπηρεσία Προστασίας περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών (2016), έδειξαν ότι περίπου 44 εκατομμύρια τόνοι αποβλήτων τούβλων ελήφθησαν από δραστηριότητες κατασκευής και κατεδάφισης μεταξύ 2012 και 2014. Τεράστιος χώρος υγειονομικής ταφής απαιτείται συνήθως για να φιλοξενήσει τη διάθεση των αποβλήτων τούβλων και επομένως, είναι απαραίτητη η ανακύκλωση

και χρήση τέτοιων αποβλήτων. Επίσης, η αυξημένη διάθεση αποβλήτων C&D, η παράνομη απόρριψη καθώς και η έλλειψη νομοθεσίας θα μπορούσαν ενδεχομένως να προκαλέσουν έλλειψη χώρου υγειονομικής ταφής.

Τα ανακυκλωμένα τούβλα από απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων ερευνήθηκαν συνήθως στο παρελθόν ως υποκατάστατο αδρανών υλικών στο σκυρόδεμα. Η χρήση ανακυκλωμένων αδρανών υλικών, όχι μόνο συμβάλλει στη μείωση του ζητήματος της υγειονομικής ταφής, αλλά είναι οικονομικά επωφελής και πιο φιλική προς το περιβάλλον. Αρκετές έρευνες δείχνουν ότι τα ανακυκλωμένα αδρανή τούβλα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να αντικαταστήσουν τα φυσικά χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα αδρανή σε κονιάματα και σκυροδέματα.

Ως εκ τούτου, η δυνατότητα ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης αποβλήτων τούβλων στην κατασκευή κεραμικών ή δομικών υλικών θεωρείται μια φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση που όχι μόνο μειώνει το ζήτημα της διάθεσής τους, αλλά βοηθάει επίσης στη μείωση της εξάρτησης από φυσικές πρώτες ύλες.

### **1.1.2. Αγροτικά Απόβλητα**

Ο παγκόσμιος πληθυσμός έχει αυξηθεί από 3,7 δισεκατομμύρια το 1970 σε 7,9 δισεκατομμύρια το 2021. Προβλέπεται ότι θα φτάσει τα 9 δισεκατομμύρια έως το 2050 και στα 11 δισεκατομμύρια έως το 2100 αντίστοιχα. Έτσι, υπάρχει μια ανησυχητική πρόκληση για την επισιτιστική ασφάλεια τα επόμενα χρόνια. Προκειμένου να εκπληρωθούν οι έντονες απαιτήσεις της σίτισης εκατομμυρίων ανθρώπων, σημειώθηκε σημαντική άνοδος στην κτηνοτροφία καθώς και στη φυτική παραγωγή, η οποία έχει συμβάλει περαιτέρω στη δημιουργία γεωργικών αποβλήτων. Κατά τη διάρκεια του περασμένου αιώνα, η Κίνα, η Ινδία και η Αφρική δεν γνώρισαν μόνο ταχεία πληθυσμιακή και οικονομική ανάπτυξη, αλλά και αύξηση της παραγωγικής ικανότητας των αγροτικών αποβλήτων.

Τα αγρο-απόβλητα λοιπόν, είναι υποπροϊόντα της συγκομιδής και της επεξεργασίας των καλλιεργειών, τα οποία έχουν μεγάλες δυνατότητες όσον αφορά την εφαρμογή τους σε τομείς των υλικών και της ενέργειας. Γενικά, τα αγρο-απόβλητα μπορούν να χωριστούν σε πρωτογενή και δευτερογενή υλικά. Τα πρωτογενή αγρο-απόβλητα είναι τα απόβλητα του αγρού που παράγονται απευθείας κατά τη συγκομιδή, όπως άχυρο βαμβακιού, άχυρο σιταριού, άχυρο ρυζιού, φύλλα φοινικέλαιου, τσαμπιά, κ.λπ. Τα δευτερογενή αγρο-απόβλητα προέρχονται από την επεξεργασία των καλλιεργειών, κυρίως φλοιοί ρυζιού, κέλυφος φυσιτικού, κέλυφος καρυδιάς, στάχυα καλαμποκιού, κέλυφος πυρήνα φοίνικα, άδειο τσαμπί φρούτων, ίνες μεσοκάρπιου φοίνικα, κ.λπ.

Τα τελευταία χρόνια έχουν διεξαχθεί μελέτες για τη χρήση μιας ευρείας ποικιλίας των λεγόμενων αγρο-αποβλήτων (υπολείμματα βιομάζας), όπου το ενδιαφέρον εστιάστηκε στα απόβλητα γεωργικής βιομάζας όπως το κέλυφος από φιστίκια (Αιγίνης) προκειμένου να καθοριστούν τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες για την ενσωμάτωση

τους σε μείγματα πηλού για την παραγωγή κεραμικών. Αξίζει να σημειωθεί ότι, τα ίδια αγρο-απόβλητα από διαφορετικές περιοχές εμφανίζουν διαφορετικές ιδιότητες λόγω διαφορετικών εδαφών και συνθηκών καλλιέργειας (όργωμα, εδαφοβελτιωτικά κλπ.).

Οι καρποί Αιγίνης λοιπόν, που συγκομίζονται καλύπτονται με οργανικά εξωτερικά περικάρπια (φλοιός) και ενδοκάρπια (κέλυφος), τα οποία απορρίπτονται κατά τη διαδικασία αφαίρεσης και αποφλοιώσής τους, αντίστοιχα. Και οι δύο αυτές ροές απορριμμάτων φυσιολογικού αντιπροσωπεύουν το >75% της συγκομιδής και στην Ελλάδα περίπου 7000 τόνοι διατίθενται ετησίως (Komnitsas et al., 2015). Σε επίπεδο χώρας, τα απόβλητα φυσιολογικών υπόκεινται κυρίως σε ανοιχτή καύση και απόρριψη χωρίς καμία επεξεργασία. Και οι δύο επιλογές μπορεί να προκαλέσουν σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα και ως εκ τούτου, η ανάγκη για ανάπτυξη εναλλακτικών και φιλικών προς το περιβάλλον πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων αποτελεί μείζον μέλημα στον τομέα του φυσιολογικού.

Για το σκοπό αυτό, η παραγωγή κομπόστ και βιοεξανθρακώματος από απόβλητα φυσιολογικού έχει κερδίσει ιδιαίτερη προσοχή την τελευταία δεκαετία, καθώς αναπτύχθηκε στρατηγική για τη βελτίωση της ποιότητας και της παραγωγικότητας του εδάφους, τη δέσμευση άνθρακα στο έδαφος και τον μετριασμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Greenhouse Gases, GHG).

Στην πραγματικότητα, η επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση των γεωργικών αποβλήτων όχι μόνο μειώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της συγκομιδής, αλλά παρέχει επίσης ένα επιπλέον εισόδημα στους αγρότες, καθώς επιτυγχάνονται υψηλότερες αποδόσεις.

Με την αυξανόμενη περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση και τη ζήτηση για βιώσιμη καλλιέργεια μαζί με τη σωστή διαχείριση των αποβλήτων, οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων και άλλοι ενδιαφερόμενοι φορείς συνειδητοποιούν όλο και περισσότερο την ανάγκη ανάπτυξης εφικτών προσεγγίσεων για τη βελτίωση του οικολογικού προφίλ των συγκομιζόμενων καλλιεργειών στο μέλλον.

## 1.2. Τεχνικές και Αξιοποίησή τους

Σύμφωνα με τον Bories (2015), τα κεραμικά τούβλα είναι ένα προϊόν που κατασκευάζεται με άφθονες, φθηνές πρώτες ύλες συχνά ελεύθερες στη φύση. Αυτά τα δομικά υλικά διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο για την οικονομία των αναπτυσσόμενων χωρών.

Ο κατασκευαστικός κλάδος καταναλώνει περισσότερες πρώτες ύλες από οποιονδήποτε άλλο βιομηχανικό τομέα και αυτό απαιτεί υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, ο κλάδος της κεραμικής συγκαταλέγεται στις βιομηχανίες που είναι καταλληλότερες για τη χρήση οργανικών αποβλήτων, καθώς απαιτεί τεράστιες ποσότητες πρώτων υλών και μπορεί να ενσωματώσει μεγάλη ποσότητα

υπολειμματικών υλικών κατά την επεξεργασία χωρίς να χρειάζεται να κάνει σημαντικές αλλαγές.

Μελέτες έχουν δείξει τη βιωσιμότητα της ανακύκλωσης απορριμμάτων σε κεραμικές διεργασίες, προσθέτοντας βιομηχανικά υπολείμματα στην εσωτερική δομή της αργίλου στην παραγωγή τούβλων. Σύμφωνα με την έννοια της βιομηχανικής οικολογικής ανάπτυξης, που αναπτύχθηκε για ένα βιώσιμο μέλλον, τα υποπροϊόντα της βιομηχανίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτες ύλες σε άλλες βιομηχανίες.

Τα τελευταία χρόνια, αυξάνεται η ευαισθητοποίηση σχετικά με την ανάγκη αύξησης της κατανάλωσης πρώτων υλών και στο να βρεθούν εφικτές λύσεις για την ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση βιομηχανικών αποβλήτων. Ένας από τους κύριους στόχους της προσθήκης υπολειμμάτων ή οργανικών υποπροϊόντων στα προϊόντα αργίλου για την κατασκευή τούβλων έχει συμβάλει στον έλεγχο του πορώδους προκειμένου να μειωθεί η θερμική αγωγιμότητα. Αυτή είναι μια ιδιαίτερα επιθυμητή ιδιότητα που έχει μεγάλη ζήτηση σε βιομηχανικά τούβλα. Η Ε.Ε. ορίζει τη βιομάζα ως, μεταξύ άλλων, το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα βιομηχανικών και δημοσιονομικών αποβλήτων. Μέχρι σήμερα, τα κατάλοιπα βιομάζας χρησιμοποιούνταν κυρίως ως καύσιμο στην ενεργειακή παραγωγή ή ως βιοκαύσιμα.

Μια εναλλακτική μέθοδος για την ανακύκλωση καταλοίπων από τη γεωργία και τις σχετικές βιομηχανίες είναι η χρήση τους για την δημιουργία πόρων σε κεραμικά υλικά, δεδομένου ότι ο σχηματισμός πορώδους κατά το στάδιο της έψησης μπορεί να τροποποιήσει θετικά τις ιδιότητες των τούβλων. Η χρήση ελαφρών τούβλων μπορεί να λύσει το πρόβλημα της ενεργειακής απόδοσης στην κατασκευή. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, οι κατοικίες και οι τριτογενείς τομείς αντιπροσωπεύουν περίπου το 40% της ενεργειακής κατανάλωσης στα κράτη μέλη της Ε.Ε. και το 36% των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Για αυτόν τον λόγο, είναι απαραίτητο να δημιουργηθούν πορώδεις ή μικρό-πορώδεις δομές με οπές και/ή διατρήσεις.

Ένα από τα πλεονεκτήματα της χρήσης υπολειμμάτων ή οργανικών σε προϊόντα αργίλου είναι η εξοικονόμηση ενέργειας κατά τη διάρκεια της έψησης. Κατά τη διάρκεια της καύσης, η βιομάζα παράγει επιπλέον ενέργεια και ένα ποσοστό αυτών έως και 10% μπορεί να προσφέρει μια αποδεκτή βελτίωση του πορώδους και της θερμικής αγωγιμότητας διατηρώντας παράλληλα τη μηχανική αντοχή.

Προηγούμενες μελέτες έχουν διερευνήσει την ενσωμάτωση διάφορων παραπροϊόντων για την παρασκευή κεραμικών, συμπεριλαμβανομένων των ανακυκλωμένων: απορρίμματα χαρτιού, απόβλητα ελαιοτριβείων, λάσπη λυμάτων, υποπροϊόντα παραγωγής βιοντίζελ, φλοιούς ρυζιών και υπολείμματα βιομάζας από τη γεωργία.

Για το σκοπό αυτό, στο απόβλητο τούβλο προστέθηκαν αγρο-απόβλητα όπως το κέλυφος από φυστίκια καθώς και χαλαζιακή άμμος για την παραγωγή πορώδων κεραμικών υλικών για τη μελέτη της επίδρασης του είδους και του ποσοστού των

προστιθέμενων υλικών (5%, 10% και 15 wt.%) στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των παραγόμενων δοκιμίων.

### **1.3. Κεραμικά**

#### **1.3.1. Εισαγωγή**

Η έρευνα στα κεραμικά υλικά εστιάζεται στη διερεύνηση της δομής και των ιδιοτήτων τους, με στόχο την παραγωγή εξελιγμένων υλικών με βελτιωμένες εφαρμογές και ευρύτερη τεχνολογική αξιοποίηση. Ως κεραμικά ορίζονται τα στερεά υλικά, τα οποία παρασκευάζονται από τον άνθρωπο και περιλαμβάνουν όλα τα ανόργανα υλικά, η δομή των οποίων είναι ετερογενής (μπορεί να είναι είτε κρυσταλλικά, είτε μη κρυσταλλικά, ενώ πολύ συχνή είναι η δομή στην οποία μια κρυσταλλική φάση είναι διεσπαρμένη σε μια μη κρυσταλλική, δηλαδή με τη μορφή συμφύσεων) και τα οποία έχουν υποστεί θερμική κατεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες (>1000 °C), είτε κατά την επεξεργασία τους, είτε κατά την εφαρμογή τους.

Η σύνθεση των κεραμικών μπορεί να περιλαμβάνει συνδυασμούς μεταλλικών και μη μεταλλικών στοιχείων, όπως είναι ένα μέταλλο και ένα μη μεταλλικό στερεό στοιχείο ή ένα αμέταλλο, ή δυο μη μεταλλικά στερεά, χημικά συνδεδεμένα μεταξύ τους με ιοντικούς, ομοιοπολικούς ή συνδυασμό αυτών των δεσμών.

Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητές τους καλύπτουν ένα ευρύ πεδίο τιμών και εξαρτώνται από το είδος των ατόμων, το είδος του δεσμού, το ποσοστό της κρυσταλλικής ή άμορφης δομής, τη μέθοδο και τις συνθήκες παραγωγής. Επομένως, καλύπτουν ένα μεγάλο φάσμα χημικών και ορυκτολογικών συστάσεων των πρώτων υλών τους με αποτέλεσμα να εμφανίζουν μηχανικές, ηλεκτρικές, ηλεκτρονικές, μαγνητικές και οπτικές ιδιότητες σε ποικίλες εφαρμογές.

Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η μεγάλη αντοχή τους σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά και η ψαθυρότητα τους. Γενικά, είναι ελαφρά αλλά πολύ σκληρά υλικά και έχουν μεγάλη αντοχή στη θερμότητα, στη φθορά και στη διάβρωση, ενώ συνήθως είναι πολύ καλοί μονωτές.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα τα κεραμικά προϊόντα ταξινομούνται σε:

- Παραδοσιακά (traditional), όπως είναι προϊόντα αργίλου, γυαλί, τσιμέντο και
- Προηγμένα ή νεότερα (advanced), όπως είναι οξείδια, καρβίδια, νιτρίδια, βορίδια.

#### **1.3.2. Παραγωγή-Κατάταξη-Ιδιότητες**

- Παραγωγή Κεραμικών

Τα στάδια που χρειάζονται για την διαδικασία παραγωγής προϊόντων κεραμουργίας είναι τα παρακάτω:

1) Αρχικά πραγματοποιείται εξόρυξη των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των κεραμικών προϊόντων, όπως οπτόπλινθων και άλλων δομικών προϊόντων από άργιλο.

2) Στη συνέχεια, οι πρώτες ύλες μεταφέρονται από το χώρο εξόρυξης και αποθηκεύονται υπαίθρια ή σε κλειστές αποθήκες και έπειτα διέρχονται από μύλους ελάττωσης μεγέθους, με σκοπό τη μείωση των αδρομερών υλικών και των τυχόν συσσωματωμάτων.

3) Ακολουθεί το στάδιο της άλεσης που περιλαμβάνει μύλους άλεσης και τράπεζες κοσκινίσματος, από όπου προκύπτει λεπτόκοκκο υλικό, το οποίο είναι κατάλληλο για τη μορφοποίηση οπτόπλινθων (τούβλων), κεραμιδιών και άλλων προϊόντων. Τύποι μύλων άλεσης που χρησιμοποιούνται τυπικά περιλαμβάνουν, ξηρούς δίσκους άλεσης, κυλινδρόμυλους και σφαιρόμυλους.

4) Έπειτα ακολουθεί η μορφοποίηση του υλικού, κατά την οποία το σώμα παίρνει προκαθορισμένο συγκεκριμένο γεωμετρικό σχήμα και διαστάσεις, ενώ σε αυτό το στάδιο ήδη διαμορφώνονται κάποιες από τις τελικές ιδιότητες του, όπως η μηχανική αντοχή και το πορώδες. Οι περισσότεροι οπτόπλινθοι μορφοποιούνται με τη μέθοδο της εξώθησης, αν και υπάρχουν περιπτώσεις που η μορφοποίηση επιτυγχάνεται με υγρή και ξηρή διαδικασία σε πρέσες. Στη συνέχεια ακολουθεί το στάδιο της ξήρανσης.

5) Από το ξηραντήριο οι οπτόπλινθοι εισέρχονται σε κλίβανο (συνήθως τύπου Tunnel), όπου και λαμβάνει χώρα το στάδιο της όπτησης (σταδιακά, έως τους 1200 °C μέγιστη θερμοκρασία). Αυτό το στάδιο είναι πολύ σημαντικό διότι, μέσω της θέρμανσης γίνεται πυροσυσσώματωση λόγω υψηλών θερμοκρασιών, που έχει ως αποτέλεσμα την ανάμιξη των κόκκων των κεραμικών κόνεων, διαμορφώνοντας έτσι τις ιδιότητες που θα έχει το τελικό προϊόν. Μετά την έψηση, οι οπτόπλινθοι εισέρχονται στη ζώνη ψύξης, όπου ψύχονται σταδιακά μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ο ρυθμός ψύξης επηρεάζει την ευθραυστότητα, το χρώμα καθώς και το σχήμα.

- Κατάταξη και Ιδιότητες Κεραμικών

Τα κεραμικά υλικά χρησιμοποιούνται από την αρχαιότητα. Οι κεραμικές βιομηχανίες, παλαιότερες ή σύγχρονες, υπάρχουν εδώ και χιλιάδες χρόνια. Τα κεραμικά χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες τα παραδοσιακά και τα προηγμένα κεραμικά.

Τα παραδοσιακά κεραμικά είναι οι παλαιότεροι και ευρύτερα γνωστοί τύποι, όπως πορσελάνη, τούβλα, πήλινα σκεύη κλπ. Τα κεραμικά αυτά βρίσκουν εφαρμογή σε αρκετούς παραδοσιακούς τομείς, συχνά όπου απαιτείται υψηλή αντοχή στη θερμότητα ή στη φθορά, στη χημική μηχανική και στη μεταλλουργία, εξαιτίας της χημικής

αδράνειας, της αντίστασης στην περιβαλλοντική οξείδωση και διάβρωση, της εξαιρετικής σκληρότητας και αντοχής.

Με βάση τις εφαρμογές τους, τα παραδοσιακά κεραμικά κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες: στα κλασσικά προϊόντα κεραμουργίας και στα πυρίμαχα. Στη πρώτη κατηγορία ανήκουν όλα τα είδη καθημερινής χρήσεως τα οποία έχουν βάση την άργιλο, και στη δεύτερη τα προϊόντα με κύριο πεδίο εφαρμογών τις επενδύσεις των βιομηχανικών κλιβάνων.

Στο παρακάτω Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται οι κατηγορίες εφαρμογών και ειδικών χρήσεων των παραδοσιακών κεραμικών.

**Πίνακας 1.1:** Εφαρμογές και χρήσεις παραδοσιακών κεραμικών.

Κατηγορίες	χρήσεις
Πήλινα αντικείμενα	Τούβλα, αγγεία, αγωγοί αποχέτευσης
Λειαντικά προϊόντα	Τροχοί λείανσης, γυαλόχαρτα, ακροφύσια αμμοβολής
Οικοδομική	Οικοδομικά τούβλα, κεραμίδια, σκυρόδεμα, πλακάκια,
Υαλουργία	Φιάλες, σκεύη εργαστηρίου, τζάμια
Πυρίμαχα προϊόντα	Πυρίμαχα τούβλα, χωνευτήρια, καλούπια, τσιμέντο
Πορσελάνες	Πλακάκια, αγωγοί ύδρευσης, επισμαλτώσεις

Τα προηγμένα κεραμικά ονομάζονται έτσι γιατί οι εφαρμογές τους αφορούν σύγχρονους τεχνολογικούς τομείς, ενώ παρουσιάζουν μοναδικό συνδυασμό φυσικών, θερμικών, μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων. Τέτοια κεραμικά χρησιμοποιούνται στη βιοϊατρική (εμφυτεύματα), στη μηχανολογία, στον τομέα της οπτικής (οπτικές ίνες), της ηλεκτρονικής (ημιαγωγοί, αισθητήρες), στο περιβάλλον (φίλτρα, μεμβράνες κλπ). Τα προηγμένα κεραμικά είναι υλικά τα οποία βελτιώνουν την καθημερινή μας ζωή με τη συνεχή έρευνά τους σε διάφορους τομείς. Ομοίως, διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στις τηλεπικοινωνίες, την ηλεκτρονική, τις δομικές, ιατρικές, αμυντικές και διαστημικές εφαρμογές.

Για δομικές εφαρμογές, χρησιμοποιούνται κεραμικά υλικά λόγω της υψηλής αντοχής και σκληρότητάς τους, της υψηλής φθοράς και της διαβρωτικής αντοχής τους. Τέτοια χαρακτηριστικά κάνουν το κεραμικό να ενσωματώνεται με οποιοδήποτε υλικό βάσης για να ενισχύσει τις ιδιότητές του. Η επίστρωση κεραμικών υλικών έχει γίνει επίσης, σε μεταλλικά υλικά για τη βελτίωση των ιδιοτήτων φθοράς και διάβρωσης.

Ορισμένα κεραμικά υλικά όπως υδροξυαπατίτης, φωσφορικό ασβέστιο, οξείδιο αργιλίου και βιο-ενεργά γυαλιά χρησιμοποιούνται σε ιατρικές εφαρμογές ως εμφυτεύματα. Τα εμφυτεύματα που κατασκευάζονται από αυτά τα βιο-κεραμικά έχουν καλή βιο-συμβατότητα, υψηλή φέρουσα ικανότητα, φθορά και αντοχή στη διάβρωση. Ωστόσο, η υψηλή πυκνότητα και ελαστικότητα, η χαμηλή ολκιμότητα, η μη βιο-

διασπασιμότητα και η δυσκολία στην κατασκευή είναι τα κύρια μειονεκτήματα των βιο-κεραμικών. Συγκεκριμένα κεραμικά υλικά έχουν αποδεδειγμένες ιδιότητες στον τομέα των ηλεκτρονικών εφαρμογών.

Γενικά, τα κεραμικά υλικά έχουν καλές μονωτικές ιδιότητες, υψηλή διηλεκτρική σταθερά και καλές ημιαγώγιμες ιδιότητες. Επομένως, χρησιμοποιούνται ως πυκνωτές, αισθητήρες και ενεργοποιητές, ολοκληρωμένα κυκλώματα, ταλαντωτές, φίλτρα κλπ. Λόγω του υψηλού σημείου τήξης, τα κεραμικά χρησιμοποιούνται επίσης για την κατασκευή των εξαρτημάτων που λειτουργούν σε περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας, όπως πτερύγια στροβίλων, πυρίμαχα υλικά και θερμομονώσεις σε πυρηνικούς και θερμικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής.

