ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ-ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ-ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

ΧΡΙΣΤΙΝΑ ΑΠΟΣΤΟΛΙΔΟΥ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΤΩΝ ΛΙΓΝΙΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ Β. ΕΛΛΑΔΟΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2017

ΧΡΙΣΤΙΝΑ ΑΠΟΣΤΟΛΙΔΟΥ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΤΩΝ ΛΙΓΝΙΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ Β. ΕΛΛΑΔΟΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας

Α.Ε.Μ: 4967

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ανδρέας Γεωργακόπουλος

© Αποστολίδου Χριστίνα, Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας,2017
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΤΩΝ ΛΙΓΝΙΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ Β. ΕΛΛΑΔΟΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χωρίς την διαρκή βοήθεια και καθοδήγηση του επιβλέποντα καθηγητή κ. Ανδρέα Γεωργακόπουλου. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Νικόλαο Καντηράνη, επίκουρο καθηγητή, την κα. Λαμπρινή Παπαδοπούλου, επίκουρη καθηγήτρια, καθώς και τη Σοφία Δοάνη, υποψήφια διδάκτωρ του τμήματος Γεωλογίας, Α.Π.Θ, για τη συμβολή και υποστήριξή τους στο ερευνητικό τμήμα της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την συμπαράσταση και στήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των προπτυχιακών σπουδών μου.

Αποστολίδου Χριστίνα

Περιεχόμενα

1. ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΛΙΓΝΙΤΕΣ ΚΑΙ ΤΟΥΣ ΓΑΙΑΝΘΡΑΚΕΣ 2

