



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ & ΥΑΛΟΥ

Διπλωματική Εργασία

«Παραγωγή κεραμικών από σκωρία καμίνου ακαριαίας τήξης»

Γεώργιος Η. Χαλουλάκος

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

- 1) Κορνίτσας Κωνσταντίνος, Καθηγητής (Επιβλέπων)
- 2) Βαρότσης Νικόλαος, Καθηγητής
- 3) Δρ. Κρητικάκη Άννα, ΕΔΙΠ

Χανιά, Σεπτέμβριος 2017

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή με σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν την χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και θέσεις που περιέχονται σε αυτήν την εργασία εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Copyright © Γεώργιος Η. Χαλουλάκος, 2017.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.



Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Τεχνολογίας Κεραμικών & Υάλου της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η εκπόνηση διήρκησε πέντε μήνες κατά το χρονικό διάστημα μεταξύ Φεβρουαρίου-Ιουνίου 2017. Το θέμα της διπλωματικής εργασίας είναι η αξιοποίηση μεταλλουργικών αποβλήτων για την παραγωγή κεραμικών.

Η Ερευνητική Μονάδα «*Τεχνολογίες Διαχείρισης Μεταλλευτικών & Μεταλλουργικών Αποβλήτων & Αποκατάστασης Εδαφών*» και το Εργαστήριο «*Τεχνολογίας Κεραμικών & Υάλου*» της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης ασχολούνται εδώ και πολλά χρόνια με την διαχείριση μεταλλουργικών σκωριών και ιπτάμενων τεφρών καθώς και με την συνδιαχείρισή τους με άλλα απόβλητα (π.χ. υλικά κατεδαφίσεων, ιζήματα λιμένων κ.λπ.) για την παραγωγή κυρίως γεωπολυμερών και άλλων αλκαλικά ενεργοποιημένων δομικών υλικών. Συνεπώς η εργασία αυτή βασίστηκε σε προηγούμενη εμπειρία της Σχολής σε θέματα διαχείρισης αποβλήτων και προσπάθησε να μελετήσει εις βάθος τις διάφορες παραμέτρους που βελτιστοποιούν τις χρησιμοποιούμενες τεχνικές διαχείρισης.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. **Κωνσταντίνο Κομνίτσα** για την ανάθεση του θέματος και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη την διάρκεια της συνεργασίας μας καθώς και για την βοήθειά του στα πάσης φύσεως προβλήματα που προέκυπταν. Τον ευχαριστώ επίσης για την εξέταση και διόρθωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης ευχαριστώ την Δρ. **Άννα Κρητικάκη** για την συμμετοχή της στην εξεταστική επιτροπή καθώς και για την βοήθεια, καθοδήγηση και ηθική υποστήριξη που μου πρόσφερε κατά την εκτέλεση των πειραμάτων.

Ευχαριστώ επίσης τον καθηγητή κ. **Νικόλαο Βαρότση** για την συμμετοχή του στην τριμελή εξεταστική επιτροπή και τις υποδείξεις του, 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 τα μέλη της οικογένειάς μου για την συνεχή συμπαράσταση και υποστήριξη που μου πρόσφεραν τα πέντε χρόνια των σπουδών μου και ιδιαίτερα κατά την διάρκεια πραγματοποίησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνώνται οι συνθήκες παραγωγής κεραμικών από σκωρία καμίνου ακαριαίας τήξης (στο εξής “**Φινλανδική σκωρία**”) καθώς και οι φυσικομηχανικές ιδιότητες αυτών. Πιο αναλυτικά, παρασκευάστηκαν δεκατέσσερα διαφορετικά είδη κεραμικών χρησιμοποιώντας σε διαφορετικές αναλογίες τις εξής πρώτες ύλες: **1)** Φινλανδική σκωρία, **2)** Φινλανδική σκωρία μετά από εκχύλιση με νιτρικό οξύ, **3)** σκωρία Η/Κ παραγωγής σιδηρονικελίου της ΛΑΡΚΟ ΓΜΜ. Α.Ε. και **4)** ιπτάμενη τέφρα από τον ΑΗΣ Πτολεμαΐδας. Όλα τα δοκίμια που περιείχαν Φινλανδική σκωρία (εκχυλισμένη και μη) σε ποσοστό 100% θερμάνθηκαν σε 3 διαφορετικές θερμοκρασίες (1000 °C, 1100 °C, 1200 °C) ενώ τα δοκίμια με ποσοστό 50% και 40% θερμάνθηκαν σε 2 θερμοκρασίες (1000 °C, 1100 °C). Ο χρόνος θέρμανσης όλων των δοκιμίων ήταν 2 ώρες και ο ρυθμός θέρμανσής τους 3 °C/min

Αρχικά οι πρώτες ύλες ξηράνθηκαν, λειοτριβήθηκαν και αναμείχθηκαν μεταξύ τους σχηματίζοντας ομοιογενή μίγματα κόνεων. Τα μίγματα αυτά τοποθετήθηκαν σε κυλινδρικό καλούπι και υπέστησαν *μονοαξονική συμπίεση* σε υδραυλική πρέσα ώστε να μορφοποιηθούν. Μετά την μορφοποίηση μετρήθηκαν οι διαστάσεις και η μάζα των δοκιμίων και στην συνέχεια έγινε θέρμανση αυτών. Μετά την θέρμανση μετρήθηκαν ξανά οι διαστάσεις και η μάζα των δοκιμίων έτσι ώστε να υπολογιστούν οι ποσοστιαίες μεταβολές τους. Σε όλα τα δοκίμια προσδιορίστηκαν με βάση τις πρότυπες μεθόδους οι εξής ιδιότητες: **1) πυκνότητα**, **2) φαινόμενο πορώδες**, **3) υδατοαπορροφητικότητα**, **4) αντοχή σε μονοαξονική θλίψη** και **5) μικροσκληρότητα Vickers**. Επίσης, έγινε ανάλυση με περίθλαση ακτίνων-Χ (XRD) ώστε να προσδιοριστούν ποιοτικά οι περιεχόμενες ορυκτολογικές φάσεις.

Μετά από μελέτη και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προέκυψε πως τα κεραμικά που παρασκευάστηκαν μόνο με μη εκχυλισμένη Φινλανδική σκωρία και θερμάνθηκαν στους 1200 °C είχαν τις καλύτερες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες. Η πυκνότητά τους ήταν 2.75 g/cm³, το πορώδες τους 15.85%, η θλιπτική αντοχή τους περίπου 80 MPa και η μικροσκληρότητα τους περίπου 800 HV. Επομένως πρόκειται για κεραμικά αξιόλογων ιδιοτήτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ευρύ πλήθος εφαρμογών. Τα υπόλοιπα είδη κεραμικών είχαν όλα μικρότερες μηχανικές ιδιότητες, αλλά όσα παρασκευάστηκαν και με ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας είχαν υψηλότερο πορώδες (περίπου 26%), αντοχή περίπου 17 MPa και πυκνότητα 2.17 g/cm³. Επομένως είναι πιθανό να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κεραμικά φίλτρα.

Abstract

In this diploma thesis the conditions for the production of ceramics from flash smelting furnace slag (or “Finnish slag”) and their physical and mechanical properties were investigated. In total, fourteen different types of ceramics were produced using the following raw materials in different proportions: **1)** Finnish slag, **2)** Finnish slag leached with nitric acid, **3)** electric arc furnace slag from the LARCO GMM SA ferronickel plant and **4)** fly ash from the thermal power plant of Ptolemais, NW Greece. The mixtures produced from 100% Finnish slag (as received or leached) were heated at 3 temperatures (1000 °C, 1100 °C, 1200 °C), while the ones containing 50% and 40% slag were heated at 2 temperatures (1000 °C, 1100 °C). The heating time of all specimens was 2 hours and the heating rate was 3 °C/min.

First, the raw materials were dried, pulverized and mixed to form homogeneous mixtures. Then the mixtures were placed in a cylindrical mold and pressed uniaxially with a hydraulic press in order to be shaped. The dimensions and mass of all specimens were measured before and after heating in order to calculate their percentage variations.

The following properties were determined in the produced ceramics: **1)** *density*, **2)** *apparent porosity*, **3)** *water absorption*, **4)** *uniaxial compressive strength* and **5)** *Vickers microhardness*. Also X-ray diffraction (XRD) analysis was carried out in order to determine the main mineralogical phases.

The evaluation of results showed that ceramics with beneficial physical and mechanical properties can be produced by using only Finnish Slag after heating of specimens at 1200 °C. The density of these ceramics was 2.75 g/cm³, their apparent porosity 15.85%, uniaxial compressive strength about 80 MPa and Vickers microhardness about 800 HV. So, these ceramics have very good properties and can be used in a wide variety of applications. All the other types of ceramics had poorer mechanical properties but these that were produced by using Ptolemais fly ash had 38% apparent porosity, 17 MPa uniaxial compressive strength and 2.17 g/cm³ density. Therefore, they are maybe suitable as ceramic filters.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	iv
Περίληψη	v
Abstract	vi
Κατάλογος Πινάκων	viii
Κατάλογος Εικόνων	ix
Κατάλογος Διαγραμμάτων	x
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: Θεωρητικό Μέρος	11
1.1. Βιομηχανικά Απόβλητα	11
1.1.1. Εισαγωγή	11
1.1.2. Τεχνικές διαχείρισης	12
1.2. Κεραμικά	17
1.2.1. Γενικά	17
1.2.2. Παραγωγική διαδικασία	17
1.2.3. Κατάταξη κεραμικών	18
1.2.4. Ιδιότητες κεραμικών	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Πειραματική Μεθοδολογία	21
2.1. Πρώτες Ύλες	21
2.1.1. Φινλανδική σκωρία	21
2.1.2. Σκωρία σιδηρονικελίου	22
2.1.3. Ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας	23
2.2. Προετοιμασία Πρώτων Υλών	25
2.2.1. Εκχύλιση Φινλανδικής σκωρίας	25
2.2.2. Ξήρανση-λειτουργία	27
2.3. Παρασκευή Κεραμικών	28
2.3.1. Αναμείξεις πρώτων υλών	28
2.3.2. Μορφοποίηση δοκιμίων	29
2.3.3. Παραγωγή κεραμικών	31
2.4. Προσδιορισμός Ιδιοτήτων	32
2.4.1. Πυκνότητα-πορώδες-υδατοαπορροφητικότητα	32
2.4.2. Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη	33
2.4.3. Μικροσκληρότητα Vickers	34

Κατάλογος Εικόνων

2.5. Ορυκτολογικές αναλύσεις	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Συζήτηση Αποτελεσμάτων.....	36
3.1. Χαρακτηρισμός Πρώτων Υλών	36
3.1.1. Χημική σύσταση	36
3.1.2. Ορυκτολογική σύσταση	37
3.1.3. Κοκκομετρία	39
3.2. Χαρακτηρισμός Κεραμικών	40
3.2.1. Ορυκτολογική σύσταση	40
3.2.2. Φυσικομηχανικές ιδιότητες	49
3.2.3. Πιθανές χρήσεις παραγόμενων κεραμικών.....	61
Συμπεράσματα-Προτάσεις	63
Βιβλιογραφία.....	64
Ελληνική.....	64
Διεθνής	64
Ιστοσελίδες	66
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	67

Κατάλογος Πινάκων

<u>Πίνακας 1.1:</u> Κατάταξη κεραμικών.....	18
<u>Πίνακας 2.1:</u> Παράμετροι εκχύλισης.....	25
<u>Πίνακας 3.1:</u> Χημική σύσταση (% w/w) πρώτων υλών.....	36
<u>Πίνακας 3.2:</u> Κοκκομετρία πρώτων υλών (μm).....	39
<u>Πίνακας 3.3:</u> Μεταβολές διαστάσεων, όγκου & βάρους κεραμικών ομάδας Α.....	50
<u>Πίνακας 3.4:</u> Μέσες τιμές ιδιοτήτων κεραμικών ομάδας Α.....	51
<u>Πίνακας 3.5:</u> Μεταβολές διαστάσεων, όγκου & βάρους κεραμικών ομάδας Β.....	56
<u>Πίνακας 3.6:</u> Μέσες τιμές ιδιοτήτων κεραμικών ομάδας Β.....	57
<u>Πίνακας 3.7:</u> Έλεγχος χρήσης παραχθέντων κεραμικών με βάση το ASTM-C62.....	61
<u>Πίνακας 3.8:</u> Έλεγχος χρήσης παραχθέντων κεραμικών με βάση το EN 771-1.....	62
<u>Πίνακας 3.9:</u> Μετρήσεις διαστάσεων, όγκου & βάρους κεραμικών ομάδας Α.....	68
<u>Πίνακας 3.10:</u> Ιδιότητες κεραμικών ομάδας Α.....	69
<u>Πίνακας 3.11:</u> Μετρήσεις διαστάσεων, όγκου & βάρους κεραμικών ομάδας Β.....	70
<u>Πίνακας 3.12:</u> Ιδιότητες κεραμικών ομάδας Β.....	72

Κατάλογος Εικόνων

<u>Εικόνα 2.1:</u> Σχηματική παράσταση καμίνου ακαριαίας τήξης (Mäkinen, 2006).....	21
<u>Εικόνα 2.2:</u> Μεταλλουργικό εργοστάσιο ΛΑΡΚΟ.....	23
<u>Εικόνα 2.3:</u> ΑΗΣ Πτολεμαΐδας.....	24
<u>Εικόνα 2.4:</u> Θερμαντικές Πλάκες.....	26
<u>Εικόνα 2.5:</u> Διήθηση υπό κενό.....	26
<u>Εικόνα 2.6:</u> Στερεό υπόλειμμα διήθησης.....	26
<u>Εικόνα 2.7:</u> Πυριαντήριο PF 60/200 Carbolite.....	27
<u>Εικόνα 2.8:</u> Πλανητικός μύλος Bico Pulverizer.....	27
<u>Εικόνα 2.9:</u> Καλούπι μορφοποίησης.....	29
<u>Εικόνα 2.10:</u> Υδραυλική πρέσα συμπίεσης.....	30
<u>Εικόνα 2.11:</u> Εξαρτήματα εξώθησης.....	30
<u>Εικόνα 2.12:</u> Κλίβανος χαμηλών θερμοκρασιών.....	31
<u>Εικόνα 2.13:</u> Μορφοποιημένα (αριστερά) και θερμασμένα κεραμικά (δεξιά).....	31
<u>Εικόνα 2.14:</u> Ζυγός ακριβείας.....	32
<u>Εικόνα 2.15:</u> Ξηραντήρας.....	32
<u>Εικόνα 2.16:</u> Μηχανή MTS 1600.....	33
<u>Εικόνα 2.17:</u> Μικροσκληρόμετρο FM-700.....	34
<u>Εικόνα 2.18:</u> Περιθλασίμετρο ακτίνων-Χ.....	35
<u>Εικόνα 2.19:</u> Δειγματοφορείς περιθλασίμετρου.....	35

Κατάλογος Διαγραμμάτων

<u>Διάγραμμα 3.1:</u> Ορυκτολογική σύσταση πρώτων υλών	37
<u>Διάγραμμα 3.2:</u> Ορυκτολογική σύσταση δειγμάτων εκχυλισμένης σκωρίας.....	38
<u>Διάγραμμα 3.3:</u> Αθροιστικό % βάρος της αρχικής Φινλανδικής σκωρίας.....	39
<u>Διάγραμμα 3.4:</u> Ορυκτολογική σύσταση κεραμικών σειράς A1.....	40
<u>Διάγραμμα 3.5:</u> Ορυκτολογική σύσταση κεραμικών σειράς A2.....	41
<u>Διάγραμμα 3.6:</u> Ορυκτολογική σύσταση κεραμικών A.FS.....	42
<u>Διάγραμμα 3.7:</u> Ορυκτολογική σύσταση κεραμικών A.FS-FeNi.....	43
<u>Διάγραμμα 3.8:</u> Ορυκτολογική σύσταση κεραμικών A.FS-FeNi-FAP.....	44
<u>Διάγραμμα 3.9:</u> Ορυκτολογική σύσταση κεραμικών σειράς B1.....	45
<u>Διάγραμμα 3.10:</u> Ορυκτολογική σύσταση κεραμικών σειράς B2.....	46
<u>Διάγραμμα 3.11:</u> Ορυκτολογική σύσταση κεραμικών B. LFS.....	47
<u>Διάγραμμα 3.12:</u> Ορυκτολογική σύσταση κεραμικών B. LFS-FeNi.....	48
<u>Διάγραμμα 3.13:</u> Ορυκτολογική σύσταση κεραμικών B. LFS-FeNi-FAP.....	49
<u>Διάγραμμα 3.14:</u> Τιμές πυκνότητας κεραμικών ομάδας A.....	52
<u>Διάγραμμα 3.15:</u> Τιμές πορώδους κεραμικών ομάδας A.....	53
<u>Διάγραμμα 3.16:</u> Τιμές υδατ/τητας κεραμικών ομάδας A.....	53
<u>Διάγραμμα 3.17:</u> Τιμές αντοχής κεραμικών ομάδας A.....	54
<u>Διάγραμμα 3.18:</u> Τιμές μικροσκληρότητας κεραμικών ομάδας A.....	55
<u>Διάγραμμα 3.19:</u> Τιμές πυκνότητας κεραμικών ομάδας B.....	58
<u>Διάγραμμα 3.20:</u> Τιμές πορώδους κεραμικών ομάδας B.....	58
<u>Διάγραμμα 3.21:</u> Τιμές υδατ/τητας κεραμικών ομάδας B.....	59
<u>Διάγραμμα 3.22:</u> Τιμές αντοχής κεραμικών ομάδας B.....	60
<u>Διάγραμμα 3.23:</u> Τιμές μικροσκληρότητας κεραμικών ομάδας B.....	60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: Θεωρητικό Μέρος**1.1. Βιομηχανικά Απόβλητα****1.1.1. Εισαγωγή**

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της κοινωνίας μας είναι η ορθολογική διαχείριση των αποβλήτων της «βαριάς» βιομηχανίας τα οποία θεωρούνται επιβλαβή για την υγεία των ανθρώπων και μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες περιβαλλοντικές καταστροφές αν διατεθούν ανεξέλεγκτα στο φυσικό περιβάλλον. Οι ουσίες που αναφέρονται ως «απόβλητα» υπόκεινται σε αυστηρή νομοθεσία, σκοπός της οποίας είναι η προστασία της ανθρώπινης ζωής και υγείας καθώς και του φυσικού περιβάλλοντος. Σύμφωνα με την Οδηγία **2008/98/ΕΚ** του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 19ης Νοεμβρίου 2008 ως «απόβλητο» ορίζεται *"κάθε ουσία ή αντικείμενο το οποίο ο κάτοχός του απορρίπτει ή προτίθεται ή υποχρεούται να απορρίψει"*. Η Οδηγία αυτή ρυθμίζει τις υποχρεώσεις των μερών που παράγουν απόβλητα, που κατέχουν απόβλητα και που διαχειρίζονται απόβλητα. Σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία όλες οι βιομηχανίες θα πρέπει να αποτρέπουν την παραγωγή επικίνδυνων αποβλήτων ή να περιορίζουν τόσο την παραγωγή τους όσο και των αρνητικών επιπτώσεών τους στην ανθρώπινη ζωή, την υγεία και το φυσικό περιβάλλον. Τα απόβλητα των οποίων η παραγωγή είναι αναπόφευκτη θα πρέπει να ανακυκλώνονται ή να επεξεργάζονται ώστε να αξιοποιούνται και στο περιβάλλον να διατίθεται το τελικό υπόλειμμά τους που είναι αδρανές και σε μικρή ποσότητα.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία αλματώδης αύξηση της ποσότητας των αποβλήτων που παράγονται από τις βιομηχανίες με αποτέλεσμα να απειλείται άμεσα το φυσικό περιβάλλον και η ανθρώπινη υγεία. Τα απόβλητα αυτά χαρακτηρίζονται ως βιομηχανικά και η απευθείας διάθεσή τους έχει απαγορευθεί βάσει νόμων οι οποίοι υποχρεώνουν τις βιομηχανίες να τα επεξεργάζονται κατάλληλα πριν τα απορρίψουν στο φυσικό περιβάλλον. Έτσι αρκετοί επιστήμονες ανέπτυξαν νέους τρόπους επεξεργασίας και διαχείρισης των βιομηχανικών αποβλήτων από κοινού με τις βιομηχανίες ώστε είτε να τα καταστήσουν φιλικά ως προς το περιβάλλον είτε να τα επαναχρησιμοποιήσουν σε διάφορους τομείς. Το αποτέλεσμα όλων αυτών των προσπαθειών ήταν η ανάπτυξη και θέσπιση πολιτικών επαναχρησιμοποίησης των βιομηχανικών αποβλήτων, οι οποίες μείωσαν το κόστος διαχείρισης αλλά και τις ποσότητες αυτών.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες αποβλήτων: τα **στερεά** και τα **υγρά**. Ως **στερεά** νοούνται τα απόβλητα που βρίσκονται σε στερεή φυσική κατάσταση και διακρίνονται σε αστικά (οικιακά και βιοτεχνικά απορρίμματα) και ειδικά. Τα ειδικά διακρίνονται σε επικίνδυνα (χημικά και βιομηχανικά), μη επικίνδυνα και ιατρικά (νοσοκομειακά και λοιπά ιατρικά). Ως **υγρά** νοούνται τα απόβλητα τα οποία βρίσκονται σε υγρή φυσική κατάσταση και δεν περιέχουν σε μεγάλο ποσοστό αιωρούμενους ρύπους. Θα πρέπει να σημειωθεί πως στην κατηγορία των στερεών αποβλήτων περιλαμβάνονται όλα τα απόβλητα εκτός από τα υγρά απόβλητα και τους αέριους ρύπους. Από τα παραπάνω γίνεται εύκολα αντιληπτό πως ο χαρακτηρισμός και ο τρόπος διαχείρισης των διαφόρων αποβλήτων εξαρτάται από την πηγή παραγωγής τους.

1.1.2. Τεχνικές διαχείρισης

Η ορθολογική διαχείριση και αξιοποίηση των αποβλήτων εκατοντάδων μεταλλουργικών βιομηχανιών και εργοστασίων παραγωγής ενέργειας σε όλο τον κόσμο έχει αφυπνίσει πολλούς ερευνητές τα τελευταία χρόνια οι οποίοι ασχολούνται πάνω στο θέμα αυτό. Υπάρχουν εκατοντάδες δημοσιεύσεις και επιστημονικές έρευνες που αποδεικνύουν πως είναι δυνατή σε ικανοποιητικό βαθμό η επαναχρησιμοποίηση βιομηχανικών αποβλήτων για την παραγωγή νέων υλικών και προϊόντων. Μάλιστα σε πολλές περιπτώσεις διαπιστώθηκε πως το κόστος παραγωγής ήταν χαμηλότερο όταν χρησιμοποιούνταν απόβλητα αντί για νέες πρώτες ύλες.

Το 1996 οι *Malhotra & Tehri* [1] διερεύνησαν την παραγωγή τούβλων από σκωρία υψικαμίνου η οποία αποτελεί παραπροϊόν της βιομηχανίας χάλυβα. Εκτός από την σκωρία υψικαμίνου χρησιμοποίησαν ενυδατωμένο ασβέστη και άμμο δημιουργώντας ένα μείγμα. Με το μείγμα αυτό έφτιαξαν τούβλα ασκώντας πίεση 4.9 MPa σε υδραυλική πρέσα και στην συνέχεια τα άφησαν να σκληρύνουν για 28 μέρες σε περιβάλλον 95% υγρασίας και 27 °C θερμοκρασίας. Έπειτα προσδιόρισαν την αντοχή, την πυκνότητα και την υδατοαπορροφητικότητα των τούβλων και διαπίστωσαν πως πρόκειται για καλής ποιότητας τούβλα με θλιπτική αντοχή 15 MPa και μικρό κόστος παραγωγής αφού δεν κατανάλωσαν μεγάλες ποσότητες ενέργειας για την θέρμανσή τους.