### 1.3.3. Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Κεραμικών Υλικών

Τα δομικά κεραμικά είναι τα υψηλής τεχνολογίας μηχανικά κεραμικά που μπορούν να αντέξουν σε υψηλές μηχανικές, θερμικές, τριβολογικές καταπονήσεις, διαβρωτικά περιβάλλοντα και υψηλές θερμοκρασίες. Γενικά, αυτά τα κεραμικά παρουσιάζουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες σε ακραία περιβάλλοντα και υψηλές θερμοκρασίες, αλλά η χαμηλή αντοχή σε θραύση, η εύθραυστη φύση και η υψηλή ευαισθησία σε δομικά ελαττώματα, ρωγμές και πόρους αποτελούσαν πάντα περιορισμό στις εφαρμογές τους.

Όμως η ταχύτατη ανάπτυξη σε ορισμένα κεραμικά, έχουν αυξήσει τις δυνατότητές τους και τη λειτουργικότητά τους, που επιτρέπουν το σχεδιασμό υλικών με προσαρμοσμένο προφίλ συμπεριφοράς που επιθυμείται. Αυτά τα κεραμικά χρησιμοποιούνται εμπορικά σε πολλές εφαρμογές και τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 1.2.

**Πίνακας 1.2:** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κεραμικών υλικών.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Σχετικά χαμηλή πυκνότητα (πιο ελαφριά)	Μικρή αντοχή σε κόπωση και κρούση
Υψηλό σημείο τήξης (μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών υψηλής θερμοκρασίας)	Μικρή αντίσταση σε εφελκυσμό (ψαθυρή συμπεριφορά)
Καλή αντίσταση σε θλίψη (πιο ανθεκτικά)	Εύκολη διάδοση ρωγμών
Υψηλό μέτρο ελαστικότητας (πιο γερά)	Ευθραυστότητα
Πολύ υψηλή σκληρότητα (πιο ανθεκτικά σε φθορά)	Υψηλό κόστος παραγωγής
Χαμηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα (μονωτές)	Μεγάλη επίδραση μικροδομής και πορώδους τους στις μηχανικές και φυσικές τους ιδιότητες
Ανώτερη πυρίμαχη, αντιδιαβρωτική και αντιτριβική συμπεριφορά ως συνδυασμός των ανωτέρω ιδιοτήτων	



#### 1.3.4. Παρασκευή Κεραμικών από Απόβλητα

Η τελική διαχείριση των αποβλήτων προκαλεί αυξανόμενη ανησυχία των κυβερνήσεων τα τελευταία χρόνια. Η αύξηση του βαθμού ανάπτυξης του πολιτισμού και της τεχνολογίας έχει αυξήσει τις ποσότητες, τις ιδιότητες και τη βλαπτικότητα των παραγόμενων αποβλήτων. Η κοινωνική πίεση για τη διατήρηση του φυσικού περιβάλλοντος, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη οικονομική πίεση, ανανέωσε το ενδιαφέρον για τη χρήση προϊόντων που χρησιμοποιούν απόβλητα ως πρώτες ύλες, που ονομάζονται επίσης δευτερογενείς πρώτες ύλες ή υποπροϊόντα.

Γενικά τα αγρο-απόβλητα χρησιμοποιήθηκαν ευρέως ως πρόσθετα στην παραγωγή τούβλων. Φυτικές ίνες φυτών ή αποβλήτων προϊόντων, χρησιμοποιήθηκαν σε τούβλα για τη βελτίωση της αντοχής τους. Τα γεωργικά υποπροϊόντα στο τούβλο ενισχύουν τις μηχανικές ιδιότητες και βελτιώνουν την αντοχή τους στη χημική διάβρωση. Επίσης, η χρήση των γεωργικών υποπροϊόντων μειώνουν τη θερμική αγωγιμότητα γεγονός που τα καθιστά ελκυστικά για τη χρήση τους σε κατοικίες.

Μια εναλλακτική λύση για τον τελικό προορισμό αυτών των αποβλήτων είναι ο κατασκευαστικός τομέας, όπου η μεγάλη ανάγκη για πρώτες ύλες μπορεί να απορροφήσει μεγάλο μέρος των αποβλήτων. Αρκετές μελέτες διαπίστωσαν ότι τα πολυμερή, το τσιμέντο και τα κεραμικά είναι τα υλικά που ταιριάζουν καλύτερα στην επίτευξη της αδρανιοποίησης και της εξουδετέρωσης των αποβλήτων, ενσωματώνοντάς τα σε τελικής μορφής δομικά υλικά.

Τα τελευταία χρόνια, η ανάπτυξη πορωδών κεραμικών για ελαφριά τούβλα με μειωμένη θερμική αγωγιμότητα και αποδεκτές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες έχει αυξηθεί για να μειώσει το βάρος του κτιρίου καθώς και την κατανάλωση ενέργειας. Το πλεονέκτημα της χρήσης ελαφρών πορωδών τούβλων είναι επιθυμητό, ιδιαίτερα σε περιοχές που έχουν πληγεί από σεισμό. Σημαντικές βελτιώσεις στη βιωσιμότητα των κτιρίων μπορούν να επιτευχθούν με τη μείωση της θερμικής αγωγιμότητας των δομικών υλικών με τη χρήση πορωδών κεραμικών τούβλων, τα οποία μειώνουν την ενέργεια που απαιτείται για τη θέρμανση και την ψύξη του κτιρίου. Η παρουσία πόρων βελτιώνει τη θερμική απόδοση των τοίχων μειώνοντας τη θερμική τους αγωγιμότητα. Ένα άλλο πλεονέκτημα της χρήσης ελαφρών πορωδών κεραμικών τούβλων είναι το μειωμένο κόστος, συμπεριλαμβανομένου του κόστους εξόρυξης πρώτων υλών, μεταφοράς και εργασίας.

Αρκετοί ερευνητές έχουν αναφέρει επίσης ότι, η ανάπτυξη δομικών υλικών χρησιμοποιώντας αγροτικά απόβλητα μπορεί να οδηγήσει σε πιο βιώσιμα κτίρια. Με βάση αυτή την προοπτική, η αξιοποίηση των αγροτικών αποβλήτων για κατασκευαστικές εφαρμογές διασφαλίζει την περιβαλλοντική βιωσιμότητα και ελαχιστοποιεί τη ρύπανση και τις δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις στον κατασκευαστικό τομέα.

## **1.4. Πρώτες Ύλες – Απόβλητα που Χρησιμοποιήθηκαν**

### **1.4.1. Απόβλητο Τούβλο**

Η προστασία του περιβάλλοντος και η διασφάλιση της μακροπρόθεσμης ευημερίας της κοινωνίας σημαίνει ότι κάθε προϊόν πρέπει να κατασκευάζεται, να καταναλώνεται και να μεταφέρεται με βιώσιμο τρόπο.

Τα απόβλητα που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα διπλωματική εργασία ανήκουν στην κατηγορία των αποβλήτων από εκσκαφές, κατασκευές και κατεδαφίσεις (ΑΕΚΚ), τα οποία αποτελούν ένα σημαντικό ποσοστό σε όγκο ανεκμετάλλευτων αποβλήτων. Αυτά αποτελούνται κατά κύριο λόγο από ένα ευρύ φάσμα δομικών υλικών, που βρίσκουν εφαρμογή σε όλα τα στάδια μιας κατασκευής και τα κυριότερα από αυτά είναι τα αδρανή υλικά, τα κεραμικά προϊόντα όπως τούβλα και πλακίδια, το σκυρόδεμα (οπλισμένο και μη), ενώ δεν αποκλείεται και η παρουσία επιβλαβών προσμίξεων (πχ Αμίαντος).

Η μαζική αποθήκευση τέτοιων αποβλήτων που προκύπτει από τις κατασκευές και τις κατεδαφίσεις καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ), αν και τα περισσότερα από αυτά είναι ανακυκλώσιμα και μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν εκ νέου, κατόπιν διαλογής, εμπλουτισμού και επεξεργασίας, ως πρώτες ύλες στον κατασκευαστικό τομέα.

Με αυτόν τον τρόπο, η απόκτηση βιώσιμων υλικών με την αντικατάσταση των δομικών υλικών σε κατασκευαστικά στοιχεία, με απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων μπορεί να ελαττώσει την κατανάλωση φυσικών μη ανανεώσιμων πόρων. Το κόστος ανακύκλωσης και ανάκτησης των αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων προκύπτει κυρίως από το κόστος αποθήκευσης αυτού του τύπου αποβλήτων. Τεράστια απόβλητα, αλλά με μεγάλες δυνατότητες για ανάκτηση είναι τα κεραμικά απόβλητα.

Επομένως, η μείωση του όγκου των αποβλήτων αυτών που καταλήγουν σε ΧΥΤΑ ή ακόμη και σε μη ελεγχμένους και πιστοποιημένους χώρους διάθεσης αποτελεί μια σημαντική πρόκληση τις τελευταίες δεκαετίες, καθώς συνεπάγονται πολυάριθμες αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η ρύπανση των εδαφών, των υδροφόρων οριζώντων και των υπόγειων υδάτων, της ατμόσφαιρας, όπως επίσης προκύπτει και η αισθητική υποβάθμιση της περιοχής διάθεσής τους.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η διαχείριση και αξιοποίηση των απόβλητων τούβλων σε συνδυασμό με άλλα αγροτικά απόβλητα (κέλυφος από φυστίκι) και πρώτες ύλες όπως η χαλαζιακή άμμος με σκοπό τη δημιουργία νέων, φιλικών προς το περιβάλλον δευτερογενών υλικών κατάλληλων για ποικίλες εφαρμογές (*Εικόνα 1.1*).



**Εικόνα 1.1:** Σωρός από απόβλητα τούβλα.

#### **1.4.2. Κέλυφος από Φυστίκι**

Η βιομηχανία επεξεργασίας φυσιτικών είναι ένας από τους σημαντικότερους συντελεστές των αγροτοβιομηχανικών αποβλήτων, κυρίως μέσω της παραγωγής αποβλήτων κελύφων φυσιτικών. Τα τελευταία χρόνια, τα κελύφη των φυσιτικών αποτελούν ένα άφθονο απόβλητο υλικό χωρίς αγοραία αξία, αλλά με πιθανή χρήση σε οικοδομικά υλικά. Περίπου 28 εκατομμύρια τόνοι φυσιτικών παράγονται ετησίως μόνο στην Ασία. Το κέλυφος συμβάλλει στο 25-30% του βάρους των φυσιτικών, που σημαίνει ότι 7-9 εκατομμύρια τόνοι αποβλήτων φυσιτικών παράγονται στην περιοχή.

Από την εκβιομηχάνιση της παραγωγής του φυσιτικού εμφανίζονται διάφορα προϊόντα, αλλά το τρίτο μέρος της παραγωγής φυσιτικών αντιστοιχεί στα κελύφη, τα οποία διαχωρίζονται στις μονάδες επιλογής και επεξεργασίας. Τα κελύφη φυσιτικών χρειάζονται 2-3 χρόνια για να αποσυντεθούν πλήρως στο έδαφος και είναι επίσης σχετικά δύσκολο να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο. Η συνήθης απόρριψη του κελύφους των φυσιτικών είναι η αποτέφρωση ή η χρήση ως καύσιμο σε λέβητες. Όταν τα κελύφη καίγονται στην ύπαιθρο προκαλούνται σημαντικές επιπτώσεις, όπως η παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων CO<sub>2</sub> και μικροσωματιδίων. Όμως, όπως έχουν δείξει προηγούμενες έρευνες, η χρήση αυτού του τύπου υπολειμμάτων βιομάζας σε οικοδομικά τούβλα πραγματοποιείται κυρίως για την παραγωγή ελαφρών κεραμικών σε μήτρες.

Στην εργασία αυτή, αγροτικά απόβλητα πιο συγκεκριμένα τα κελύφη των φυσιτικών (Εικόνα 1.2) χαρακτηρίστηκαν προκειμένου να αναλυθεί η δυνατότητα χρήσης τους ως πιθανής πρώτης ύλης για την κατασκευή κεραμικών υλικών για τη βιομηχανία δομικών υλικών. Τα κελύφη φυσιτικών υποβλήθηκαν σε διάφορες τεχνικές όπως περίθλαση ακτινών X (X-Ray Diffraction, XRD) και χημική ανάλυση με την τεχνική της

φασματοσκοπίας φθορισμού ακτινών X (X-Ray Fluorescence, XRF) για τη δυνατότητα χρήσης τους σε οπτόπλινθους.



**Εικόνα 1.2:** Κελύφη φυστικιών τύπου Αιγίνης.

### **1.4.3. Βιοεξανθράκωμα**

Η μετατροπή των αγρο-αποβλήτων σε βιοεξανθράκωμα μέσω πυρόλυσης είναι μια εξέχουσα στρατηγική διαχείρισης για την επίτευξη ουδέτερου ισοζυγίου άνθρακα σε μια κυκλική οικονομία, ικανοποιώντας τόσο τις περιβαλλοντικές, όσο και τις κοινωνικές ανησυχίες.

Για την επίτευξη του παγκόσμιου στόχου που έχει θέσει η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC, 2018), απαιτείται αποτελεσματική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG) για τον στόχο των μηδενικών εκπομπών. Η αξιοποίηση της βιομάζας είναι μία από τις άμεσα διαθέσιμες λύσεις. Για παράδειγμα, τα αγρο-απόβλητα θεωρούνται ανανεώσιμη βιομάζα που συνοδεύει τη συγκομιδή των καλλιεργειών και το CO<sub>2</sub> απομακρύνεται κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των φυτών.

Ωστόσο, σε πολλές περιοχές, τα αγρο-απόβλητα εγκαταλείπονται άμεσα στο χωράφι ή/και καίγονται για να απελευθερώσουν CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα, οδηγώντας σε εκτεταμένα περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως οι εκπομπές αιθαλομίχλης και αιωρούμενων σωματιδίων (Tagade et al., 2021). Οι ανεκμετάλλευτες ευκαιρίες για προηγμένες και φιλικές προς το περιβάλλον στρατηγικές διαχείρισης των αγρο-αποβλήτων θα κλείσουν τον βρόγχο των πόρων για καθαρές μηδενικές εκπομπές άνθρακα και θα επιτύχουν βιώσιμη διαχείριση των πόρων των αγρό-οικοσυστημάτων.

Ως μία από τις πιο ελπιδοφόρες τεχνολογίες για τη μετατροπή βιομάζας, είναι η πυρόλυση η οποία μπορεί να επιτύχει νέα υλικά προστιθέμενης αξίας (Zhu et al., 2022). Διαφορετικοί τύποι τεχνολογιών πυρόλυσης μπορούν να προσαρμοστούν για να ικανοποιήσουν διάφορες απαιτήσεις εφαρμογής, ανάλογα με τους τύπους πρώτων υλών, τις περιοχές και τις κλίμακες.

Η πυρόλυση μπορεί γενικά να ταξινομηθεί σε: α) γρήγορη πυρόλυση, β) ενδιάμεση πυρόλυση και γ) αργή πυρόλυση, σύμφωνα με διαφορετικούς ρυθμούς θέρμανσης και χρόνο παραμονής, τα οποία χαρακτηρίζονται από διαφορετικά κλάσματα κύριων προϊόντων (π.χ. συνθετικό αέριο, βιοέλαιο και βιοεξανθράκωμα). Η ρύθμιση της θερμοκρασίας πυρόλυσης, της διάρκειας, των καταλυτικών προσθέτων και των μεθόδων τροποποίησης (φυσική και χημική ενεργοποίηση), μπορεί να βελτιώσει περαιτέρω τη διανομή και τις ιδιότητές του προϊόντος.

Το βιοεξανθράκωμα (biochar), ως στερεό υλικό πλούσιο σε άνθρακα, έχει μια ποικιλία σεναρίων εφαρμογής, όπως τροποποίηση εδάφους, υποκατάσταση ενέργειας, προσροφητικά, υποστηρίγματα καταλυτών, για προσρόφηση CO<sub>2</sub> κλπ. Μεταξύ αυτών, η εφαρμογή βιοεξανθρακωμάτων για τροποποίηση του εδάφους είναι δημοφιλής, επειδή το βιοεξανθράκωμα θα μπορούσε όχι μόνο να βελτιώσει τη συνολική υγεία του εδάφους, όπως η ενισχυμένη γονιμότητα, η μείωση της ρύπανσης και ο εμπλουτισμένος βιοτικός πληθυσμός, αλλά και να συμβάλει στη δέσμευση του άνθρακα και στη στάθμιση της κλιματικής αλλαγής. Αν και το βιοεξανθράκωμα μπορεί να αποικοδομηθεί σε κάποιο βαθμό υπό διαφορετικές συνθήκες πεδίου, η μακροπρόθεσμη αποθήκευση άνθρακα είναι παγκοσμίως αναγνωρισμένη και πέρα από κάθε αμφιβολία. Επιπλέον, το βιοεξανθράκωμα είναι ένας καλός φορέας ενέργειας με υψηλή θερμογόνο ικανότητα (HHV) 12-30 MJ/kg, που δείχνει μεγάλο ενεργειακό δυναμικό ως στερεό καύσιμο. Ως εκ τούτου, η τεχνολογία βιοεξανθρακώματος μπορεί να διευκολύνει την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των αγρο-αποβλήτων.

Στη μέθοδο αυτή (πυρόλυση), τα αγρο-απόβλητα πιο συγκεκριμένα το κέλυφος από τα φυστίκια υποβάλλονται σε επεξεργασία σε θερμοκρασία περίπου 400 °C (θερμική αποικοδόμηση) απουσία οξυγόνου. Γενικά η πυρόλυση πραγματοποιείται σε διάφορους αντιδραστήρες, συμπεριλαμβανομένων αντιδραστήρων ρευστοποιημένων κλινών, αντιδραστήρων σταθερής κλίνης και περιστροφικών κλιβάνων (εδώ χρησιμοποιήθηκε μόνο κλίβανος).

Το biochar λοιπόν, είναι λεπτόκοκκο κάρβουνο με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα (Koul and Taak, 2018). Με την πάροδο των ετών, τα κατάλοιπα βιοεξανθρακωμάτων και καλλιεργειών έχουν κερδίσει δημοσιότητα ως βιώσιμη στρατηγική για τη παραγωγή κεραμικών υλικών. Ο τύπος της βιομάζας και η μέθοδος της πυρόλυσης έχει σημαντικό αντίκτυπο στην ποιότητα των βιοεξανθρακωμάτων. Πρέπει να σημειωθεί ότι η αποτελεσματικότητα των βιοεξανθρακωμάτων ως πρόσμικτου σε τσιμεντοειδή υλικά επηρεάζεται από τη σύνθεση και τις φυσικές του ιδιότητες, οι οποίες εξαρτώνται από την πρώτη ύλη και τις συνθήκες παραγωγής.

#### **1.4.4. Χαλαζιακή Άμμος**

Ο χαλαζίας είναι σχετικά φθηνός, χημικά ουδέτερος, έχει κογχοειδή θραυσμό και σκληρότητα 7 κατά Mohs. Παρουσιάζει υψηλή λευκότητα, χαμηλή απορροφητικότητα

ελαίου και ικανότητα κονιοποίησης σε ειδικά μεγέθη κόκκων. Για αυτό, η χαλαζιακή άμμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό πλήρωσης, λείανσης ή διήθησης, καθώς και σε ποικίλες κατασκευές. Επίσης, παρουσιάζει πυριμαχότητα (σημείο τήξης 1470 °C) και χρησιμοποιείται ως άμμος χυτηρίων.

Η χαλαζιακή άμμος θεωρείται προϊόν αποσάθρωσης και επεξεργασίας όλων των πετρωμάτων, κυρίως από το νερό και τον άνεμο. Ο βαθμός εμπλουτισμού της σε χαλαζία και η καλή ταξινόμηση αυτής εξαρτάται από τη διάρκεια και την ένταση των παραγόντων αποσάθρωσης και μεταφοράς των θραυσμάτων ή κόκκων, καθώς και από την παρουσία πλούσιων σε χαλαζία μητρικών πετρωμάτων.

Οι κύριες πηγές προέλευσης της χαλαζιακής άμμου είναι τα πλούσια σε χαλαζία πυριγενή ή μεταμορφωμένα πετρώματα. Διάφορες εφαρμογές της χρήσης χαλαζιακής άμμου είναι στην υαλουργία (>98,5% SiO<sub>2</sub>, 0,2-1,6% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, <0,04%Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ίχνη χρωστικών στοιχείων και πυρίμαχων ορυκτών), στην κεραμική (μέγεθος κόκκων <75 μm, >97,5% SiO<sub>2</sub>, <0,55% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, <0,2% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), σε άμμο χυτηρίων (μέσο μέγεθος κόκκων 75μm, >85% σίδηρος ή >95% χάλυβας SiO<sub>2</sub>), σε πυρίμαχη άμμο (95-99% SiO<sub>2</sub>) και στην αγγειοπλαστική (>95% SiO<sub>2</sub>, 1-2% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, <0,10% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

#### **1.4.5. Βιο-τούβλα (bio-bricks)**

Για κατασκευαστικούς σκοπούς, το κύριο υλικό που χρησιμοποιείται είναι ψημένα τούβλα από πηλό των οποίων η παραγωγή εκλύει μεγάλο αριθμό αερίων θερμοκηπίου. Το βιο-τούβλο (bio-brick) είναι μια βασισμένη σε αγρο-απόβλητα, απαλλαγμένη σε άνθρακα, βιώσιμη, οικονομικά αποδοτική και κερδοφόρα εναλλακτική λύση, αντί για την καύση υπολειμμάτων καλλιεργειών (Rautray et al., 2021). Αυτά τα βιο-τούβλα έχουν χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα περίπου 0,27 W/mK και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή τοίχων με αυξημένη ηχομόνωση και θερμομόνωση.

Οι ερευνητές διαπίστωσαν κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του βίο-τούβλου, ότι μόνο ένα μπλοκ αυτού(150 mm x 150 mm x 150mm) μπορεί να δεσμεύσει 322,2 g CO<sub>2</sub>. Αν και τα βιο-τούβλα παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα, εξακολουθούν να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας για την κατασκευή κτιρίων μεγάλης φέρουσας ικανότητας. Μπορούν, όμως να χρησιμοποιηθούν με συνδυασμό ξύλινων ή μεταλλικών δομικών σκελετών σε κατοικίες χαμηλού κόστους. Οι ερευνητές συνεχίζουν να βελτιώνουν την αναλαμβανόμενη φέρουσα ικανότητα των βίο-τούβλων.

## Κεφάλαιο 2-Πειραματική Μεθοδολογία

### 2.1. Προετοιμασία και Παρασκευή Κεραμικών

#### 2.1.1. Πυρόλυση Κελύφους Φυστικιού

Το βιοεξανθράκωμα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία παρασκευάστηκε από απόβλητα κελύφους φυστικιών. Η βιομάζα θρυμματίστηκε σε μικρά τεμαχίδια όπου το μέσο μέγεθος κόκκων ήταν κάτω από 80  $\mu\text{m}$ . Τα θρυμματισμένα κελύφη μετατράπηκαν σε βιοεξανθράκωμα με πυρόλυση στους 400  $^{\circ}\text{C}$  και με ρυθμό ανόδου θερμοκρασίας 3  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

Αυτό θεωρείται αργή πυρόλυση, η οποία αυξάνει την απόδοση του βιοεξανθρακώματος. Η θέρμανση πραγματοποιήθηκε για μία ώρα, σε θερμοκρασία σταθερής κατάστασης 400  $^{\circ}\text{C}$ . Στη συνέχεια, το βιοεξανθράκωμα αφαιρέθηκε και υποβλήθηκε σε άλεση σε πλανητικό μύλο για τρία λεπτά, ώστε να ληφθούν λεπτά σωματίδια πριν αναμειχθούν με το κεραμάλευρο και τη χαλαζιακή άμμο (Εικόνα 2.1).



**Εικόνα 2.1:** Σκόνη βιοεξανθρακώματος από την έψηση λειοτριβημένου κελύφους φυστικιού.

#### 2.1.2. Λειοτρίβηση Αποβλήτων Τούβλων-Κέλυφος από Φυστίκι-Χαλαζιακή Άμμος

Για την παρασκευή των δοκιμίων έπρεπε οι ξηρές σκόνες από τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν να έχουν λειοτριβηθεί καταλλήλως, για την αποφυγή προβλημάτων κατά την ανάμιξη τους, για την μορφοποίηση των δοκιμίων. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε ειδικός σπαστήρας (ραβδόμυλος), (Εικόνα 2.2) για την λειοτρίβηση των αποβλήτων τούβλων, ώστε να μειωθεί το μέγεθός τους. Έπειτα και για τα απόβλητα τούβλα και για τις υπόλοιπες πρώτες ύλες, χρησιμοποιήθηκε ο πλανητικός μύλος Bico Pulverizer (Εικόνα 2.3 και Εικόνα 2.4), ώστε η κοκκομετρία του κάθε υλικού να είναι  $d_{50} < 50 \mu\text{m}$  με αποτέλεσμα έτσι, την καλύτερη συσσωμάτωση τους στη μεταξύ τους ανάμιξη.





**Εικόνα 2.2:** Ειδικός σπαστήρας-Ραβδόμυλος.



**Εικόνα 2.3:** Πλανητικός μύλος Bico Pulverizer.



**Εικόνα 2.4:** Κέλυφος φυστικιού (ως έχει).



### 2.1.3. Προετοιμασία Συστάσεων - Αναμίξεις Πρώτων Υλών

Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των δοκιμίων ήταν οι εξής:

- Απόβλητο τούβλο,
- Κέλυφος από φυστίκι (ως έχει και μετά από πυρόλυση),
- Χαλαζιακή άμμος

Αρχικά όλα τα υλικά λειοτριβήθηκαν ώστε να έχουν το κατάλληλο μέγεθος για την ομοιόμορφη ανάμιξη τους στην κατασκευή των δοκιμίων. Η ομάδα Α των δοκιμίων αποτελείται από απόβλητο τούβλο και απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυστικιού(ως έχει και μετά από πυρόλυση), σε διάφορες συστάσεις.

Η πρώτη σειρά των δοκιμίων αποτελείται αποκλειστικά από απόβλητο τούβλο (50g), η δεύτερη σειρά των δοκιμίων αποτελείται από απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυστικιού σε ποσοστό 5% (ως έχει και μετά από πυρόλυση) και η τρίτη σειρά δοκιμίων αποτελείται από απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυστικιού σε ποσοστό 15% (ως έχει και μετά από πυρόλυση). Για να ομογενοποιηθεί το μείγμα καλύτερα, χρησιμοποιήθηκαν λίγες σταγόνες από απιονισμένο νερό, ώστε τα δοκίμια να γίνουν πιο συμπαγή και ακέραια για να αποφευχθεί ο πιθανός θρυμματισμός τους, καθώς και η εμφάνιση ρωγμών (Εικόνα 2.5).



**Εικόνα 2.5:** Μείγμα από απόβλητο τούβλο και κέλυφος φυστικιού (μετά από πυρόλυση).

Σε όλα τα μείγματα κατασκευάστηκαν 16 δοκίμια κάθε φορά. Έπειτα τα δείγματα τοποθετήθηκαν στον ξηραντήρα για ένα 24ώρο (εν γένει όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος που παραμένει το υλικό στον ξηραντήρα, τόσο το καλύτερο, διότι αποβάλλεται η περιλαμβανόμενη περίσσεια ποσότητα νερού που οφείλεται είτε στη φύση του υλικού, είτε στην υγρασία της ατμόσφαιρας, είτε σε ποσότητα νερού που προσθέσαμε εμείς για την ομογενοποίηση του μείγματος και αυτό συμβάλλει στην αποφυγή των πιθανών εμφανίσεων ρωγμών στα τελικά δοκίμια) και στην συνέχεια θερμάνθηκαν σε θερμοκρασίες 900 °C, 1000 °C και 1100 °C (Εικόνα 2.6).

Επίσης δημιουργήθηκαν άλλες τέσσερις φαρίνες. Η ομάδα Β των δοκιμίων αποτελείται από απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυστικιού (ως έχει)-χαλαζιακή άμμο σε διάφορες συστάσεις.

Η πρώτη σειρά των δοκιμίων αποτελείται από απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού σε ποσοστό 5%-χαλαζιακή άμμο σε ποσοστό 5% .Η δεύτερη σειρά δοκιμίων αποτελείται από απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού σε ποσοστό 5%-χαλαζιακή άμμο σε ποσοστό 10%. Η τρίτη σειρά των δοκιμίων αποτελείται από απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού σε ποσοστό 15%-χαλαζιακή άμμο σε ποσοστό 5% και η τέταρτη σειρά δοκιμίων αποτελείται από απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού σε ποσοστό 15%-χαλαζιακή άμμο σε ποσοστό 10%.

Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν αυτή την φορά ήταν 12 για κάθε ομάδα. Έπειτα μετά τη ξήρανση τους, ακολούθησε η έψηση αντίστοιχα στις ίδιες θερμοκρασίες με τα προηγούμενα, δηλαδή 900 °C , 1000 °C και 1100 °C, όπως φαίνεται και παρακάτω (Εικόνα 2.7, Εικόνα 2.8 και Εικόνα 2.9).



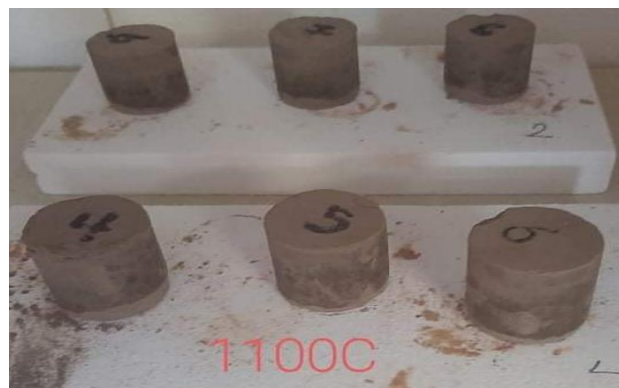
**Εικόνα 2.6:** Δοκίμια πριν την έψηση.



**Εικόνα 2.7:** Δοκίμια πριν την έψηση στους 900 °C.



**Εικόνα 2.8:** Δοκίμια πριν την έψηση στους 1000 °C.



**Εικόνα 2.9:** Δοκίμια πριν την έψηση στους 1100 °C.

#### 2.1.4. Μορφοποίηση Δοκιμίων

Όλα τα δοκίμια μορφοποιήθηκαν με ξηρή μέθοδο και ειδικότερα με τη μέθοδο της μονοαξονικής συμπίεσης σε ειδική πρέσα. Αναλυτικότερα, οι κεραμικές σκόνες των λειοτριβημένων πρώτων υλών σχηματοποιήθηκαν μέσα σε ένα ανοξείδωτο μεταλλικό κυλινδρικό καλούπι, υψηλής σκληρότητας και αντοχής, με την βοήθεια μιας εφαρμοζόμενης πίεσης που ασκείται μέσω ενός εμβόλου που μεταφέρει τη δύναμη συμπίεσης προς μία και μόνο διεύθυνση, συνήθως του κατακόρυφου άξονα του καλουπιού. Η πίεση αυτή είναι σημαντική διότι, βοηθάει τους ασύνδετους κόκκους των υλικών να ενωθούν μεταξύ τους παίρνοντας το εσωτερικό σχήμα του καλουπιού, ενώ συγχρόνως προκαλεί πλαστική παραμόρφωση σε αυτούς.

Αφού ομογενοποιηθούν λοιπόν, η κοιλότητα του καλουπιού γεμίζει με το μείγμα απ' τις πρώτες ύλες και έπειτα εισάγεται σε αυτό, ένα έμβολο συμπίεσης (Εικόνα 2.10). Στη συνέχεια, το καλούπι και το έμβολο τοποθετούνται στην υδραυλική πρέσα συμπίεσης (Εικόνα 2.11), όπου μέσω του ειδικού μοχλού λάμβανε χώρα η συμπίκνωση του μείγματος με πίεση από πάνω. Για την μορφοποίηση των μειγμάτων, η δύναμη συμπίεσης που εφαρμόστηκε ήταν 10 MPa. Μετά την συμπίεση το καλούπι με το έμβολο αφαιρούνταν από την πρέσα, ώστε να παραληφθεί το μορφοποιημένο δοκίμιο

του συμπυκνωμένου υλικού, με την τεχνική της εξώθησης και η διαδικασία επαναλαμβάνεται ομοίως για τα υπόλοιπα δοκίμια.



**Εικόνα 2.10:** α) Καλούπια μορφοποίησης μείγματος και β) εξώθησης.



**Εικόνα 2.11:** Υδραυλική πρέσα συμπίεσης.

### 2.1.5. Παραγωγή Κεραμικών

Έπειτα από κάθε στάδιο, όπως η ξήρανση και η μορφοποίηση δοκιμίων μετρήθηκαν οι διαστάσεις (ύψος και διάμετρος) και η μάζα κάθε δοκιμίου ξεχωριστά καθώς και μετά την έψηση αντίστοιχα, στους 900 °C, 1000 °C και 1100 °C. Η έψηση έγινε σε κλίβανο υψηλών θερμοκρασιών για δύο ώρες με ρυθμό θέρμανσης 3 °C/min (Εικόνα 2.12) και έπειτα μειώθηκε σταδιακά η θερμοκρασία μέχρι τα δοκίμια που ήταν τοποθετημένα μέσα στον κλίβανο να φτάσουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ώστε



στη συνέχεια να γίνει συγκριτική αξιολόγηση στις μεταβολές των μεγεθών που μετρήθηκαν, πριν και μετά το στάδιο της έψησης.



**Εικόνα 2.12:** Κλίβανος υψηλών θερμοκρασιών.



**Εικόνα 2.13:** Δοκίμια μετά την έψηση.



**Εικόνα 2.14:** α) Δοκίμια απόβλητου τούβλου-κελύφους φυσιτικού μετά την έψηση, β) Δοκίμια απόβλητου τούβλου μετά την έψηση και γ) Δοκίμια απόβλητου τούβλου-κελύφους φυσιτικού (μετά από πυρόλυση).



**Εικόνα 2.15:** Δοκίμια με απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού-χαλαζιακή άμμο μετά την έψηση.

## 2.2. Προσδιορισμός Ιδιοτήτων

### 2.2.1. Πυκνότητα-Πορώδες-Υδατοαπορροφητικότητα

Κατά το πρότυπο DIN EN 993-1, προσδιορίστηκαν οι φυσικές ιδιότητες των κεραμικών δοκιμίων, που αφορούν τη πυκνότητα, το φαινόμενο πορώδες και την υδατοαπορροφητικότητα. Αρχικά, προσδιορίστηκε με ζυγό ακριβείας η μάζα  $m_1$  επί ξηρού του εκάστοτε δοκιμίου (Εικόνα 2.16) και εν συνεχεία τοποθετήθηκαν όλα τα δοκίμια εντός του ξηραντήρα με ερμητικό κλείσιμο του δοχείου (Εικόνα 2.17 a), για να αφαιρεθεί όλος ο περιεχόμενος ατμοσφαιρικός αέρας από τους πόρους των δοκιμίων, με τη δημιουργία κενού για δύο ώρες. Ακολούθησε η πλήρωση του δοχείου με απιονισμένο νερό έως το 50% του ύψους των δοκιμίων (Εικόνα 2.17 b), τα οποία παρέμειναν σε αυτό το περιβάλλον για τρεις ώρες, ώστε να διεισδύσει το νερό σε όλους τους πόρους τους. Στη συνέχεια, προσδιορίστηκε η φαινόμενη μάζα των εμβαπτισμένων δοκιμίων  $m_2$  με ζύγισή τους εντός του νερού και κατόπιν απομακρύνονται από το νερό, σκουπίζονται με χαρτί για την απομάκρυνση των σταγόνων από την επιφάνειά τους, ώστε να προσδιοριστεί και η μάζα  $m_3$  με ζύγισή τους εκτός του νερού.

Συνεπώς προσδιορίζονται τα προαναφερόμενα φυσικά μεγέθη, ως εξής:

- Πυκνότητα,  $\rho$  (g/cm<sup>3</sup>)

$$\rho = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \rho_w$$

- Φαινόμενο πορώδες,  $\varphi$  (%)

$$\varphi = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} 100$$

- Υδατοαπορροφητικότητα,  $E(\%)$

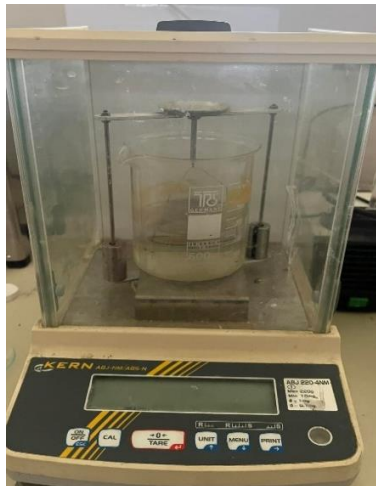
$$E = \frac{m_2 - m_1}{m_2} 100$$

$m_1$ : μάζα δοκιμίων επί ξηρού,

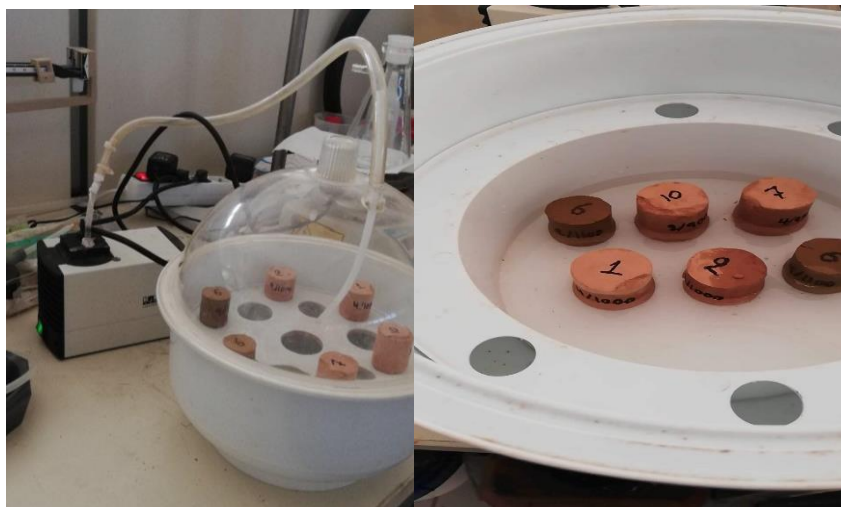
$m_2$ : μάζα εμβαπτισμένων δοκιμίων εντός νερού

$m_3$ : μάζα δοκιμίων εκτός νερού, και

$\rho_w$ : η πυκνότητα του νερού,  $0,998 \text{ g/cm}^3$  σε συνθήκες περιβάλλοντος



**Εικόνα 2.16:** Ζυγός ακριβείας.



**Εικόνα 2.17:** α) Ξηραντήρας κενού και β) Δοκίμια βυθισμένα σε απιονισμένο νερό.

### 2.2.2. Αντοχή σε Θλίψη

Οι δοκιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη όλων των δοκιμίων έγιναν στο εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων, με την άκαμπτη μηχανή φόρτισης MTS 815 (ικανή να επιβάλλει δύναμη της τάξης των 1600 kN) (Εικόνα 2.18). Η συσκευή δοκιμής επιβάλλει σταθερό ρυθμό φόρτισης στο δοκίμιο και συγχρόνως έχει τη δυνατότητα να

μετρήσει ή και να καταγράψει το επιβαλλόμενο φορτίο, καθώς και τις μετατοπίσεις των πλακών φόρτισης.

Διαθέτει δυο πλάκες φόρτισης που χρησιμεύουν στο να μεταφέρουν το φορτίο στο δοκίμιο, το οποίο τοποθετείται στη κάτω πλάκα και στην συνέχεια εφαρμόζεται η άνω πλάκα φόρτισης πάνω σε αυτό. Η σύγκλιση της άνω πλάκας φόρτισης με την κάτω, γίνεται με έλεγχο μετατόπισης από κάτω προς τα πάνω. Έπειτα, αρχίζει η επιβολή του αξονικού φορτίου πάνω στο δοκίμιο, με σταδιακό και συνεχόμενο ρυθμό αύξησής του, μέχρι τη στιγμή που θα φτάσει το μέγιστο φορτίο και επομένως το δοκίμιο θα αστοχήσει.

Καθ' όλη τη διάρκεια της επιβολής του αξονικού φορτίου, το μηχάνημα κατέγραφε τις δυνάμεις φόρτισης που ασκήθηκαν πάνω στο δοκίμιο. Από αυτά τα δεδομένα, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη  $\sigma_c$ , υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση  $F_{\max}/A$ , όπου  $F_{\max}$  είναι το μέγιστο φορτίο (δύναμη) που δέχθηκε το δοκίμιο μέχρι να αστοχήσει και  $A$  είναι η επιφάνεια που υπολογίζεται από τη διάμετρο του δοκιμίου.



**Εικόνα 2.18:** Μηχανή φόρτισης MTS 815.



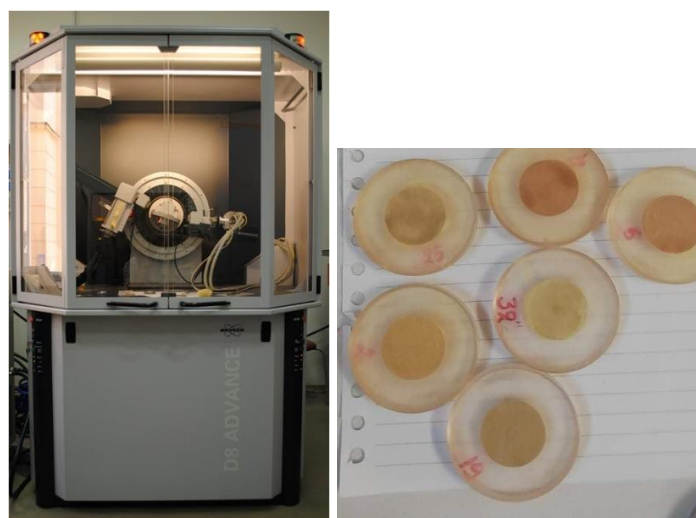
### 2.2.3. Ορυκτολογικές και Χημικές Αναλύσεις (XRD και XRF)

- Ορυκτολογικές Αναλύσεις (XRD)

Ο προσδιορισμός των ορυκτολογικών αναλύσεων των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο περιθλασιμετρίας ακτίνων-X (XRD). Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το περιθλασίμετρο ακτίνων-X τύπου D8 Advance της Bruker AXS, του εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης (Εικόνα 2.19), με χρήση λυχνίας Cu και φάσμα σάρωσης  $4^\circ$  έως  $70^\circ 2\theta$ , με βήμα  $0.02^\circ$ .

Ένα σύγχρονο περιθλασίμετρο ακτίνων-X αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία: α) μονάδα παραγωγής υψηλής τάσης, β) λυχνία ακτίνων-X, γ) το γωνιόμετρο, δ) απαριθμητής των ακτίνων-X με την ηλεκτρική μονάδα επεξεργασίας και καταγραφής των κρούσεων και ε) μονάδα του μικροϋπολογιστή. Η ορυκτολογική ανάλυση όλων των δειγμάτων έγινε με ποιοτικά διαγράμματα, που προέκυψαν από τη βάση δεδομένων του Power Diffraction File, κατά τη σάρωση του υλικού από τη δέσμη και τα οποία αναλύθηκαν με τη χρήση του λογισμικού DIFFRAC plus EVA.

Έπειτα, αρχίζει η διαδικασία της παρασκευής των δειγμάτων για τη μέτρηση στο περιθλασίμετρο. Αρχικά, γίνεται λειοτρίβηση σε μια μικρή ποσότητα από κάθε υλικό στον πλανητικό μύλο Bico Pulverizer, ώστε οι κόκκοι οι οποίοι το αποτελούν να είναι μικρού μεγέθους της τάξης λίγων μικρών ( $\mu\text{m}$ ). Στη συνέχεια, η λειοτριβημένη σκόνη τοποθετείται ομοιόμορφα στη κοιλότητα ενός ειδικού πλαστικού δειγματοφορέα του οργάνου (Εικόνα 2.24). Η κοιλότητα αυτή έχει βάθος 1mm και διάμετρο μερικών cm ικανή να προσφέρει χώρο για μάζα δειγμάτων 1g την οποία κατανέμεται έτσι ώστε να προκύψει μια λεία επιφάνεια μέτρησης χωρίς ανωμαλίες. Το επίπεδο αυτό παρασκεύασμα, τοποθετείται στο δειγματοφορέα του γωνιομέτρου του περιθλασίμετρου και ακτινοβολείται από τη λυχνία, ώστε να δώσει όλες τις δυνατές ανακλάσεις.



**Εικόνα 2.19:** α) Περιθλασίμετρο ακτίνων X (XRD) και β) Δειγματοφορείς περιθλασίμετρου.

- Χημικές Αναλύσεις (XRF)

Οι χημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με την τεχνική της φασματοσκοπίας φθορισμού ακτίνων-X (XRF). Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το αυτοματοποιημένο φασματόμετρο φθορισμού ακτίνων-X (XRF-EDS), τύπου Bruker-AXS S2 Range, στο Εργαστήριο Ανόργανης Χημείας, Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας του Πολυτεχνείου Κρήτης (*Εικόνα 2.20*), το οποίο έχει την ικανότητα να αναλύει γρήγορα, συνεχώς και ταυτοχρόνως πολλά χημικά στοιχεία, προσφέροντας έτσι υψηλή απόδοση για μικρούς όγκους δειγμάτων.

Μια τυπική διάταξη φασματοσκοπίας ακτίνων-X περιλαμβάνει μια πηγή πρωτογενούς ακτινοβολίας (ραδιοϊσότοπο ή λυχνία ακτίνων-X) υψηλής ενέργειας, για τη διέγερση των ηλεκτρονίων των ατόμων και ένα σύστημα ανίχνευσης της δευτερεύουσας (φθορίζουσας) ακτινοβολίας που εκπέμπουν. Σκοπός της ανάλυσης είναι ο προσδιορισμός των κυριότερων συστατικών που περιέχονται στα αρχικά παραπροϊόντα, όπως στο απόβλητο τούβλο, στο κέλυφος του φυστικιού και στην χαλαζιακή άμμο.