Το 2000 οι *Sioulas & Sanjayan* [2] ανέφεραν τα αποτελέσματα της αντικατάστασης του τσιμέντου από σκωρία στην παραγωγή σκυροδέματος υψηλών αντοχών. Η αντικατάσταση με σκωρία μπορεί να βοηθήσει στην μείωση των υψηλών θερμοκρασιών ενυδάτωσης, οι οποίες είναι ένα συνηθισμένο πρόβλημα στα σκυροδέματα που περιέχουν μεγάλο ποσοστό τσιμέντου. Έτσι αντικατέστησαν το

τσιμέντο με σκωρία σε ποσοστό 70%, 50% και 30%. Η μελέτη τους βασίσθηκε σε κυβικά δοκίμια με διατομή 800 x 800 mm και ύψος 1200 mm. Επίσης παρασκεύασαν ένα μείγμα που περιείχε τσιμέντο Portland, σκωρία και διοξείδιο του πυριτίου. Αυτό που συμπεράναν από τα αποτελέσματά τους ήταν πως η αύξηση της θερμοκρασίας ενυδάτωσης σε σκυροδέματα υψηλών αντοχών μπορεί να μειωθεί αρκετά αν αντικατασταθεί μέρος του τσιμέντου Portland από σκωρία.

Το 2006 οι *Teik-Thye & Chu* [3] μελέτησαν την χρήση σκωρίας από μεταλλουργία χαλκού ως υλικό πλήρωσης για την αποκατάσταση εδάφους. Αρχικά προσδιόρισαν τις φυσικές και γεωτεχνικές ιδιότητες της σκωρίας και τις σύγκριναν με της άμμου, ενώ η αξιολόγηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που θα προέκυπταν έγινε με μετρήσεις του pH, του Eh, της ικανότητας εξουδετέρωσης οξέος, δοκιμές εκχύλισης και μακροχρόνια παρακολούθηση της διάσπασης του υλικού. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν πως η σκωρία ήταν ελαφρώς αλκαλική με pH γύρω στο 8.4, ενώ μετά την εκχύλιση οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων ήταν μικρότερες από τα επιτρεπτά όρια. Έτσι συμπεράναν πως η σκωρία χαλκού είναι πολύ καλό υλικό πλήρωσης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποκατάσταση γης.

Ένας άλλος τρόπος (συν)διαχείρισης των βιομηχανικών αποβλήτων όπως των σκωριών και της ιπτάμενης τέφρας είναι η χρήση τους στην παραγωγή **ανόργανων πολυμερών** (γεωπολυμερή). Πιο αναλυτικά, το 2009 η *Ζαχαράκη & Κορνίτσας* [7] χρησιμοποίησαν ως πρώτη ύλη σκωρία παραγωγής σιδηρονικελίου και ως πρόσθετα ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας, ερυθρά ιλύ, καολίνη, οξείδιο του ασβεστίου, πυριτική άμμο, εμπορικό γυαλί και ποζολάνη. Αφού λειοτρίβησαν όλα τα υλικά, προετοίμασαν το διάλυμα ενεργοποίησης διαλυτοποιώντας άνυδρο υδροξείδιο του καλίου (KOH) σε απιονισμένο νερό και προσθέτοντας έπειτα διάλυμα πυριτικού νατρίου (Na₂SiO₃). Στην συνέχεια πρόσθεσαν σιγά σιγά στο διάλυμα την σκωρία και τα πρόσθετα (με διαφορετικές αναλογίες και συνδυασμούς κάθε φορά) και ανακάτεψαν πολύ καλά την «πάστα» που προέκυψε. Την πάστα αυτή την τοποθέτησαν σε υψηλής αντίστασης πλαστικά κυβικά καλούπια τα οποία δονήθηκαν για 5 λεπτά ούτως ώστε να απομακρυνθεί όλος ο παγιδευμένος αέρας από την μάζα της. Τα καλούπια παρέμειναν σε θερμοκρασία δωματίου για 2 ημέρες ώστε να γίνουν οι αντιδράσεις των ανόργανων πολυμερών (οι οποίες ενισχύουν την ανάπτυξη της αντοχής) και στην συνέχεια θερμάνθηκαν στον εργαστηριακό φούρνο στις απαιτούμενες θερμοκρασίες και χρόνους. Η γήρανση των δοκιμών έγινε για 7 ημέρες σε συνθήκες δωματίου ώστε να αναπτυχθούν οι δομικοί δεσμοί.

Μετά από αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων τους συμπέραναν πως η προσθήκη καολίνη και ποζολάνης μειώνει σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό την θλιπτική αντοχή των πολυμερών με θερμοκρασία θέρμανσης μεταξύ 40 °C και 80 °C. Με προσθήκη ιπτάμενης τέφρας ή ερυθράς ιλύος ή οξειδίου του ασβεστίου παρατηρήθηκε μείωση της θλιπτικής αντοχής μεγαλύτερη από 92% ενώ με προσθήκη λειοτριβημένης πυριτικής άμμου αυτή αυξήθηκε ελαφρώς. Τέλος, για τα γεωπολυμερή που περιείχαν εμπορικό γυαλί παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή (123 MPa) ενώ η προσθήκη καολίνη οδηγούσε σε πολύ μικρότερη αντοχή.

Το 2009 ο Κομνίτσας κ.α. [8] παρασκεύασαν γεωπολυμερή χρησιμοποιώντας ως πρώτη ύλη σκωρία παραγωγής σιδηρονικελίου χαμηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο και ως πρόσθετα καολίνη και μετακαολίνη. Τα ανόργανα πολυμερή υγρά παρασκευάστηκαν με προσθήκη είτε υδροξειδίου του νατρίου (NaOH) είτε υδροξειδίου του καλίου (KOH) σε απιονισμένο νερό και μετέπειτα προσθήκη διαλύματος πυριτικού νατρίου (Na₂SiO₃). Η σκωρία και τα πρόσθετα όπως ο καολίνης και ο μετακαολίνης προστίθονταν σιγά σιγά στο διάλυμα το οποίο αναδευόταν συνεχώς με μηχανικό τρόπο ούτως ώστε να προκύψει μια ομοιογενής και ενεργή «πάστα». Στην συνέχεια η πάστα αυτή χυτεύθηκε σε πλαστικά κυβικά καλούπια τα οποία δονήθηκαν για μερικά λεπτά έτσι ώστε να απομακρυνθεί ο αέρας από την μάζα της. Τα καλούπια παρέμειναν σε θερμοκρασία δωματίου για 48 ώρες ώστε να αναπτυχθούν δομικοί δεσμοί (διαδικασία γήρανσης) και κατόπιν θερμάνθηκαν στον εργαστηριακό φούρνο στις απαιτούμενες θερμοκρασίες.

Τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την σύνθεση των γεωπολυμερών είναι η ορυκτολογική σύσταση των πρώτων υλών, οι τύποι των πρόσθετων, η αρχική περιεκτικότητα σε νερό, η συγκέντρωση των αλκαλίων και του ενεργοποιητή, ο χρόνος γήρανσης, η θερμοκρασία και ο χρόνος θέρμανσης. Επίσης συμπέραναν πως τα γεωπολυμερή στα οποία χρησιμοποιήθηκε KOH 8M και Na₂SiO₃ σε ποσοστό 8% εμφάνισαν την μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή της τάξεως των 60 MPa. Τέλος παρατήρησαν πως η προσθήκη καολίνη στην αρχική πάστα οδήγησε σε μείωση της θλιπτικής αντοχής ενώ η προσθήκη μετακαολίνη οδήγησε σε ακόμη μεγαλύτερη μείωση της θλιπτικής αντοχής των πολυμερών.

Το 2010 ο Turgut [10] χρησιμοποίησε σκόνη ασβεστόλιθου και ιπτάμενη τέφρα κατηγορίας C για την παραγωγή τούβλων τοιχοποιίας. Αφού ανέμειξε τις πρώτες ύλες σε διαφορετικές αναλογίες πρόσθεσε υγρασία στα μείγματα και συμπιέζοντάς τα στα 20 MPa τα μορφοποίησε σε τούβλα. Έπειτα άφησε μερικά από τα μορφοποιημένα

τούβλα να σκληρύνουν σε θερμοκρασία δωματίου για 48 ώρες ενώ τα υπόλοιπα τα τοποθέτησε σε μία δεξαμενή νερού θερμοκρασίας 22 °C για 7, 28 και 90 ημέρες αντίστοιχα και κατόπιν τα ξήρανε στους 105 °C για 24 ώρες. Τελικά μετά τον προσδιορισμό των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων τους κατέληξε στο συμπέρασμα πως μπορούν να παραχθούν καλής ποιότητας τούβλα τοιχοποιίας (η μέγιστη θλιπτική αντοχή ήταν 18.27 MPa) από ιπτάμενη τέφρα και ασβεστολιθική σκόνη.

Το 2012 ο *Turgut* [12] διερεύνησε την παρασκευή τούβλων τοιχοποιίας αξιοποιώντας ιπτάμενη τέφρα κατηγορίας C, ασβεστολιθική σκόνη, διοξείδιο του πυριτίου και νερό. Για να τα παρασκευάσει ανέμειξε τις πρώτες ύλες με νερό, συμπίεσε το μείγμα και άφησε τα μορφοποιημένα δοκίμια να ωριμάσουν για 7, 28 και 90 ημέρες αντίστοιχα. Έπειτα μέτρησε τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητές τους και τα αποτελέσματα έδειξαν πως η θλιπτική αντοχή και η αντοχή σε κάμψη των τούβλων αυξήθηκαν σημαντικά όταν αυξήθηκε το ποσοστό του διοξειδίου του πυριτίου στο αρχικό μείγμα. Με 20% διοξείδιο του πυριτίου η θλιπτική αντοχή των τούβλων έπειτα από 28 και 90 μέρες ωρίμανσης ήταν 23 και 26.5 MPa αντίστοιχα. Επίσης συμπέρανε πως το κόστος παραγωγής αυτών των τούβλων ήταν 6.4 φορές μικρότερο σε σχέση με το κόστος παραγωγής των παραδοσιακών τούβλων από άργιλο.

Το 2013 οι *Chavan & Kulkarni* [13] παρασκεύασαν σκυρόδεμα χρησιμοποιώντας σκωρία χαλκού αντί για λεπτομερή αδρανή και διερεύνησαν την επίδραση που είχε στην αντοχή του σκυροδέματος. Οι πρώτες ύλες τις οποίες χρησιμοποίησαν σε διαφορετικές αναλογίες ήταν τσιμέντο τύπου Portland, λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα αδρανή και σκωρία από μεταλλουργία χαλκού. Αφού τα δοκίμια του σκυροδέματος σκλήρυναν μέσα στο νερό για 7 και 28 ημέρες πραγματοποίησαν δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και αντοχής σε κάμψη. Αυτό που διαπίστωσαν από τα αποτελέσματα ήταν πως με αντικατάσταση κατά 40% των λεπτομερών αδρανών από σκωρία η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος αυξήθηκε κατά 55% (αρχική αντοχή 18.29 MPa και τελική αντοχή 28.48 MPa) ενώ με αντικατάσταση των αδρανών κατά 20% η αντοχή του σε κάμψη αυξήθηκε κατά 14% (αρχική αντοχή 3.49 MPa και τελική αντοχή 4 MPa).

Μία άλλη τεχνική συνδιαχείρισης των σκωριών και των ιπτάμενων τεφρών είναι η παραγωγή **υαλοκεραμικών**. Το 2016 η *Κρητικάκη κ.α.* [16] χρησιμοποίησαν ιπτάμενη τέφρα κατηγορίας C, σκωρία παραγωγής σιδηρονικελίου και ερυθρά ιλύ για την παρασκευή υαλοκεραμικών. Για να παράξουν το γυαλί τοποθέτησαν τις πρώτες ύλες σε πυρίμαχα χωνευτήρια και τα θέρμαναν στους 1300 °C και στους 1500 °C για 2 ώρες ενώ για την μείωση του σημείου τήξης των υλικών πρόσθεσαν βόρακα και ανθρακικό

νάτριο. Μόλις το γυαλί ψύχθηκε, το λειοτρίβησαν και συμπίεσαν την σκόνη στα 60 MPa παράγοντας δοκίμια κυλινδρικού σχήματος. Έπειτα ξήραναν τα δοκίμια στους 110 °C και τα θέρμαναν για 2 ώρες σε θερμοκρασία μεταξύ 800 και 1000 °C. Σε όλα τα δοκίμια προσδιόρισαν φυσικομηχανικές ιδιότητες όπως την θλιπτική αντοχή, την πυκνότητα και το φαινόμενο πορώδες και συμπέραναν πως μπορούν να παραχθούν υαλοκεραμικά με καλές ιδιότητες.

Το 2016 η Ζαχαράκη κ.α. [17] χρησιμοποίησαν σκωρία σιδηρονικελίου, απόβλητα κατεδαφίσεων (πλακάκια, τούβλα και σκυρόδεμα) και ερυθρά ιλύ για να παράξουν **αλκαλικά ενεργοποιημένα** υλικά. Αρχικά λειοτρίβησαν τις πρώτες ύλες και παρασκεύασαν με αυτές μείγματα σε διαφορετικές αναλογίες και στην συνέχεια παρασκεύασαν το διάλυμα της αλκαλικής ενεργοποίησης. Για να το παρασκευάσουν πρόσθεσαν υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) σε απιονισμένο νερό και κατόπιν πρόσθεσαν διάλυμα πυριτικού νατρίου (Na₂SiO₃). Το τελικό διάλυμα έμεινε να κρυώσει για 24 ώρες σε θερμοκρασία δωματίου πριν το χρησιμοποιήσουν και αφού κρύωσε πρόσθεσαν σε αυτό τα μείγματα των πρώτων υλών υπό ανάδευση. Οι «πάστες» που δημιουργήθηκαν από αυτή την διαδικασία τοποθετήθηκαν σε κυβικά καλούπια τα οποία δονήθηκαν για μερικά λεπτά ώστε να απομακρυνθεί ο αέρας αλλά και για να βελτιωθούν οι ιδιότητες των τελικών δοκιμίων. Τα δοκίμια παρέμειναν μέσα στα καλούπια για 4 ώρες και σε θερμοκρασία δωματίου ώστε να γίνει μία πρώτη στερεοποίηση της πάστας. Στην συνέχεια τα καλούπια αποσυναρμολογήθηκαν και τα δοκίμια θερμάνθηκαν στους 80 °C για 24 ώρες και μετά από γήρανση 7 ημερών σε θερμοκρασία δωματίου υπεβλήθησαν σε δοκιμή μονοαξονικής αντοχής. Τέλος πραγματοποιήθηκαν δοκιμές θερμικής συμπεριφοράς των δοκιμίων (με θέρμανση σε υψηλές θερμοκρασίες) και μετρήσεις ογκομετρικής συρρίκνωσης και πορώδους.

Αυτό που συμπέραναν ήταν πως επιτυχής αλκαλική ενεργοποίηση των πρώτων υλών για την παραγωγή αλκαλικά ενεργοποιημένων δομικών υλικών μπορεί να γίνει στους 80 °C και χρησιμοποιώντας ως διάλυμα ενεργοποίησης NaOH. Επίσης διαπίστωσαν πως τα τελικά προϊόντα αποκτούν βέλτιστες ιδιότητες (μέγιστη θλιπτική αντοχή περίπου 76 MPa) μόνο όταν χρησιμοποιείται επαρκής ποσότητα του αλκαλικού ενεργοποιητή και υπάρχουν οι κατάλληλες αναλογίες SiO₂/Al₂O₃ και SiO₂/CaO στο αρχικό μείγμα. Τέλος συμπέραναν πως με συγκεκριμένα μείγματα πρώτων υλών μπορούν να προκύψουν υλικά τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πυροπροστασία.

1.2. Κεραμικά

1.2.1. Γενικά

Τα «κεραμικά» είναι ανόργανα μη μεταλλικά στερεά κρυσταλλικής ή άμορφης δομής τα οποία παράγονται με θερμική κατεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες (>1000 °C) και προκύπτουν από διάφορους συνδυασμούς μετάλλων και αμετάλλων ή μη-μεταλλικών στερεών. Τα κεραμικά αποτελούνται τουλάχιστον από δύο χημικά στοιχεία και οι δεσμοί μεταξύ των ατόμων τους μπορεί να είναι ιοντικοί, ομοιοπολικοί ή συνδυασμός αυτών, ενώ το είδος του δεσμού που επικρατεί επηρεάζει την κρυσταλλική δομή και τις ιδιότητές τους. Οι τελικές ιδιότητες των κεραμικών επηρεάζονται επίσης από την χημική και ορυκτολογική σύσταση των πρώτων υλών καθώς και την κοκκομετρία αυτών, την μέθοδο μορφοποίησης και τις συνθήκες θέρμανσής. Μερικές από τις χαρακτηριστικές ιδιότητες των κεραμικών είναι:

- Ψαθυρή συμπεριφορά
- Υψηλή σκληρότητα
- Αντοχή σε μεγάλες θερμοκρασίες
- Αντοχή σε τριβή
- Μικρή θερμική αγωγιμότητα
- Μικρή ηλεκτρική αγωγιμότητα

1.2.2. Παραγωγική διαδικασία

Το **πρώτο** στάδιο για την παραγωγή κεραμικών είναι η *προετοιμασία* των πρώτων υλών. Στο στάδιο αυτό οι πρώτες ύλες ξηραίνονται ώστε να απομακρυνθεί η περιεχόμενη υγρασία τους, λειοτριβούνται για την επίτευξη συγκεκριμένης κοκκομετρίας και στο τέλος αναμειγνύονται σε συγκεκριμένες αναλογίες δημιουργώντας ομοιογενή μείγματα ξηρών κόνεων.

Το **δεύτερο** στάδιο είναι η *μορφοποίηση* των προετοιμασμένων μειγμάτων. Με την μορφοποίηση διαμορφώνεται ένα σώμα με συγκεκριμένο γεωμετρικό σχήμα και διαστάσεις, ενώ διαμορφώνονται και πολλές από τις τελικές ιδιότητες αυτού (μηχανική αντοχή, πορώδες κλπ.). Οι κυριότερες μέθοδοι μορφοποίησης είναι:

- Συμπίεση (μονοαξονική, ισοστατική, εν θερμώ)
- Υγρή χύτευση
- Εξώθηση

Το **τελευταίο** στάδιο είναι η **θέρμανση** των μορφοποιημένων δοκιμίων. Κατά την διαδικασία της θέρμανσης πραγματοποιείται πυροσυσσωμάτωση λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την δομική διασύνδεση των κόκκων των κεραμικών κόνεων. Το στάδιο αυτό είναι το πιο σημαντικό στην παραγωγή κεραμικών καθώς διαμορφώνει τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος π.χ. πορώδες και το δοκίμιο αποκτά μηχανική αντοχή λόγω της δομικής διασύνδεσης.

1.2.3. Κατάταξη κεραμικών

Οι κυριότερες κατηγορίες κεραμικών είναι τα **παραδοσιακά** και τα **προηγμένα**. Στα παραδοσιακά κεραμικά συγκαταλέγονται τα προϊόντα που βασίζονται στην άργιλο (προϊόντα αγγειοπλαστικής και κεραμουργείας), ενώ τα προηγμένα κεραμικά αποτελούνται από εξειδικευμένα υλικά και έχουν ιδιαίτερες ιδιότητες (ηλεκτρικές, μαγνητικές, οπτικές κλπ.). Στον **Πίνακα 1.1** παρουσιάζεται η κατάταξη των κεραμικών καθώς και οι εφαρμογές της κάθε κατηγορίας (Κρητικάκη & Κομνίτσας, 2014).

Πίνακας 1.1: Κατάταξη κεραμικών

	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΥΛΙΚΟ	ΕΦΑΡΜΟΓΗ
ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΑ ΚΕΡΑΜΙΚΑ	Προϊόντα αγγειοπλαστικής	Πορσελάνη μαλακή/σκληρή, πυροχώματα	Είδη εστίασης, πλακίδια, είδη υγιεινής, ηλεκτρονικοί μονωτές
	Προϊόντα κεραμουργείας	Πηλός	Τούβλα, κεραμίδια, πλακίδια δαπέδου
	Κοπτικά λειαντικά	Αλούμινα, καρβίδια πυριτίου – βολφραμίου, διαμάντι	Εργαλεία κοπής, εργαλεία λείανσης
	Πυρίμαχα	Αλούμινα, αργιλοπυριτικά, μαγνησία, σπινέλιος	Επενδύσεις φούρνων, καλούπια για χύτευση μετάλλων
ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΚΕΡΑΜΙΚΑ	Γυαλιά	Γυαλί, υαλοκεραμικά, υαλώματα	Γυάλινα είδη, υαλοπίνακες, εφυσωμένα αντικείμενα
	Τσιμέντα	Υδραυλική κονία από άσβεστο, αλούμινα, πυριτία	Δομικά προϊόντα
	Τεχνικά κεραμικά	Οξειδία, καρβίδια, νιτρίδια, βορίδια, σύνθετα κεραμικά	Σε πολλούς τομείς των νέων τεχνολογιών
	Ηλεκτρονικά κεραμικά	Οξειδία, νιτρίδια, σύνθετες ενώσεις	Μονωτές, υλικά υποστρωμάτων, κυκλώματα

1.2.4. Ιδιότητες κεραμικών

Τα κεραμικά έχουν χαρακτηριστικά και ιδιότητες που τους επιτρέπουν να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλη ποικιλία διαφορετικών εφαρμογών. Έχουν καλές φυσικές ιδιότητες π.χ. υψηλή θερμοχωρητικότητα σε αντίθεση με τις μηχανικές τους ιδιότητες όπως η αντοχή τους σε εφελκυσμό που είναι χαμηλή, ενώ η χαρακτηριστική τους ιδιότητα είναι πως παρουσιάζουν ψαθυρή συμπεριφορά κατά την θραύση τους. Παρακάτω ορίζονται μερικές από τις βασικές ιδιότητες των κεραμικών:

- **Πυκνότητα**: Ως πυκνότητα ορίζεται ο λόγος της μάζας ξηρού υλικού ενός πορώδους σώματος προς τον όγκο αυτού. Υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\rho_b = \frac{m_1}{m_3 - m_2} * \rho_{liq} \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

Όπου: **m₁**: μάζα του ξηρού δοκιμίου (g)

m₂: φαινόμενη μάζα του εμβαπτισμένου δοκιμίου (g)

m₃: μάζα του εμβαπτισμένου δοκιμίου (g)

ρ_{liq}: πυκνότητα του υγρού εμβαπτισμού (g/cm³)

- **Φαινόμενο πορώδες**: Ως φαινόμενο πορώδες ορίζεται ο λόγος του συνολικού όγκου των ανοικτών πόρων σε ένα πορώδες σώμα προς τον όγκο αυτού. Υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\varphi = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} * 100 \text{ [%]}$$

Όπου: **m₁**: μάζα του ξηρού δοκιμίου (g)

m₂: φαινόμενη μάζα του εμβαπτισμένου δοκιμίου (g)

m₃: μάζα του εμβαπτισμένου δοκιμίου (g)

- **Υδατοαπορροφητικότητα**: Υδατοαπορροφητικότητα ονομάζεται η επί τοις εκατό (%) ποσοστιαία αύξηση της μάζας ενός δοκιμίου μετά την εμβάπτιση και παραμονή του στο νερό για κάποιο χρονικό διάστημα. Υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$W_a = \frac{m_2 - m_1}{m_1} * 100 [\%]$$

Όπου: m_1 : μάζα του ξηρού δοκιμίου (g)

m_2 : μάζα του υγρού δοκιμίου (g)

- **Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη**: Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη είναι η ικανότητα ενός υλικού ή μιας δομής να αντέχει σε θλιπτικά φορτία που τείνουν να μειώσουν το μέγεθός του. Υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$C_o = \frac{P_{\max}}{A} [Pa]$$

Όπου: P_{\max} : μέγιστο θλιπτικό φορτίο μέχρι αστοχίας του δοκιμίου (N)

A : εμβαδόν επιφάνειας φόρτισης δοκιμίου (m²)

- **Μικροσκληρότητα Vickers**: Είναι η τιμή που λαμβάνεται από ένα φορτίο δοκιμής το οποίο εφαρμοζόμενο σε ένα δοκίμιο διαμορφώνει ένα αποτύπωμα σ' αυτό χρησιμοποιώντας ένα αδαμάντινο διεισδυτήρα πυραμιδοειδούς σχήματος με τετραγωνική βάση και γωνία επιφάνειας 136°. Υπολογίζεται από την σχέση:

$$HV = \frac{1.854 * P}{d^2} [HV]$$

Όπου: P : εφαρμοζόμενο φορτίο δοκιμής (kgf)

d : Μήκος μέσης διαγώνιου αποτυπώματος (mm²)

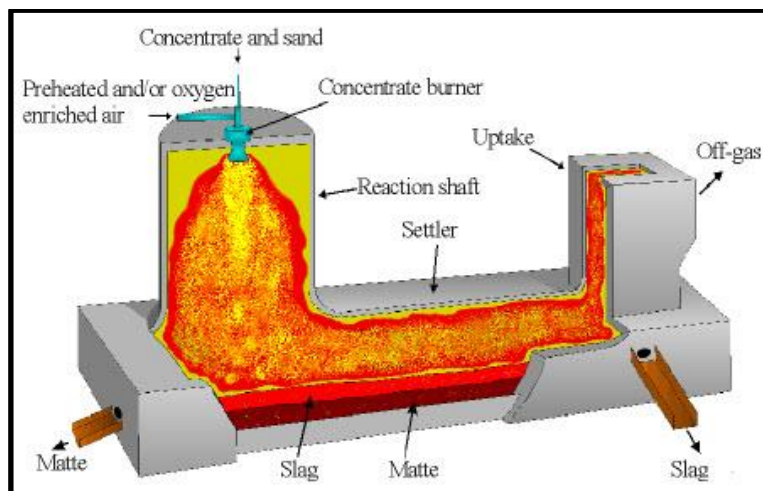
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Πειραματική Μεθοδολογία

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η πειραματική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την προετοιμασία και τον χαρακτηρισμό των πρώτων υλών καθώς και για την παρασκευή και τον χαρακτηρισμό των κεραμικών δοκιμίων. Αρχικά γίνεται αναλυτική περιγραφή των πρώτων υλών (χαρακτηριστικά, τρόπος παραγωγής και προέλευσής τους) και έπειτα περιγράφεται η διαδικασία εκχύλισης της Φινλανδικής σκωρίας και η προετοιμασία των πρώτων υλών, αναλύονται τα στάδια παρασκευής των κεραμικών και του προσδιορισμού των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων τους και τέλος αναφέρεται η διαδικασία των ορυκτολογικών αναλύσεων.