**Εικόνα 2.20:** Φασματόμετρο φθορισμού ακτίνων-X (XRF).

#### **2.2.4. Μέτρηση Ειδικής Επιφάνειας**

Η μέτρηση της ειδικής επιφάνειας των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με ειδικό ποροσίμετρο αζώτου, με βάση τη μέθοδο BET (Brunauer-Emmett-Teller). Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το NOVA 2200, Thermo Scientific Server Gas Absorption Analyzer, (*Εικόνα 2.21*). Γενικά, ως ειδική επιφάνεια ενός υλικού, ορίζεται η επιφάνεια της μονάδας της μάζας του και συνήθως εκφράζεται σε  $\text{m}^2/\text{g}$ . Η ανάλυση προσρόφησης αερίου με βάση τη θεωρία Brunauer-Emmett-Teller (BET), είναι μια πολύτιμη τεχνική για τον προσδιορισμό της ειδικής επιφάνειας δειγμάτων, η οποία και πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Κεραμικών και Υάλου του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Με βάση λοιπόν τη μέθοδο BET, πραγματοποιούνται συνήθως οι μετρήσεις της ειδικής επιφάνειας σε πορώδη κεραμικά, χρησιμοποιώντας περιβάλλον υγρού αζώτου ( $N_2$ ). Αυτή η μέθοδος αφορά τον προσδιορισμό της έκτασης της προσρόφησης του υγρού αζώτου, στη θερμοκρασία βρασμού του (που επιτυγχάνεται στους  $-77\text{ K}$ ), από το εξεταζόμενο στερεό δείγμα, ως συνάρτηση της σχετικής πίεσης ( $P/P_0$ ), όπου  $P$  η πίεση ισορροπίας και  $P_0$  η τάση ατμών του αερίου στη θερμοκρασία πειράματος.

Η βασική αρχή της ποροσιμετρίας αζώτου, στηρίζεται στην ισόθερμη προσρόφηση του υγρού αζώτου από το δείγμα, στην οποία το πορώδες υλικό βρίσκεται μέσα σε έναν ερμητικά κλειστό χώρο και σε συγκεκριμένη πίεση αερίου ή ατμού αζώτου. Έπειτα, το υλικό προσροφά αέριο άζωτο και έτσι μεταβάλλεται το βάρος του δείγματος και η πίεση του αερίου. Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, η πίεση του αερίου διατηρείται σταθερή και επομένως, το βάρος του στερεού δεν μεταβάλλεται. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ο υπολογισμός της πτώσης της πίεσης ή/και της αύξησης του βάρους του δείγματος, ανάλογα με το ποσό του αερίου που προσροφήθηκε από το δείγμα.

Ουσιαστικά, προσδιορίζεται η ποσότητα αερίου που προσροφήθηκε για διάφορες πιέσεις ισορροπίας και κατασκευάζονται οι αντίστοιχες ισόθερμες προσρόφησης οι οποίες, αναπαριστούν την ποσότητα αερίου που προσροφήθηκε συνάρτηση της μερικής του πίεσης ( $P/P_0$ ) σε σταθερή θερμοκρασία. Η ειδική επιφάνεια των δειγμάτων υπολογίζεται αυτόματα από την ίδια τη συσκευή που είναι συνδεδεμένη με υπολογιστή, χωρίς περαιτέρω επεξεργασία αποτελεσμάτων.



**Εικόνα 2.21:** Ποροσίμετρο Αζώτου NOVA 2200.

## Κεφάλαιο 3-Αποτελέσματα, Επεξεργασία και Συζήτηση

### 3.1. Χαρακτηρισμός και Ανάλυση Πρώτων Υλών

#### 3.1.1. Χημική Σύσταση-XRF

Στον παρακάτω Πίνακα 3.1 παρουσιάζεται η χημική σύσταση-XRF των πρώτων υλών με τη μορφή οξειδίων (% w/w). Παρατηρείται ότι το απόβλητο τούβλο καθώς και η χαλαζιακή άμμος που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των κεραμικών, περιέχουν σε μεγάλο ποσοστό οξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ). Γενικά, το ποσοστό της χαλαζιακής άμμου αναμένεται να προσεγγίζει την τιμή 99,9%  $\text{SiO}_2$ , δεδομένου ότι αποτελείται από το ορυκτό χαλαζίας, το οποίο δομείται αποκλειστικά από πυρίτιο και οξυγόνο.

**Πίνακας 3.1:** Χημική σύσταση απόβλητου τούβλου και χαλαζιακής άμμου.

Συστατικό (Οξείδιο)	Απόβλητο Τούβλο	Χαλαζιακή Άμμος
$\text{SiO}_2$	59,48	99,7
$\text{CaO}$	17,88	-
$\text{Na}_2\text{O}$	-	0,02
$\text{Al}_2\text{O}_3$	10,22	-
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	7,41	-
$\text{K}_2\text{O}$	1,95	-
$\text{MgO}$	1,91	-
$\text{TiO}_2$	1,01	-
$\text{MnO}$	0,07	-
$\text{P}_2\text{O}_5$	-	-
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	-	-
$\text{SO}_3$	-	-
$\text{ZnO}$	-	-
$\text{ZrO}_2$	-	-
$\text{BaO}$	-	-
LOI	6,00	-
Σύνολο	99,93	99,9

Επίσης, στον παρακάτω Πίνακα 3.2, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στοιχειακής ανάλυσης του κελύφους φυσιτικού (ως έχει) και του βιοεξανθρακώματος (μετά από πυρόλυση). Παρατηρείται ότι, αυξάνεται η επί τοις εκατό ποσότητα του άνθρακα (C) στο βιοεξανθράκωμα, ενώ συγχρόνως, η επί τοις εκατό ποσότητα των υπόλοιπων στοιχείων του φαίνεται να υποδιπλασιάζεται.

**Πίνακας 3.2:** Στοιχειακή ανάλυση βιομάζας και βιοεξανθρακώματος.

Συστατικό	Κέλυφος φυσιτικού	Βιοεξανθράκωμα
C	45,9	73
H	6	3
N	0,4	0,2
O	47,6	25

Επιπλέον, η προσεγγιστική ανάλυση για το κέλυφος φυσιτικού και του βιοεξανθρακώματος παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα 3.3.

**Πίνακας 3.3:** Προσεγγιστική ανάλυση κελύφους φυσιτικού και βιοεξανθρακώματος.

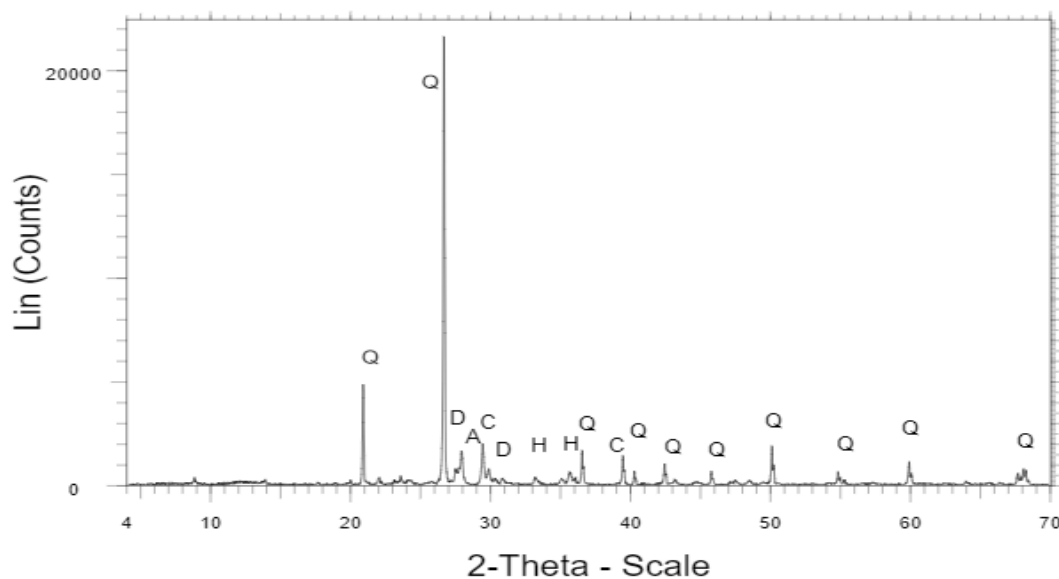
	Κέλυφος φυσιτικού	Βιοεξανθράκωμα
<b>Υγρασία (%)</b>	2,2	-
<b>EC (mS/cm)</b>	7,7	23,5
<b>pH</b>	4,3	5,5
<b>Πτητικά στερεά (%)</b>	86	45
<b>Τέφρα (%)</b>	14	55

Η σημαντικότερη παράμετρος στον προηγούμενο πίνακα είναι το ποσοστό της υγρασίας, το οποίο όπως παρατηρείται μετά την πυρόλυση έχει απομακρυνθεί, γεγονός το οποίο διευκολύνει την άλεση των δειγμάτων για την επίτευξη ιδανικής κοκκομετρίας, για την καλύτερη ανάμιξη και παρασκευή των δοκιμίων. Τέλος, παρατηρείται σημαντική αύξηση της τέφρας στο βιοεξανθράκωμα το οποίο οφείλεται στην απομάκρυνση των πτητικών στερεών.

### 3.1.2. Ορυκτολογική Σύσταση-XRD

Στο Διάγραμμα 3.1, παρουσιάζεται η ορυκτολογική σύσταση-XRD του απόβλητου τούβλου, ως πρώτη ύλη που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των δοκιμίων.

Με βάση λοιπόν την ορυκτολογική ανάλυση, οι βασικές ορυκτολογικές φάσεις του απόβλητου τούβλου είναι ο Χαλαζίας [Q: Quartz ( $\text{SiO}_2$ )] σε μεγαλύτερο ποσοστό και ακολουθούν σε μικρότερα ποσοστά ο Διοψίδιος [D: Diopside ( $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ )], ο Αλβίτης [A: Albite ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ )], ο Ασβεστίτης [C: Calcite ( $\text{CaCO}_3$ )] και ο Αιματίτης [H: Hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )].

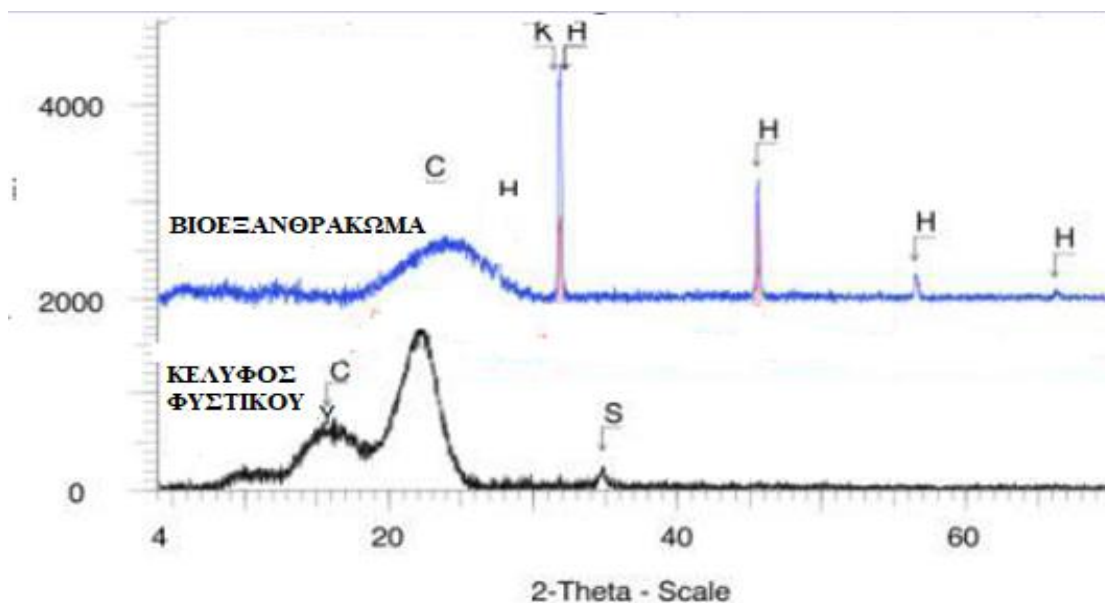


**Διάγραμμα 3.1:** Ορυκτολογική σύσταση-XRD απόβλητου τούβλου.

Στο παρακάτω *Διάγραμμα 3.2*, παρουσιάζεται η ορυκτολογική σύσταση-XRD του κελύφους φυσιτικού και του παραγόμενου βιοεξανθρακώματος του, μετά από πυρόλυση στους 400 °C που χρησιμοποιήθηκε ως πρόσθετο αγρο-απόβλητο, για την παρασκευή κεραμικών δοκιμίων.

Παρατηρείται ότι, οι βασικές ορυκτολογικές φάσεις στο ακτινοδιάγραμμα που αντιστοιχεί στο κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) είναι η Κυτταρίνη [C: Cellulose ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub>], το οποίο είναι ένα από τα πιο σημαντικά δομικά συστατικά του κυτταρικού τοιχώματος των φυτικών κυττάρων που συγκροτεί τους αντίστοιχους ιστούς και ο Θερμονατρίτης [S: Thermonatrite ( $Na_2CO_3 \cdot H_2O$ )], ο οποίος εμφανίζεται ως αποτέλεσμα της ατμοσφαιρικής ενανθράκωσης.

Επίσης, παρατηρείται ότι, οι βασικές ορυκτολογικές φάσεις στο ακτινοδιάγραμμα που αντιστοιχεί στο κέλυφος φυσιτικού μετά από πυρόλυση είναι ο Αλίτης [H: Halite ( $NaCl$ )], λόγω της αποσύνθεσης των οργανικών φάσεων σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 300 °C, το όξινο ανθρακικό Κάλιο [K: Kalicinite ( $KHCO_3$ )], το οποίο σχηματίζεται από την αποσύνθεση οργανικής ύλης και σε μικρότερο ποσοστό η Κυτταρίνη, ενώ ο Θερμονατρίτης απουσιάζει λόγω της υψηλής θερμοκρασίας της πυρόλυσης.



**Διάγραμμα 3.2:** Ορυκτολογική σύσταση-XRD κελύφους φυσιτικού και του παραγόμενου βιοεξανθράκωματος.

### 3.1.3. Προσδιορισμός Κοκκομετρίας Πρώτων Υλών

Όλες οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν όπως το απόβλητο τούβλο, το κέλυφος φυσιτικού (ως έχει ή μετά από πυρόλυση) και η χαλαζιακή άμμος είχαν μέσο μέγεθος κόκκων  $d < 50 \mu\text{m}$ , το οποίο είναι ιδανικό μέγεθος για την ομοιογενή ανάμιξη τους και την παρασκευή άρρηκτων δοκιμίων ικανών να υποβληθούν σε πειραματικές διαδικασίες. Στον παρακάτω Πίνακα 3.4, παρουσιάζονται οι τιμές κοκκομετρίας των πρώτων υλών μετά τη λειοτρίβηση, ώστε να υπάρξει μια ομαλή μορφοποίηση δοκιμίων.

**Πίνακας 3.4:** Κοκκομετρία πρώτων υλών.

	Απόβλητο Τούβλο	Βιοεξανθράκωμα κελύφους φυσιτικού
$d_{90} (\mu\text{m})$	68,60	24,15
$d_{50} (\mu\text{m})$	11,60	7,31
$d_{10} (\mu\text{m})$	0,33	0,38

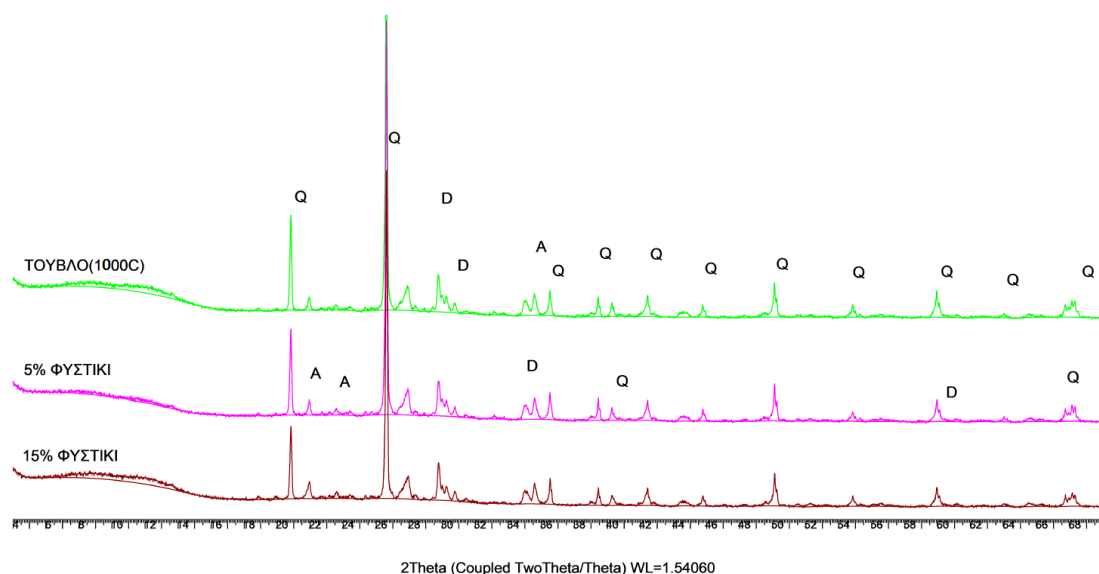
## 3.2. Χαρακτηρισμός Παραγόμενων Κεραμικών

### 3.2.1. Ορυκτολογική Σύσταση-XRD

Στο Διάγραμμα 3.3 απεικονίζεται η ορυκτολογική σύσταση-XRD των παραγόμενων κεραμικών της ομάδας A στους 1000 °C. Παρατηρείται ότι, οι βασικές ορυκτολογικές φάσεις για το απόβλητο τούβλο, απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (μετά από πυρόλυση) σε ποσοστά 5% και 15% είναι ο Χαλαζίας [Q: Quartz ( $\text{SiO}_2$ )], ο Διοψίδιος [D: Diopside ( $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ )], και ο Αλβίτης [A: Albite ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ )].

Η ορυκτολογική φάση που συναντάται σε μεγαλύτερο ποσοστό και στα τρία κεραμικά είναι ο Χαλαζίας, γεγονός το οποίο επαληθεύεται βάσει των αποτελεσμάτων της ορυκτολογικής ανάλυσης του αρχικού υλικού (απόβλητου τούβλου). Πιο αναλυτικά, στο ακτινοδιάγραμμα του απόβλητου τούβλου παρατηρείται ότι σε μεγαλύτερο ποσοστό εμφανίζεται ο Χαλαζίας και σε μικρότερα ποσοστά ο Διοψίδιος και ο Αλβίτης.

Ακόμα, στο ακτινοδιάγραμμα που αντιστοιχεί στο απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (μετά από πυρόλυση) σε ποσοστό 5% περιλαμβάνει και τα τρία παραπάνω στοιχεία σε μικρότερα ποσοστά, ενώ στο απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (μετά από πυρόλυση) σε ποσοστό 15% η βασική ορυκτολογική φάση του είναι ο Χαλαζίας, όπως φαίνεται και από την αντίστοιχη κορυφή στο διάγραμμα.

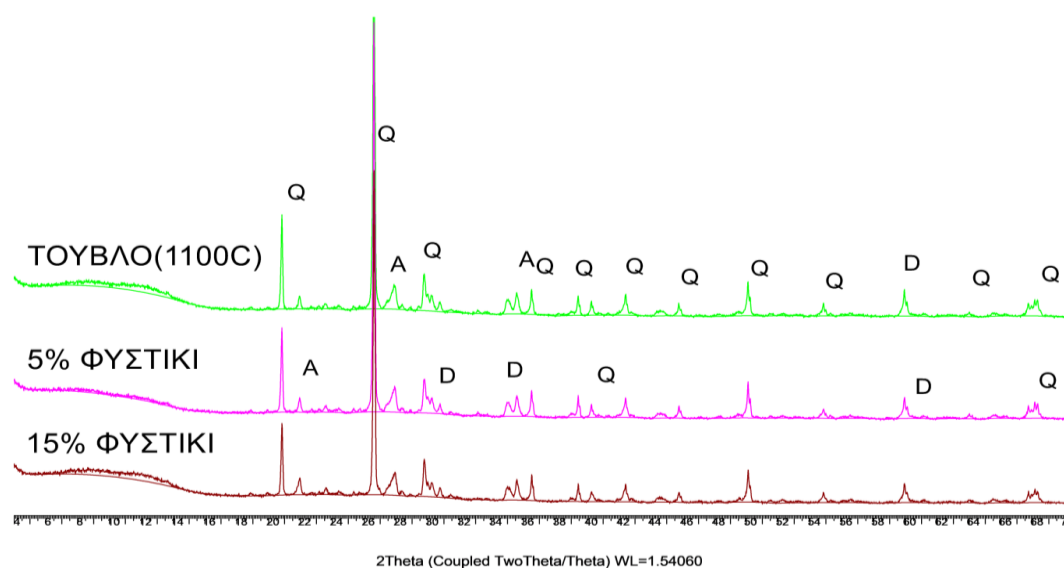


**Διάγραμμα 3.3:** Ορυκτολογική σύσταση παραγόμενων κεραμικών ομάδας A (1000 °C).

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η ορυκτολογική σύσταση-XRD των παραγόμενων κεραμικών της ομάδας A στους 1100 °C. Παρατηρείται ότι, οι βασικές ορυκτολογικές φάσεις για το απόβλητο τούβλο, απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (μετά από πυρόλυση) σε ποσοστά 5% και 15% είναι ίδιες όπως στο προηγούμενο Διάγραμμα 3.3, δηλαδή ο Χαλαζίας, ο Διοψίδιος και ο Αλβίτης.



Παρατηρείται ότι, ο Χαλαζίας παρουσιάζεται ξανά και στα τρία κεραμικά με την μεγαλύτερη ένταση κορυφής. Στο απόβλητο τούβλο στους 1100 °C, ο Χαλαζίας αποτελεί και πάλι το μεγαλύτερο ποσοστό αλλά και ο Αλβίτης είναι πιο αισθητός από τον Διοψίδιο ο οποίος έχει μειωθεί. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με το ακτινοδιάγραμμα που αντιστοιχεί στο απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (μετά από πυρόλυση) σε ποσοστό 5%, όπου υπάρχουν και τα τρία στοιχεία, αλλά η μία κορυφή του Αλβίτη περιέχεται σε μικρότερα ποσοστά στους 1100 °C, καθώς ο Διοψίδιος εμφανίζεται σε μεγαλύτερο ποσοστό στην συγκεκριμένη θερμοκρασία και ο Χαλαζίας στο ίδιο ποσοστό όπως και στους 1000 °C, ενώ δεν παρατηρείται κάποια ιδιαίτερη μεταβολή στο ακτινοδιάγραμμα του απόβλητου τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (μετά από πυρόλυση) σε ποσοστό 15%.

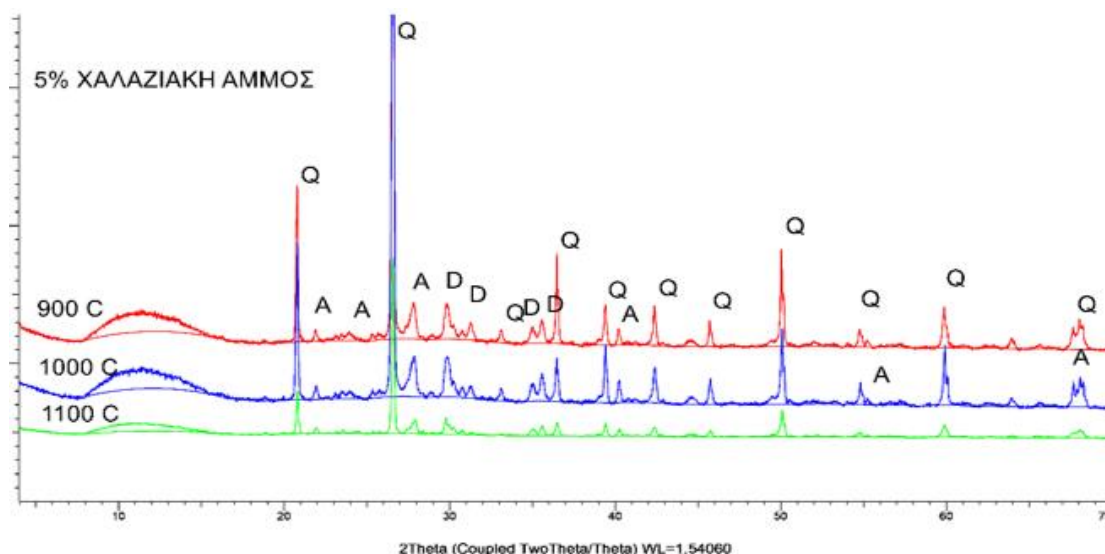


**Διάγραμμα 3.4:** Ορυκτολογική σύσταση παραγόμενων κεραμικών ομάδας Α (1100 °C).

Στο *Διάγραμμα 3.5* απεικονίζεται η ορυκτολογική σύσταση-XRD των παραγόμενων κεραμικών της ομάδας Β, για τις θερμοκρασίες έψησης (900 °C, 1000 °C, 1100 °C). Οι βασικές ορυκτολογικές φάσεις για το απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει)-χαλαζιακή άμμος σε ποσοστό 5%, όπως και στα προηγούμενα *Διαγράμματα 3.3* και *3.4* είναι ο Χαλαζίας, ο Διοψίδιος και ο Αλβίτης.

Παρατηρείται ότι, τα ορυκτά δεν αλλάζουν με την προσθήκη της χαλαζιακής άμμου στις συστάσεις τους και επιπλέον ενισχύεται η ένταση των ανακλάσεων του ποσοστού του περιεχόμενου Χαλαζία, σε σχέση με τις τιμές των παραπάνω ακτινοδιαγραμμάτων. Στην θερμοκρασία 900 °C, σε μεγαλύτερο ποσοστό εμφανίζεται ο Χαλαζίας, έπειτα ο Αλβίτης και σε μικρότερο ποσοστό ο Διοψίδιος. Στην θερμοκρασία 1000 °C, παρατηρείται ότι ο Αλβίτης έχει αντικαταστήσει ένα μέρος του Χαλαζία και αυτό ίσως να οφείλεται στο ότι υπάρχει η ορυκτή φάση του Ιαδεΐτη ( $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ ), η οποία δέσμευσε το Χαλαζία υπό την επίδραση υψηλής θερμοκρασίας έψησης και σχημάτισε

Αλβίτη. Στην θερμοκρασία 1100 °C, όπως και στις προηγούμενες θερμοκρασίες, η κυρίαρχη ορυκτολογική φάση είναι ο Χαλαζίας.

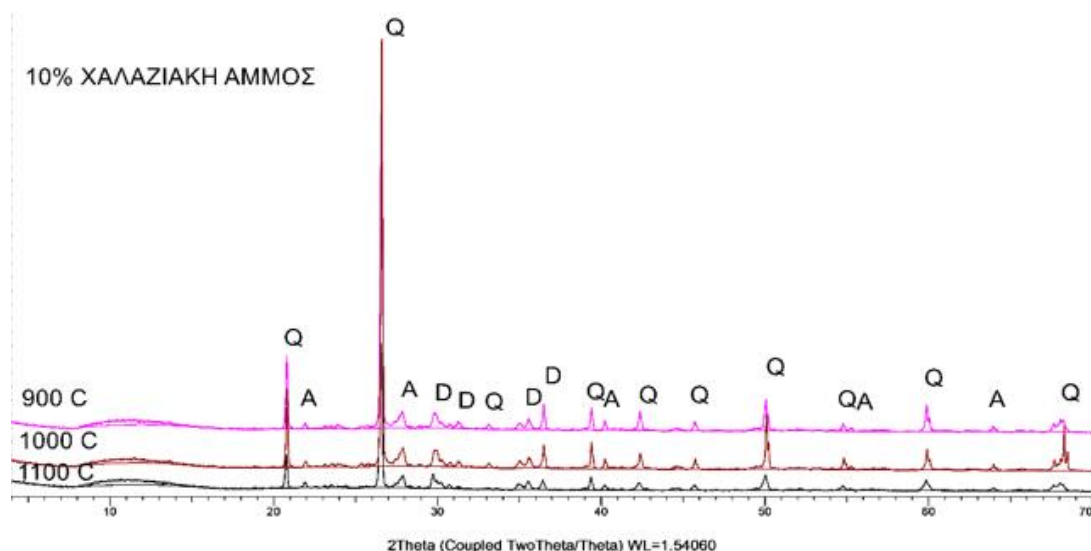


**Διάγραμμα 3.5:** Ορυκτολογική σύσταση παραγόμενων κεραμικών ομάδας B με προσθήκη 5% χαλαζιακής άμμου σε όλες τις θερμοκρασίες έψησης.

Στο *Διάγραμμα 3.6* απεικονίζεται η ορυκτολογική σύσταση-XRD των παραγόμενων κεραμικών της ομάδας B, για τις θερμοκρασίες έψησης (900 °C, 1000 °C, 1100 °C). Οι βασικές ορυκτολογικές φάσεις για το απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει)-χαλαζιακή άμμος σε ποσοστό 10% επαναλαμβάνονται και σε αυτό το διάγραμμα και είναι ο Χαλαζίας, ο Διοψίδιος και ο Αλβίτης.

Παρατηρείται ότι ο Χαλαζίας παρουσιάζεται όπως και στο *Διάγραμμα 3.5* με την μεγαλύτερη ένταση κορυφών και στις τρεις θερμοκρασίες και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αποτελεί τη βασική ορυκτολογική φάση, ακολουθεί ο Αλβίτης και έπειτα ο Διοψίδιος. Επίσης και για τρεις θερμοκρασίες, η ένταση όλων των κορυφών είναι η ίδια, το οποίο συνεπάγεται ότι αποτελούνται από την ίδια ποσοστιαία σύσταση των ορυκτών.

Η διαφορά που εντοπίζεται συγκριτικά με τα κεραμικά που δεν περιείχαν χαλαζιακή άμμο είναι το ποσοστό άμορφου (από 7°-15°) που οφείλεται στην παρουσία του SiO<sub>2</sub>.



**Διάγραμμα 3.6:** Ορυκτολογική σύσταση παραγόμενων κεραμικών ομάδας B με προσθήκη 10% χαλαζιακής άμμου σε όλες τις θερμοκρασίες έψησης.

### 3.2.2. Φυσικομηχανικές Ιδιότητες

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι φυσικομηχανικές ιδιότητες όλων των παραγόμενων κεραμικών της πειραματικής μας διαδικασίας, καθώς αναλύονται μέσω πινάκων και διαγραμμάτων για την καλύτερη σύγκριση τους.

- **Ομάδα Α**

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μέσες τιμές ιδιοτήτων των παραγόμενων κεραμικών της ομάδας Α που αποτελούνται από απόβλητο τούβλο, απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει και μετά από πυρόλυση) σε ποσοστά 5% και 15% αντίστοιχα. Με βάση τον πίνακα αυτό, προκύπτουν τα παρακάτω ραβδογράμματα που μας βοηθάνε να μελετήσουμε τα αποτελέσματα από τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν κατά την πειραματική διαδικασία παίρνοντας το μέσο όρο των ιδιοτήτων που αντιστοιχούν σε κάθε σύσταση και για διαφορετική θερμοκρασία έψησης και έπειτα να αναλυθούν με βάση τις ιδιότητες τους συνδυάζοντάς τα με την ορυκτολογική τους σύσταση.

**Πίνακας 3.5:** Μέσες τιμές ιδιοτήτων παραγόμενων κεραμικών ομάδας Α.

Σύσταση	Θερμοκρασία Έψησης T (°C)	Μέσες Τιμές Ιδιοτήτων				
		Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	Πορώδες (%)	Υδατ/τητα (%)	Αντοχή (MPa)	Ειδική Επιφάνεια
Απόβ. Τούβλο	900 °C	1,36	34,81	22,56	5,44	-
Απόβ. Τούβλο+Κελ.Φυστ. (ως έχει) (5%)		1,25	38,00	28,00	4,32	-
Απόβ. Τούβλο+Κελ.Φυστ. (ως έχει) (15%)		1,00	44,00	22,00	2,50	-

Απόβ. Τούβλο+Κελ.Φυστ. (μετά από πυρ.) (5%)		1,18	36,69	24,27	4,00	-
Απόβ. Τούβλο+Κελ.Φυστ. (μετά από πυρ.) (15%)		1,04	41,22	29,99	2,20	-
Απόβ. Τούβλο	1000 °C	1,66	20,00	18,10	6,48	-
Απόβ. Τούβλο+Κελ.Φυστ. (ως έχει) (5%)		1,34	26,00	24,00	6,23	-
Απόβ. Τούβλο+Κελ.Φυστ. (ως έχει) (15%)		1,23	30,00	26,00	4,48	-
Απόβ. Τούβλο+Κελ.Φυστ. (μετά από πυρ.) (5%)		1,51	23,47	21,42	5,25	-
Απόβ. Τούβλο+Κελ.Φυστ. (μετά από πυρ.) (15%)		1,35	26,36	23,17	4,12	-
Αποβ. Τούβλο		2,29	12,80	3,11	12,46	0,8
Απόβ. Τούβλο+Κελ.Φυστ. (ως έχει) (5%)	1100 °C	2,24	15,00	6,00	16,00	-
Απόβ. Τούβλο+Κελ.Φυστ. (ως έχει) (15%)		2,00	17,00	7,20	8,24	-
Απόβ. Τούβλο+Κελ.Φυστ. (μετά από πυρ.) (5%)		2,20	13,24	4,26	10,44	1,70
Απόβ. Τούβλο+Κελ.Φυστ. (μετά από πυρ.) (15%)		2,09	14,62	6,89	8,15	2,45

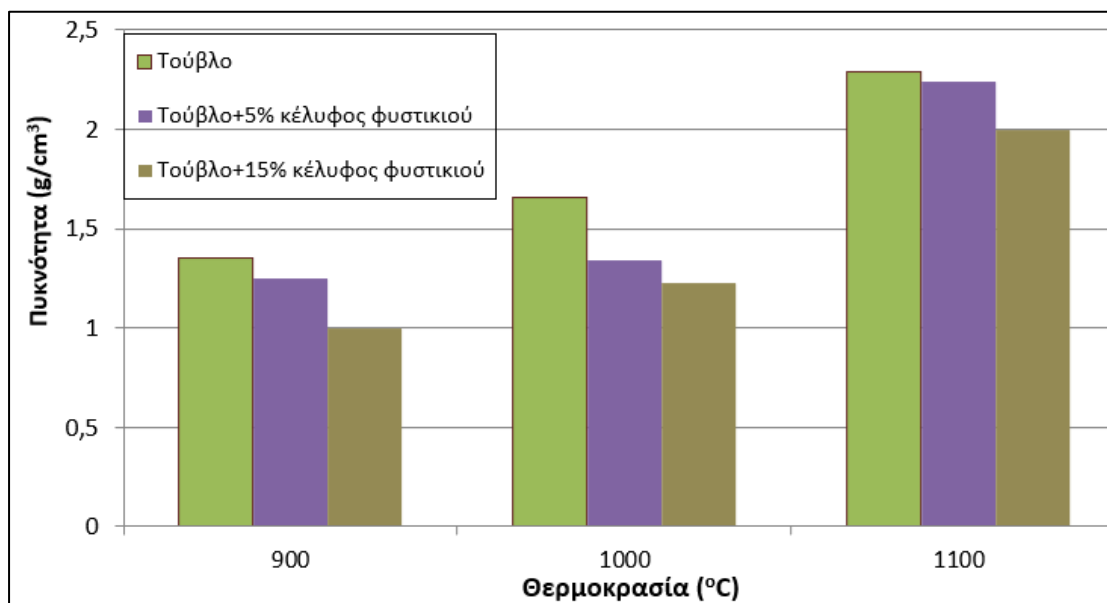
Στα Διαγράμματα 3.7 και 3.8 απεικονίζονται όλες οι τιμές της πυκνότητας των παραγόμενων κεραμικών της ομάδας Α, για τις θερμοκρασίες έψησης (900 °C, 1000 °C, 1100 °C). Παρατηρείται ότι το κεραμικό με την υψηλότερη τιμή πυκνότητας 2,29 g/cm<sup>3</sup> και στις δύο περιπτώσεις, ήταν αυτό που παράχθηκε από απόβλητα τούβλα σε θερμοκρασία έψησης 1100 °C. Ενώ με την προσθήκη κελύφους φυσιτικού (ως έχει) στο απόβλητο τούβλο σε ποσοστό 15% στους 900 °C παράχθηκε η χαμηλότερη τιμή πυκνότητας 1,00 g/cm<sup>3</sup> ενώ στο πυρολυμένο κέλυφος φυσιτικού η χαμηλότερη τιμή ήταν 1,04 g/cm<sup>3</sup>.

Επίσης, παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις στα κεραμικά από απόβλητο τούβλο αυξάνεται η πυκνότητα τους καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, με αποτέλεσμα να δώσουν και τις μεγαλύτερες τιμές σε θερμοκρασία έψησης 1100 °C.

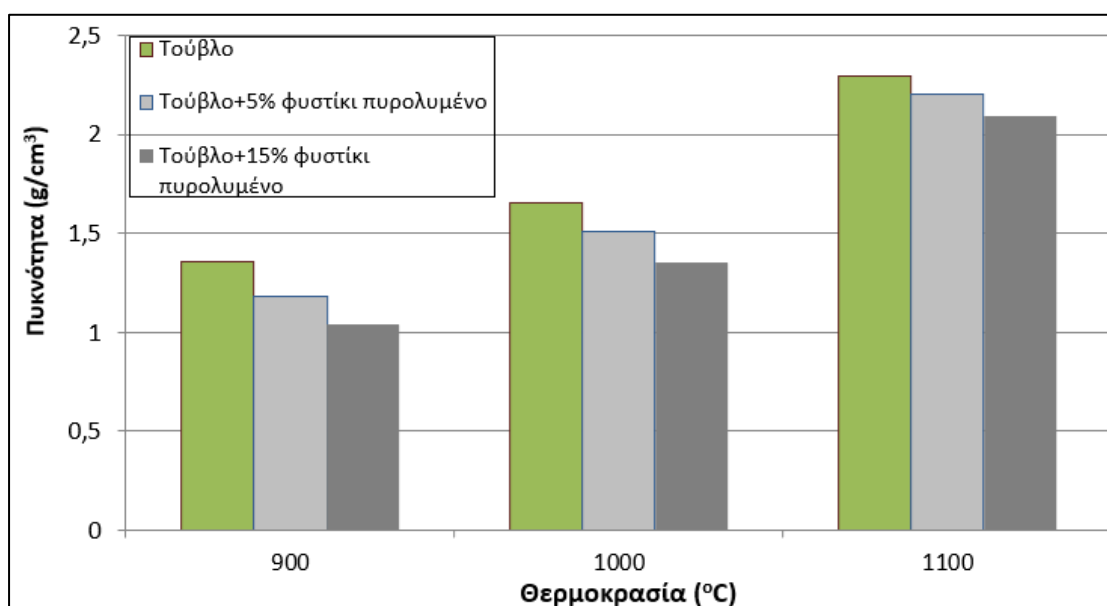
Στα υπόλοιπα κεραμικά με την προσθήκη αγρο-απόβλητου κελύφους φυσιτικού (ως έχει και μετά από πυρόλυση) παρατηρείται ότι, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία αυξάνεται η πυκνότητα τους αλλά σε μικρότερο ποσοστό από ότι στο απόβλητο τούβλο χωρίς αγρο-απόβλητα.

Τέλος, τα κεραμικά δοκίμια που κατασκευάστηκαν από απόβλητο τούβλο, απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (μετά από πυρόλυση) σε ποσοστά 5% και 15% σε

θερμοκρασία έψησης 900 °C, παρατηρήθηκε ότι δεν είχε ολοκληρωθεί η πυροσυσσώματωση, με συνέπεια τα παραγόμενα δοκίμια να θραύονται.



**Διάγραμμα 3.7:** Τιμές πυκνότητας παραγόμενων κεραμικών (ως έχουν) ομάδας Α.

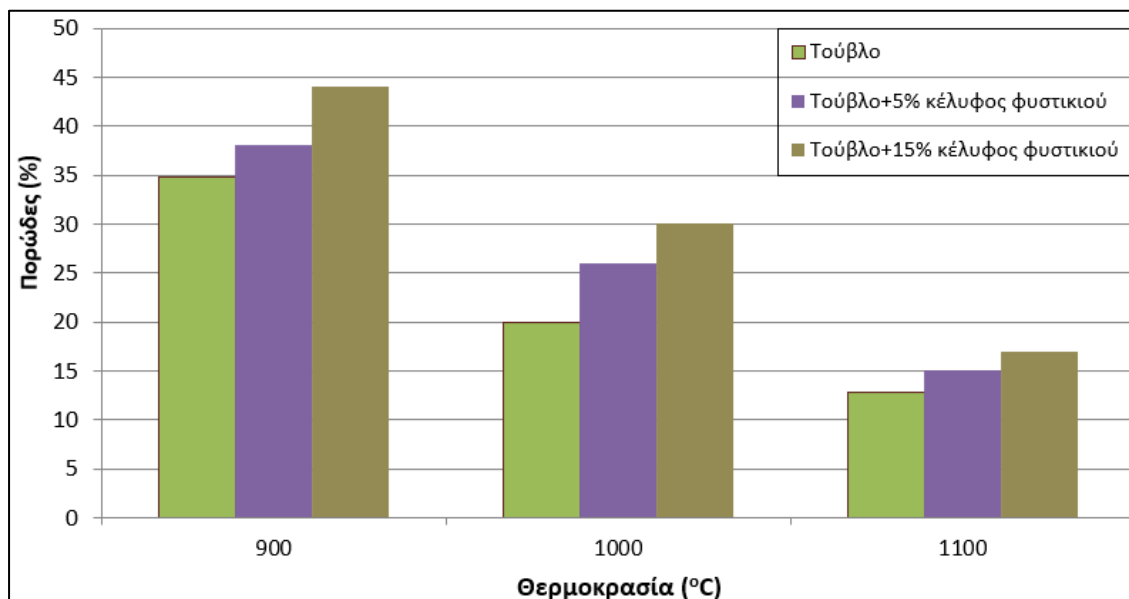


**Διάγραμμα 3.8:** Τιμές πυκνότητας παραγόμενων κεραμικών (μετά από πυρόλυση) ομάδας Α.

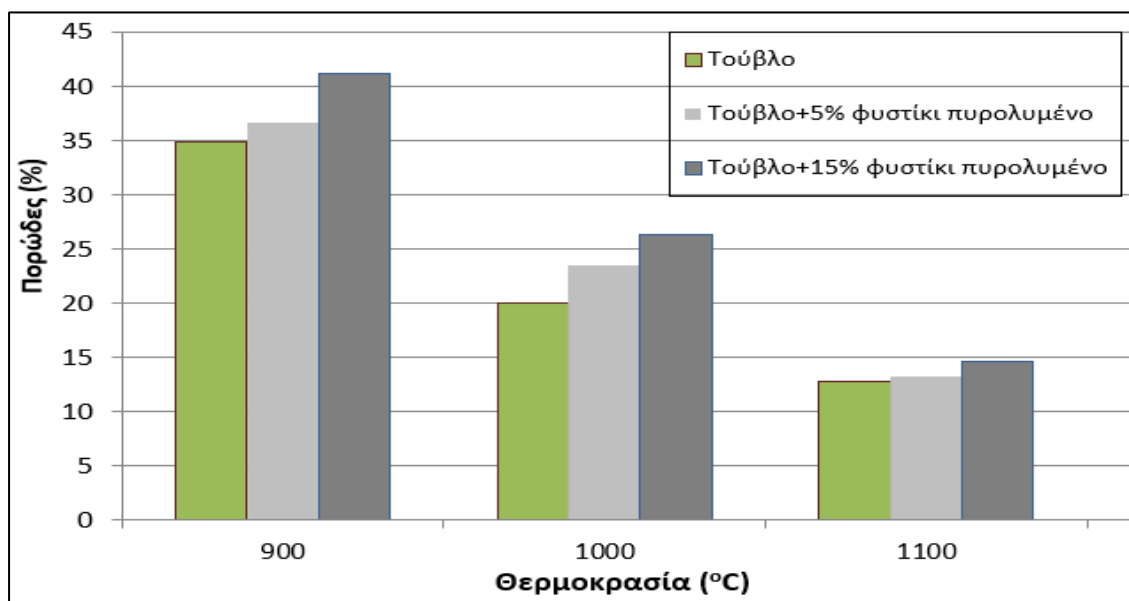
Στα Διαγράμματα 3.9 και 3.10 παρουσιάζονται όλες οι τιμές του πορώδους των παραγόμενων κεραμικών της ομάδας Α, για τις θερμοκρασίες έψησης (900 °C, 1000 °C, 1100 °C). Παρατηρείται ότι, τα κεραμικά από απόβλητο τούβλο και στα δύο διαγράμματα είχαν τη χαμηλότερη τιμή πορώδους 12,80% σε θερμοκρασία έψησης 1100 °C, ενώ η μεγαλύτερη τιμή 44% επιτεύχθηκε από τη σύσταση απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) σε ποσοστό 15% στους 900 °C. Το ίδιο ισχύει και για το

πυρολυμένο φυστίκι, που η μεγαλύτερη τιμή προήλθε από την ίδια σύσταση στους 900 °C και ήταν 41,22%.

Παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις οι χαμηλότερες τιμές προήλθαν από τη θερμοκρασία έψησης 1100 °C και οι μεγαλύτερες τιμές προήλθαν από τη θερμοκρασία έψησης στους 900 °C. Αυτό είναι λογικό διότι, η πυκνότητα στα παραπάνω *Διαγράμματα 3.7 και 3.8* είχαν δώσει τις ακριβώς αντίθετες τιμές στις συγκεκριμένες θερμοκρασίες, αφού αυτά τα δύο μεγέθη είναι μεταξύ τους, αλλά και με την θερμοκρασία αντιστρόφως ανάλογα.



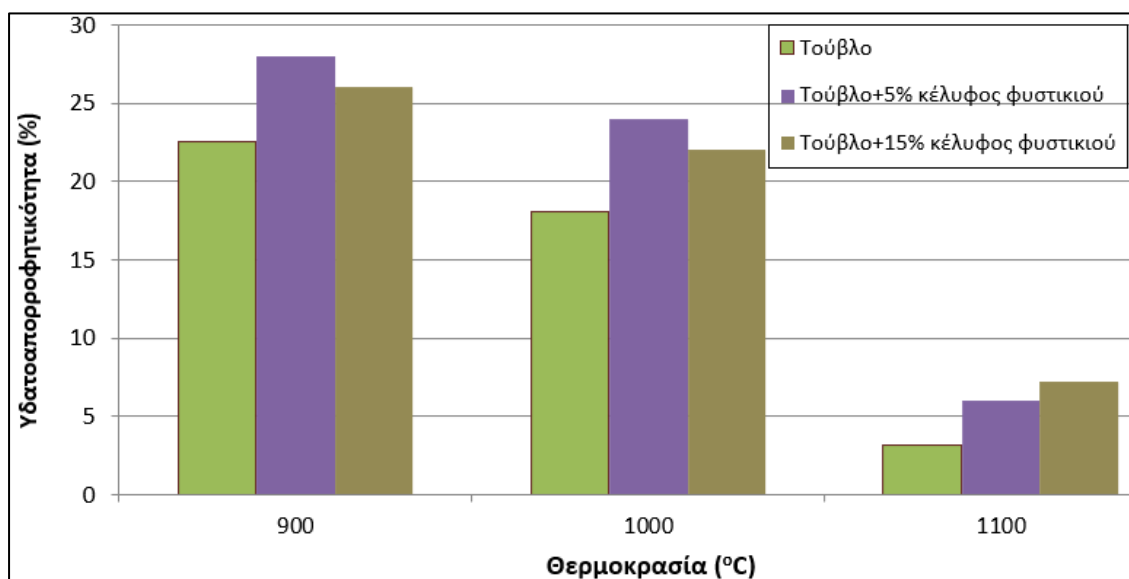
**Διάγραμμα 3.9:** Τιμές πορώδους παραγόμενων κεραμικών (ως έχουν) ομάδας Α.