2.1. Πρώτες Ύλες

2.1.1. Φινλανδική σκωρία

Η σκωρία που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία για την παρασκευή κεραμικών προέρχεται από την Φινλανδία. Η σκωρία αυτή παράγεται σε κάμινο ακαριαίας τήξης (Εικόνα 2.1) η τροφοδοσία της οποίας αποτελείται από συμπυκνώματα χαλκού, χρησιμοποιημένες ανόδους ηλεκτρόλυσης και κάποια απόβλητα ηλεκτρονικού εξοπλισμού (e-απόβλητα). Μαζί με τα υλικά της τροφοδοσίας διοχετεύεται στην κάμινο και θερμός αέρας εμπλουτισμένος σε οξυγόνο ώστε να πραγματοποιηθούν οι οξειδωτικές αντιδράσεις μεταξύ των υλικών. Από τις διάφορες εξόδους της καμίνου εξέρχονται τα παραγόμενα αέρια, η matte χαλκού που είναι το χρήσιμο υλικό και επεξεργάζεται σε επόμενο στάδιο και η **σκωρία** η οποία είναι το τελικό υπόλειμμα της διαδικασίας και χαρακτηρίζεται ως μεταλλουργικό απόβλητο.



Εικόνα 2.1: Σχηματική παράσταση καμίνου ακαριαίας τήξης (Mäkinen, 2006)

2.1.2. Σκωρία σιδηρονικελίου

Η σκωρία σιδηρονικελίου αποτελεί παραπροϊόν της πυρομεταλλουργικής διεργασίας που υφίστανται διάφορα μεταλλεύματα λατεριτών με σκοπό την παραγωγή σιδηρονικελίου. Οι κύριες φάσεις για την παραγωγή σιδηρονικελίου που ακολουθούνται στο μεταλλουργικό εργοστάσιο της ΛΑΡΚΟ ΓΜΜ ΑΕ. στην Λάρυμνα Βοιωτίας (Εικόνα 2.2) είναι τα ακόλουθα (<http://www.larco.gr>) :

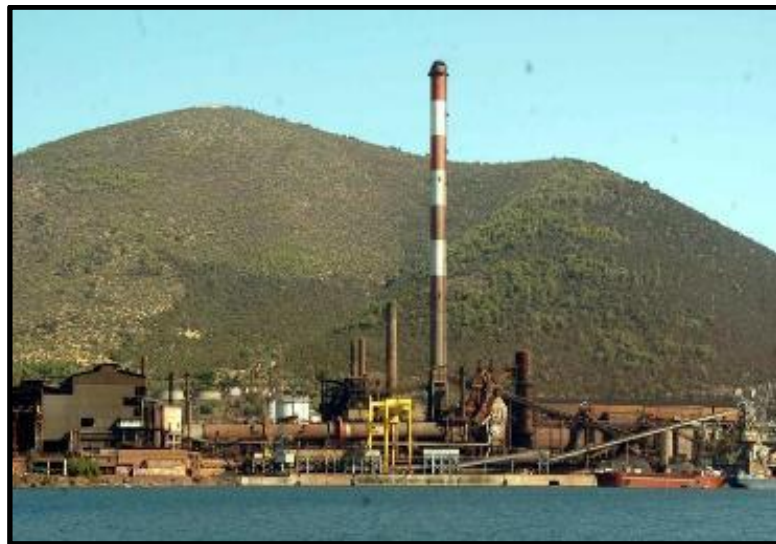
1. Διακίνηση πρώτων υλών και ανάμιξή τους για την προετοιμασία του μεταλλουργικού μείγματος.
2. Προθέρμανση και προαναγωγή του μεταλλουργικού μείγματος σε περιστροφικές καμίνους.
3. Αναγωγική τήξη του προϊόντος των περιστροφικών καμίνων σε ηλεκτρικές καμίνους εμβαπτισμένου τόξου στις οποίες παράγονται η μεταλλική φάση του σιδηρονικελίου και η φάση της σκωρίας.
4. Εμπλουτισμός – εξευγενισμός του παραχθέντος σιδηρονικελίου σε μεταλλάκτες OBM.

Στην 3^η φάση της παραγωγικής διαδικασίας δημιουργείται η φάση της σκωρίας η οποία διαχωρίζεται από την μεταλλική φάση του σιδηρονικελίου λόγω της αναγωγής των οξειδίων του σιδήρου και του νικελίου σε μεταλλικό σίδηρο και νικέλιο. Στην συνέχεια το σιδηρονικέλιο και η σκωρία εξέρχονται από τις ηλεκτρικές καμίνους και η σκωρία κοκκοποιείται με ισχυρό ρεύμα θαλασσινού νερού. Η κοκκοποιημένη σκωρία τελικώς απορρίπτεται στην θάλασσα ή πωλείται στις τσιμεντοβιομηχανίες και σε μονάδες αμμοβολής.

Η σκωρία των ηλεκτροκαμίνων της ΛΑΡΚΟ έχει κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τα οποία την καθιστούν κατάλληλη για χρήση σε ένα πλήθος διαφορετικών εφαρμογών. Πιο συγκεκριμένα είναι λεπτόκοκκη με μέγεθος κόκκου κατά 90% μικρότερο από 2mm, χαρακτηρίζεται ως άμορφο υλικό (σε ποσοστό περίπου 98%) και έχει ποζολανικές ιδιότητες λόγω του περιεχόμενου ενεργού SiO₂. Αποτελείται κυρίως από 40% SiO₂ και 35% FeO καθώς και από οξείδια του Al, Mg, Cr και Ca.

Η σκωρία σιδηρονικελίου της ΛΑΡΚΟ καλύπτει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά αντικαθιστώντας πολλές πρώτες ύλες. Πιο συγκεκριμένα οι εφαρμογές της είναι:

- Ως υλικό αμμοβολής λόγω της κοκκομετρίας και της σκληρότητας της
- Στην τσιμεντοβιομηχανία (τσιμέντο τύπου Portland, αλουμινούχο τσιμέντο κ.α.)
- Στην βιομηχανία κεραμικών, πυρίμαχων και οικοδομικών υλικών (τούβλα, κεραμίδια, πλακάκια, πυρότουβλα, αντλιοσθητικές πλάκες πεζοδρομίων κ.α.)
- Στην οδοποιΐα (αντλιοσθητικοί ασφαλτοτάπητες, υπόβαση οδοστρώματος κ.α.)
- Ως υλικό υποστρώματος και κάλυψης (επικάλυψη σωλήνων και καλωδίων, υποστρώματα δρόμων κ.α.)



Εικόνα 2.2: Μεταλλουργικό εργοστάσιο ΛΑΡΚΟ

2.1.3. Ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας

Ως ιπτάμενη τέφρα ορίζεται το λεπτόκοκκο υλικό το οποίο αποτελείται κυρίως από σφαιρικά υαλώδη σωματίδια και δημιουργείται κατά την καύση του άνθρακα στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς (ΑΗΣ) παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Εικόνα 2.3). Η ιπτάμενη τέφρα είναι το στερεό υπόλειμμα της καύσης του άνθρακα και απομακρύνεται από το σημείο καύσης με τα παραγόμενα απαέρια των λεβήτων καύσης. Τα απαέρια αυτά την οδηγούν στα ηλεκτροστατικά φίλτρα των μονάδων καύσης τα οποία την δεσμεύουν ώστε να μην διαχέεται στην ατμόσφαιρα.

Η ιπτάμενη τέφρα που προέρχεται από τον ΑΗΣ Πτολεμαΐδας αποτελείται κυρίως από τα εξής ορυκτά: πορτλανδίτη, ανορθίτη, ασβεσίτη και χαλαζία. Επειδή περιέχει οξείδιο του ασβεστίου (CaO) σε ποσοστό μεγαλύτερο του 10% χαρακτηρίζεται ως **ασβεστολιθική** (κατηγορία W) σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο **EN 197-1**, ενώ χαρακτηρίζεται ως **τέφρα τύπου C** σύμφωνα με το αμερικάνικο πρότυπο **ASTM C 618** καθώς περιέχει χαλαζία (SiO_2) σε ποσοστό μικρότερο από 70%. Εξαιτίας της υψηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο (Ca) η ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας έχει υδραυλικές (σκληραίνει όταν αντιδράσει με το νερό) και ποζολανικές ιδιότητες οι οποίες καθορίζουν τις εφαρμογές στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Οι κυριότερες χρήσεις της ιπτάμενης τέφρας είναι:

- Στην παραγωγή τσιμέντου τύπου CEM II με βάση το πρότυπο EN 197-1
- Σε διάφορους τύπους σκυροδέματος (πεζοδρόμησης, αγωγών κ.α.)
- Στα ασβεστοκονιάματα και στις τσιμεντενέσεις ως υποκατάστατο του τσιμέντου
- Στην παραγωγή δομικών υλικών (τούβλα, κεραμίδια, πλακάκια κ.α.)
- Στην οδοποιία για την κατασκευή στρώσεων του οδοστρώματος
- Στην βιομηχανία κεραμικών (φίλτρα, μεμβράνες κ.α.)
- Στην εξυγίανση βιομηχανικών αποβλήτων



Εικόνα 2.3: ΑΗΣ Πτολεμαΐδας

2.2. Προετοιμασία Πρώτων Υλών

2.2.1. Εκχύλιση Φινλανδικής σκωρίας

Η εκχύλιση της Φινλανδικής σκωρίας έγινε ώστε να απομακρυνθούν πιθανά τοξικά συστατικά της και κάποια ποσότητα διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2) η οποία δημιουργεί προβλήματα (δημιουργία γέλης) σε επόμενα στάδια επεξεργασίας με βάση προηγούμενη εμπειρία του εργαστηρίου σε θέματα διαχείρισης αυτής της σκωρίας.

Η εκχύλιση έγινε με μαγνητική ανάδευση εν θερμώ και χρησιμοποιώντας ως διαλύτη διάλυμα νιτρικού οξέος (HNO_3). Στον **Πίνακα 2.1** παρουσιάζονται οι πειραματικοί παράμετροι των πέντε διαφορετικών εκχυλίσεων της Φινλανδικής σκωρίας όπου η κύρια παράμετρος που άλλαζε ήταν η διάρκεια εκχύλισης με αποτέλεσμα να συλλεχθούν 5 διαφορετικά δείγματα εκχυλισμένης σκωρίας τα οποία αναμείχθηκαν και ομογενοποιήθηκαν.

Πίνακας 2.1: Παράμετροι εκχύλισης

Ώρες Εκχύλισης	Περιεκτικότητα Στερεών (%)	Μάζα σκωρίας (g)	Όγκος διαλύματος (mL)	Συγκέντρωση Διαλύματος	Θερμοκρασία Διαλύματος (°C)
24	30	90	300	3M	80
6	30	90	300	3M	80
4	30	90	300	3M	80
2	30	90	300	3M	80
2	30	90	300	1M	80

Αρχικά παρασκευάστηκαν σε κωνικές φιάλες τα διαλύματα με συγκεκριμένη συγκέντρωση σε νιτρικό οξύ και στην συνέχεια τοποθετήθηκαν πάνω σε θερμαντικές πλάκες (*Εικόνα 2.4*) ώστε να θερμανθούν μέχρι τους 80 °C. Όταν η θερμοκρασία του κάθε διαλύματος ήταν 80 °C προστέθηκε σε αυτό συγκεκριμένη ποσότητα Φινλανδικής σκωρίας και ένας μαγνήτης ώστε να γίνει μαγνητική ανάδευση του πολφού. Μετά το πέρας συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος εκχύλισης οι κωνικές φιάλες απομακρύνθηκαν από τις θερμαντικές πλάκες ώστε ο πολφός τους να φθάσει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στην συνέχεια έγινε διήθηση υπό κενό των πολφών (*Εικόνα 2.5*) ώστε να διαχωρισθούν τα στερεά από το υγρό και το στερεό υπόλειμμα της κάθε διήθησης (*Εικόνα 2.6*) ξηράνθηκε για 24 ώρες στους 60 °C και κατόπιν ζυγίστηκε ώστε να υπολογιστεί η απώλεια βάρους η οποία κυμαινόταν από 13% έως 78%.



Εικόνα 2.4: Θερμαντικές Πλάκες



Εικόνα 2.5: Διήθηση υπό κενό



Εικόνα 2.6: Στερεό υπόλειμμα διήθησης

2.2.2. Ξήρανση-λειοτριβηση

Πριν να χρησιμοποιηθούν οι πρώτες ύλες για την παρασκευή των κεραμικών προετοιμάστηκαν κατάλληλα ώστε να αποφευχθούν τυχόν προβλήματα κατά την ανάμειξή τους και κατά την μορφοποίηση των δοκιμίων. Αρχικά οι πρώτες ύλες τοποθετήθηκαν για 24 ώρες στο πυριαντήριο PF 60/200 Carbolite (Εικόνα 2.7) και σε θερμοκρασία 100 °C ώστε να απομακρυνθεί η υγρασία τους και να είναι τελείως ξηρές. Στην συνέχεια οι ξηρές σκόνες λειοτριβήθηκαν στον πλανητικό μύλο Bico Pulverizer (Εικόνα 2.8) για 5 λεπτά η κάθε μία ούτως ώστε να διασπαστούν τα προϋπάρχοντα συσσωματώματα και να προκύψει λεπτομερές υλικό για τις αναμείξεις.



Εικόνα 2.7: Πυριαντήριο PF 60/200 Carbolite



Εικόνα 2.8: Πλανητικός μύλος Bico Pulverizer

2.3. Παρασκευή Κεραμικών

2.3.1. Αναμειξεις πρώτων υλών

Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των δοκιμών ήταν οι εξής: 1) Φινλανδική σκωρία (**FS**), 2) εκχυλισμένη Φινλανδική σκωρία (**LFS**), 3) σκωρία **ΛΑΡΚΟ** (**FeNi**) και 4) ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας (**FAP**). Αρχικά ζυγίστηκαν οι μάζες των πρώτων υλών σύμφωνα με τις παρακάτω αναλογίες και στην συνέχεια αναμείχθηκαν μεταξύ τους με ταυτόχρονη προσθήκη μικρής ποσότητας απιονισμένου νερού το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως συνδέτης με σκοπό την βελτίωση της ομογενοποίησης και την πλασιμότητας όλων των μειγμάτων. Στα μείγματα που περιείχαν Φινλανδική σκωρία η ποσότητα του απιονισμένου νερού ήταν 1.5-2 mL ενώ στα μείγματα της εκχυλισμένης Φινλανδικής σκωρίας ήταν 4-6 mL επειδή δεν μπορούσαν με μικρή ποσότητα νερού να συμπυκνωθούν και να σχηματίσουν ακέραια δοκίμια.

1^ο μείγμα: 70g **FS** (100% **FS**)

2^ο μείγμα: 35g **FS** + 35g **FeNi** (50% **FS** + 50% **FeNi**)

3^ο μείγμα: 28g **FS** + 21g **FeNi** + 21g **FAP** (40% **FS** + 30% **FeNi** + 30% **FAP**)

4^ο μείγμα: 70g **LFS** (100% **LFS**)

5^ο μείγμα: 35g **LFS** + 35g **FeNi** (50% **LFS** + 50% **FeNi**)

6^ο μείγμα: 28g **LFS** + 21g **FeNi** + 21g **FAP** (40% **LFS** + 30% **FeNi** + 30% **FAP**)

Με τα τρία πρώτα μείγματα παρασκευάστηκαν 8 δοκίμια τα οποία θερμάνθηκαν στους **1000 °C** (σειρά **A1**) και άλλα 9 (3 δοκίμια/μείγμα) τα οποία θερμάνθηκαν στους **1100 °C** (σειρά **A2**), ενώ με το 1^ο μείγμα παρασκευάστηκαν ακόμη 3 δοκίμια τα οποία θερμάνθηκαν στους **1200 °C** (σειρά **A3**).

Με τα μείγματα που περιείχαν εκχυλισμένη Φινλανδική σκωρία παρασκευάστηκαν αρχικώς 12 δοκίμια (4 δοκίμια/μείγμα) τα οποία θερμάνθηκαν στους **1000 °C** (σειρά **B1**) και άλλα 12 (4 δοκίμια/μείγμα) τα οποία θερμάνθηκαν στους **1100 °C** (σειρά **B2**). Τέλος ετοιμάστηκαν 4 δοκίμια με το 4^ο μείγμα τα οποία θερμάνθηκαν στους **1200 °C** (σειρά **B3**).

2.3.2. Μορφοποίηση δοκιμίων

Για την μορφοποίηση των δοκιμίων εφαρμόστηκε η μέθοδος της μονοαξονικής συμπίεσης. Στην μέθοδο αυτή το μείγμα των πρώτων υλών τοποθετείται σε ανοξείδωτο μεταλλικό καλούπι μεγάλης σκληρότητας και επιθυμητού σχήματος και στην συνέχεια μέσω ενός εμβόλου εφαρμόζεται στο μείγμα πίεση προς μια διεύθυνση (συνήθως αυτή του κατακόρυφου άξονα του καλουπιού). Η πίεση αυτή αναγκάζει τους ασύνδετους κόκκους των υλικών να συνδεθούν μεταξύ τους παίρνοντας το εσωτερικό σχήμα του καλουπιού ενώ παράλληλα παραμορφώνονται πλαστικά.

Αρχικά τα ομογενοποιημένα και ελαφρώς νωπά μείγματα των πρώτων υλών τοποθετούνταν κάθε φορά στο καλούπι μορφοποίησης (*Εικόνα 2.9*) και στην συνέχεια εισαγόταν σ' αυτό το έμβολο συμπίεσης. Έπειτα το καλούπι και το έμβολο έμπαιναν στην υδραυλική πρέσα συμπίεσης (*Εικόνα 2.10*) όπου μέσω των ειδικών μοχλών γινόταν η συμπίεση των μειγμάτων. Η δύναμη συμπίεσης που εφαρμόστηκε για την μορφοποίηση των μειγμάτων που περιείχαν Φινλανδική σκωρία ήταν **100 bar** ενώ για τα μείγματα της εκχυλισμένης Φινλανδικής σκωρίας ήταν **150 bar** καθώς σε μικρότερες πιέσεις ήταν αδύνατη η μορφοποίηση ακεραίων κυλινδρικών δοκιμίων. Μετά την συμπίεση το καλούπι με το έμβολο αφαιρούνταν από την πρέσα ώστε να γίνει η εξώθηση του μορφοποιημένου δοκιμίου χρησιμοποιώντας τα εξαρτήματα εξώθησης (*Εικόνα 2.11*).



Εικόνα 2.9: Καλούπι μορφοποίησης



Εικόνα 2.10: Υδραυλική πρέσα συμπίεσης



Εικόνα 2.11: Εξαρτήματα εξώθησης

2.3.3. Παραγωγή κεραμικών

Μετά την μορφοποίηση μετρήθηκαν οι διαστάσεις (διάμετρος και ύψος) και η μάζα όλων των δοκιμίων και θερμάνθηκαν στον ηλεκτρικά θερμαινόμενο κλίβανο χαμηλών θερμοκρασιών της εταιρείας Nabertherm (Εικόνα 2.12) ώστε να γίνουν κεραμικά.

Οι θερμοκρασίες θέρμανσης των δοκιμίων ήταν **1000 °C**, **1100 °C** και **1200 °C**, ο ρυθμός θέρμανσης όλων των δοκιμίων ήταν **3 °C/min** και ο χρόνος θέρμανσής τους **2 ώρες**, ενώ ο ρυθμός πτώσης της θερμοκρασίας έγινε με φυσικό τρόπο μέχρι τα δοκίμια που βρίσκονταν εντός του κλιβάνου να φθάσουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τότε μετρήθηκαν ξανά οι διαστάσεις και η μάζα των δοκιμίων ώστε να υπολογιστούν οι αντίστοιχες ποσοστιαίες μεταβολές.



Εικόνα 2.12: Κλίβανος χαμηλών θερμοκρασιών



Εικόνα 2.13: Μορφοποιημένα (αριστερά) και θερμασμένα κεραμικά (δεξιά)

2.4. Προσδιορισμός Ιδιοτήτων

2.4.1. Πυκνότητα-πορώδες-υδατοαπορροφητικότητα

Οι φυσικές ιδιότητες των δοκιμίων και συγκεκριμένα η πυκνότητα, το φαινόμενο πορώδες και η υδατοαπορροφητικότητα προσδιορίστηκαν με βάση το πρότυπο **DIN EN 993-1**. Αρχικά σε ζυγό ακριβείας μετρήθηκε με ειδική διάταξη (Εικόνα 2.14) η μάζα του κάθε ξηρού δοκιμίου και στην συνέχεια όλα τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρα (Εικόνα 2.15) όπου εφαρμόστηκε κενό για **2 ώρες** έτσι ώστε να αφαιρεθεί όλος ο αέρας από τους πόρους. Στην συνέχεια προστέθηκε ως υγρό πλήρωσης των πόρων απιονισμένο νερό μέχρι τα $\frac{3}{4}$ του ύψους του ξηραντήρα ούτως ώστε να καλυφθούν όλα τα δοκίμια με νερό. Ο χρόνος παραμονής των δοκιμίων μέσα στο νερό ήταν **1 ημέρα** ώστε να εξασφαλιστεί η εισχώρηση του νερού στους πόρους των δοκιμίων. Έπειτα τα νωπά δοκίμια αφαιρέθηκαν από τον ξηραντήρα και ζυγίστηκαν κατευθείαν με τον ζυγό ακριβείας μέσα σε νερό και στην συνέχεια αφού σκουπίστηκαν εξωτερικά ζυγίστηκαν ξανά με την ειδική διάταξη του ζυγού ακριβείας.



Εικόνα 2.14: Ζυγός ακριβείας



Εικόνα 2.15: Ξηραντήρας

2.4.2. Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

Οι δοκιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη όλων των δοκιμίων έγιναν στο εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων με την άκαμπτη μηχανή φόρτισης MTS 1600 (Εικόνα 2.16). Αρχικά τα δοκίμια τοποθετούνταν στην κατώτερη πλάκα φόρτισης της μηχανής και στην συνέχεια τοποθετούνταν η πάνω πλάκα φόρτισης. Η φόρτιση έγινε με **έλεγχο μετατόπισης** από κάτω προς τα πάνω έτσι ώστε το δοκίμιο να έρθει σε επαφή με το πάνω μέρος της μηχανής. Μετά τις κατάλληλες ρυθμίσεις στον υπολογιστή που ήταν συνδεδεμένος με την μηχανή τέθηκε σε λειτουργία και ξεκίνησε η επιβολή του αξονικού φορτίου. Η αύξηση του φορτίου ήταν σταδιακή και συνεχόμενη μέχρι την στιγμή όπου εφαρμοζόταν το εκάστοτε μέγιστο φορτίο οπότε και αστοχούσε το δοκίμιο. Μετά την αστοχία γινόταν η αποφόρτιση της μηχανής και η απομάκρυνση του δοκιμίου.