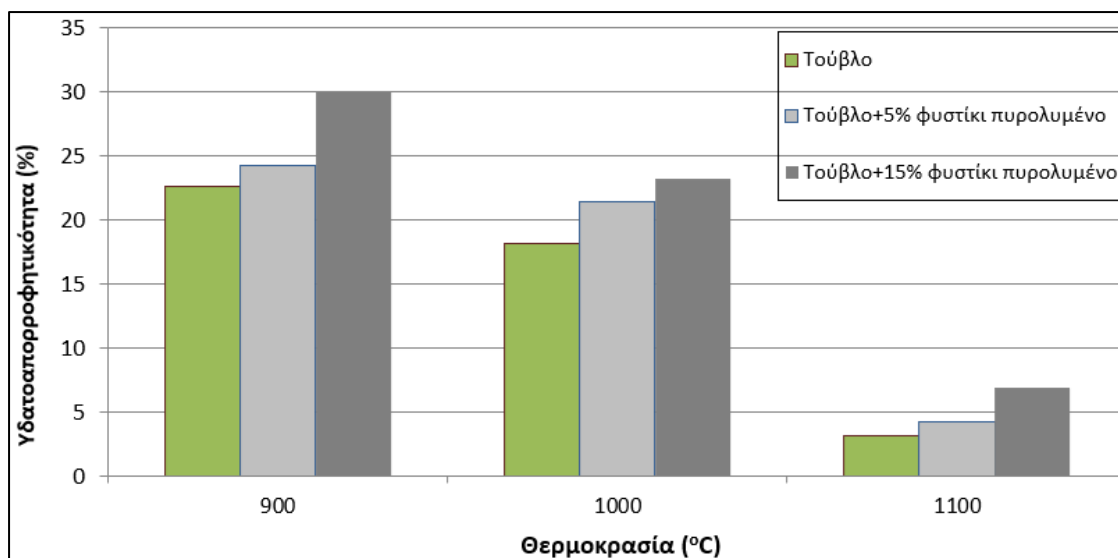
**Διάγραμμα 3.10:** Τιμές πορώδους παραγόμενων κεραμικών (μετά από πυρόλυση) ομάδας Α.

Στα *Διαγράμματα 3.11* και *3.12* απεικονίζονται οι τιμές της υδατοαπορροφητικότητας των παραγόμενων κεραμικών της ομάδας Α, για τις θερμοκρασίες έψησης (900 °C, 1000 °C, 1100 °C). Παρατηρείται ότι το κεραμικό με την υψηλότερη τιμή υδατοαπορροφητικότητας στο πρώτο διάγραμμα προέκυψε από τη σύσταση απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) σε ποσοστό 5% με τιμή 28% και σε θερμοκρασία έψησης 900 °C, ενώ στο δεύτερο διάγραμμα προέκυψε από την ίδια θερμοκρασία, αλλά από τη σύσταση απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (μετά από πυρόλυση) σε ποσοστό 15% με τιμή 29,99%. Όμως και στις δύο παρακάτω περιπτώσεις το κεραμικό από απόβλητο τούβλο στους 1100 °C έδωσε την χαμηλότερη τιμή υδατοαπορροφητικότητας 3,11%.

Επομένως, παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες τιμές υδατοαπορροφητικότητας, όπως και στο πορώδες, προήλθαν από την προσθήκη αγρό-απόβλητου στην χαμηλότερη θερμοκρασία έψησης 900 °C. Όμως και σε αυτή την περίπτωση όπως και στα *Διαγράμματα 3.9* και *3.10* του πορώδους παρατηρήθηκε μείωση της υδατοαπορροφητικότητας όλων των κεραμικών με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό το αποτέλεσμα είναι λογικό, διότι καθώς εξελίσσεται η διαδικασία της πυροσυσσωμάτωσης το πορώδες και η υδατοαπορροφητικότητα μειώνονται. Οι συγκεκριμένες ιδιότητες είναι ανάλογες μεταξύ τους και αντιστρόφως ανάλογες με την θερμοκρασία και την πυκνότητα.



**Διάγραμμα 3.11:** Τιμές υδατοαπορροφητικότητας παραγόμενων κεραμικών (ως έχουν) ομάδας Α.

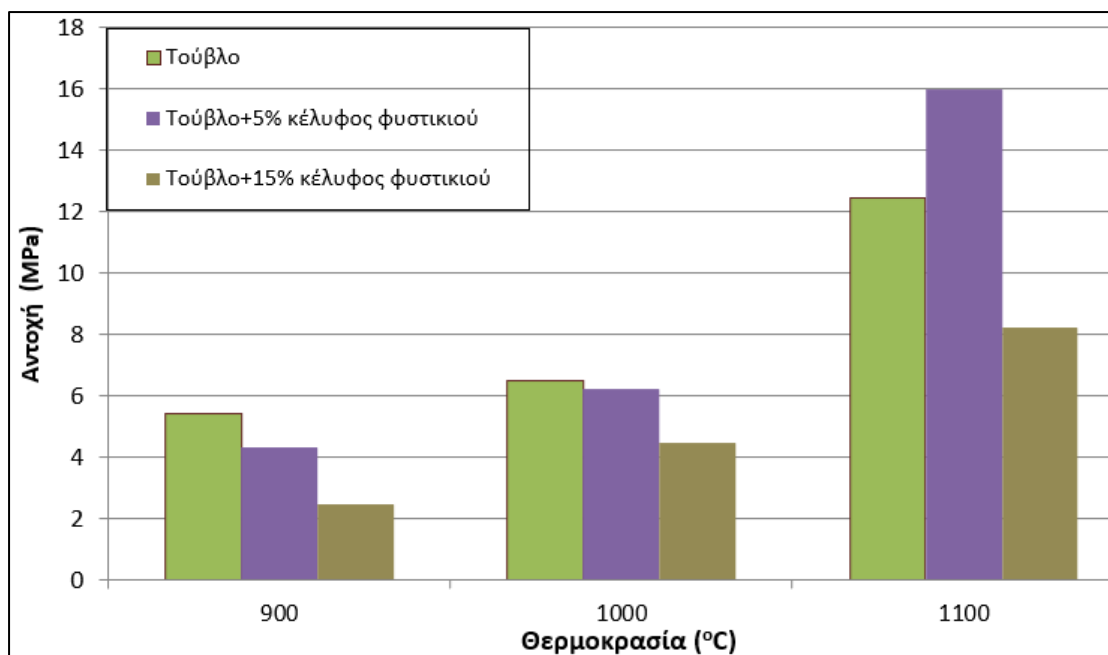


**Διάγραμμα 3.12:** Τιμές υδατοαπορροφητικότητας παραγόμενων κεραμικών (μετά από πυρόλυση) ομάδας Α.

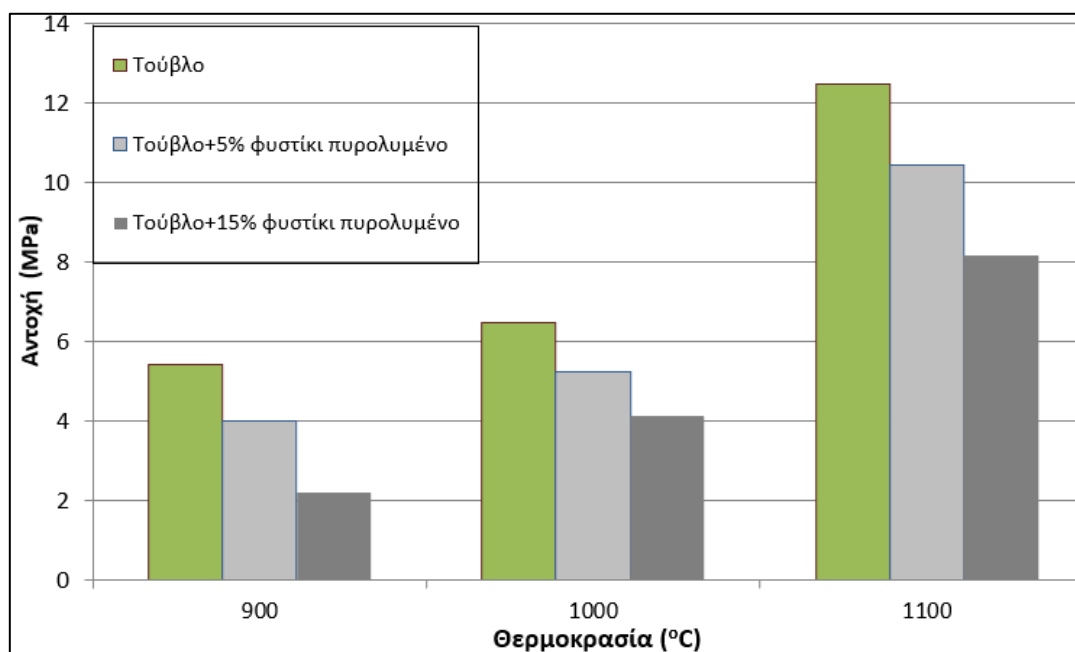
Στα *Διαγράμματα 3.13* και *3.14* απεικονίζονται οι τιμές της αντοχής των παραγόμενων κεραμικών της ομάδας Α, για τις θερμοκρασίες έψησης (900 °C, 1000 °C, 1100 °C). Τα κεραμικά που παράχθηκαν από τη σύσταση απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυστικιού (ως έχει και μετά από πυρόλυση) σε ποσοστό 15% στους 900 °C έδωσαν τις χαμηλότερες τιμές αντοχής, οι οποίες ήταν στην πρώτη περίπτωση 2,50 MPa και στη δεύτερη 2,20 MPa. Αντίστοιχα, τα κεραμικά με την υψηλότερη αντοχή ήταν αυτά που παράχθηκαν σε θερμοκρασία έψησης 1100 °C. Στο *Διάγραμμα 3.13* ήταν το κεραμικό που παράχθηκε από τη σύσταση απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυστικιού (ως έχει) σε ποσοστό 5% και με την τιμή 16 MPa, ενώ στο *Διάγραμμα 3.14* ήταν το κεραμικό που παράχθηκε από απόβλητο τούβλο και με την τιμή 12,46 MPa.

Παρατηρείται ότι στα κεραμικά στους 900 °C και 1000 °C, η αύξηση της θερμοκρασίας ευνοεί σε μικρό βαθμό την αντοχή τους, καθώς η προσθήκη αγρο-απόβλητου έχει μικρότερη αντοχή και στις δύο θερμοκρασίες από ότι στο απόβλητο τούβλο, ενώ στους 1100 °C παρατηρούνται αρκετά μεγαλύτερες αντοχές, γεγονός το οποίο αποδεικνύει πως έχει ολοκληρωθεί σε ένα μεγάλο βαθμό η πυροσυσσωμάτωση σε αυτή τη θερμοκρασία. Ειδικότερα στη περίπτωση, προσθήκης κελύφους φυστικιού (ως έχει) σε ποσοστό 5% στο απόβλητο τούβλο, έχει επιτευχθεί η μεγαλύτερη αντοχή, το οποίο πιθανόν να οφείλεται στο συνδυασμό του καλού βαθμού της πυροσυσσωμάτωσης με τη καλύτερη ανάμιξη του μίγματος.





**Διάγραμμα 3.13:** Τιμές αντοχής παραγόμενων κεραμικών (ως έχουν) ομάδας Α.



**Διάγραμμα 3.14:** Τιμές αντοχής παραγόμενων κεραμικών (μετά από πυρόλυση) ομάδας Α.

Με βάση την συγκριτική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρήθηκε ότι, η προσθήκη του αγρο-απόβλητου του κελύφους φυσιτικού (ως έχει), είχε καλύτερη επίδραση στην ανάμιξη με το απόβλητο τούβλο για την παραγωγή των κεραμικών.

- **Ομάδα Β**

Οι μέσες τιμές των ιδιοτήτων των παραγόμενων κεραμικών της ομάδας Β, τα οποία αποτελούνται από απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) σε ποσοστά 5% και 15%-χαλαζιακή άμμος σε ποσοστά 5% και 10% παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Με βάση τον πίνακα αυτό, προκύπτουν τα παρακάτω ραβδογράμματα.

Παρατηρείται ότι έχουμε καλύτερα αποτελέσματα σε αυτή την ομάδα, με βάση τις τιμές που προέκυψαν. Αυτό ίσως να οφείλεται στην προσθήκη της χαλαζιακής άμμου και του κελύφους φυσιτικού (ως έχει) που είχαν καλύτερη επίδραση με το απόβλητο τούβλο κατά την ανάμειξή τους, με αποτέλεσμα την ενίσχυση των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων των κεραμικών.

**Πίνακας 3.6 :** Μέσες τιμές ιδιοτήτων παραγόμενων κεραμικών ομάδας Β.

Σύσταση	Θερμοκρασία Έψησης T (°C)	Μέσες Τιμές Ιδιοτήτων				
		Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	Πορώδες (%)	Υδατ/τητα (%)	Αντοχή (MPa)	Ειδική Επιφάνεια
Απόβ. Τούβλο+Κελ. Φυστ. (ως έχει) (5%)+Χαλ. Άμμο (5%)	900 °C	1,21	71,37	31,07	6,36	-
Απόβ. Τούβλο+Κελ. Φυστ. (ως έχει) (5%)+Χαλ. Άμμο (10%)		1,71	65,11	25,86	6,81	-
Απόβ. Τούβλο+Κελ. Φυστ. (ως έχει) (5%)+Χαλ. Άμμο (5%)	1000 °C	1,29	54,96	28,79	7,62	-
Απόβ. Τούβλο+Κελ. Φυστ. (ως έχει) (5%)+Χαλ. Άμμο (10%)		1,54	48,40	22,47	8,72	-
Απόβ. Τούβλο+Κελ. Φυστ. (ως έχει) (5%)+Χαλ. Άμμο (5%)	1100 °C	2,19	26,41	21,53	16,13	-
Απόβ. Τούβλο+Κελ. Φυστ. (ως έχει) (5%)+Χαλ. Άμμο (10%)		2,42	18,86	14,41	18,14	-
Απόβ. Τούβλο+Κελ. Φυστ. (ως έχει) (15%)+Χαλ. Άμμο (5%)	900 °C	1,26	73,47	27,10	3,50	-
Απόβ. Τούβλο+Κελ. Φυστ. (ως έχει) (15%)+Χαλ. Άμμο (10%)		1,34	60,47	21,98	3,41	-
Απόβ. Τούβλο+Κελ. Φυστ. (ως έχει) (15%)+Χαλ. Άμμο (5%)	1000 °C	1,11	62,28	27,55	6,44	-
Απόβ. Τούβλο+Κελ. Φυστ. (ως έχει) (15%)+Χαλ. Άμμο (10%)		1,40	52,20	20,68	6,23	-
Απόβ. Τούβλο+Κελ. Φυστ. (ως έχει) (15%)+Χαλ. Άμμο (5%)	1100 °C	2,32	27,73	23,83	13,05	4,56
Απόβ. Τούβλο+Κελ. Φυστ. (ως έχει) (15%)+Χαλ. Άμμο (10%)		2,40	23,30	15,87	12,79	6,32

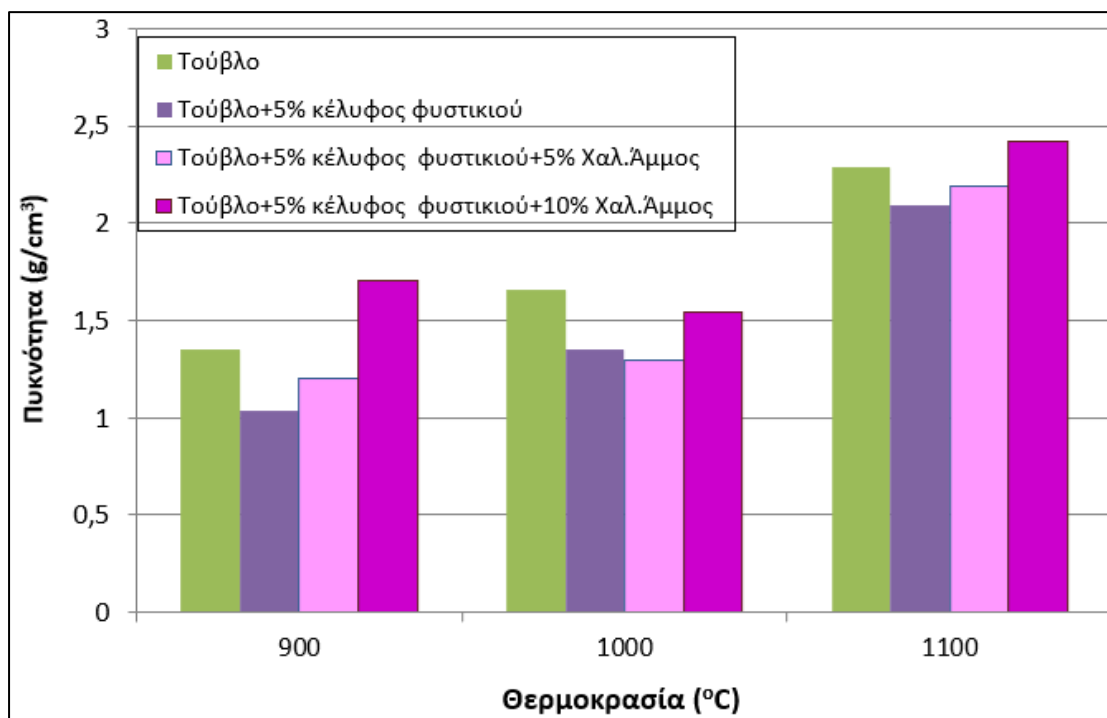
➤ **Κέλυφος φυσιτικού 5%**

Στο Διάγραμμα 3.15 παρουσιάζονται οι τιμές της πυκνότητας των παραγόμενων κεραμικών της ομάδας Β, για τις θερμοκρασίες έψησης (900 °C, 1000 °C, 1100 °C). Παρατηρείται ότι, το κεραμικό με την υψηλότερη τιμή πυκνότητας 2,42 g/cm<sup>3</sup> ήταν αυτό που παράχθηκε από τη σύσταση απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) (5%) -χαλαζιακή άμμος (10%) και σε θερμοκρασία έψησης 1100 °C, ενώ η χαμηλότερη τιμή πυκνότητας 1,21 g/cm<sup>3</sup> παράχθηκε από τη σύσταση απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) (5%)-χαλαζιακή άμμος (5%) σε θερμοκρασία έψησης 900 °C.

Επίσης, παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία υπάρχει μια πολύ μικρή αύξηση της πυκνότητας σε θερμοκρασία έψησης 1000 °C, η οποία ίσως σηματοδοτεί ότι η πυροσυσσώματωση βρίσκεται σε ένα μέσο στάδιο στο οποίο δεν έχει ακόμα ολοκληρωθεί πλήρως.

Ενώ στη θερμοκρασία 1100 °C, παρατηρείται ότι έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία της πυροσυσσώματωσης, δηλαδή όλοι οι κόκκοι έχουν συμπτυχθεί για αυτό το λόγο έχει αποτυπωθεί και η μεγαλύτερη τιμή πυκνότητας με την προσθήκη χαλαζιακής άμμου, η οποία παρατηρείται ότι πλησιάζει την τιμή του απόβλητου τούβλου και είναι καλύτερη από την προσθήκη μόνο κελύφους φυσιτικού.

Ακόμα, παρατηρείται ότι οι ιδιότητες των παραγόμενων κεραμικών με την προσθήκη αγρο-απόβλητου, δεν διαφέρουν σημαντικά με τις ιδιότητες του απόβλητου τούβλου. Η αξιοποίηση των αγρο-αποβλήτων φαίνεται ότι έχει θετική συνεισφορά τόσο στην πυκνότητα, όσο και στις υπόλοιπες ιδιότητες των κεραμικών.

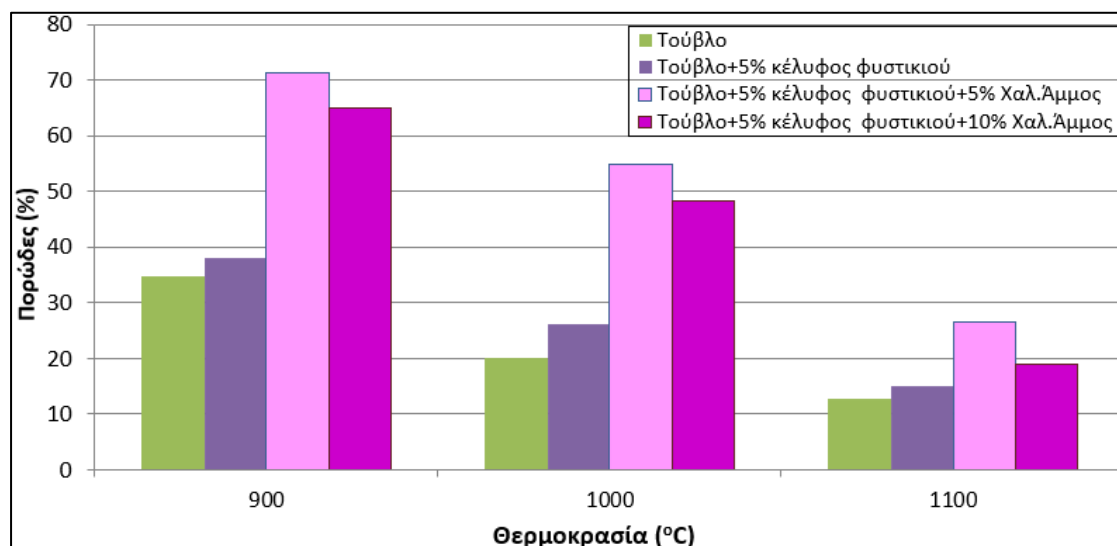


**Διάγραμμα 3.15:** Τιμές πυκνότητας παραγόμενων κεραμικών ομάδας Β.

Στο *Διάγραμμα 3.16* παρουσιάζονται οι τιμές του πορώδους των παραγόμενων κεραμικών της ομάδας Β, για τις θερμοκρασίες έψησης (900 °C, 1000 °C, 1100 °C). Παρατηρείται ότι το κεραμικό με θερμοκρασία έψησης 900 °C από τη σύσταση απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) (5%)-χαλαζιακή άμμος (5%) είχε την μεγαλύτερη τιμή πορώδους 71,37%, ενώ το κεραμικό με την χαμηλότερη τιμή πορώδους 18,86 % παράχθηκε από τη σύσταση απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) (5%)-χαλαζιακή άμμος (10%) στους 1100 °C.