Μετά από επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν από το καταγραφικό σύστημα της μηχανής προσδιορίστηκε η μέγιστη δύναμη φόρτισης του κάθε δοκιμίου η οποία διαιρέθηκε με την επιφάνεια φόρτισής του για να προκύψει τελικά η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη.



Εικόνα 2.16: Μηχανή MTS 1600

2.4.3. Μικροσκληρότητα Vickers

Η μικροσκληρότητα Vickers προσδιορίστηκε με το ψηφιακό μικροσκληρόμετρο FM-700 (Εικόνα 2.17) της εταιρείας FUTURE-TECH. Για να γίνουν οι μετρήσεις της μικροσκληρότητας κατασκευάστηκαν στιλπνές τομές από μερικά δοκίμια.

Αρχικά τα δείγματα των δοκιμίων παρέμειναν για 2 ώρες στο κενό ώστε να απομακρυνθεί όλος ο αέρας από τους πόρους τους και στην συνέχεια εγκιβωτίστηκαν με ειδική ρητίνη μέσα σε ένα πλαστικό σωλήνα μικρής διαμέτρου. Μετά την σκλήρυνση της ρητίνης έγινε λείανση και στίλβωση της επιφάνειας του εγκιβωτισμένου δοκιμίου και έτσι κατέστη δυνατή η οπτική παρατήρηση στο ψηφιακό μικροσκληρόμετρο.

Η κάθε στιλπνή τομή τοποθετούνταν ανάμεσα στους ειδικούς υποδοχείς του οργάνου και στην συνέχεια ασφαλιζόταν με αυτούς ώστε να μην μπορεί να μετακινηθεί κατά την διάρκεια επιβολής του φορτίου. Έπειτα με τις κατάλληλες ρυθμίσεις στην οθόνη αφής του οργάνου γινόταν η επιβολή του φορτίου (**500g** για όλες τις τομές) στην στιλπνή επιφάνεια της τομής χρησιμοποιώντας τον αδαμάντινο διεισδυτήρα πυραμιδοειδούς σχήματος. Ύστερα από οπτική μέτρηση του αποτυπώματος με τον ειδικό φακό του μηχανήματος συλλέχθηκαν οι απαραίτητες μετρήσεις και υπολογίστηκε η μικροσκληρότητα Vickers.



Εικόνα 2.17: Μικροσκληρόμετρο FM-700

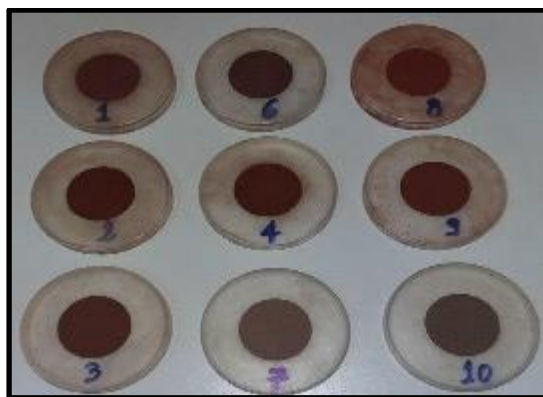
2.5. Ορυκτολογικές αναλύσεις

Οι ορυκτολογικές αναλύσεις στις 3 πρώτες ύλες και στα 14 είδη κεραμικών έγιναν στο εργαστήριο Γενικής & Τεχνικής Ορυκτολογίας με το περιθλασίμετρο ακτίνων-Χ τύπου Bruker D8 Advance (Εικόνα 2.18) με χρήση λυχνίας Cu και φάσμα σάρωσης από 4° έως 70° 2θ, με βήμα 0.02° και χρόνο μέτρησης 31.8 sec/βήμα. Η ποιοτική ορυκτολογική ανάλυση όλων των μετρήσεων έγινε χρησιμοποιώντας τα λογισμικά DIFFRAC plus EVA και Profex-BGMN.

Η διαδικασία της προετοιμασίας των δειγμάτων για μέτρηση στο περιθλασίμετρο ξεκινά με την λειοτρίβηση μικρής ποσότητας του προς ανάλυση υλικού στον πλανητικό μύλο Bico Pulverizer. Έπειτα η λειοτριβημένη σκόνη τοποθετείται ομοιόμορφα στους ειδικούς πλαστικούς δειγματοφορείς του οργάνου (Εικόνα 2.19) και διαστρώνεται πολύ καλά ώστε να προκύψει μία λεία επιφάνεια μέτρησης χωρίς ανωμαλίες.



Εικόνα 2.18: Περιθλασίμετρο ακτίνων-Χ



Εικόνα 2.19: Δειγματοφορείς περιθλασίμετρου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Συζήτηση Αποτελεσμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται, αναλύονται και συζητώνται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών. Αρχικά γίνεται ο χαρακτηρισμός των πρώτων υλών με βάση την χημική και ορυκτολογική τους σύσταση και την κοκκομετρία τους. Έπειτα χαρακτηρίζονται τα 14 είδη κεραμικών με βάση την ορυκτολογική τους σύσταση και παρουσιάζονται οι ιδιότητές τους με την μορφή πινάκων και διαγραμμάτων τα οποία αξιολογούνται με βάση και την ορυκτολογική σύσταση. Τέλος γίνεται σύγκριση των τιμών της αντοχής και της υδατοαπορροφητικότητας με τα διεθνή πρότυπα ποιότητας και προσδιορίζεται η καταλληλότητα των κεραμικών για κάποιες εφαρμογές.

3.1. Χαρακτηρισμός Πρώτων Υλών

3.1.1. Χημική σύσταση

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζεται η χημική σύσταση των πρώτων υλών με την μορφή οξειδίων (% w/w) όπου παρατηρούμε πως οι δύο σκωρίες είναι σε μεγάλο βαθμό σιδηρούχες καθώς περιέχουν οξείδιο του σιδήρου (Fe_2O_3) σε μεγάλο ποσοστό ενώ η ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας περιέχει κυρίως οξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και οξείδιο του ασβεστίου (CaO).

Πίνακας 3.1: Χημική σύσταση (% w/w) πρώτων υλών

Οξείδιο	Φινλανδική σκωρία	Σκωρία σιδηρονικελίου	Ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας
Fe_2O_3	57.6	43.83	5.6
SiO_2	30.1	32.74	33.4
ZnO	2.8	-	-
Al_2O_3	2.8	8.32	13.1
CaO	1.0	3.73	31.85
MgO	1.3	2.76	3.67
K_2O	0.87	-	0.76
Na_2O	0.49	-	0.46
SO_3	0.44	0.45	6.58
NiO	0.16		
TiO_2	0.19	-	0.71
MnO	-	0.41	0.18
Cr_2O_3	-	3.07	0.06
C	0.04	0.11	-
Ni	0.13	0.1	0.046
Co	0.1	0.02	0.0068
Σύνολο	98.02	95.54	96.42

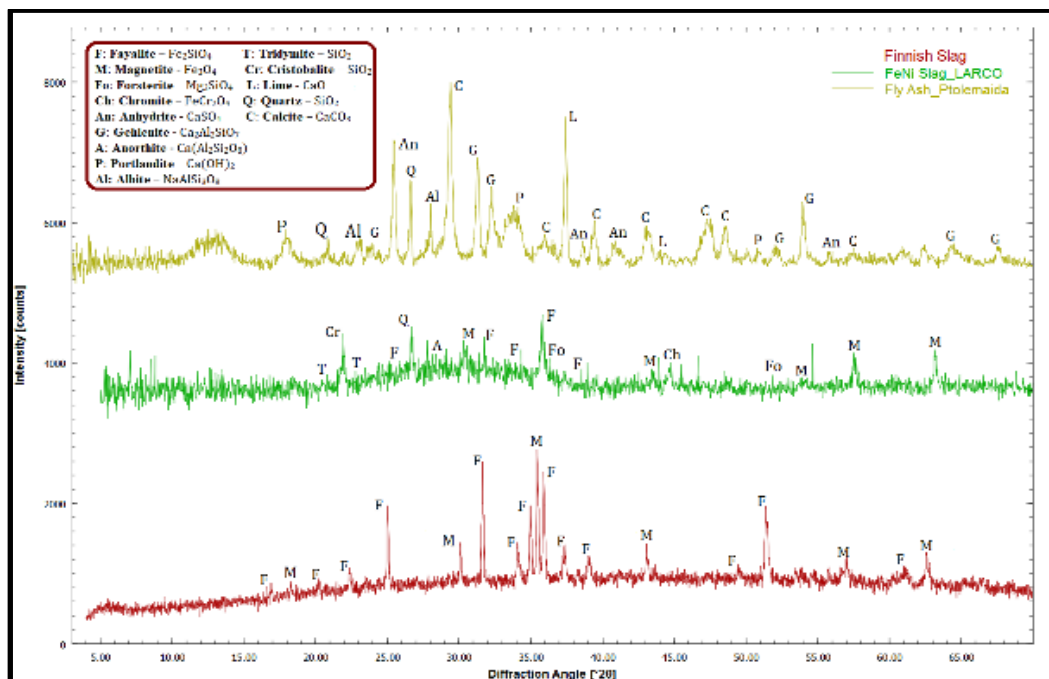
3.1.2. Ορυκτολογική σύσταση

Στο Διάγραμμα 3.1 παρουσιάζεται η ορυκτολογική σύσταση των πρώτων υλών και συγκεκριμένα της Φινλανδικής σκωρίας (*Finnish Slag*), της σκωρίας παραγωγής σιδηρονικελίου (*FeNi Slag_LARCO*) καθώς και της ιπτάμενης τέφρας Πτολεμαΐδας (*Fly Ash_Ptolemaida*).

Σύμφωνα λοιπόν με την ορυκτολογική ανάλυση οι βασικές ορυκτολογικές φάσεις της **Φινλανδικής σκωρίας** είναι ο φαυαλίτης (*Fayalite*) και ο μαγνητίτης (*Magnetite*) τα οποία είναι σιδηρούχα ορυκτά με τον φαυαλίτη να εμφανίζεται περισσότερες φορές από ότι ο μαγνητίτης.

Όσο αφορά την **σκωρία σιδηρονικελίου** οι βασικές ορυκτολογικές φάσεις είναι ο φαυαλίτης και ο μαγνητίτης, ενώ επίσης εμφανίζονται ο φορστερίτης (*Forsterite*), ο τριδυμίτης (*Tridymite*), ο χρωμίτης (*Chromite*), ο χριστοβαλίτης (*Cristobalite*), ο ανορθίτης (*Anorthite*) και ο χαλαζίας (*Quartz*).

Η **ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας** αποτελείται κυρίως από γκελενίτη (*Gehlenite*), ασβεστίτη (*Calcite*) και ανυδρίτη (*Anhydrite*) ενώ οι φάσεις οι οποίες εμφανίζονται λιγότερο είναι ο αλβίτης (*Albite*), ο πορτλαντίτης (*Portlandite*) και το οξείδιο του ασβεστίου (*Lime*).

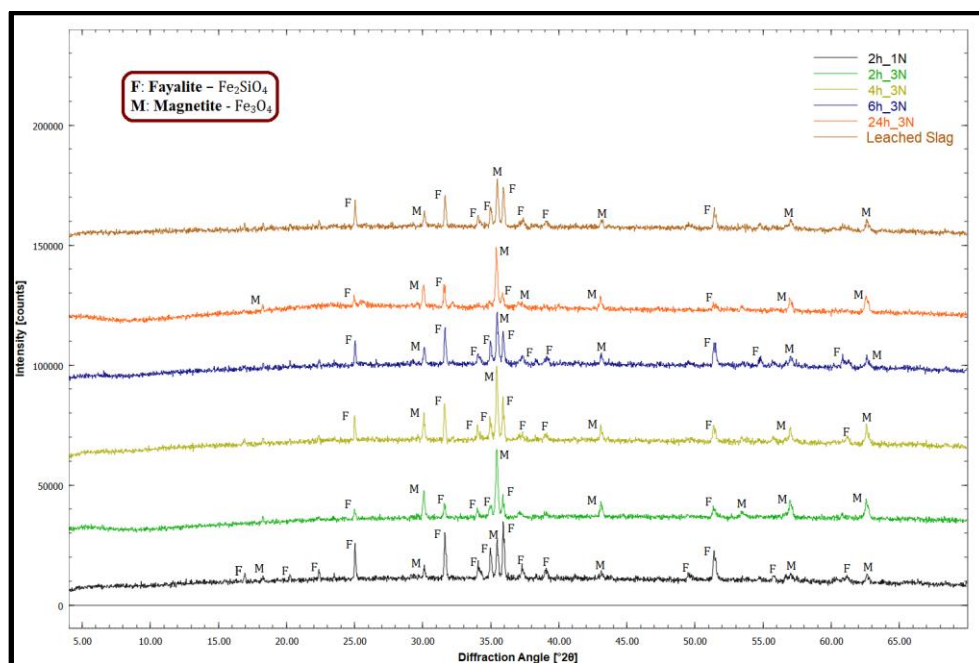


Διάγραμμα 3.1: Ορυκτολογική σύσταση πρώτων υλών

Στο Διάγραμμα 3.2 παρουσιάζεται η ορυκτολογική σύσταση των πέντε δειγμάτων που προέκυψαν από την εκχύλιση της Φινλανδικής σκωρίας καθώς και του τελικού υλικού (*Leached Slag*) που προέκυψε ύστερα από ανάμειξη των επιμέρους υπολειμμάτων των εκχυλίσεων. Παρατηρούμε πως οι μόνες φάσεις που εμφανίζονται σε όλα τα δείγματα της εκχυλισμένης σκωρίας αλλά και στο τελικό υλικό είναι ο φαιαλίτης και ο μαγνητίτης.

Συγκρίνοντας την ορυκτολογική σύσταση του τελικού υλικού (το οποίο και χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των κεραμικών της ομάδας Β) με την σύσταση της μη εκχυλισμένης Φινλανδικής σκωρίας διαπιστώνουμε πως συνέβησαν κάποιες αλλαγές. Συγκεκριμένα, το ποσοστό του φαιαλίτη μειώθηκε στην εκχυλισμένη σκωρία καθώς και η ένταση των κορυφών του αλλά και οι φορές εμφάνισής του φαίνεται να έχουν μειωθεί. Επομένως, αφού μειώθηκε η φάση του φαιαλίτη στην εκχυλισμένη σκωρία θα μειώθηκε και το ποσοστό του περιεχόμενου SiO_2 . Όσο αφορά την φάση του μαγνητίτη δεν παρατηρείται κάποια σημαντική αλλαγή εκτός από μία μικρή μείωση στην ένταση των κορυφών του.

Η μείωση του ποσοστού του SiO_2 που συνέβη μετά από την εκχύλιση της Φινλανδικής σκωρίας αναμένεται να επηρεάσει τις τελικές ιδιότητες των κεραμικών. Και αυτό επειδή η ορυκτολογική σύσταση των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή των κεραμικών επηρεάζει άμεσα τις φυσικομηχανικές τους ιδιότητες.



Διάγραμμα 3.2: Ορυκτολογική σύσταση δειγμάτων εκχυλισμένης σκωρίας

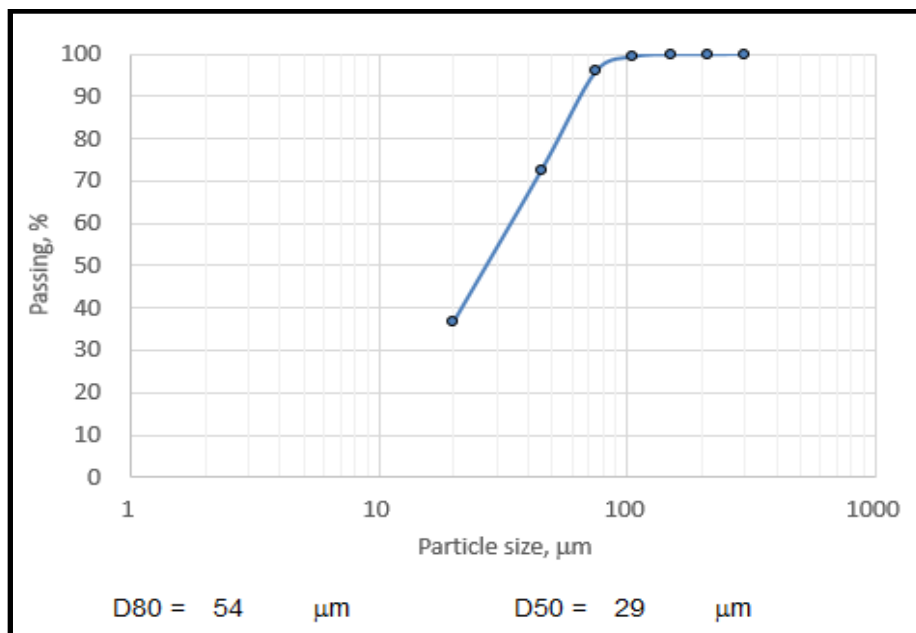
3.1.3. Κοκκομετρία

Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζεται η κοκκομετρία των πρώτων υλών πριν και μετά την λειοτρίβηση στον πλανητικό μύλο Bico Pulverizer. Μετά την λειοτρίβηση προέκυψαν λεπτομερείς πρώτες ύλες απαλλαγμένες από συσσωματώματα και μεγάλους κόκκους οι οποίοι θα είχαν αρνητική επίδραση στην διαδικασία της ανάμειξης και της μορφοποίησης καθώς και στις τελικές ιδιότητες των κεραμικών όπως την αντοχή και το πορώδες.

Πίνακας 3.2: Κοκκομετρία πρώτων υλών (μm)

	Αρχική κοκκομετρία	Τελική κοκκομετρία
Φινλανδική σκωρία	-100	-54
Σκωρία σιδηρονικελίου	-4000	-12
Ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας	-400	-32

Στο Διάγραμμα 3.3 απεικονίζεται το % αθροιστικό βάρος των διερχόμενων της αρχικής **Φινλανδικής σκωρίας** που διέρχονται από συγκεκριμένο άνοιγμα κόσκινου. Από την καμπύλη αυτή προκύπτει πως το μέσο κοκκομετρικό μέγεθος (d_{50}) της Φινλανδικής σκωρίας πριν την λειοτρίβηση ήταν 29 μm.



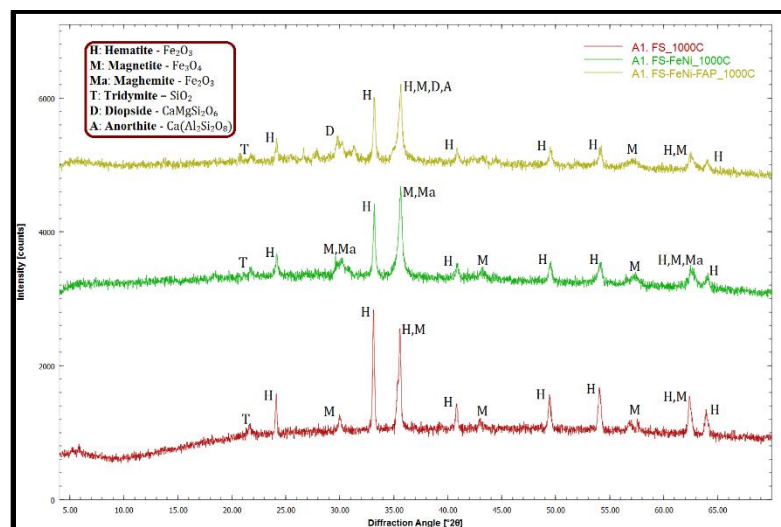
Διάγραμμα 3.3: Αθροιστικό % βάρος της αρχικής Φινλανδικής σκωρίας

3.2. Χαρακτηρισμός Κεραμικών

3.2.1. Ορυκτολογική σύσταση

Στο Διάγραμμα 3.4 παρουσιάζεται η ορυκτολογική σύσταση των κεραμικών της σειράς A1 (1000 °C). Παρατηρούμε πως στο 1^ο κεραμικό (FS) που παράχθηκε μόνο από Φινλανδική σκωρία έχουν σχηματιστεί αιματίτης, μαγνητίτης και τριδυμίτης, ενώ στο 2^ο κεραμικό (FS-FeNi) που προέκυψε από ανάμειξη των δύο σκωριών έχει σχηματιστεί και ο μαγκεμίτης (*Maghemite*) ο οποίος είναι μία άλλη μορφή του αιματίτη. Ο σχηματισμός αυτού του ορυκτού οφείλεται στην προσθήκη σκωρίας σιδηρονικελίου η οποία περιέχει σε μεγάλο ποσοστό σιδηρούχες φάσεις. Στο 3^ο κεραμικό (FS-FeNi-FAP) που προέκυψε και από τις τρεις πρώτες ύλες περιέχονται και διοψίδιος (*Diopside*) και ανορθίτης (*Anorthite*) που είναι ορυκτά του ασβεστίου. Το γεγονός αυτό είναι λογικό καθώς η ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας αποτελείται σχεδόν εξ ολοκλήρου από ορυκτά του ασβεστίου όπως ασβεστίτη, γκελενίτη, ανυδρίτη κλπ.

Επίσης, ο αιματίτης, ο μαγνητίτης και ο τριδυμίτης περιέχονται και στα τρία κεραμικά των 1000 °C αλλά με διαφορετικά ποσοστά. Ο μαγνητίτης υπήρχε σε δύο από τις πρώτες ύλες άρα η εμφάνισή του και στα τρία κεραμικά είναι λογική για την συγκεκριμένη θερμοκρασία καθώς η θερμοκρασία τήξης του είναι περίπου 1600 °C. Όσο αφορά τον αιματίτη και τον τριδυμίτη που εμφανίζονται σε όλα τα κεραμικά η θερμοκρασία σχηματισμού τους είναι πάνω από τους 950 °C και τους 870 °C αντίστοιχα άρα στην συγκεκριμένη θερμοκρασία ευνοείται ο σχηματισμός τους.

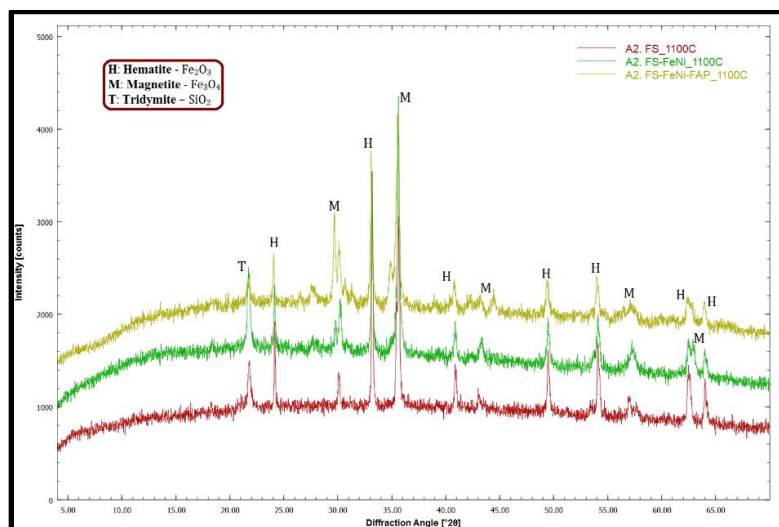


Διάγραμμα 3.4: Ορυκτολογική σύσταση κεραμικών σειράς A1

Στο Διάγραμμα 3.5 παρουσιάζεται η ορυκτολογική σύσταση των κεραμικών της σειράς **A2** τα οποία παράχθηκαν στους 1100 °C. Παρατηρούμε πως και τα τρία κεραμικά αποτελούνται από τις ίδιες ορυκτολογικές φάσεις και συγκεκριμένα τον αιματίτη, τον μαγνητίτη και τον τριδυμίτη. Ο μαγνητίτης εμφανίζεται και στα τρία κεραμικά με την μεγαλύτερη ένταση κορυφών, ακολουθεί ο αιματίτης με λίγο μικρότερη και τέλος ο τριδυμίτης ο οποίος έχει την μικρότερη ένταση κορυφών σε όλα τα κεραμικά.

Η τόσο μεγάλη ένταση των κορυφών του μαγνητίτη και η παρουσία του και στα τρία κεραμικά οφείλεται στο ότι υπάρχει σε δύο από τις πρώτες ύλες και με θέρμανση στους 1100 °C δεν εξαφανίζεται καθώς η θερμοκρασία τήξης του είναι 1600 °C. Για τον αιματίτη και τον τριδυμίτη ισχύουν τα ίδια αφού η θερμοκρασία των 1100 °C είναι μεγαλύτερη της θερμοκρασίας σχηματισμού τους και έτσι ευνοείται ο σχηματισμός τους. Όσο αφορά τον τριδυμίτη και σε αυτή την θερμοκρασία έχει πολύ μικρό ποσοστό συμμετοχής και στα τρία κεραμικά.

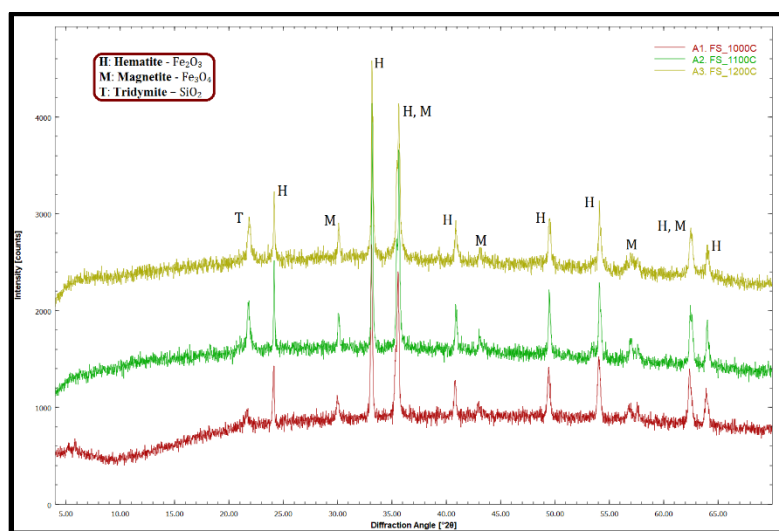
Συγκρίνοντας το Διάγραμμα 3.5 με το Διάγραμμα 3.4 διαπιστώνουμε πως τα ορυκτά του ασβεστίου που εμφανίζονταν στο 3^ο κεραμικό (*FS-FeNi-FAP*) στους 1000 °C (διοψίδιος και ανορθίτης) έχουν εξαφανιστεί τελείως στο αντίστοιχο κεραμικό των 1100 °C. Συνεπώς αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας θέρμανσης κατά 100 °C συντέλεσε στην εξάλειψη αυτών των ασβεστιτικών ορυκτών. Επίσης, δεν εμφανίζεται καθόλου ο μαγκεμίτης που εμφανιζόταν προηγουμένως, επομένως η αύξηση της θερμοκρασίας συντέλεσε στον μετασχηματισμό του. Πιθανώς να μετασχηματίστηκε σε μαγνητίτη ο οποίος φαίνεται να έχει μεγαλύτερη ένταση κορυφών στα κεραμικά των 1100 °C.



Διάγραμμα 3.5: Ορυκτολογική σύσταση κεραμικών σειράς A2

Στο Διάγραμμα 3.6 απεικονίζεται η ορυκτολογική σύσταση των κεραμικών που παράχθηκαν μόνο από Φινλανδική σκωρία σε τρεις θερμοκρασίες (1000 °C, 1100 °C, 1200 °C). Βλέπουμε πως εμφανίζονται τρεις ορυκτολογικές φάσεις (αιματίτης, μαγνητίτης και τριδυμίτης) και στα τρία κεραμικά επομένως η αύξηση της θερμοκρασίας θέρμανσης κατά 100 °C κάθε φορά δεν επέφερε κάποια αλλαγή στην ορυκτολογική σύσταση των παραχθέντων κεραμικών. Ο αιματίτης εμφανίζεται με την μεγαλύτερη ένταση κορυφών και στις τρεις θερμοκρασίες και αποτελεί την κυρίαρχη ορυκτολογική φάση, ακολουθεί ο τριδυμίτης και τέλος ο μαγνητίτης. Θα πρέπει να σημειωθεί πως η ένταση όλων των κορυφών είναι ίδια και στα τρία κεραμικά που σημαίνει πως έχουν και τα ίδια ποσοστά ορυκτών.

Η Φινλανδική σκωρία που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των κεραμικών αποτελούταν από φαιαλίτη και μαγνητίτη ο οποίος εξακολουθεί να εμφανίζεται και στα τρία κεραμικά σε μικρές ποσότητες. Διαπιστώνουμε δηλαδή πως ο μαγνητίτης υπάρχει ακόμη και στο κεραμικό που παράχθηκε στους 1200 °C. Λαμβάνοντας υπόψη πως ο μαγνητίτης έχει σημείο τήξης κοντά στους 1600 °C γίνεται εύκολα αντιληπτό πως είναι αναμενόμενη η παρουσία του σε όλα τα κεραμικά που έχουν θερμανθεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Όσο αφορά τον τριδυμίτη και τον μαγνητίτη ο σχηματισμός τους ευνοείται σε θερμοκρασίες θέρμανσης υψηλότερες από την θερμοκρασία σχηματισμού τους, επομένως η συμμετοχή τους σε αυτά τα κεραμικά είναι αναμενόμενη. Συμπεραίνουμε λοιπόν για τα κεραμικά αυτής της ομάδας πως η αύξηση της θερμοκρασίας δεν άλλαξε την ορυκτολογική τους σύσταση ποιοτικά αλλά και ποσοτικά.

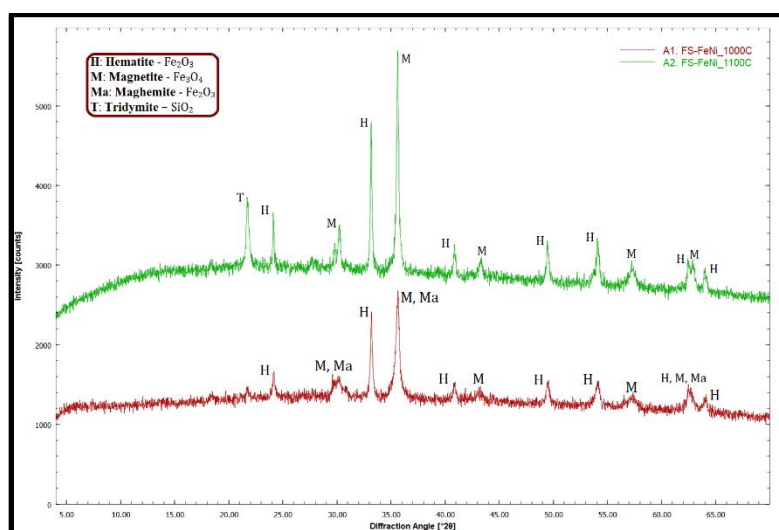


Διάγραμμα 3.6: Ορυκτολογική σύσταση κεραμικών A.FS

Από το Διάγραμμα 3.7 το οποίο απεικονίζει την ορυκτολογική σύσταση των κεραμικών που παρασκευάστηκαν από Φινλανδική σκωρία και σκωρία παραγωγής σιδηρονικελίου (1000 °C, 1100 °C) προκύπτει πως οι κύριες ορυκτολογικές φάσεις είναι ο αιματίτης, ο μαγνητίτης, ο μαγκεμίτης και ο τριδυμίτης. Γενικά ο αιματίτης εμφανίζεται σε μεγαλύτερο αριθμό κορυφών σε σχέση με τον μαγνητίτη και στα δύο κεραμικά και αυτό οφείλεται στο ότι οι πρώτες ύλες είναι σε μεγάλο βαθμό σιδηρούχες.

Στο κεραμικό των 1000 °C υπάρχει κυρίως αιματίτης και μαγνητίτης και ακολουθεί με μικρότερο ποσοστό ο μαγκεμίτης. Την μεγαλύτερη ένταση κορυφών παρουσιάζει ο αιματίτης. Αντίθετα στο κεραμικό των 1100 °C ο μαγκεμίτης εξαφανίζεται και εμφανίζεται ο τριδυμίτης. Παρατηρείται δηλαδή εξάλειψη της φάσης του μαγκεμίτη και εμφάνιση αυτής του τριδυμίτη όταν αυξάνεται η θερμοκρασία θέρμανσης. Ο τριδυμίτης υπήρχε στην σκωρία σιδηρονικελίου και εμφανίστηκε στην υψηλότερη θερμοκρασία. Ο μαγνητίτης έχει κατά κύριο λόγο την μεγαλύτερη ένταση κορυφών και ακολουθεί ο αιματίτης και ο τριδυμίτης. Η παρουσία των ορυκτών αυτών λαμβάνοντας υπόψη την χημική και ορυκτολογική σύσταση των δύο πρώτων υλών είναι σωστή καθώς οι πρώτες ύλες περιέχουν σε μεγάλη ποσότητα οξείδια του σιδήρου αλλά και τριδυμίτη (η σκωρία σιδηρονικελίου).

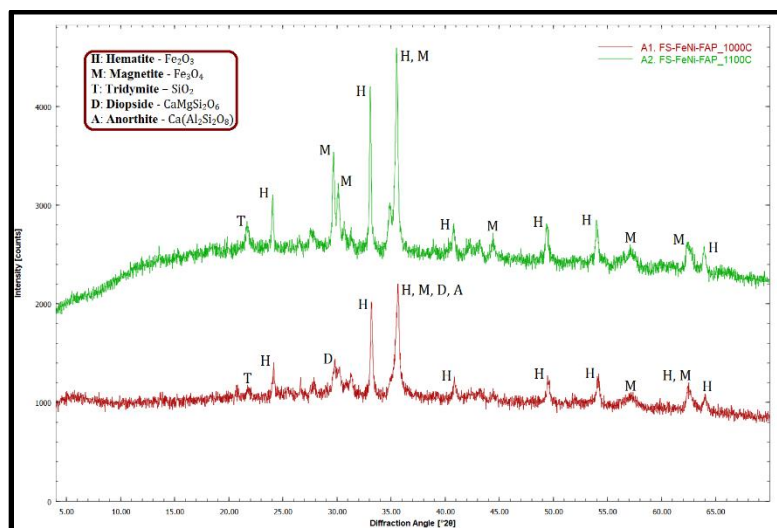
Συγκρίνοντας μεταξύ τους τις δύο αναλύσεις βλέπουμε πως με αύξηση της θερμοκρασίας κατά 100 °C ο μαγνητίτης και ο αιματίτης εμφανίζονται με μεγαλύτερο ποσοστό σε σχέση με την θερμοκρασία των 1000 °C. Η διαφοροποίηση αυτή είναι σημαντική καθώς επιδρά άμεσα στις φυσικομηχανικές ιδιότητες των κεραμικών.



Διάγραμμα 3.7: Ορυκτολογική σύσταση κεραμικών A.FS-FeNi

Στο Διάγραμμα 3.8 απεικονίζεται η ορυκτολογική σύσταση των κεραμικών που παρασκευάστηκαν και με τις τρεις πρώτες ύλες (1000 °C, 1100 °C). Στο κεραμικό των 1000 °C υπάρχουν αιματίτης, μαγνητίτης, διοψίδιος, ανορθίτης και τριδυμίτης. Η εμφάνιση των δύο πρώτων ορυκτών οφείλεται στην ορυκτολογική σύσταση των δύο πρώτων υλών (Φινλανδική σκωρία και σκωρία σιδηρονικελίου), ενώ η εμφάνιση του διοψιδίου και του ανορθίτη, που είναι ορυκτά του ασβεστίου, οφείλεται στην ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας η οποία περιέχει πολλά ορυκτά του ασβεστίου (ασβεστίτης, γκελενίτης, ανυδρίτης κλπ.). Ο αιματίτης εμφανίζεται με την μεγαλύτερη ένταση κορυφών και ακολουθούν ο μαγνητίτης, ο διοψίδιος, ο ανορθίτης και ο τριδυμίτης.

Στο κεραμικό των 1100 °C υπάρχουν αιματίτης, μαγνητίτης και τριδυμίτης. Ο αιματίτης έχει ξανά την μεγαλύτερη ένταση κορυφών και ακολουθούν ο μαγνητίτης και ο τριδυμίτης. Τα ορυκτά του ασβεστίου δηλαδή ο διοψίδιος και ο ανορθίτης έχουν εξαφανιστεί επομένως η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί στην εξάλειψη αυτών των φάσεων του ασβεστίου. Επίσης ο μαγνητίτης εμφανίζεται σε μεγαλύτερο ποσοστό από ότι στην θερμοκρασία των 1000 °C. Φαίνεται δηλαδή πως το δεύτερο κεραμικό έχει υποστεί αρκετές μεταβολές στην ορυκτολογική του σύσταση (εξαφάνιση ασβεστοπικτών ορυκτών, αύξηση σιδηρούχων ορυκτών) επομένως και οι ιδιότητές του θα είναι διαφοροποιημένες σε σχέση με αυτές του πρώτου.

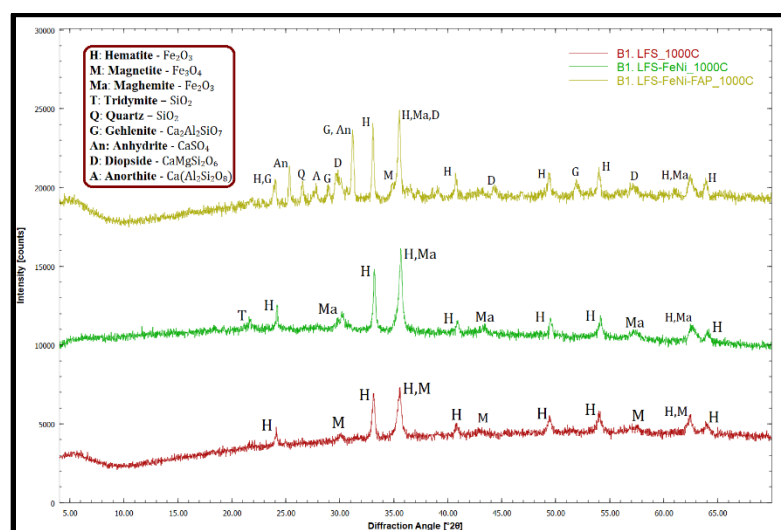


Διάγραμμα 3.8: Ορυκτολογική σύσταση κεραμικών A.FS-FeNi-FAP

Στο Διάγραμμα 3.9 παρουσιάζεται η ορυκτολογική σύσταση των κεραμικών της σειράς **B1** (1000 °C) στα οποία χρησιμοποιήθηκε εκχυλισμένη Φινλανδική σκωρία. Στο 1^ο κεραμικό (*LFS*) υπάρχει αιματίτης και μαγνητίτης. Ο αιματίτης έχει την μεγαλύτερη ένταση κορυφών και ακολουθεί ο μαγνητίτης. Η παρουσία τους οφείλεται στο ότι η εκχυλισμένη σκωρία περιείχε σε μεγάλο ποσοστό μόνο σιδηρούχα ορυκτά (φαιαλίτη και μαγνητίτη) επομένως και στο παραχθέν κεραμικό θα εμφανίζονται σιδηρούχα ορυκτά αφού η θερμοκρασία των 1000 °C είναι μικρότερη από το σημείο τήξης του μαγνητίτη (1600 °C).

Στο 2^ο κεραμικό (*LFS-FeNi*) υπάρχει αιματίτης, μαγκεμίτης ο οποίος αντικατέστησε τον μαγνητίτη του προηγούμενου κεραμικού ενώ εμφανίζεται και τριδυμίτης. Η μεγαλύτερη ένταση κορυφών παρουσιάζεται στον αιματίτη και ακολουθούν ο μαγκεμίτης και τέλος ο τριδυμίτης. Και εδώ η ορυκτολογική σύσταση του κεραμικού «συμφωνεί» με την ορυκτολογική σύσταση των πρώτων υλών.

Στο 3^ο κεραμικό (*LFS-FeNi-FAP*) εμφανίζονται αιματίτης, μαγκεμίτης, μαγνητίτης, γκελενίτης, διοψίδιος, ανυδρίτης, χαλαζίας και ανορθίτης. Τα τρία πρώτα ορυκτά εμφανίζονται λόγω της σύστασης των δύο πρώτων υλών (όπως και στα προηγούμενα κεραμικά), ενώ τα υπόλοιπα ορυκτά είναι τα ασβεστιτικά και πυριτικά ορυκτά της ιπτάμενης τέφρας. Δηλαδή οι φάσεις αυτές δεν κατάφεραν να μετασχηματιστούν ή να εξαφανιστούν στην συγκεκριμένη θερμοκρασία με αποτέλεσμα να εμφανίζονται στο τελικό κεραμικό. Μάλιστα ο γκελενίτης και ο διοψίδιος εμφανίζονται σε αρκετές κορυφές και με αρκετή ένταση, ενώ οι υπόλοιπες φάσεις έχουν μικρότερο ποσοστό συμμετοχής.

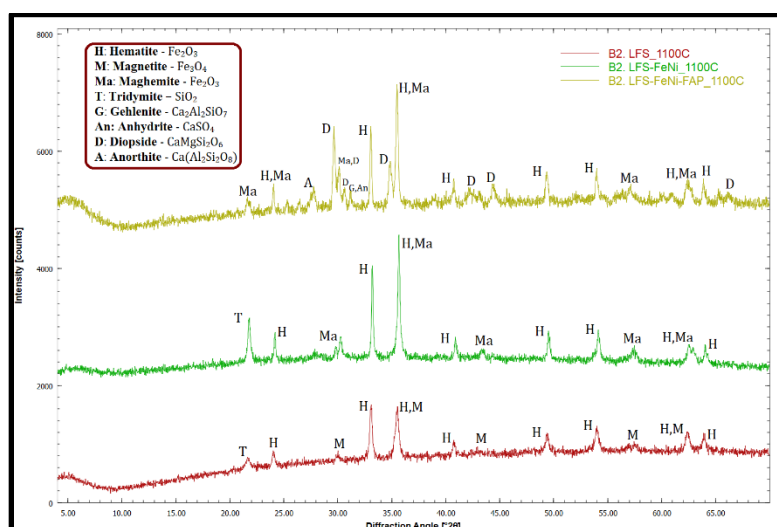


Διάγραμμα 3.9: Ορυκτολογική σύσταση κεραμικών σειράς *B1*

Στο Διάγραμμα 3.10 παρουσιάζονται οι ορυκτολογικές συστάσεις της σειράς **B2** (1100 °C). Για το 1^ο κεραμικό (*LFS*) προκύπτει πως οι κύριες ορυκτολογικές φάσεις του είναι ο αιματίτης, ο μαγνητίτης και ο τριδυμίτης. Ο αιματίτης έχει την μεγαλύτερη ένταση κορυφών άρα και το μεγαλύτερο ποσοστό συμμετοχής στην σύσταση του κεραμικού, ακολουθεί ο μαγνητίτης και τέλος ο τριδυμίτης με αρκετά μικρότερη ένταση. Η παρουσία των συγκεκριμένων ορυκτών είναι και πάλι αναμενόμενη καθώς η εκχυλισμένη Φινλανδική σκωρία περιείχε φασαλίτη και μαγνητίτη. Ο μαγνητίτης υπάρχει ακόμη ενώ ο φασαλίτης έχει εξαφανιστεί και ίσως μετασχηματίστηκε σε αιματίτη. Ο τριδυμίτης πιθανώς να σχηματίστηκε από το πυρίτιο του φασαλίτη.

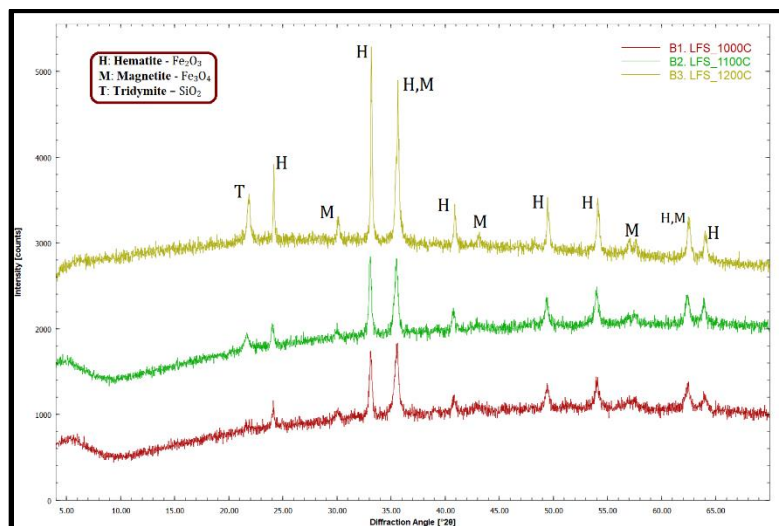
Το 2^ο κεραμικό (*LFS-FeNi*) αποτελείται από αιματίτη, μαγκεμίτη, ο οποίος αντικατέστησε τον μαγνητίτη, και τριδυμίτη. Στα ποσοστά συμμετοχής και τις εντάσεις των κορυφών πάλι ο αιματίτης υπερτερεί, ακολουθεί ο μαγκεμίτης ο οποίος σχηματίστηκε λόγω της σκωρίας σιδηρονικελίου και τέλος ο τριδυμίτης ο οποίος έχει λίγο μεγαλύτερο ποσοστό από ότι πριν. Η αύξηση αυτή οφείλεται στην προσθήκη σκωρίας σιδηρονικελίου η οποία έχει αρκετό πυρίτιο (32.74% κ.β.).

Στο 3^ο κεραμικό (*LFS-FeNi-FAP*) εμφανίζονται αιματίτης, μαγνητίτης, διοψίδιος, ανορθίτης, γκελενίτης και ανυδρίτης. Τα δύο πρώτα ορυκτά προέρχονται από τις σιδηρούχες πρώτες ύλες ενώ τα υπόλοιπα είναι ορυκτά της ιπτάμενης τέφρας Πτολεμαΐδας. Τα ορυκτά αυτά φαίνεται να μην μετασχηματίστηκαν μετά την θέρμανση επομένως η αύξηση της θερμοκρασίας θέρμανσης πιθανώς να οδηγούσε σε εξάλειψη αυτών των ασβεστιτικών φάσεων.



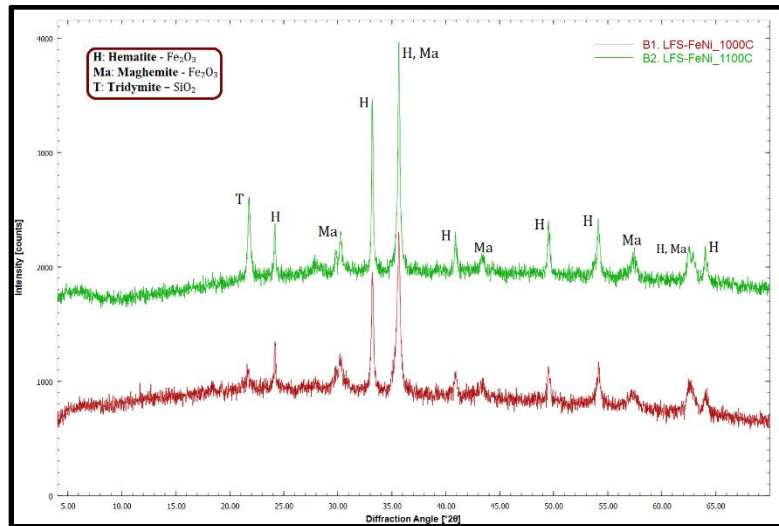
Διάγραμμα 3.10: Ορυκτολογική σύσταση κεραμικών σειράς B2

Στο Διάγραμμα 3.11 απεικονίζεται η ορυκτολογική σύσταση των κεραμικών που παρασκευάστηκαν μόνο από εκχυλισμένη Φινλανδική σκωρία σε τρεις θερμοκρασίες (1000 °C, 1100 °C, 1200 °C). Όπως και στο Διάγραμμα 3.6, έτσι και εδώ, δεν παρατηρείται διαφορά στην ορυκτολογική σύσταση των τριών κεραμικών με αύξηση της θερμοκρασίας. Τα ορυκτά που εμφανίζονται είναι τα ίδια με πριν δηλαδή αιματίτης, μαγνητίτης και τριδυμίτης. Μεγαλύτερη ένταση κορυφών έχει ο αιματίτης, ακολουθεί ο μαγνητίτης και τέλος ο τριδυμίτης. Η παρουσία τους οφείλεται στην σύσταση της εκχυλισμένης Φινλανδικής σκωρίας (φασαλίτης και μαγνητίτης). Η φάση του φασαλίτη έχει εξαλειφθεί και ίσως μετασχηματίστηκε κατά ένα μέρος σε αιματίτη και κατά ένα άλλο μέρος σε τριδυμίτη, ενώ ο μαγνητίτης δεν μετασχηματίστηκε.