Επίσης, από τις τιμές του παρακάτω διαγράμματος παρατηρείται ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας υπήρξε μείωση στα πορώδη όλων των παραγόμενων κεραμικών, γεγονός το οποίο αναμένεται, γιατί κατά τη διάρκεια της πυροσυσσωμάτωσης μειώνονται οι πόροι μεταξύ των κόκκων. Με το αποτέλεσμα αυτό λοιπόν, συμπεραίνεται ότι η πυκνότητα και το πορώδες είναι δύο ιδιότητες αντιστρόφως ανάλογες σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας όπως είδαμε στο *Διάγραμμα 3.15*.

Παρατηρείται ότι συγκριτικά με το απόβλητο τούβλο και το απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού(ως έχει) (5%) η προσθήκη της χαλαζιακής άμμου οδήγησε σε σημαντική αύξηση του πορώδους κυρίως στους 900 °C [από 30% στο απόβλητο τούβλο σε 70% με προσθήκη 5% κελύφους φυσιτικού (ως έχει) και 5% χαλαζιακής άμμου]. Όσο εξελίσσεται η πυροσυσσωμάτωση, οι τιμές του πορώδους μειώνονται, όμως η τάση είναι ίδια, δηλαδή η προσθήκη της χαλαζιακής άμμου αυξάνει το πορώδες των παραγόμενων κεραμικών.



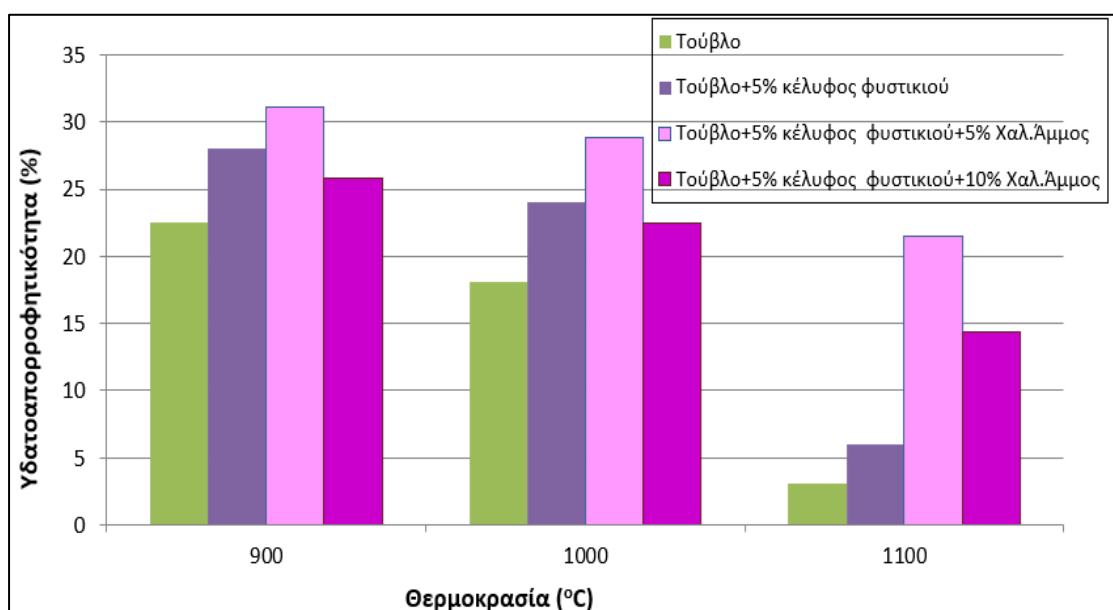
**Διάγραμμα 3.16:** Τιμές πορώδους παραγόμενων κεραμικών ομάδας Β.

Στο *Διάγραμμα 3.17* παρουσιάζονται οι τιμές της υδατοαπορροφητικότητας των κεραμικών της ομάδας Β, για τις θερμοκρασίες έψησης (900 °C, 1000 °C, 1100 °C). Παρατηρείται ότι η υψηλότερη τιμή της υδατοαπορροφητικότητας 31,07% παράχθηκε από τη σύσταση απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) (5%)-χαλαζιακή άμμος (5%) στους 900 °C, ενώ η χαμηλότερη τιμή της 14,41% υδατοαπορροφητικότητας παράχθηκε από τη σύσταση απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) (5%)-

χαλαζιακή άμμος (10%) σε θερμοκρασία έψησης 1100 °C. Επομένως συμπεραίνεται, πως με αύξηση της θερμοκρασίας η υδατοαπορροφητικότητα μειώνεται.

Επίσης, σε συνδυασμό με τις τιμές που προέκυψαν από το *Διάγραμμα 3.16* του πορώδους των δοκιμίων, υπάρχει μια ανάλογη συσχέτιση όπως παρατηρείται μεταξύ αυτών των δύο ιδιοτήτων στα παραγόμενα κεραμικά, το οποίο επαληθεύει το γεγονός ότι, υλικά με μεγάλο πορώδες μπορούν να απορροφήσουν μεγάλη ποσότητα νερού και το αντίστροφο.

Ακόμα συγκριτικά με το απόβλητο τούβλο και το απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) (5%) όπως και στο πορώδες, έτσι και η υδατοαπορροφητικότητα έχουν πιο χαμηλές τιμές, γεγονός που αποδεικνύει ότι η προσθήκη χαλαζιακής άμμου έχει θετική επίδραση στις ιδιότητες των παραγομένων κεραμικών.

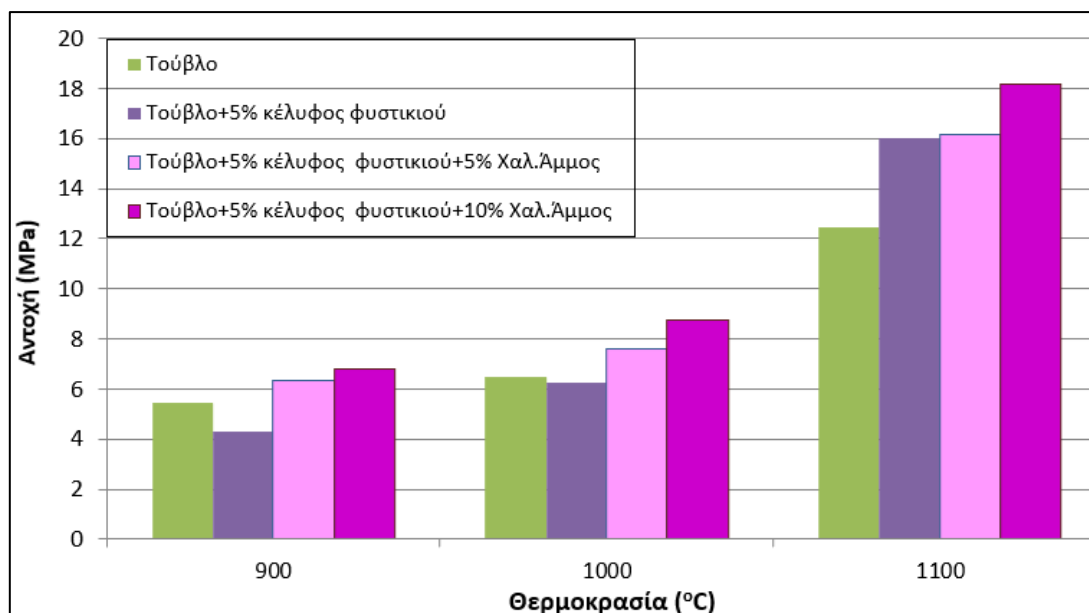


**Διάγραμμα 3.17:** Τιμές υδατοαπορροφητικότητας παραγόμενων κεραμικών ομάδας B.

Στο *Διάγραμμα 3.18* απεικονίζονται οι τιμές της αντοχής των παραγόμενων κεραμικών της ομάδας B, για τις θερμοκρασίες έψησης (900 °C, 1000 °C, 1100 °C). Το κεραμικό με την χαμηλότερη τιμή αντοχής 6,36 MPa ήταν αυτό που παράχθηκε από τη σύσταση απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) (5%)-χαλαζιακή άμμος (5%) στους 900 °C, ενώ το κεραμικό που παράχθηκε από τη σύσταση απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) (5%)-χαλαζιακή άμμος (10%) σε θερμοκρασία έψησης 1100 °C έδωσε τη μεγαλύτερη τιμή αντοχής 18,14 MPa.

Στα κεραμικά με σύσταση απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) (5%)-χαλαζιακή άμμος σε ποσοστά (5%) και (10%) και σε θερμοκρασία έψησης 1100 °C παρατηρήθηκαν οι υψηλότερες τιμές αντοχής, το οποίο οφείλεται στην καλή πυροσυσσωμάτωση των δοκιμίων στη συγκεκριμένη θερμοκρασία.

Στα υπόλοιπα κεραμικά που παράχθηκαν σε θερμοκρασία έψησης 900 °C και 1000 °C παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία υπάρχει μια μικρή αύξηση στην αντοχής τους και αυτό οφείλεται στην προσθήκη της χαλαζιακής άμμου που έχει προφανώς θετική επίδραση στην ανάμιξη τους, σε σχέση με το τα κεραμικά που έχουν παραχθεί από απόβλητο τούβλο και απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) (5%).



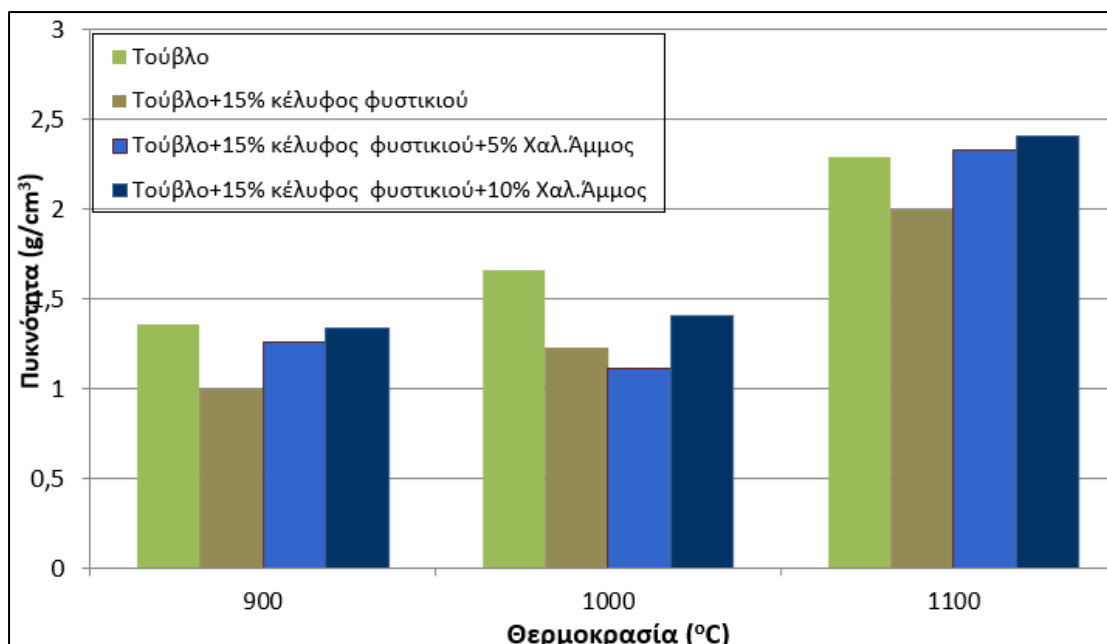
**Διάγραμμα 3.18:** Τιμές αντοχής παραγόμενων κεραμικών ομάδας Β.

#### ➤ **Κέλυφος φυσιτικού 15%**

Από το *Διάγραμμα 3.19* προκύπτει πως το κεραμικό που παράχθηκε από τη σύσταση απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) (15%)-χαλαζιακή άμμος (10%) είχε την μεγαλύτερη τιμή πυκνότητας  $2,40 \text{ g/cm}^3$  σε θερμοκρασία έψησης 1100 °C, ενώ το κεραμικό που παράχθηκε από τη σύσταση απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) (15%)-χαλαζιακή άμμος (5%) είχε την χαμηλότερη τιμή  $1,11 \text{ g/cm}^3$  στους 1000 °C.

Με βάση το παρακάτω διάγραμμα συμπεραίνεται ότι, η αύξηση της θερμοκρασίας έψησης οδηγεί αντίστοιχα και σε αύξησή της πυκνότητας και κατ' επέκταση μείωση του πορώδους, όπως θα δούμε στο *Διάγραμμα 3.20*.

Παρατηρείται επίσης ότι, οι τιμές της πυκνότητας του απόβλητου τούβλου συγκλίνουν με τις τιμές της σύστασης απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) (15%)-χαλαζιακή άμμος (10%), με αυτές να είναι λίγο καλύτερες όταν προστίθεται στη σύσταση χαλαζιακή άμμο σε ποσοστό 10%.

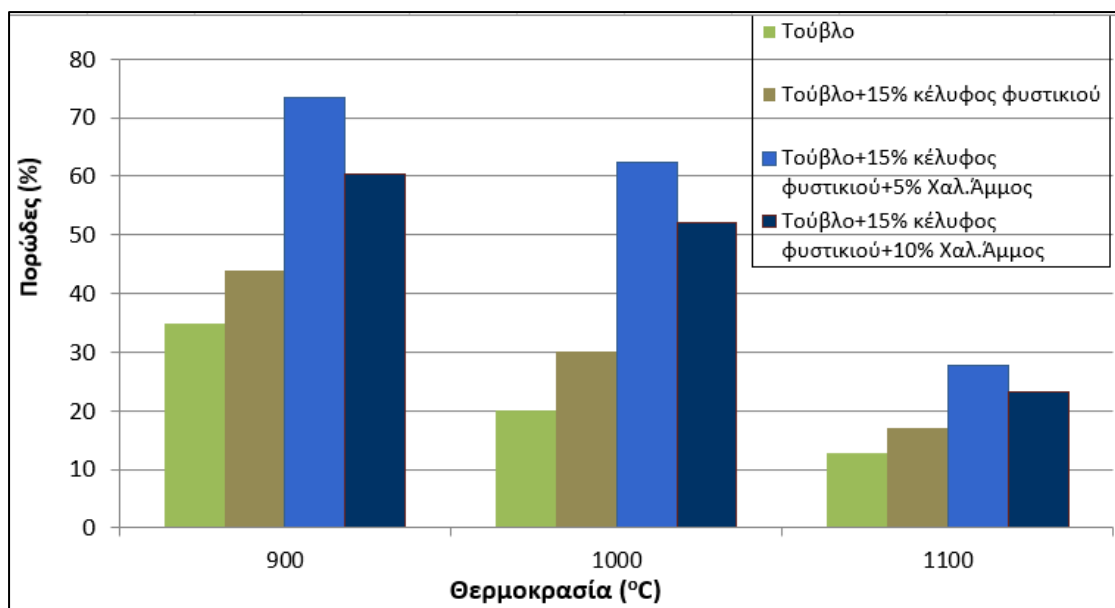


**Διάγραμμα 3.19:** Τιμές πυκνότητας παραγόμενων κεραμικών ομάδας Β.

Από το Διάγραμμα 3.20 προκύπτει πως το κεραμικό που παράχθηκε από τη σύσταση απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) (15%)-χαλαζιακή άμμος (5%) είχε την μεγαλύτερη τιμή πορώδους 73,47% στους 900 °C, ενώ το κεραμικό που παράχθηκε από τη σύσταση απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) (15%)-χαλαζιακή άμμος (10%) είχε την χαμηλότερη τιμή 23,30% στους 1100 °C.

Παρατηρείται ότι και για τις τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες έψησης (900 °C, 1000 °C, 1100 °C) η προσθήκη χαλαζιακής άμμου στις συστάσεις που δημιουργήθηκαν βοηθάει τις ιδιότητες των παραγομένων κεραμικών σε αντίθεση με το απόβλητο τούβλο και απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) (15%) που οι τιμές τους είναι προφανώς πιο μειωμένες.

Επίσης, σε όλες τις συστάσεις καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία παρατηρείται μείωση στις τιμές όλων των πορώδων κεραμικών που παράχθηκαν και αυτό είναι λογικό διότι, η θερμοκρασία με το πορώδες είναι δύο ιδιότητες που είναι μεταξύ τους αντιστρόφως ανάλογες.



**Διάγραμμα 3.20:** Τιμές πορώδους παραγόμενων κεραμικών ομάδας Β.

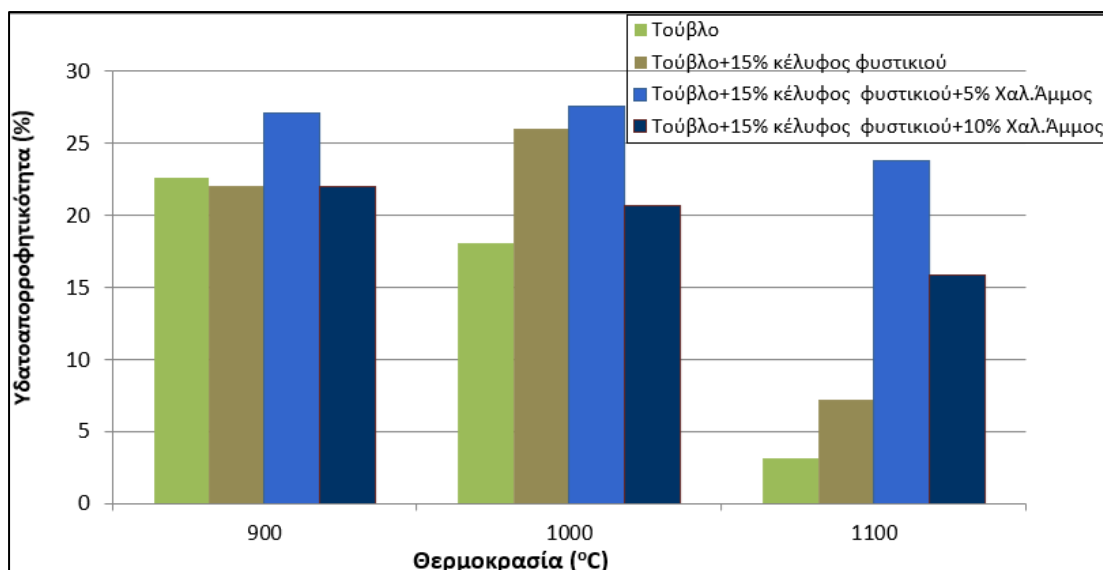
Από το Διάγραμμα 3.21 προκύπτει πως το κεραμικό που παράχθηκε από τη σύσταση απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) (15%)-χαλαζιακή άμμος (5%) είχε την μεγαλύτερη τιμή υδατοαπορροφητικότητας 27,55% στους 1000 °C, ενώ το κεραμικό που παράχθηκε από τη σύσταση απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) (15%)-χαλαζιακή άμμος (10%) είχε την χαμηλότερη τιμή 15,87% στους 1100 °C.

Παρατηρείται ότι και για τις τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες έψησης (900 °C, 1000 °C, 1100 °C) το απόβλητο τούβλο και απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) (15%) έχουν χαμηλότερες τιμές από τις συστάσεις που περιέχουν και χαλαζιακή άμμο, άρα σε αυτή την περίπτωση η προσθήκη της βοηθάει την υδατοαπορροφητικότητα των παραγόμενων κεραμικών.

Παρόλα αυτά, η μείωση των τιμών με την προσθήκη χαλαζιακής άμμου είναι ελάχιστη καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, συγκριτικά με το απόβλητο τούβλο και απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού(ως έχει) (15%) που είναι πιο αισθητή η μείωση τους με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Επίσης, στο παρακάτω διάγραμμα παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη τιμή υδατοαπορροφητικότητας προέκυψε στους 1000 °C, που αυτό πιθανώς να οφείλεται στην παρουσία μικρό-ρωγμών στη δομή τους ή μη καλή σύνδεση μεταξύ των κόκκων κατά την ανάμιξη τους στην χαμηλότερη θερμοκρασία.



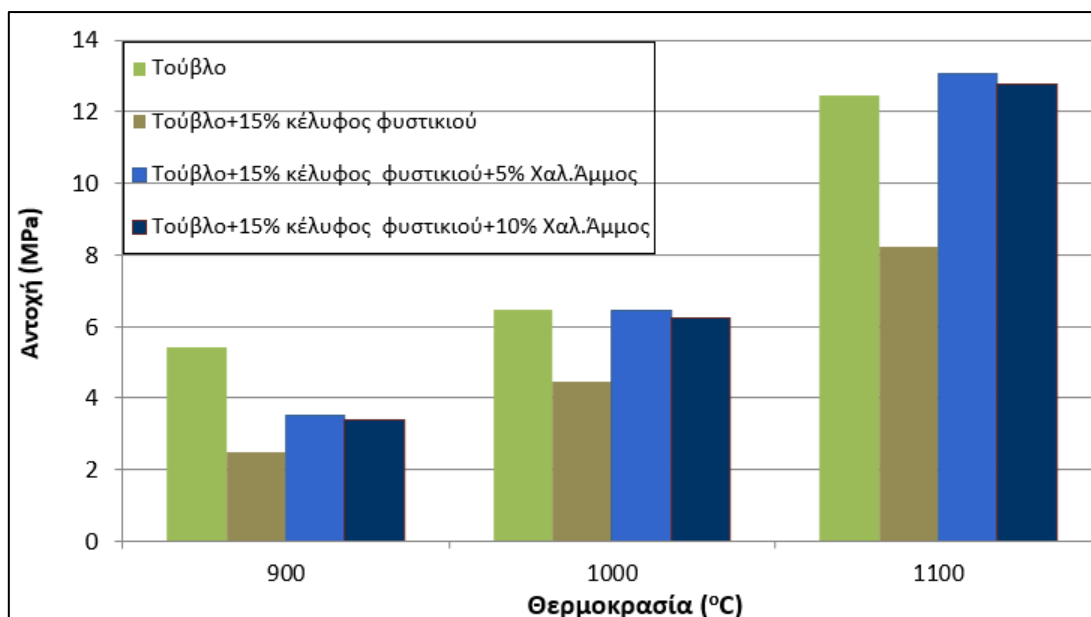


**Διάγραμμα 3.21:** Τιμές υδατοαπορροφητικότητας παραγόμενων κεραμικών ομάδας Β.

Στο Διάγραμμα 3.22 απεικονίζονται οι τιμές της αντοχής των παραγόμενων κεραμικών της ομάδας Β, για τις θερμοκρασίες έψησης (900 °C, 1000 °C, 1100 °C). Το κεραμικό με την χαμηλότερη τιμή αντοχής 3,41 MPa ήταν αυτό που παράχθηκε από τη σύσταση απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) (15%) -χαλαζιακή άμμος (10%) στους 900 °C, ενώ το κεραμικό με την μεγαλύτερη αντοχή 13,05 MPa ήταν αυτό που παράχθηκε από τη σύσταση απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) (15%) -χαλαζιακή άμμος (5%) στους 1100 °C.

Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία δημιουργείται καλύτερη πυροσυσσώματωση και για αυτό το λόγο υπήρξαν οι μεγαλύτερες τιμές αντοχής των κεραμικών σε θερμοκρασία έψησης 1100 °C. Επίσης, η χαλαζιακή άμμος επιδρά θετικά στην αντοχή των δοκιμίων στη συγκεκριμένη θερμοκρασία με την προσθήκη απόβλητου τούβλου-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) (15%) -χαλαζιακή άμμος (5%) με αποτέλεσμα να πλησιάζει την αντοχή του απόβλητου τούβλου. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τη θερμοκρασία έψησης στους 900 °C, καθώς το απόβλητο τούβλο έχει μεγαλύτερη αντοχή, γεγονός το οποίο ίσως οφείλεται στο ότι δεν έχει ξεκινήσει ακόμα η διαδικασία της πυροσυσσώματωσης.

Όμως τα καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά και από τα δύο διαγράμματα αντοχής στην Ομάδα Β προέκυψαν στο Διάγραμμα 3.18 που έγινε προσθήκη κελύφους φυσιτικού 5% και αυτό συμβαίνει διότι, όσο αυξάνεται το ποσοστό του αγρο-αποβλήτου, καθώς πραγματοποιείται η καύση, παρατηρείται ότι δημιουργούνται περισσότεροι πόροι και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην συμβάλει στην ενίσχυση της αντοχής αλλά στην ενίσχυση του πορώδους.



**Διάγραμμα 3.22:** Τιμές αντοχής παραγόμενων κεραμικών ομάδας Β.

### 3.2.3. Πιθανές Εφαρμογές Παραγόμενων Προϊόντων

Με βάση τις τιμές που προέκυψαν για την αντοχή και την υδατοαπορροφητικότητα όλων των δοκιμίων που παρουσιάστηκαν στους Πίνακες 3.5 και 3.6 της προηγούμενης ενότητας 3.2.2, γίνεται κατηγοριοποίηση αυτών, με διεθνή πρότυπα, ώστε να εντοπιστούν οι πιθανές εφαρμογές των παραγόμενων προϊόντων. Πιο συγκεκριμένα, εμφανίζονται τα κεραμικά δοκίμια, τα οποία πληρούν τις προϋποθέσεις των παρακάτω προτύπων.

Σύμφωνα με το Αμερικάνικο πρότυπο ASTM C62, οι προϋποθέσεις των φυσικών ιδιοτήτων για την παρασκευή τούβλων τοιχοποιίας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα και χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες.

**Πίνακας 3.7:** Προϋποθέσεις φυσικών ιδιοτήτων για την παρασκευή τούβλων τοιχοποιίας με βάση το πρότυπο ASTM C62.

	Ελάχιστη Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Μέγιστη Υδατοαπορροφητικότητα (%)
<b>Κατηγορία Α</b>	20,7	17
<b>Κατηγορία Β</b>	17,2	22
<b>Κατηγορία Γ</b>	10,3	-

Κατηγορία Α: αφορά τούβλα, τα οποία για να χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε φθορά από το ψύχος (όταν είναι κορεσμένα σε νερό).

Κατηγορία Β: αφορά τούβλα, τα οποία για να χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να παρουσιάζουν μέτρια αντοχή σε φθορά από το ψύχος, πιο συγκεκριμένα όταν περιέχουν υγρασία αλλά δεν είναι κορεσμένα.

Κατηγορία Γ: αφορά τούβλα, τα οποία για να χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να παρουσιάζουν χαμηλή αντοχή σε φθορά από το ψύχος, πιο συγκεκριμένα εφαρμόζονται όταν είναι στεγανά από την υγρασία και το ψύχος (ASTM C62).

**Πίνακας 3.8:** Έλεγχος χρήσης παραγόμενων κεραμικών για την παρασκευή τούβλων τοιχοποιίας με βάση το πρότυπο ASTM C62.

Ο μ ά δ α	Συστάσεις	Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Υδατ/τητα (%)	Έλεγχος		
				Κατηγορία Α	Κατηγορία Β	Κατηγορία Γ
				Θ.Α. > 20,7 MPa & Υδατ/τητα < 17 %	Θ.Α. > 17,2 MPa & Υδατ/τητα < 22 %	Θ.Α. > 10,3 MPa & Υδατ/τητα (κανένα όριο)
Α	Απόβ. Τούβλο	12,46	3,11	-	-	OK
	Απόβ. Τούβλο+Κελ. Φυστ. (ως έχει) (5%)	16,00	6,00	-	-	OK
	Τούβλο+Κελ. Φυστ. (μετά από πυρ.) (5%)	10,44	4,26	-	-	OK
Β	Απόβ. Τούβλο+ Κελ. Φυστ. (ως έχει) (5%)+ Χαλ. Άμμο (5%)	16,13	21,53	-	-	OK
	Απόβ. Τούβλο+ Κελ. Φυστ. (ως έχει) (5%)+ Χαλ. Άμμο (10%)	18,14	14,41	-	OK	-
	Απόβ. Τούβλο+ Κελ. Φυστ. (ως έχει) (15%)+ Χαλ. Άμμο (5%)	13,05	23,83	-	-	OK
	Απόβ. Τούβλο+ Κελ. Φυστ. (ως έχει) (15%)+ Χαλ. Άμμο (10%)	12,79	15,87	-	-	OK

Σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο (EN 711-1, 2015), οι προϋποθέσεις των φυσικών ιδιοτήτων για την παρασκευή τούβλων τοιχοποιίας παρουσιάζονται σε δυο κατηγορίες, οι οποίες αναφέρονται στη μέγιστη θλιπτική αντοχή και στην ελάχιστη τιμή υδατοαπορροφητικότητας που θα πρέπει να έχουν και συγκρίνονται με τα παραγόμενα δοκίμια.

**Πίνακας 3.9:** Προϋποθέσεις φυσικών ιδιοτήτων για την παρασκευή τούβλων τοιχοποιίας με βάση το πρότυπο EN 711-1.

	Μέγιστη Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Ελάχιστη Υδατοαπορροφητικότητα (%)
Κατηγορία Α	≥12,5	≤4,5
Κατηγορία Β	≥7,5	≤7

**Πίνακας 3.10:** Έλεγχος χρήσης παραγόμενων κεραμικών για την παρασκευή τούβλων τοιχοποιίας με βάση το πρότυπο EN 771-1.

				Έλεγχος	
Ομάδα	Συστάσεις	Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Υδατ/τητα (%)	Κατηγορία Α	Κατηγορία Β
				Θ.Α. $\geq 12,5\text{MPa}$ & Υδατ/τητα $\leq 4,5\%$	Θ.Α. $\geq 7,5\text{MPa}$ & Υδατ/τητα $\leq 7\%$
Α	Απόβ. Τούβλο	12,46	3,11	OK	-
	Απόβ. Τούβλο+ Κελ. Φυστ. (ως έχει) (5%)	16,00	6,00	-	OK
	Απόβ. Τούβλο+ Κελ. Φυστ. (μετά από πυρ.) (5%)	10,44	4,26	-	OK
	Απόβ. Τούβλο+ Κελ. Φυστ. (μετά από πυρ.) (15%)	8,15	6,89	-	OK

Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο (EN 14411, 2004), οι προϋποθέσεις των φυσικών ιδιοτήτων για την παρασκευή κεραμικών πλακιδίων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα και χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες.

**Πίνακας 3.11:** Προϋποθέσεις φυσικών ιδιοτήτων για την παρασκευή κεραμικών πλακιδίων με βάση το πρότυπο EN 14411.

Κατηγορία	Υδατοαπορροφητικότητα (%)	Ελάχιστη Θλιπτική Αντοχή (MPa)
<b>BIa</b>	$\leq 0,5$	32
<b>BIb</b>	$0,5 < E \leq 3$	27
<b>BIIa</b>	$3 < E \leq 6$	20
<b>BIIb</b>	$6 < E \leq 10$	16
<b>BIII</b>	$> 10$	12

Η κατηγορία BIa, περιλαμβάνει πλακίδια εξωτερικής χρήσης, για έντονη κυκλοφορία πεζών (δημόσιοι χώροι).

Η κατηγορία BIb, περιλαμβάνει πλακίδια εξωτερικής χρήσης (για μέτρια κυκλοφορία πεζών).

Η κατηγορία BIIa, περιλαμβάνει πλακίδια δαπέδου εσωτερικής χρήσης (βεράντες, μπαλκόνια).

Η κατηγορία BIIb, περιλαμβάνει πλακίδια δαπέδου εσωτερικής χρήσης (εσωτερικοί χώροι σπιτιού).

Η κατηγορία BIII, περιλαμβάνει πλακίδια επένδυσης τοίχου.

**Πίνακας 3.12:** Έλεγχος χρήσης παραγόμενων κεραμικών για την παρασκευή κεραμικών πλακιδίων με βάση το πρότυπο EN 14411.

				Έλεγχος				
Ομάδα	Συστάσεις	Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Υδατ/τητα (%)	ΒIa	ΒIb	ΒIIa	ΒIIb	ΒIII
				Θ.Α. > 32MPa & Υδατ/τητα ≤ 0,5 %	Θ.Α. > 27MPa & Υδατ/τητα ≤ 3 %	Θ.Α. > 20MPa & Υδατ/τητα ≤ 6 %	Θ.Α. > 16MPa & Υδατ/τητα ≤ 10 %	Θ.Α. > 12MPa & Υδατ/τητα > 10 %
A	Απόβ. Τούβλο+ Κελ. Φυστ. (ως έχει) (5%)	16,00	6,00	-	-	-	OK	-
B	Απόβ. Τούβλο+ Κελ. Φυστ. (ως έχει) (5%)+ Χαλ. Άμμο (5%)	16,13	21,53	-	-	-	-	OK
	Απόβ. Τούβλο+ Κελ. Φυστ. (ως έχει) (5%)+ Χαλ. Άμμο (10%)	18,14	14,41	-	-	-	-	OK
	Απόβ. Τούβλο+ Κελ. Φυστ. (ως έχει) (15%)+ Χαλ. Άμμο (5%)	13,05	23,83	-	-	-	-	OK
	Απόβ. Τούβλο+ Κελ. Φυστ. (ως έχει) (15%)+ Χαλ. Άμμο (10%)	12,79	15,87	-	-	-	-	OK

## Συμπεράσματα-Μελλοντικές Σκέψεις για Περαιτέρω Έρευνα

Τα πιο σημαντικά συμπεράσματα αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι τα ακόλουθα:

1) Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ανάμιξη παραπροϊόντων όπως το απόβλητο τούβλο, τα αγροτικά απόβλητα (κέλυφος φυσιτικού και βιοεξανθρακώματος κελύφους φυσιτικού) και άλλων προϊόντων, όπως η χαλαζιακή άμμος για την παρασκευή κεραμικών, βελτιώνουν σημαντικά τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των τελικών προϊόντων. Συγκεκριμένα, προκύπτουν ικανοποιητικές τιμές του φαινομένου πορώδους, της υδατοαπορροφητικότητας και της πυκνότητας των παραγόμενων κεραμικών.

2) Τα καλύτερα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής βρέθηκαν στην ομάδα Α από τα κεραμικά που παράχθηκαν από τη σύσταση απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) (5%), με τιμή 16 MPa και στην ομάδα Β από τη σύσταση απόβλητο τούβλο-κέλυφος φυσιτικού (ως έχει) (5%)-χαλαζιακή άμμος (10%), με τιμή 18,1 MPa, σε θερμοκρασία έψησης 1100 °C . Συνεπώς τα δοκίμια μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές κατασκευών και δόμησης.

Επίσης, τα πρότυπα για την κατασκευή δομικών υλικών υποδεικνύουν μικρές τιμές υδατοαπορροφητικότητας και πορώδους, οι οποίες παρατηρήθηκαν μόνο στην ομάδα

Α και σε θερμοκρασία έψησης 1100 °C .

Ακόμα, παρατηρείται ότι με την προσθήκη αγροτικών αποβλήτων και χαλαζιακής άμμου, τα παραγόμενα κεραμικά της ομάδας Β χαρακτηρίζονται από πυκνότερη και συμπαγή μορφολογία με μεγαλύτερες τιμές πορώδους και υδατοαπορροφητικότητας και ως εκ τούτου αποκτούν καλύτερες μηχανικές αντοχές και μπορούν να αξιοποιηθούν για την παρασκευή κεραμικών φίλτρων.

3) Οι χαμηλότερες τιμές πυκνότητας αποβλήτων τούβλων ( $1-1,21 \text{ g/cm}^3$ ) που κατασκευάζονται αρχικά στην ομάδα Α προέκυψαν από τις συστάσεις:

- Απόβλητο Τούβλο-Κέλφος Φυστικιού (15%) (ως έχει) με τιμή  $1,00 \text{ g/cm}^3$  και
- Απόβλητο Τούβλο- Κέλφος Φυστικιού (μετά από πυρόλυση) σε ποσοστά (5%) και (15%) σε θερμοκρασία έψησης 900 °C , με τιμές  $1,18 \text{ g/cm}^3$  και  $1,04 \text{ g/cm}^3$  αντίστοιχα.

Ενώ στην ομάδα Β προέκυψαν από τις συστάσεις:

- Απόβλητο Τούβλο-Κέλφος Φυστικιού (ως έχει) (5%)-Χαλαζιακή Άμμος (5%) στους 900 °C, με τιμή  $1,21 \text{ g/cm}^3$ ,
- Απόβλητο Τούβλο-Κέλφος Φυστικιού (μετά από πυρόλυση) (15%)-Χαλαζιακή Άμμος (5%) στους 1000 °C, με τιμή  $1,11 \text{ g/cm}^3$ .

Η πυκνότητα σε αυτές τις συστάσεις θα μπορούσε να βελτιώσει τον χειρισμό, τη μεταφορά και τη χρήση τέτοιων τούβλων και θα μπορούσε επίσης να έχει θετική επίδραση στο συνολικό βάρος της κατασκευής. Ακόμα, μπορούν να αξιοποιηθούν και για την παρασκευή μονωτικών υλικών (ιδανικά μέχρι  $1,2 \text{ g/cm}^3$ ).

4) Επίσης, παρατηρήθηκε ότι δεν προέκυψαν επιθυμητά αποτελέσματα στους 900 °C, διότι δεν είχε ολοκληρωθεί η πυροσυσσώματωση και αυτό είχε ως αποτέλεσμα να προκύψουν πολύ μικρές τιμές αντοχής στη συγκεκριμένη θερμοκρασία. Οπότε, η συν-αξιοποίηση απόβλητου τούβλου, κελύφους φυσιτικού και βιοεξανθρακώματος εξ' αυτού σε αυτή τη θερμοκρασία δεν είναι ιδανική για την παρασκευή κεραμικών.

5) Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω αποτελέσματα, η χρήση αποβλήτων για την παραγωγή κεραμικών έχει σημαντικά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα, γιατί εξοικονομούνται σημαντικές ποσότητες πόρων και μειώνονται σε σημαντικό βαθμό οι εκπομπές CO<sub>2</sub>. Με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, τα κεραμικά που προέκυψαν μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν για την κατασκευή δομικών υλικών.

Επιπλέον, έχει αυξηθεί ο αριθμός των ερευνών που διεξάγονται σχετικά με την ανακύκλωση αποβλήτων τούβλων για την παραγωγή πιο φιλικών προς το περιβάλλον προϊόντων.

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, μελλοντική έρευνα που θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί είναι:

- Η διερεύνηση των συνθήκων παραγωγής κεραμικών προϊόντων (τούβλα τοιχοποιίας).
- Η διερεύνηση της δυνατότητας εφαρμογής τους, ως μονωτικά υλικά.
- Η διερεύνηση της δυνατότητας εφαρμογής τους, ως κεραμικά φίλτρα για το καθαρισμό υγρών αποβλήτων.
- Παραγωγή κεραμικών με χρήση αποβλήτων σε διαφορετικές αναλογίες από αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.
- Η δυνατότητα προσθήκης διαφορετικών αγρο-αποβλήτων π.χ. κλαδιά ελιάς, κελύφη καρυδιών, κ.α.

## Βιβλιογραφία

### Ελληνική

1. Βλάχου Α. (2015). “Δυνατότητα γεωπολυμερισμού αποβλήτων από εκσκαφές, κατασκευές και κατεδαφίσεις (ΑΕΚΚ)”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
2. Γκότσης Α. & Τσετσέκου Α. (2021). “Μη-Μεταλλικά Υλικά”, Υπό έκδοση από: Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης, Χανιά.
3. Κρητικάκη Α. & Κομνίτσας Κ. (2014). “Σημειώσεις Κεραμικών” . Τμήμα της διδακτέας ύλης του μαθήματος Μεταλλουργικές Διεργασίες, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
4. Κρητικάκη Α. (2009) “Πορώδη κεραμικά για περιβαλλοντικές εφαρμογές” Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
5. Ξυλούρη Α. (2017-2018). “Επιστήμη Κεραμικών Υλικών”, Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών, Πανεπιστήμιο Κρήτης.
6. Τσιραμπίδης Α. (2003). “Ελαφρά Αδρανή και Χαλαζιακή Άμμος: Ιδιότητες-Παραγωγή-Είδη”, Ημερίδα Αδρανή Πετρώματα και Δομικοί Λίθοι, Απρίλιος, 23-47.
7. Χρηστίδης Γ. & Τριανταφύλλου Γ. (2021). “Σημειώσεις για Οπτόπλινθους”. Τμήμα της διδακτέας ύλης του μαθήματος Δομικά και Αδρανή υλικά, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.

### Διεθνής

1. ASTM C62 Standard Specification for Building Bricks (Solid Masonry Units Made from Clay or Shale) (1999).
2. Bartzas, G. and Komnitsas, K. (2017). “Life cycle analysis of pistachio production in Greece”, Science of The Total Environment, 595, 13-24.
3. Bobet, O., Nassio, S., Seynou, M., Remy, B., Zerbo, L., Sanou, I., Sawadogo, M., Millogo, Y. and Gilles, E. (2020). “Characterization of Peanut Shells for Their Valorization in Earth Brick”, Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 8, 301-315.
4. Bories, C., Borredon, M.E., Vedrenne, E. and Vilarem, G. (2014). “Development of eco-friendly porous fired clay bricks using pore-forming agents: A review”, Journal of Environmental Management, 143, 186-196.
5. Eliche-Quesada, D., Martínez-García, C., Martínez-Cartas, M.L., Cotes-Palomino, M.T., Pérez-Villarejo, L., Cruz-Pérez, N. and Corpas-Iglesias, F.A. (2011). “The use of different forms of waste in the manufacture of ceramic bricks”, Applied Clay Science, 52(3), 270-276.
6. EN 14411 Ceramic Tiles, Definition, Classification, Characteristics and Marking (2004).
7. EN 711-1 Specification for masonry units - Part 1: Clay masonry units (2015).



8. Gupta, S. and Kashani, A. (2021). "Utilization of biochar from unwashed peanut shell in cementitious building materials – Effect on early age properties and environmental benefits", *Fuel Processing Technology*, 218, 106841.
9. IPCC. 2018. Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C; Chapter 4: Strengthening and Implementing the Global Response*.
10. Komnitsas, K., Zaharaki, D., Pyliotis, I., Vamvuka, D. and Bartzas, G. (2015). "Assessment of pistachio shell biochar quality and its potential for adsorption of heavy metals", *Waste and Biomass Valorization*, 6, 805-816.
11. Koul, B., Yakoob, M., and Shah, M.P. (2022). "Agricultural waste management strategies for environmental sustainability", *Environmental Research*, 206, 112285.
12. Koul, B. and Taak, P. (2018). "Biotechnological Strategies for Effective Remediation of Polluted Soils", Springer Singapore.
13. Misra, R.D.K. and Misra, K.P (2022). "1 - Fundamentals of ceramics: introduction, classification, and applications", *Ceramic Science and Engineering*, (book chapter), Elsevier Series on Advanced Ceramic Materials, 5-20.
14. Ngayakamo, B. and Onwualu, A.P. (2022). "Recent advances in green processing technologies for valorization of eggshell waste for sustainable construction materials", *Heliyon*, 8(6), e09649.
15. Pérez-Villarejo, L., Eliche-Quesada, D., Martín-Pascual, J., Martín-Morales, M. and Zamorano, M. (2020). "Comparative study of the use of different biomass from olive grove in the manufacture of sustainable ceramic lightweight bricks", *Construction and Building Materials*, 231, 117103.
16. Preet Kaur, D., Raj, S. and Bhandari, M. (2022). "Chapter 2 - Recent advances in structural ceramics", *Advanced Ceramics for Versatile Interdisciplinary Applications*, (book chapter), Elsevier Series on Advanced Ceramic Materials, 15-39.
17. Quaranta, N., Caligaris, M., Pelozo, G., Cristobal, A., Schefer, R.C. and Torrico, L. (2016). "Ceramic bricks from mixtures of clay and peanut shells", 2<sup>nd</sup> World Congress on Biopolymers, Manchester, UK, 04-05 August.
18. Quaranta, N., Caligaris, M., Pelozo, G., Cesari, A. and Cristobal, A. (2018). "Use of Wastes from the Peanut Industry in the Manufacture of Building Materials", *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 13(4), 662-670.
19. Quaranta, N.E, Caligaris, M.G., Unsen, M.A., López, H.A., Pelozo, G.G. and Cristóbal, A.A. (2018) "Residual biomass of the agricultural industry as pore forming material in ceramics", *Municipal and Industrial Waste: Sources, Management Practices and Future Challenges* (book chapter), Nova Publishers, ISBN 978-1-53613-442-1.
20. Rautray, P., Roy, A., Deepak, J.M. and Eisenbart, B. (2021). "Bio-Bricks: Circular Economy and New Products". *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 221, 845-857. ISSN 2190-3018.
21. Salleh, S.Z., Awang Kechik, A., Yusoff, A.H., Taib, M.A.A., Mohamad Nor, M., Mohamad, M., Tan, T.G., Ali, A., Masri, M.N., Mohamed, J.J., Zakaria, S.K., Boon, J.G., Budiman, F. and Teo, P.T. (2021). "Recycling food, agricultural, and industrial wastes as pore-forming agents for sustainable porous ceramic production: A review", *Journal of Cleaner Production*, 306, 127264.

22. Srivastava, S.K., Gupta, G.K., Joshi, T. C., Pandey, A., Muchhala, D., Shrivastava, V., Singh, P., Mondal, D.P., Kumar, R. and Ranjan, S. (2022). "Chapter 1-Existence of advanced ceramic materials in human life", *Advanced Ceramics for Versatile Interdisciplinary Applications*, (book chapter), Elsevier Series on Advanced Ceramic Materials, 1-14.
23. Tagade, A., Kirti, N. and Sawarkar, A.N. (2021). "Pyrolysis of agricultural crop residues: An overview of researches by Indian scientific community", *Bioresource Technology Reports*, 15, 100761.
24. Wong, C.L., Mo, K.H., Yap, S.P., Alengaram, U.J., and Ling, T.C. (2018). "Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review", *Journal of Cleaner Production*, 195, 26-239.
25. Yahya, K. and Boussabaine, H. (2010). "Quantifying environmental impacts and eco-costs from brick waste", *Architectural Engineering and Design Management*, 6(3), 189-206.
26. Zaharie, A., Tintisan, M.L., Siomin, A.C., Manea, D.L, and Plesa, M.L. (2022). "The Use of Ceramic Waste in the Construction Materials Industry Based on the Concept of Sustainable Development". In: Moldovan, L., Gligor, A. (eds) *The 15th International Conference Interdisciplinarity in Engineering. Inter-Eng 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 386. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-93817-8\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-93817-8_18).
27. Zhu, X., Luo, Z., Guo, W., Cai, W. and Zhu, X. (2022). "Reutilization of biomass pyrolysis waste: Tailoring dual-doped biochar from refining residue of bio-oil through one-step self-assembly", *Journal of Cleaner Production*, 343, 131046.
28. Zhu, X., Labianca, C., He, M., Luo, Z., Wu, C., You, S. and Tsang, D.C.W. (2022). "Life-cycle assessment of pyrolysis processes for sustainable production of biochar from agro-residues" *Bioresource Technology*, 360, 127601.