Διάγραμμα 3.11: Ορυκτολογική σύσταση κεραμικών B.LFS

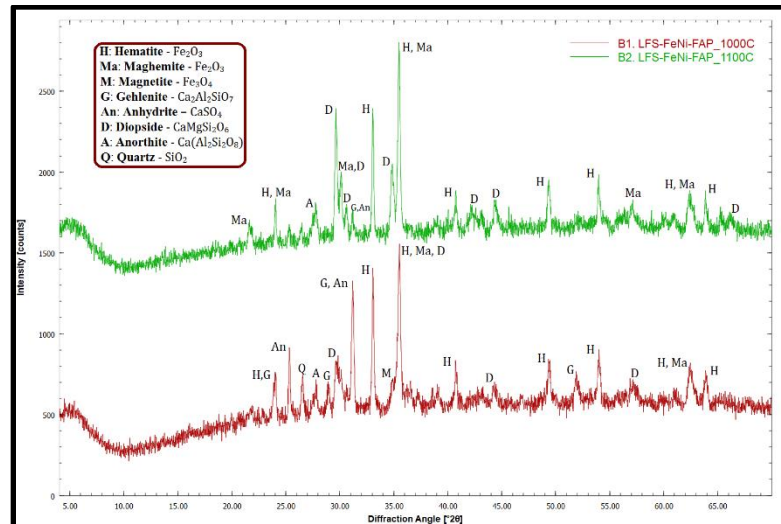
Για τα κεραμικά που παράχθηκαν από εκχυλισμένη Φινλανδική σκωρία και σκωρία σιδηρονικελίου από το Διάγραμμα 3.12 προκύπτει πως οι ορυκτολογικές φάσεις τους είναι ο αιματίτης, ο μαγκεμίτης και ο τριδυμίτης. Ο αιματίτης έχει την μεγαλύτερη ένταση κορυφών, ακολουθεί ο μαγκεμίτης και τέλος ο τριδυμίτης. Με βάση και πάλι την αρχική σύσταση της κάθε πρώτης ύλης και για τις συγκεκριμένες θερμοκρασίες είναι αναμενόμενο να έχουμε παρουσία αυτών των ορυκτών. Όμως, το ότι η αύξηση της θερμοκρασίας δεν επέφερε καμία αλλαγή στην ορυκτολογική σύσταση του δεύτερου κεραμικού παρά μόνο στην ένταση των κορυφών, σημαίνει πως θα πρέπει να αυξηθεί και άλλο π.χ. 1400 °C ώστε να αρχίσουν να σχηματίζονται νέα ορυκτά. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ένα κεραμικό με άλλες και ίσως καλύτερες φυσικομηχανικές ιδιότητες.



Διάγραμμα 3.12: Ορυκτολογική σύσταση κεραμικών B.LFS-FeNi

Στα κεραμικά στα οποία παράχθηκαν και από ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας από το Διάγραμμα 3.13 βλέπουμε πως υπάρχουν διαφορές στην ορυκτολογική τους σύσταση αλλά και στην ένταση των κορυφών. Στο κεραμικό των 1000 °C εμφανίζεται αιματίτης, μαγκεμίτης, μαγνητίτης, διοψίδιος, γκελενίτης, διοψίδιος, ανυδρίτης και ανορθίτης. Τα τρία πρώτα ορυκτά προέρχονται από τις δύο σιδηρούχες πρώτες ύλες και τα υπόλοιπα από την ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας. Η παρουσία τους δείχνει ότι στην συγκεκριμένη θερμοκρασία θέρμανσης δεν μπορούν να μετασχηματιστούν και παραμένουν ως έχουν. Στην ένταση των κορυφών επικρατεί ο αιματίτης και στην συνέχεια ο γκελενίτης ενώ τα υπόλοιπα ορυκτά έχουν μικρότερα ποσοστά συμμετοχής.

Σχετικά με το κεραμικό των 1100 °C έχουμε εξαφάνιση του μαγνητίτη και του χαλαζία ενώ τα υπόλοιπα ορυκτά παρέμειναν ως είχαν. Δηλαδή εδώ η αύξηση της θερμοκρασίας επέδρασε στον μετασχηματισμό των ορυκτών. Το κεραμικό αυτό σε σχέση με το προηγούμενο εμφανίζει αύξηση του ποσοστού του διοψιδίου ο σχηματισμός του οποίου φαίνεται να ευνοήθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας. Όσο αφορά τις υπόλοιπες φάσεις σε γενικές γραμμές δεν παρατηρούνται μεγάλες αλλαγές στην ένταση των κορυφών τους.



Διάγραμμα 3.13: Ορυκτολογική σύσταση κεραμικών B.LFS-FeNi-FAP

3.2.2. Φυσικομηχανικές ιδιότητες

Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζονται και αναλύονται με μορφή πινάκων και ραβδογραμμάτων οι φυσικομηχανικές ιδιότητες όλων των δοκιμίων. Επίσης παρουσιάζονται με μορφή πινάκων και αναλύονται οι ποσοστιαίες μεταβολές των διαστάσεων (διάμετρος και ύψος) και του βάρους τους.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 3.3 (& Πίνακα 3.11 σελ.69) βλέπουμε πως όλα τα δοκίμια παρουσιάζουν την μεγαλύτερη μεταβολή στον όγκο τους και την μικρότερη στο βάρος τους. Για τα κεραμικά που παράχθηκαν μόνο από Φινλανδική σκωρία βλέπουμε πως οι υψηλότερες τιμές μεταβολής της διαμέτρου, του όγκου και του βάρους αυτών παρουσιάζονται στην χαμηλότερη θερμοκρασία (1000 °C) ενώ για το ύψος στην υψηλότερη θερμοκρασία (1200 °C). Παρατηρώντας τον όγκο και το βάρος των δοκιμίων συμπεραίνουμε πως γίνεται πύκνωση, δηλαδή αναμένουμε αύξηση της πυκνότητας αυτών με την θερμοκρασία αφού και το βάρος και ο όγκος τους μειώνονται. Όσο αφορά την επίδραση της ορυκτολογικής σύστασης των κεραμικών στις παραπάνω μεταβολές δεν υπάρχει κάποια σαφής συσχέτιση καθώς και τα τρία είδη κεραμικών περιείχαν τα ίδια ορυκτά και με ίδιο ποσοστό.

Σχετικά με τα κεραμικά που παράχθηκαν από Φινλανδική σκωρία και σκωρία σιδηρονικελίου στους 1100 °C παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές μεταβολής των διαστάσεων, του όγκου και του βάρους αυτών. Πιθανώς το γεγονός αυτό να οφείλεται στο ότι στην 1^η θερμοκρασία υπάρχει αρκετός μαγνεμίτης, ενώ στην 2^η θερμοκρασία

μετασχηματίζεται σε μαγνητίτη και παράλληλα εμφανίζεται και τριδυμίτης. Οι μεταβολές αυτές των ορυκτολογικών φάσεων επιδρούν στις διαστάσεις, τον όγκο και το βάρος των δοκιμίων. Επίσης, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση και του όγκου και του βάρους άρα η πυκνότητα των δοκιμίων θα είναι μικρότερη στους 1100 °C.

Τα κεραμικά που παράχθηκαν και από ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας εμφανίζουν τις μεγαλύτερες τιμές μεταβολής των διαστάσεων, του όγκου και του βάρους τους στους 1100 °C. Και εδώ έχουμε αύξηση του όγκου και του βάρους των δοκιμίων στην δεύτερη θερμοκρασία επομένως περιμένουμε μείωση της πυκνότητας αυτών. Όσο αφορά τους μετασχηματισμούς των ορυκτών, με την αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται εξαφάνιση του διοψίδιου στο κεραμικό των 1100 °C και αύξηση του ποσοστού του μαγνητίτη, επομένως οι αλλαγές αυτές είχαν επίδραση στην μεταβολή του όγκου και του βάρους των δοκιμίων.

Πίνακας 3.3: Μεταβολές διαστάσεων, όγκου & βάρους κεραμικών ομάδας Α

ΔΟΚΙΜΙΟ	Θερμοκρασία (°C)	Ποσοστιαίες Μεταβολές			
		Διάμετρος (%)	Ύψος (%)	Όγκος (%)	Βάρος (%)
A1.1. FS	1000	6.52	6.09	17.94	3.62
A1.2. FS		8.09	7.51	21.86	3.41
A2.1. FS	1100	2.93	8.55	13.84	0.86
A2.2. FS		3.31	9.67	15.54	2.31
A2.3. FS		4.52	8.79	16.85	2.09
A3.1. FS	1200	2.17	10.08	13.94	1.23
A3.2. FS		2.15	9.15	13.02	1.57
A3.3. FS		2.14	10.25	14.06	1.34
A1.1. FS-FeNi	1000	3.48	4.66	11.17	1.19
A1.2. FS-FeNi		3.23	5.24	11.27	0.97
A1.3. FS-FeNi		5.68	6.32	16.66	1.29
A2.1. FS-FeNi	1100	4.27	12.81	20.09	0.91
A2.2. FS-FeNi		4.61	12.99	20.82	1.95
A2.3. FS-FeNi		3.48	13.95	19.82	1.64
A1.1. FS-FeNi - FAP	1000	4.27	5.32	13.23	2.69
A1.2. FS-FeNi - FAP		5.63	5.39	15.75	2.81
A1.3. FS-FeNi - FAP		5.07	6.13	15.40	2.90
A2.1. FS-FeNi - FAP	1100	16.13	12.79	38.66	4.10
A2.2. FS-FeNi - FAP		17.87	11.49	40.30	3.42
A2.3. FS-FeNi - FAP		14.02	11.83	34.81	4.00

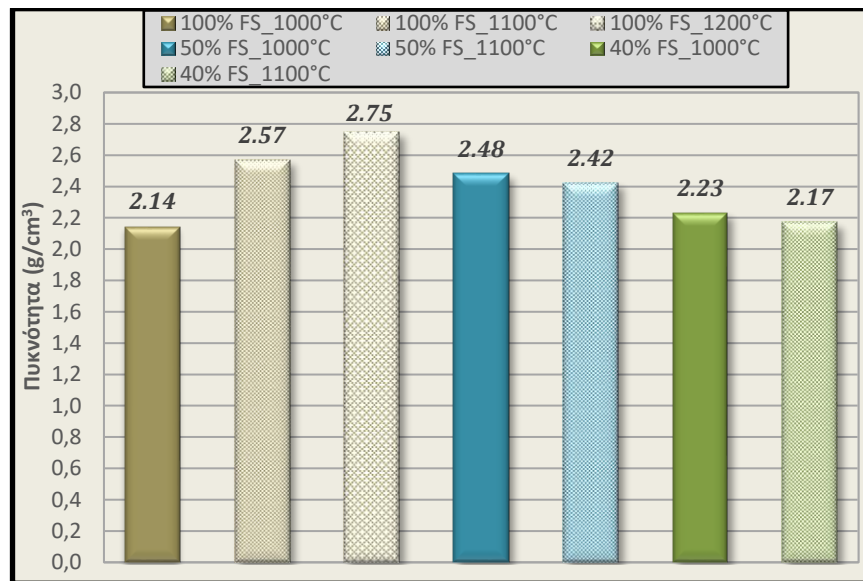
Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων των κεραμικών της ομάδας Α οι οποίες υπολογίστηκαν ως ο αριθμητικός μέσος όρος των αντίστοιχων τιμών του Πίνακα 3.12 της σελ.70. Βάσει των τιμών αυτών δημιουργήθηκαν συγκεντρωτικά ραβδογράμματα για κάθε ιδιότητα έτσι ώστε να μπορεί να γίνει ευκολότερα ο χαρακτηρισμός των κεραμικών βάσει των ιδιοτήτων τους και λαμβάνοντας υπόψη και την ορυκτολογική σύσταση αυτών.

Πίνακας 3.4: Μέσες τιμές ιδιοτήτων κεραμικών ομάδας Α

ΕΙΔΟΣ ΚΕΡΑΜΙΚΟΥ	Θερμοκρασία (°C)	Μέσες Τιμές Ιδιοτήτων				
		Πυκνότητα (g/cm ³)	Πορώδες (%)	Υδατ/τητα (%)	Αντοχή (MPa)	Σκληρότητα (HV)
A1. FS	1000	2.14	30.84	14.19	49.63	402.89
A2. FS	1100	2.57	15.89	6.23	8.73	519.27
A3. FS	1200	2.75	15.85	5.76	82.77	792.96
A1. FS-FeNi	1000	2.48	27.15	11.15	15.45	786.31
A2. FS-FeNi	1100	2.42	23.19	9.54	20.95	579.29
A1. FS-FeNi-FAP	1000	2.23	29.53	13.39	7.74	84.83
A2. FS-FeNi-FAP	1100	2.17	26.28	12.09	16.87	120.33

Από το Διάγραμμα 3.14 προκύπτει πως το κεραμικό με την μεγαλύτερη πυκνότητα (2.75 g/cm³) ήταν αυτό που παράχθηκε μόνο από Φινλανδική σκωρία στους 1200 °C, ενώ το κεραμικό με την μικρότερη πυκνότητα (2.14 g/cm³) ήταν αυτό που παράχθηκε μόνο από Φινλανδική σκωρία στους 1000 °C. Επομένως, με αύξηση της θερμοκρασίας η πυκνότητα των κεραμικών που παράχθηκαν μόνο από Φινλανδική σκωρία αυξάνεται. Επίσης, προκύπτει πως με αύξηση της θερμοκρασίας η πυκνότητα των κεραμικών που παράχθηκαν από Φινλανδική σκωρία σε ποσοστό 50% και 40% μειώνεται.

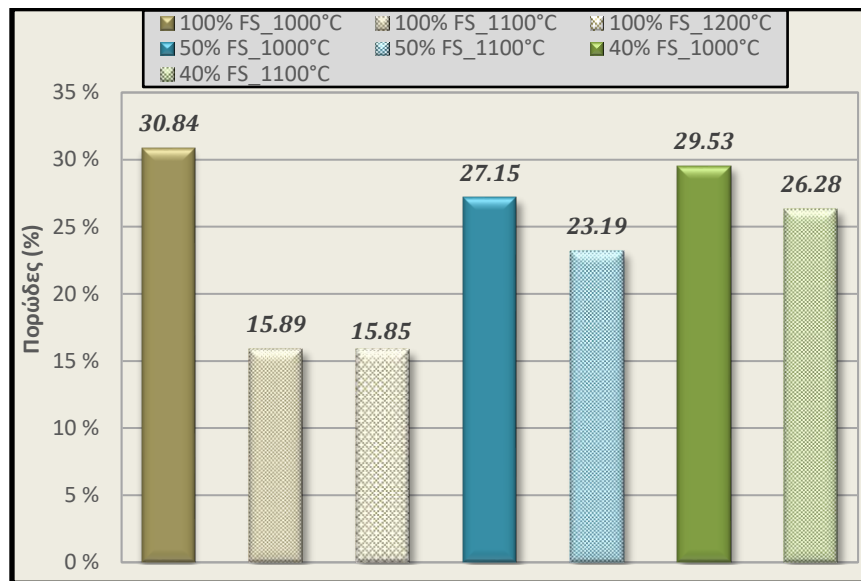
Στην 1^η περίπτωση (100% FS) αν και δεν παρατηρείται αλλαγή στην ορυκτολογική σύσταση των κεραμικών έχουμε αύξηση της πυκνότητας αφού λόγω πυροσυσσωμάτωσης γίνεται πύκνωση των δοκιμών με βάση και τον Πίνακα 3.3. Όσο αφορά την 2^η περίπτωση όπου προστέθηκε και σκωρία σιδηρονικελίου (50% FS), η πυκνότητα μειώθηκε στους 1100 °C και αυτό οφείλεται στην αντικατάσταση του μαγκεμίτη από μαγνητίτη. Στην 3^η περίπτωση όπου προστέθηκε και ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας (40% FS) το κεραμικό των 1100 °C είχε και πάλι την μικρότερη πυκνότητα. Αυτό είναι λογικό αν λάβουμε υπόψη ότι ο όγκος και το βάρος αυτών των κεραμικών αυξήθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας γεγονός που οδήγησε στην μείωση της πυκνότητας.



Διάγραμμα 3.14: Τιμές πυκνότητας κεραμικών ομάδας Α

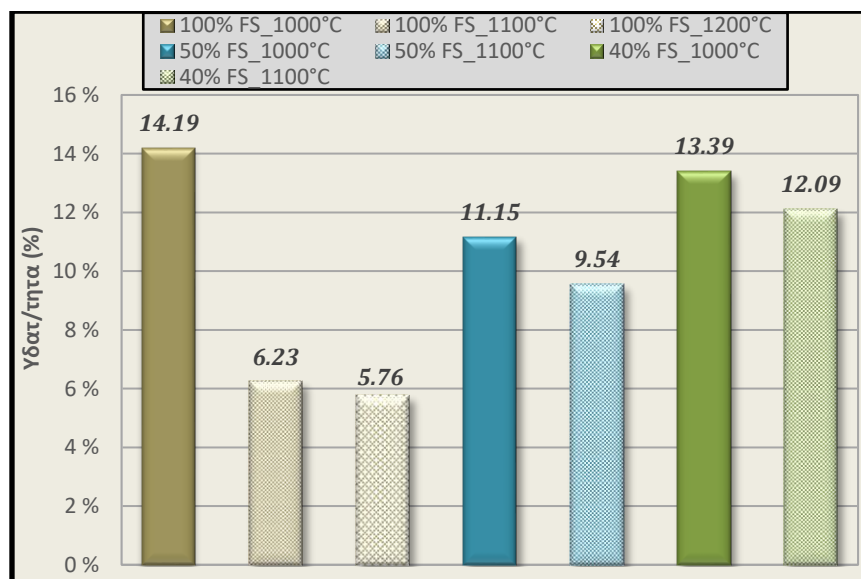
Στο Διάγραμμα 3.15 παρουσιάζονται οι τιμές του πορώδους των κεραμικών της ομάδας Α. Αυτό που προκύπτει είναι πως το κεραμικό που παράχθηκε μόνο από Φινλανδική σκωρία στους 1000 °C είχε το μεγαλύτερο πορώδες (30.84 %), ενώ το κεραμικό με το μικρότερο πορώδες (15.85 %) ήταν αυτό που παράχθηκε μόνο από Φινλανδική σκωρία στους 1200 °C. Επομένως, με αύξηση της θερμοκρασίας το πορώδες των κεραμικών που παράχθηκαν μόνο από Φινλανδική σκωρία μειώνεται. Αν λάβουμε υπόψη και την αντίστοιχη μείωση της πυκνότητας (με βάση το προηγούμενο διάγραμμα) αυτή η μείωση του πορώδους είναι λογική. Γενικά, όσο το πορώδες ενός υλικού αυξάνεται η πυκνότητά του μειώνεται καθώς γίνεται πιο αραιό και λιγότερο συμπαγές.

Όσο αφορά τα υπόλοιπα κεραμικά που παράχθηκαν και από σκωρία σιδηρονικελίου (50% FS) αλλά και από ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας (40% FS), αν και η πυκνότητα τους μειώθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας, το πορώδες τους μειώθηκε σε μικρό βαθμό. Το γεγονός αυτό πιθανώς να οφείλεται στους μετασχηματισμούς των ορυκτολογικών φάσεων που έλαβαν χώρα με την αύξηση της θερμοκρασίας θέρμανσης.



Διάγραμμα 3.15: Τιμές πορώδους κεραμικών ομάδας A

Στο Διάγραμμα 3.16 παρουσιάζονται οι τιμές της υδατοαπορροφητικότητας των κεραμικών της ομάδας A. Παρατηρούμε πως σε όλα τα είδη κεραμικών η υδατοαπορροφητικότητα μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επίσης, με βάση και το Διάγραμμα 3.15 προκύπτει μία σχέση εξάρτησης ανάμεσα στο πορώδες και την υδατοαπορροφητικότητα αφού η μείωση του πορώδους σε όλες τις περιπτώσεις οδηγεί και σε μείωση της υδατοαπορροφητικότητας. Αυτό οφείλεται στο ότι υλικά με μικρό πορώδες δηλαδή μικρό όγκο κενών μπορούν να απορροφήσουν μικρότερες ποσότητες νερού σε σχέση με υλικά που έχουν μεγάλο πορώδες.

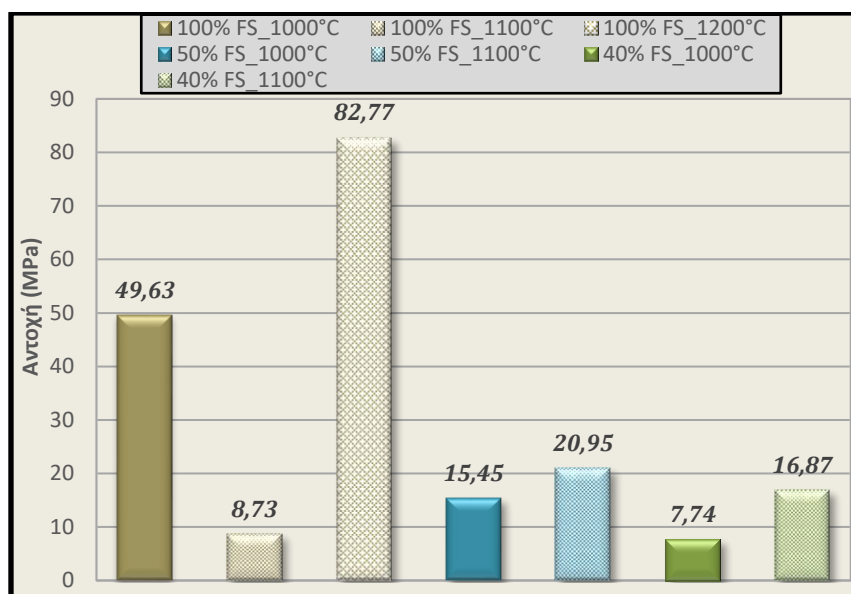


Διάγραμμα 3.16: Τιμές υδατ/τητας κεραμικών ομάδας A

Στο Διάγραμμα 3.17 απεικονίζονται οι τιμές της αντοχής των κεραμικών της ομάδας Α. Το κεραμικό με την υψηλότερη αντοχή (82.77 MPa) ήταν αυτό που παράχθηκε μόνο από Φινλανδική σκωρία στους 1200 °C, ενώ το κεραμικό που παράχθηκε και από τις τρεις πρώτες ύλες (40% FS) στους 1000 °C είχε την χαμηλότερη αντοχή (7.74 MPa).

Στα κεραμικά της Φινλανδικής σκωρίας αύξηση της θερμοκρασίας από τους 1000 °C στους 1200 °C οδήγησε σε αύξηση της αντοχής λόγω καλύτερης πυροσυσσωμάτωσης. Η μείωση της αντοχής στους 1100 °C οφείλεται πιθανώς σε σφάλμα κατά την μορφοποίηση των δοκιμών το οποίο και οδήγησε σε δημιουργία μικρορωγματώσεων κατά την θέρμανσή τους και τελικά στην υποβάθμιση της αντοχής του κεραμικού. Όσο αφορά την επίδραση της ορυκτολογικής σύστασης στην αντοχή, τα σιδηρούχα ορυκτά (αιματίτης και μαγνητίτης) αλλά και ο τριδυμίτης (SiO_2) φαίνεται να επιδρούν θετικά.

Στα υπόλοιπα κεραμικά (50% FS και 40% FS) η αύξηση της θερμοκρασίας ευνοεί σε μικρό βαθμό την αντοχή τους αφού και στις δύο περιπτώσεις αυξάνεται. Στα κεραμικά που προέκυψαν από τις δύο σκωρίες, η αύξηση της αντοχής τους καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται πιθανώς να οφείλεται στον μετασχηματισμό του μαγκεμίτη σε μαγνητίτη και στην αύξηση του ποσοστού συμμετοχής του δεύτερου στην σύσταση του τελικού κεραμικού. Επίσης, και η εμφάνιση του τριδυμίτη στην 2^η θερμοκρασία συντέλεσε στην αύξηση της αντοχής. Για τα κεραμικά που προέκυψαν και από τις τρεις πρώτες ύλες έχουμε διπλασιασμό της αντοχής τους στους 1100 °C. Προφανώς η απουσία των ασβεστιτικών ορυκτών (διοψίδιος, ανορθίτης) από το κεραμικό των 1100 °C ενίσχυσε ελαφρώς την αντοχή του και οδήγησε σε διπλασιασμό της.

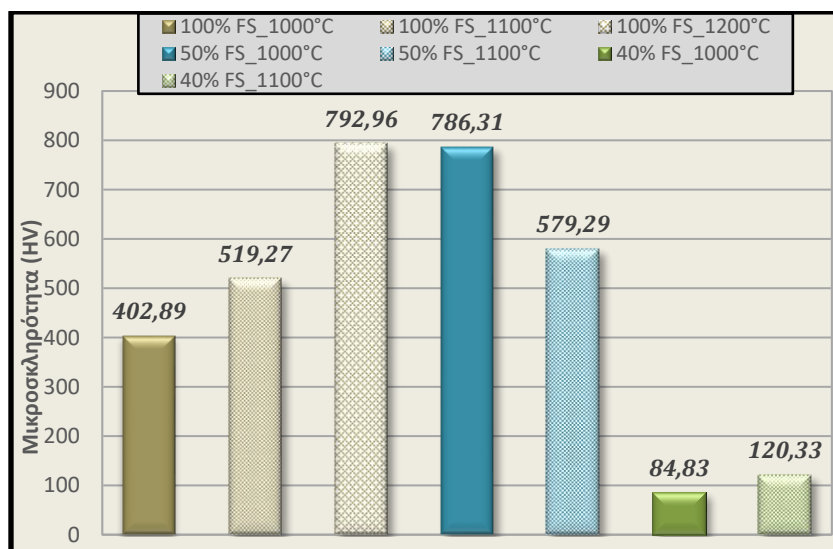


Διάγραμμα 3.17: Τιμές αντοχής κεραμικών ομάδας Α

Από το Διάγραμμα 3.18 προκύπτει ότι το κεραμικό που παράχθηκε μόνο από Φινλανδική σκωρία στους 1200 °C είχε την μεγαλύτερη μικροσκληρότητα (792.96 HV), ενώ αυτό που παράχθηκε και από τις τρεις πρώτες ύλες στους 1000 °C είχε την μικρότερη (84.83 HV). Στην 1^η κατηγορία (100% FS) η αύξηση της μικροσκληρότητας καθώς η θερμοκρασία αυξάνει, οφείλεται στην καλύτερη πυροσυσσωμάτωση των δοκιμίων. Το κεραμικό των 1200 °C είχε την μεγαλύτερη αντοχή (82.77 MPa) αλλά και την μεγαλύτερη μικροσκληρότητα (792.96 HV). Επίσης ο αιματίτης, ο μαγνητίτης και ο τριδυμίτης που υπάρχουν σε αυτό το κεραμικό συνεισφέρουν στην μεγάλη μικροσκληρότητα καθώς οι μικροσκληρότητες αυτών είναι 817HV, 669HV και 1161HV αντίστοιχα. Τέλος, το πορώδες του συγκεκριμένου κεραμικού ήταν το χαμηλότερο (15.85 %) επομένως είναι λογικό να έχει τις μεγαλύτερες μηχανικές ιδιότητες.

Για την 2^η κατηγορία (50% FS) η μικροσκληρότητα μειώνεται στην υψηλότερη θερμοκρασία σε αντίθεση με την θλιπτική αντοχή η οποία αυξάνεται. Στους 1000 °C το κεραμικό έχει 15.45 MPa αντοχή και 786.31 HV μικροσκληρότητα, ενώ στους 1100 °C έχει 20.95 MPa αντοχή και 579.29 HV μικροσκληρότητα. Γενικά η μικροσκληρότητα και η θλιπτική αντοχή των κεραμικών είναι ανάλογες της θερμοκρασίας, κάτι το οποίο δεν ισχύει εδώ πιθανώς λόγω του μικρού πλήθους μετρήσεων μικροσκληρότητας.

Στην 3^η κατηγορία (40% FS) έχουμε μικρή αύξηση της μικροσκληρότητας με αύξηση της θερμοκρασίας γεγονός που συνάδει με την αντίστοιχη αύξηση της θλιπτικής αντοχής. Στο γεγονός αυτό συντελεί και η εξαφάνιση των ασβεστιτικών ορυκτών (διοψίδιος και ανορθίτης) από το κεραμικό των 1100 °C αλλά και η αύξηση του ποσοστού των σιδηρούχων ορυκτών (αιματίτης και μαγνητίτης).



Διάγραμμα 3.18: Τιμές μικροσκληρότητας κεραμικών ομάδας Α

Από τον Πίνακα 3.5 (& Πίνακα 3.13 σελ.71) προκύπτει πως σχεδόν όλα τα είδη κεραμικών είχαν μεγάλη μεταβολή στον όγκο τους. Όμως το κεραμικό που παράχθηκε από εκχυλισμένη Φινλανδική σκωρία και σκωρία σιδηρονικελίου (LFS-FeNi) στους 1100 °C παρουσίασε την μεγαλύτερη μεταβολή στον όγκο του παρόλο που δεν υπήρχε μεταβολή στην ορυκτολογική του σύσταση. Για όλα τα δοκίμια της ομάδας Β τα οποία παράχθηκαν από εκχυλισμένη Φινλανδική σκωρία δεν παρατηρούνται συγκεκριμένες συσχετίσεις μεταξύ κάποιων μεταβολών π.χ. όγκου και βάρους όπως ίσχυε με τα κεραμικά της ομάδας Α. Γενικά, η εκχύλιση επέδρασε αρνητικά σε όλες τις ιδιότητες των παραχθέντων κεραμικών αλλά αυτό το θέμα χρήζει μελλοντικής μελέτης και ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας διπλωματικής.

Πίνακας 3.5: Μεταβολές διαστάσεων, όγκου & βάρους κεραμικών ομάδας Β

ΔΟΚΙΜΙΟ	Θερμοκρασία (°C)	Ποσοστιαία Μεταβολή			
		Διάμετρος (%)	Ύψος (%)	Όγκος (%)	Βάρος (%)
B1.1. LFS	1000	10.13	5.38	23.59	2.10
B1.2. LFS		7.90	7.64	21.66	3.65
B1.3. LFS		13.07	16.13	36.62	2.98
B1.4. LFS		13.98	15.67	37.60	2.03
B2.1. LFS	1100	5.91	12.65	22.67	1.76
B2.2. LFS		9.33	12.10	27.74	4.82
B2.3. LFS		5.93	14.07	23.96	2.68
B2.4. LFS		4.84	11.68	20.02	5.94
B3.1. LFS	1200	10.99	7.83	26.98	4.06
B3.2. LFS		12.27	8.92	29.90	3.73
B3.3. LFS		11.86	9.06	29.35	4.75
B3.4. LFS		12.30	9.20	30.16	5.38
B1.1. LFS-FeNi	1000	10.93	9.57	28.26	1.14
B1.2. LFS-FeNi		11.56	9.14	28.93	2.71
B1.3. LFS-FeNi		11.47	10.09	29.53	3.15
B1.4. LFS-FeNi		11.89	10.29	30.36	3.58
B2.1. LFS-FeNi	1100	1.87	2.50	6.12	17.45
B2.2. LFS-FeNi		2.54	4.31	9.10	20.48
B2.3. LFS-FeNi		2.47	3.87	8.55	20.43
B2.4. LFS-FeNi		2.96	1.74	7.46	22.64
B1.1. LFS-FeNi-FAP	1000	12.27	13.18	33.17	2.95
B1.2. LFS-FeNi-FAP		12.57	12.05	32.77	4.10
B1.3. LFS-FeNi-FAP		10.22	12.54	29.49	2.09
B1.4. LFS-FeNi-FAP		14.40	12.62	35.97	2.24
B2.1. LFS-FeNi-FAP	1100	2.99	5.94	11.48	7.50
B2.2. LFS-FeNi-FAP		3.48	6.83	13.20	6.05
B2.3. LFS-FeNi-FAP		2.66	4.65	9.66	5.49
B2.4. LFS-FeNi-FAP		2.18	4.91	9.01	4.51

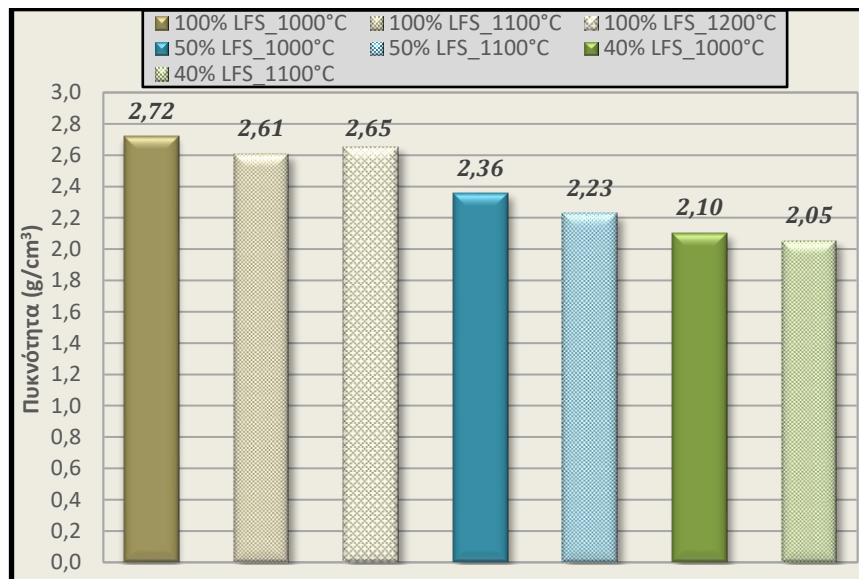
Στον Πίνακα 3.6 (& Πίνακα 3.14 σελ.73) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων όλων των δοκιμίων της ομάδας Β τα οποία παρασκευάστηκαν με εκχυλισμένη Φινλανδική σκωρία. Παρατηρώντας όλες τις ιδιότητες βλέπουμε πως είναι υποδεέστερες σε σχέση με αυτές των ομάδων Α στα οποία χρησιμοποιήθηκε Φινλανδική σκωρία χωρίς να υποστεί εκχύλιση. Πιθανώς λόγω της εκχύλισης διαλυτοποιήθηκαν σε κάποιο βαθμό μερικά χρήσιμα χημικά στοιχεία π.χ. πυρίτιο τα οποία συμμετείχαν σε κάποιες ορυκτολογικές φάσεις που ενίσχυαν τις μηχανικές ιδιότητες των κεραμικών και καθόριζαν φυσικές ιδιότητες όπως την πυκνότητα και το πορώδες.

Πίνακας 3.6: Μέσες τιμές ιδιοτήτων κεραμικών ομάδας Β

ΕΙΔΟΣ ΚΕΡΑΜΙΚΟΥ	Θερμοκρασία (°C)	Μέσες Τιμές Ιδιοτήτων				
		Πυκνότητα (g/cm ³)	Πορώδες (%)	Υδατ/τητα (%)	Αντοχή (MPa)	Σκληρότητα (HV)
B1. LFS	1000	2.72	23.13	8.51	69.33	189.46
B2. LFS	1100	2.61	17.50	6.70	46.96	430.22
B3. LFS	1200	2.65	7.56	2.84	35.67	723.05
B1. LFS-FeNi	1000	2.36	31.11	13.15	4.21	679.23
B2. LFS-FeNi	1100	2.23	27.29	12.30	9.04	189.37
B1. LFS-FeNi-FAP	1000	2.10	37.72	17.89	3.24	543.36
B2. LFS-FeNi-FAP	1100	2.05	33.16	16.12	7.51	56.23

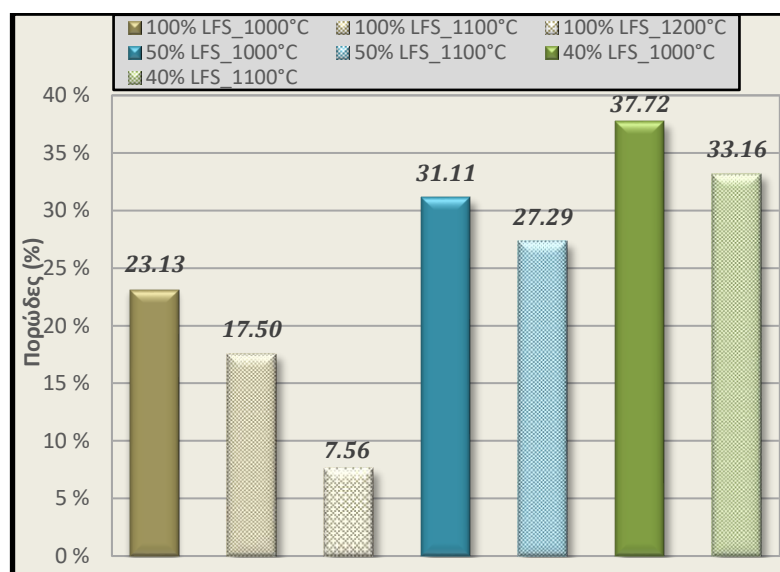
Από το Διάγραμμα 3.19 προκύπτει πως το κεραμικό με την μεγαλύτερη πυκνότητα (2.72 g/cm³) ήταν αυτό που παράχθηκε μόνο από εκχυλισμένη Φινλανδική σκωρία στους 1000 °C (100% LFS), ενώ το κεραμικό με την μικρότερη πυκνότητα (2.05 g/cm³) ήταν αυτό που παράχθηκε και από τις τρεις πρώτες ύλες στους 1100 °C (40% LFS). Θα μπορούσαμε να πούμε λοιπόν πως η αύξηση της θερμοκρασίας θέρμανσης οδηγεί σε αύξηση της πυκνότητας των κεραμικών η οποία θα έχει ως αποτέλεσμα μικρότερο πορώδες και υψηλότερη θλιπτική αντοχή.

Για την πυκνότητα των κεραμικών που παρασκευάστηκαν μόνο από εκχυλισμένη Φινλανδική σκωρία (100% LFS) δεν παρατηρείται συγκεκριμένη μεταβολή με αύξηση της θερμοκρασίας, καθώς έχει την μικρότερη πυκνότητα στους 1100 °C (2.61 g/cm³). Πιθανώς αυτό να οφείλεται σε κάποιο πειραματικό σφάλμα. Στα κεραμικά με 50% LFS και 40% LFS παρατηρήθηκε μείωση της πυκνότητας με αύξηση της θερμοκρασίας η οποία ίσως συνέβη λόγω καλύτερης πυροσυσσωμάτωσης στους 1100 °C. Δηλαδή έγινε πύκνωση των κεραμικών στην δεύτερη θερμοκρασία η οποία πιθανώς να οδηγήσει και σε μεγαλύτερες αντοχές αυτών των κεραμικών.



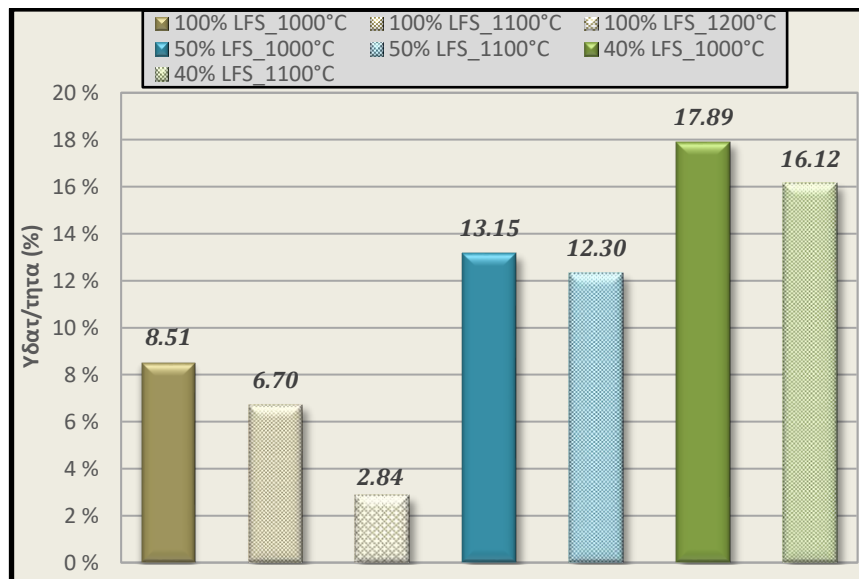
Διάγραμμα 3.19: Τιμές πυκνότητας κεραμικών ομάδας B

Από το Διάγραμμα 3.20 προκύπτει πως το κεραμικό που παράχθηκε και από τις τρεις πρώτες ύλες στους 1000 °C είχε το μεγαλύτερο πορώδες (37.72 %), ενώ το κεραμικό με το μικρότερο πορώδες (7.56 %) ήταν αυτό που παράχθηκε μόνο από εκχυλισμένη Φινλανδική σκωρία στους 1200 °C. Επίσης, προκύπτει πως το πορώδες όλων των κεραμικών μειώθηκε με αύξηση της θερμοκρασίας. Το γεγονός αυτό έρχεται σε αντίθεση με την αντίστοιχη μείωση της πυκνότητας, καθώς αυτές οι δύο ιδιότητες θα πρέπει να είναι αντιστρόφως ανάλογες. Αυτό συνέβη στα κεραμικά της ομάδας A στα οποία η Φινλανδική σκωρία δεν είχε εκχυλιστεί, επομένως συμπεραίνουμε πως η εκχύλιση οδήγησε σε μεγάλες αλλαγές ιδιοτήτων.



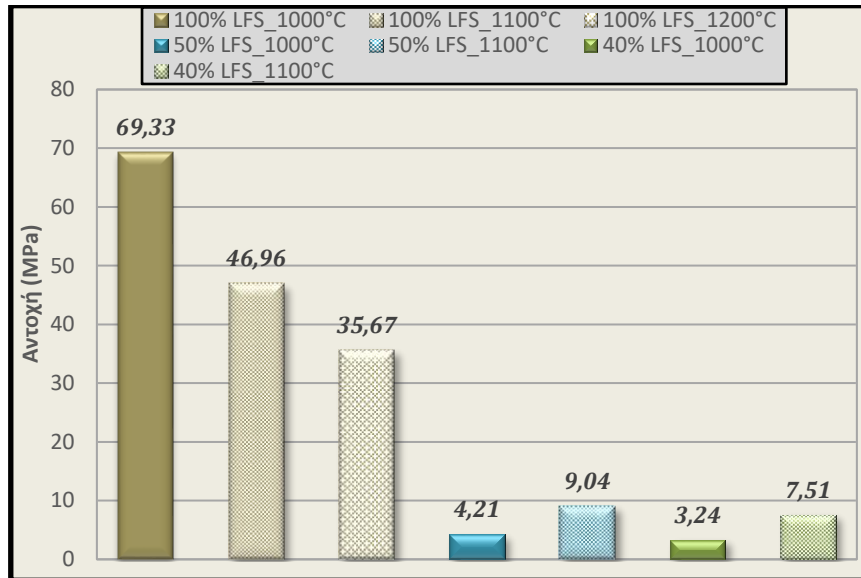
Διάγραμμα 3.20: Τιμές πορώδους κεραμικών ομάδας B

Από το Διάγραμμα 3.21 προκύπτει πως το κεραμικό που παράχθηκε με 40% LFS στους 1000 °C είχε την μεγαλύτερη υδατοαπορροφητικότητα (17.89%), ενώ αυτό που παράχθηκε από 100% LFS στους 1200 °C είχε την μικρότερη τιμή (2.84 %). Επομένως η προσθήκη στο αρχικό μείγμα ανάμειξης και ιπτάμενης τέφρας Πτολεμαΐδας η οποία αποτελούταν κυρίως από ασβεστιτικά ορυκτά (ασβεστίτη, γκελενίτη, κλπ.) οδήγησε σε υψηλές τιμές υδατοαπορροφητικότητας. Τέλος, η υδατοαπορροφητικότητα όλων των κεραμικών μειώθηκε με αύξηση της θερμοκρασίας. Λαμβάνοντας υπόψη πως και το πορώδες τους μειώθηκε, διαπιστώνουμε πως οι δύο ιδιότητες είναι ανάλογες μεταξύ τους και αντιστρόφως ανάλογες της θερμοκρασίας.



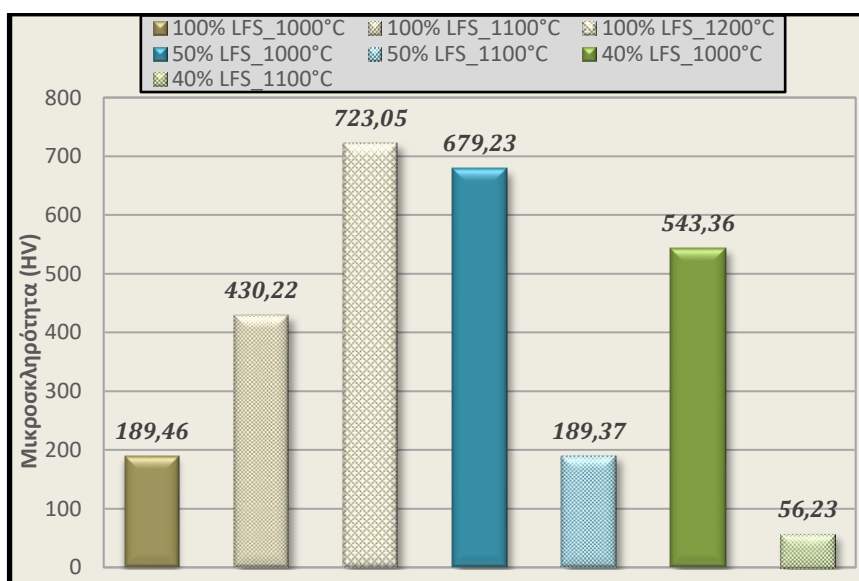
Διάγραμμα 3.21: Τιμές υδατ/τητας κεραμικών ομάδας Β

Σχετικά με την θλιπτική αντοχή, από το Διάγραμμα 3.22 προκύπτει πως το κεραμικό που παράχθηκε μόνο από Φινλανδική σκωρία στους 1000 °C είχε την μεγαλύτερη τιμή (69.33 MPa), ενώ το κεραμικό που παράχθηκε και από τις τρεις πρώτες ύλες (40% FS) στους 1000 °C είχε την χαμηλότερη (3.24 MPa). Επίσης, προκύπτει πως η αντοχή των κεραμικών που παράχθηκαν από 100% LFS μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ αυτών με 50% και 40% αυξάνεται. Συνδυάζοντας και τις αντίστοιχες τιμές του πορώδους, συμπεραίνουμε πως ενώ στα κεραμικά που παράχθηκαν και από τις άλλες πρώτες ύλες η αντοχή και το πορώδες είναι αντιστρόφως ανάλογες ιδιότητες, στα κεραμικά που παράχθηκαν μόνο από LFS είναι ανάλογες. Δηλαδή με αύξηση της θερμοκρασίας είχαμε μείωση και του πορώδους και της αντοχής. Ίσως, αυτή η μείωση της αντοχής στις υψηλότερες θερμοκρασίες να οφείλεται στην παρουσία μικρορωγμών στην δομή των κεραμικών, οι οποίες υποβάθμισαν την αντοχή τους.



Διάγραμμα 3.22: Τιμές αντοχής κεραμικών ομάδας Β

Για την μικροσκληρότητα από το Διάγραμμα 3.22 προκύπτει πως με αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται για τα κεραμικά που παρασκευάστηκαν μόνο από LFS, ενώ στα υπόλοιπα μειώνεται. Συνδυάζοντας και το Διάγραμμα 3.21, βλέπουμε πως οι δύο ιδιότητες είναι αντιστρόφως ανάλογες, αφού στα κεραμικά που η αντοχή μειώνεται η μικροσκληρότητα αυξάνεται και αντίστροφα. Γενικά στα κεραμικά δεν ισχύει αυτό καθώς αύξηση της θλιπτικής αντοχής οδηγεί σε αύξηση της μικροσκληρότητας. Αυτή η παράξενη σχέση των δύο ιδιοτήτων μπορεί να οφείλεται στο μικρό πλήθος μετρήσεων μικροσκληρότητας, αφού όσες περισσότερες μετρήσεις λαμβάνονται τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα εμφάνισης πειραματικού λάθους.



Διάγραμμα 3.23: Τιμές μικροσκληρότητας κεραμικών ομάδας Β

3.2.3. Πιθανές χρήσεις παραγόμενων κεραμικών

Στον Πίνακα 3.7 συγκρίνονται οι τιμές της θλιπτικής αντοχής και της υδατοαπορροφητικότητας των παραχθέντων κεραμικών με τα όρια του αμερικάνικου προτύπου **ASTM-C62** για τα τούβλα τοιχοποιίας. Τα όρια αυτά αφορούν την κατηγορία **NW** στην οποία οι καιρικές συνθήκες δεν λαμβάνονται υπόψη. Παρατηρούμε πως για την ομάδα Α πέντε από τα επτά κεραμικά πληρούν το όριο αντοχής, ενώ ως προς την υδατοαπορροφητικότητα δεν υπάρχει όριο άρα πληρούν και αυτή την ιδιότητα. Εφόσον πληρούν τα όρια και των δύο ιδιοτήτων τα κεραμικά αυτά είναι κατάλληλα για τούβλα τοιχοποιίας με βάση το συγκεκριμένο πρότυπο. Όσο αφορά τα κεραμικά της ομάδας Β, μόνο αυτά που παράχθηκαν από εκχυλισμένη Φινλανδική σκωρία σε τρεις θερμοκρασίες (1000 °C, 1100 °C, 1200 °C) πληρούν και τις δύο ιδιότητες του προτύπου και επομένως είναι κατάλληλα για τούβλα τοιχοποιίας.

Πίνακας 3.7: Έλεγχος χρήσης παραχθέντων κεραμικών με βάση το ASTM-C62

Κεραμικό	Αντοχή Δοκιμίων (MPa)	Αντοχή ASTM-C62 (MPa)	Έλεγχος	Υδατ/τητα Δοκιμίων (%)	Υδατ/τητα ASTM-C62	Έλεγχος
FS_1000 °C	49.63	10.3	OK	14.19	-	OK
FS_1100 °C	8.73			6.23		OK
FS_1200 °C	82.77		OK	5.76		OK
FS-FeNi_1000 °C	15.45		OK	11.15		OK
FS-FeNi_1100 °C	20.95		OK	9.54		OK
FS-FeNi-FAP_1000 °C	7.74			13.39		OK
FS-FeNi-FAP_1100 °C	16.87		OK	12.09		OK
LFS_1000 °C	69.33		OK	8.51		OK
LFS_1100 °C	46.96		OK	6.7		OK
LFS_1200 °C	35.67		OK	2.84		OK
LFS-FeNi_1000 °C	4.21			13.15		OK
FS-FeNi_1100 °C	9.04			12.3		OK
LFS-FeNi-FAP_1000 °C	3.24			17.89		OK
LFS-FeNi-FAP_1100 °C	7.51			16.12		OK

Στον Πίνακα 3.8 συγκρίνονται οι τιμές της θλιπτικής αντοχής και της υδατοαπορροφητικότητας των παραχθέντων κεραμικών με τα όρια του ευρωπαϊκού προτύπου **EN 771-1 (κατηγορία B)** για τα τούβλα τοιχοποιίας. Παρατηρούμε πως σχεδόν όλα τα είδη κεραμικών πληρούν το όριο αντοχής με εξαίρεση το κεραμικό “LFS-FeNi_1000 °C” και το κεραμικό “LFS-FeNi-FAP_1100 °C” τα οποία έχουν λίγο μικρότερη αντοχή από αυτή που ορίζεται στο πρότυπο. Επομένως, τα κεραμικά τα οποία πληρούν το όριο αντοχής αυτού του προτύπου, είναι κατάλληλα για τούβλα τοιχοποιίας.

Πίνακας 3.8: Έλεγχος χρήσης παραχθέντων κεραμικών με βάση το EN 771-1

Κεραμικό	Αντοχή Δοκιμών (MPa)	Αντοχή EN 771-2 (MPa)	Έλεγχος
FS_1000 °C	49.63	>5	OK
FS_1100 °C	8.73		OK
FS_1200 °C	82.77		OK
FS-FeNi_1000 °C	15.45		OK
FS-FeNi_1100 °C	20.95		OK
FS-FeNi-FAP_1000 °C	7.74		OK
FS-FeNi-FAP_1100 °C	16.87		OK
LFS_1000 °C	69.33		OK
LFS_1100 °C	46.96		OK
LFS_1200 °C	35.67		OK
LFS-FeNi_1000 °C	4.21		
FS-FeNi_1100 °C	9.04		OK
LFS-FeNi-FAP_1000 °C	3.24		
LFS-FeNi-FAP_1100 °C	7.51		OK

Συμπεράσματα-Προτάσεις

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης βιομηχανικών αποβλήτων χωρίς την χρήση εμπορικών πρόσθετων για την παραγωγή κεραμικών. Αυτό που προέκυψε μετά από αξιολόγηση των αποτελεσμάτων είναι πως μπορούν να παραχθούν κεραμικά με αξιόλογες ιδιότητες χρησιμοποιώντας μόνο βιομηχανικά απόβλητα όπως τις σκωρίες μεταλλουργίας και την ιπτάμενη τέφρα και χωρίς να γίνει προσθήκη εμπορικών πρόσθετων (συνδέτες, διασπορείς κλπ.). Επομένως μπορούν να παραχθούν νέα προϊόντα όπως δομικά υλικά και προϊόντα κεραμουργίας αποκλειστικά από βιομηχανικά απόβλητα.

Όσο αφορά τα παραχθέντα είδη κεραμικών, το κεραμικό που παράχθηκε από Φινλανδική σκωρία στους **1200 °C** είχε θλιπτική αντοχή περίπου 80 MPa επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλές μηχανικές αντοχές υλικών. Επίσης, η μικροσκληρότητά του ήταν πολύ υψηλή (περίπου 800 HV) επομένως ως προς αυτή την ιδιότητα υπάρχει καλή συμπεριφορά. Τέλος, πληρούσε τα όρια αντοχής και υδατοαπορροφητικότητας για τα τούβλα τοιχοποιίας και του αμερικάνικου και του αγγλικού προτύπου άρα είναι δυνατή η χρήση του σ' αυτό τον τομέα.

Όλα τα κεραμικά που παράχθηκαν από εκχυλισμένη Φινλανδική σκωρία είχαν υποδεέστερες φυσικομηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τα κεραμικά που παράχθηκαν από μη εκχυλισμένη Φινλανδική σκωρία. Επομένως, το υλικό αυτό δεν ενδείκνυται για την παραγωγή κεραμικών σε χαμηλές θερμοκρασίες, της τάξεως των 1000 °C. Ίσως σε αρκετά υψηλότερες θερμοκρασίες π.χ. 1400 °C οι ιδιότητες να γίνουν καλύτερες αλλά σε αυτή την περίπτωση το κόστος παραγωγής θα είναι υψηλότερο λόγω της ποσότητας απαιτούμενης ενέργειας.

Μία πιθανή μελλοντική έρευνα που θα μπορούσε να γίνει πάνω στο θέμα αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των συνθηκών παραγωγής κεραμικών προϊόντων όπως τα τούβλα τοιχοποιίας, τα κεραμικά φίλτρα για τον καθαρισμό αέριων ρύπων, οι πλάκες πεζοδρόμησης κ.α. Επίσης, θα μπορούσαν να διερευνηθούν οι αλλαγές που θα προέκυπταν στις τελικές ιδιότητες των κεραμικών από την αλλαγή των αναλογιών ανάμειξης των πρώτων υλών και από την θέρμανση των δοκιμών σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Τέλος, θα μπορούσε να γίνει βελτιστοποίηση της διαδικασίας μορφοποίησης ώστε να παραχθούν δοκίμια με συγκεκριμένες γεωμετρικές διαστάσεις π.χ. λεπτοί κεραμικοί σωλήνες, κυβικές πλάκες κ.α.

Βιβλιογραφία

Ελληνική

1. Τσέλιου Μ. (2009). "Διερεύνηση δυνατοτήτων παρασκευής κεραμικών μαζών από ιπτάμενη τέφρα (Ι.Τ.) του ΑΗΣ Αχλάδας-Μελίτης για την παραγωγή φίλτρων". Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
2. Ζαχαράκη Δ. (2009). "Συμβολή στη διερεύνηση των μηχανισμών γεωπολυμερισμού μεταλλουργικών αποβλήτων με έμφαση στις σκωρίες ηλεκτροκαμίνων". Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
3. Κρητικάκη Α. (2009). "Πορώδη κεραμικά για περιβαλλοντικές εφαρμογές". Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
4. Κρητικάκη Α. & Κομνίτσας Κ. (2014). "Σημειώσεις Κεραμικών". Τμήμα της διδακτέας ύλης του μαθήματος Μεταλλουργικές Διεργασίες, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.
5. Ευρωπαϊκή Οδηγία 2008/98/ΕΚ

Διεθνής

1. Malhotra S. & Tehri S. (1996). "Development of bricks from granulated blast furnace slag". Construction and Building Materials, 10(3), 191-193.
2. Sioulas B. & Sanjayan J. (2000). "Hydration temperatures in large high-strength concrete columns incorporating slag". Cement and Concrete Research, 30, 1791-1799.
3. Teik-Thye L. & Chu J. (2006). "Assessment of the use of spent copper slag for land reclamation". Waste Management & Resources, 24, 67-73.
4. Mäkinen J. (2006). "Eco-efficient Solutions in the Finnish Metallurgical Industry". Challenges of Eco-efficiency, 5.12.2006, VTT Espoo, Finland.
5. Komnitsas K., Zaharaki D. & Perdikatsis V. (2007). "Geopolymerisation of low calcium ferronickel slags". Journal of Material Science, 42 (9), 3073–3082.
6. Komnitsas K. & Zaharaki D. (2007). "Geopolymerisation. A review and prospects for the mineral industry". Minerals Engineering, 20, 1261–1277.

7. Zaharaki D. & Komnitsas K. (2009). "*Effect of additives on the compressive strength of slag-based inorganic polymers*". Global NEST Journal, 11(2), 137–146.
8. Komnitsas K., Zaharaki D. & Perdikatsis V. (2009). "*Effect of synthesis parameters on the compressive strength of low-calcium ferronickel slag inorganic polymers*". Journal of Hazardous Materials, 161, 760–768.
9. Zaharaki D., Komnitsas K. & Perdikatsis V. (2010). "*Use of analytical techniques for identification of inorganic polymer gel composition*". Journal of Materials Science, 45, 2715-2724.
10. Turgut P. (2010). "*Masonry composite material made of limestone powder and fly ash*". Powder Technology, 204, 42-47.
11. Komnitsas K. (2011). "*Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities*". Procedia Engineering, 21, 1023-1032.
12. Turgut P. (2012). "*Manufacturing of building bricks without Portland cement*". Journal of Cleaner Production, 37, 361-367.
13. Chavan R. & Kulkarni D. (2013). "*Performance of copper slag on strength properties as partial replace of fine aggregate in concrete mix*". International Journal of Advanced Engineering Research and Studies, 95-98.
14. Komnitsas K., Zaharaki D. & Bartzas G. (2013). "*Effect of sulphate and nitrate anions on heavy metal immobilization in ferronickel slag geopolymers*". Applied Clay Science, 73, 103-109.
15. Komnitsas K., Zaharaki D., Vlachou A., Bartzas G. & Galetakis M. (2015). "*Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers*". Advanced Powder Technology, 26(2), 368-376.
16. Kritikaki A., Zaharaki D. & Komnitsas K. (2016). "*Valorization of Industrial Wastes for the Production of Glass–Ceramics*". Waste and Biomass Valorization, 885–898.
17. Zaharaki D., Galetakis M. & Komnitsas K. (2016). "*Valorization of construction and demolition (C&D) and industrial wastes through alkali activation*". Construction and Building Materials, 121, 686–693.
18. Komnitsas K. (2016). "*Co-valorization of marine sediments and construction & demolition (C&D) and industrial wastes through alkali activation*". Journal of Environmental Chemical Engineering, 4, 4661-4669.
19. American Standard ASTM C-62

20. American Standard ASTM C-618
21. European Standard EN 197-1
22. European Standard EN 771-1

Ιστοσελίδες

1. www.larco.gr
2. www.dei.gr
3. www.sciencedirect.com
4. <https://www.mindat.org>
5. www.flyash.com

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ι. ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Πίνακας 3.9: Μετρήσεις διαστάσεων, όγκου & βάρους κεραμικών ομάδας Α

ΔΟΚΙΜΙΟ	Θερμοκρασία (°C)	Άψητα				Ψημένα				Μάζα	
		Διάμετρος (cm)	Ύψος (cm)	Όγκος (cm³)	Βάρος (g)	Διάμετρος (cm)	Ύψος (cm)	Όγκος (cm³)	Βάρος (g)	m ₁ (g)	m ₂ (g)
A1.1. FS	1000	3.68	3.12	33.18	51.9181	3.44	2.93	27.23	50.0372	37.3159	57.7026
A1.2. FS		3.71	2.53	27.35	44.0324	3.41	2.34	21.37	42.5327	25.0239	48.0852
A2.1. FS	1100	3.75	3.04	33.58	55.0964	3.64	2.78	28.93	54.6207	36.4271	56.5755
A2.2. FS		3.63	2.69	27.84	42.0165	3.51	2.43	23.51	41.0461	28.7338	44.4188
A2.3. FS		3.76	2.73	30.31	42.3261	3.59	2.49	25.20	41.4397	26.9460	44.2974
A3.1. FS	1200	3.69	2.48	26.52	43.6624	3.61	2.23	22.82	43.1246	29.8765	45.5257
A3.2. FS		3.72	2.95	32.06	46.7057	3.64	2.68	27.89	45.9734	31.8512	48.5973
A3.3. FS		3.73	2.83	30.92	44.5748	3.65	2.54	26.58	43.9786	30.6308	46.6253
A1.1. FS-FeNi	1000	3.74	2.79	30.65	43.4891	3.61	2.66	27.23	42.9734	30.5348	47.8913
A1.2. FS-FeNi		3.71	2.67	28.86	40.3473	3.59	2.53	25.61	39.9576	26.7472	41.9669
A1.3. FS-FeNi		3.70	2.53	27.20	38.3126	3.49	2.37	22.67	37.8189	28.1473	44.2442
A2.1. FS-FeNi	1100	3.75	2.81	31.04	43.2570	3.59	2.45	24.80	42.8647	28.4017	46.6262
A2.2. FS-FeNi		3.69	2.54	27.16	40.9538	3.52	2.21	21.51	40.1549	28.7091	44.2812
A2.3. FS-FeNi		3.74	2.94	32.30	44.5219	3.61	2.53	25.90	43.7896	29.2802	47.9830
A1.1. FS-FeNi - FAP	1000	3.75	2.63	29.05	38.2423	3.59	2.49	25.20	37.2124	25.5104	42.3006
A1.2. FS-FeNi - FAP		3.73	2.04	22.29	34.8853	3.52	1.93	18.78	33.9038	24.3173	40.1885
A1.3. FS-FeNi - FAP		3.75	2.12	23.41	36.5647	3.56	1.99	19.81	35.5059	23.1885	38.3351
A2.1. FS-FeNi - FAP	1100	3.72	2.97	32.28	44.0145	3.12	2.59	19.80	42.2117	27.9031	47.4418
A2.2. FS-FeNi - FAP		3.75	2.61	28.83	40.3940	3.08	2.31	17.21	39.0119	25.7048	43.5677
A2.3. FS-FeNi - FAP		3.71	2.79	30.16	41.7948	3.19	2.46	19.66	40.1232	26.5850	45.0248

Πίνακας 3.10: Ιδιότητες κεραμικών ομάδας Α

ΔΟΚΙΜΙΟ	Θερμοκρασία (°C)	Ιδιότητες				
		Πυκνότητα (g/cm ³)	Πορώδες (%)	Υδατ/τητα (%)	Αντοχή (MPa)	Σκληρότητα (HV)
A1.1. FS	1000	2.45	37.60	15.32	40.48	397.46
A1.2. FS		1.84	24.08	13.05	58.78	408.32
A2.1. FS	1100	2.71	9.70	3.58	8.18	647.95
A2.2. FS		2.61	21.50	8.22	9.09	543.16
A2.3. FS		2.38	16.47	6.90	8.93	366.70
A3.1. FS	1200	2.75	15.34	5.57	72.31	750.08
A3.2. FS		2.74	15.67	5.71	96.63	781.90
A3.3. FS		2.75	16.55	6.02	79.36	846.90
A1.1. FS-FeNi	1000	2.47	28.33	11.44	12.06	735.47
A1.2. FS-FeNi		2.62	13.20	5.03	16.94	773.88
A1.3. FS-FeNi		2.35	39.92	16.99	17.35	849.60
A2.1. FS-FeNi	1100	2.35	20.64	8.78	18.90	640.98
A2.2. FS-FeNi		2.58	26.50	10.28	25.21	654.90
A2.3. FS-FeNi		2.34	22.42	9.58	18.74	442.00
A1.1. FS-FeNi - FAP	1000	2.21	30.30	13.67	6.55	72.40
A1.2. FS-FeNi - FAP		2.13	39.60	18.54	7.57	91.69
A1.3. FS-FeNi - FAP		2.34	18.68	7.97	9.11	90.40
A2.1. FS-FeNi - FAP	1100	2.16	26.77	12.39	16.74	140.03
A2.2. FS-FeNi - FAP		2.18	25.50	11.68	17.34	108.83
A2.3. FS-FeNi - FAP		2.17	26.58	12.22	16.52	112.13

Πίνακας 3.11: Μετρήσεις διαστάσεων, όγκου & βάρους κεραμικών ομάδας Β

ΔΟΚΙΜΙΟ	Θερμοκρασία (°C)	Άψητα				Ψημένα				Μάζα		
		Διάμετρος (cm)	Ύψος (cm)	Όγκος (cm³)	Βάρος (g)	Διάμετρος (cm)	Ύψος (cm)	Όγκος (cm³)	Βάρος (g)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)
B1.1. LFS	1000	3.75	2.23	24.63	35.0820	3.37	2.11	18.82	34.3448	34.3448	25.0239	38.0195
B1.2. LFS		3.67	2.75	29.09	44.2494	3.38	2.54	22.79	42.6322	42.6322	30.4658	46.2188
B1.3. LFS		3.75	2.48	27.39	41.3651	3.26	2.08	17.36	40.1321	40.1321	28.7649	43.1342
B1.4. LFS		3.72	3.00	32.61	49.3175	3.20	2.53	20.35	48.3174	48.3174	34.4622	51.9089
B2.1. LFS	1100	3.72	3.40	36.95	49.4278	3.50	2.97	28.57	48.5575	23.7577	16.3042	25.6366
B2.2. LFS		3.75	3.14	34.68	37.2643	3.40	2.76	25.06	35.4688	2.1452	1.4883	2.3020
B2.3. LFS		3.71	2.63	28.43	34.9403	3.49	2.26	21.62	34.0024	6.8404	4.6405	7.2502
B2.4. LFS		3.72	2.91	31.63	35.6148	3.54	2.57	25.29	33.5007	2.4242	1.6496	2.5599
B3.1. LFS	1200	3.73	2.81	30.71	50.3723	3.32	2.59	22.42	48.3283	7.8735	5.1104	8.0331
B3.2. LFS		3.75	2.69	29.71	40.4271	3.29	2.45	20.83	38.9201	1.3197	0.8343	1.3572
B3.3. LFS		3.71	2.54	27.46	36.0400	3.27	2.31	19.40	34.3272	1.0033	0.6691	1.0394
B3.4. LFS		3.74	2.61	28.67	37.6733	3.28	2.37	20.03	35.6471	1.3724	0.9050	1.4122
B1.1. LFS-FeNi	1000	3.75	3.45	38.10	50.2532	3.34	3.12	27.34	49.6809	2.6798	1.8573	3.0304
B1.2. LFS-FeNi		3.72	3.39	36.84	51.5695	3.29	3.08	26.18	50.1718	4.2983	3.1951	4.8679
B1.3. LFS-FeNi		3.75	3.27	36.12	51.4999	3.32	2.94	25.45	49.8765	10.4704	7.2882	11.7968
B1.4. LFS-FeNi		3.70	3.11	33.44	38.6326	3.26	2.79	23.29	37.2513	3.9009	2.7240	4.4315
B2.1. LFS-FeNi	1100	3.74	4.00	43.94	57.3155	3.67	3.90	41.26	47.3167	9.8074	6.5824	10.8275
B2.2. LFS-FeNi		3.55	3.25	32.17	51.3691	3.46	3.11	29.24	40.8482	6.0766	4.0285	6.9834
B2.3. LFS-FeNi		3.65	3.10	32.44	51.9628	3.56	2.98	29.66	41.3491	3.3801	2.3188	3.7931
B2.4. LFS-FeNi		3.72	4.03	43.80	54.7060	3.61	3.96	40.53	42.3179	10.0322	6.7788	11.2002

B1.1. LFS-FeNi-FAP	1000	3.75	2.58	28.50	31.1837	3.29	2.24	19.04	30.2629	1.9041	1.3388	2.2461
B1.2. LFS-FeNi-FAP		3.74	2.24	24.61	30.3112	3.27	1.97	16.54	29.0690	2.2106	1.5409	2.5851
B1.3. LFS-FeNi-FAP		3.72	3.19	34.67	38.7594	3.34	2.79	24.44	37.9477	2.7505	1.9535	3.2288
B1.4. LFS-FeNi-FAP		3.75	3.25	35.90	38.8231	3.21	2.84	22.98	37.9547	4.7635	3.3749	5.6816
B2.1. LFS-FeNi-FAP	1100	3.68	3.20	34.04	50.6366	3.57	3.01	30.13	46.8409	17.4462	11.8717	20.1784
B2.2. LFS-FeNi-FAP		3.74	2.78	30.54	41.0074	3.61	2.59	26.51	38.5259	4.5974	3.1212	5.3095
B2.3. LFS-FeNi-FAP		3.76	3.01	33.42	46.1995	3.66	2.87	30.19	43.6635	7.1042	4.7356	8.2788
B2.4. LFS-FeNi-FAP		3.67	2.24	23.70	34.0009	3.59	2.13	21.56	32.4659	4.5930	3.0983	5.3646

Πίνακας 3.12: Ιδιότητες κεραμικών ομάδας Β

ΔΟΚΙΜΙΟ	Θερμοκρασία (°C)	Ιδιότητες				
		Πυκνότητα (g/cm ³)	Πορώδες (%)	Υδατ/τητα (%)	Αντοχή (MPa)	Σκληρότητα (HV)
B1.1. LFS	1000	2.63	28.28	10.70	9.66	-
B1.2. LFS		2.70	22.77	8.41	45.33	-
B1.3. LFS		2.78	20.89	7.48	65.71	-
B1.4. LFS		2.76	20.59	7.43	96.97	189.46
B2.1. LFS	1100	2.54	20.13	7.91	36.62	-
B2.2. LFS		2.63	19.27	7.31	85.15	430.22
B2.3. LFS		2.61	15.70	5.99	33.57	-
B2.4. LFS		2.66	14.91	5.60	32.51	-
B3.1. LFS	1200	2.69	5.46	2.03	22.97	-
B3.2. LFS		2.52	7.17	2.84	36.87	-
B3.3. LFS		2.70	9.75	3.60	61.85	
B3.4. LFS		2.70	7.85	2.90	20.97	723.05
B1.1. LFS-FeNi	1000	2.28	29.89	13.08	4.61	599.14
B1.2. LFS-FeNi		2.56	34.05	13.25	4.33	-
B1.3. LFS-FeNi		2.32	29.42	12.67	3.82	759.33
B1.4. LFS-FeNi		2.28	31.07	13.60	4.09	-
B2.1. LFS-FeNi	1100	2.30	24.03	10.40	9.29	-
B2.2. LFS-FeNi		2.05	30.69	14.92	6.74	-
B2.3. LFS-FeNi		2.29	28.01	12.22	9.80	138.67
B2.4. LFS-FeNi		2.26	26.42	11.64	10.32	240.06

B1.1. LFS-FeNi-FAP	1000	2.09	37.69	17.96	1.42	-
B1.2. LFS-FeNi-FAP		2.11	35.86	16.94	4.34	-
B1.3. LFS-FeNi-FAP		2.15	37.50	17.39	5.27	-
B1.4. LFS-FeNi-FAP		2.06	39.80	19.27	1.92	543.36
B2.1. LFS-FeNi-FAP	1100	2.09	32.89	15.66	10.86	-
B2.2. LFS-FeNi-FAP		2.10	32.54	15.49	9.22	-
B2.3. LFS-FeNi-FAP		2.00	33.15	16.53	6.14	-
B2.4. LFS-FeNi-FAP		2.02	34.05	16.80	3.83	56.23