1.1 Σχηματισμός και ιδιότητες 2

1.2 Ταξινόμηση 3

1.3 Κοιτάσματα γαιανθράκων του Ελληνικού χώρου 4

1.3.1 Ο Ελληνικός λιγνίτης 4

1.3.2 Λεκάνη Πτολεμαΐδας- Φλώρινας 5

1.3.3 Αξιοποίηση λιγνιτικών κοιτασμάτων 8

2. ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ 10

2.1 Τύποι της Ιπτάμενης τέφρας. 10

2.2 Ιπτάμενη τέφρα των ελληνικών λιγνιτών 12

2.2.1 Χημική σύσταση, ορυκτολογία και μορφολογία 12

2.2.2 Μέτρα παγίδευσης και παραγόμενες ποσότητες 13

2.3 Εφαρμογές και δυνητικές χρήσεις 14

2.3.1 Τσιμεντοβιομηχανία 16

2.3.2 Κατασκευές 18

3. ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ 19

3.1 Κοκκομετρικός διαχωρισμός 19

3.2 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο (SEM) 20

3.3 Περιθλασιμετρία ακτίνων-Χ (XRD) 20

3.4 Δοκιμές διόγκωσης 20

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 21

4.1 Μορφολογία ιπτάμενης τέφρας και χημικές αναλύσεις 21

4.1.1 Ιπτάμενη Τέφρα ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου 21

4.1.2 Ιπτάμενη Τέφρα ΑΗΣ Αμυνταίου 32

4.1.3 Ιπτάμενη Τέφρα ΑΗΣ Καρδιάς 45

4.1.4 Χημική ανάλυση 58

4.2 Κοκκομετρία ιπτάμενης τέφρας 60

4.3 Ορυκτολογική σύσταση τέφρας 63

4.4 Δοκιμές διόγκωσης 68

4.5 Συμπεράσματα 69

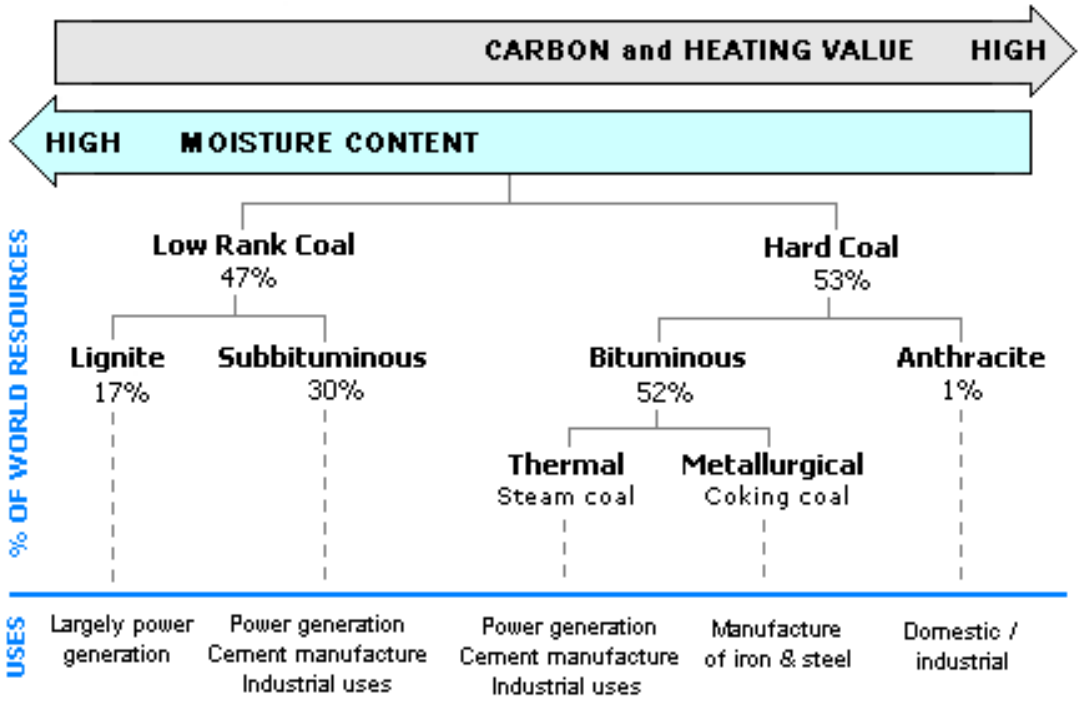
Βιβλιογραφία 71

1. ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΛΙΓΝΙΤΕΣ ΚΑΙ ΤΟΥΣ ΓΑΙΑΝΘΡΑΚΕΣ

1.1 Σχηματισμός και ιδιότητες

Οι γαιάνθρακες αποτελούν μια στερεά καύσιμη ύλη και σχηματίζονται μέσω μιας σειράς πολύπλοκων φυσικοχημικών διεργασιών, που ονομάζεται ενανθράκωση κατά την οποία παρατηρείται μείωση της περιεκτικότητας σε νερό, οξυγόνο και υδρογόνο, αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα, αύξηση της αρωματικότητας και μείωση των πτητικών συστατικών με αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό των αποθέσεων των φυτικών υπολειμμάτων σε άνθρακα (Trethowan,1990). Ο χρόνος σχηματισμού των γαιανθράκων φτάνει ως και τα 350 εκ. χρόνια για τον σχηματισμό των ανθράκων, ενώ 30 εκ. χρόνια είναι αρκετά για τη δημιουργία ενός κοιτάσματος τύρφης.

Οι γαιάνθρακες, ανάλογα με το βαθμό ενανθράκωσής τους, αποκτούν ορισμένα χαρακτηριστικά με βάση τα οποία διακρίνονται σε ανθρακίτες,, βιτουμενούχους άνθρακες, υποβιτουμενούχους άνθρακες και λιγνίτες. Τα βασικά αυτά χαρακτηριστικά είναι τέσσερα: η περιεκτικότητά τους σε μόνιμο άνθρακα, τα πτητικά στοιχεία που περιέχουν, η τέφρα και η θερμογόνος δύναμη (εικόνα 1).



Εικόνα 1. Παγκόσμια κατανομή των γαιαθράκων και ταξινόμηση τους με βάση τα τέσσερα κύρια τους συστατικά.

1.2 Ταξινόμηση

Η κατάταξη (rank) ή βαθμός ενός ορυκτού άνθρακα είναι το πιο χρήσιμο κριτήριο κατάταξης, με το οποίο ουσιαστικά προσδιορίζεται το στάδιο ενανθράκωσης στο οποίο βρίσκεται ένας ορυκτός άνθρακας, μεταξύ της πλούσιας σε οξυγόνο αρχικής φυτικής ουσίας και του πλούσιου σε μόνιμο άνθρακα (C) και φτωχού σε οξυγόνο, ανθρακίτη. Η μεταμόρφωση του ορυκτού άνθρακα από τύρφη σε ανθρακίτη συνοδεύεται από μια σειρά μεταβολών που αποτελούν το κριτήριο προσδιορισμού του βαθμού ενανθράκωσης.

Ο βαθμός την ενανθράκωσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την πίεση που θα υποστεί ο σχηματισμός σε συνάρτηση με το χρονικό διάστημα που θα βρεθεί στις ανάλογες συνθήκες και είναι αυτός που διακρίνει τους άνθρακες σε **χαμηλού** και **υψηλού βαθμού**. Ως χαμηλού βαθμού άνθρακες χαρακτηρίζονται οι υποβιτουμενούχοι άνθρακες και οι λιγνίτες. Αυτό που τους χαρακτηρίζει είναι από τη μία η χαμηλή θερμογόνος δύναμη και περιεκτικότητα σε μόνιμο άνθρακα και από την άλλη η υψηλή περιεκτικότητα σε τέφρα και πτητικά (πίνακας 1).

	ΤΥΡΦΗ	**ΛΙΓΝΙΤΗΣ**	**ΥΠΟΒΙΤΟΥΜΕΝΟΥΧΟΣ ΑΝΘΡΑΚΑΣ**	**ΒΙΤΟΥΜΕΝΟΥΧΟΣ ΑΝΘΡΑΚΑΣ**	**ΑΝΘΡΑΚΙΤΗΣ**
%H_2O	75-80	**50-70**	**25-30**	5-10	2-5
%C	50-60	**60-75**	**75-80**	80-90	90-95
%H	5-6	**5-6**	**5-6**	4-5	2-3
%O	35-40	**20-30**	**15-20**	10-15	2-3
%ΠΤΗΤΙΚΑ	60-65	**45-55**	**40-55**	20-40	5-7
ΘΕΡΜΟΓΟΝΟΣ (kJ^{-1})	25	**25-30**	**28-32**	30-35	35-38

Πίνακας 1. Περιεκτικότητα των τεσσάρων τύπων γαιανθράκων καθώς και τύρφης σε βασικά συστατικά.

1.3 Κοιτάσματα γαιανθράκων του Ελληνικού χώρου

1.3.1 Ο Ελληνικός λιγνίτης

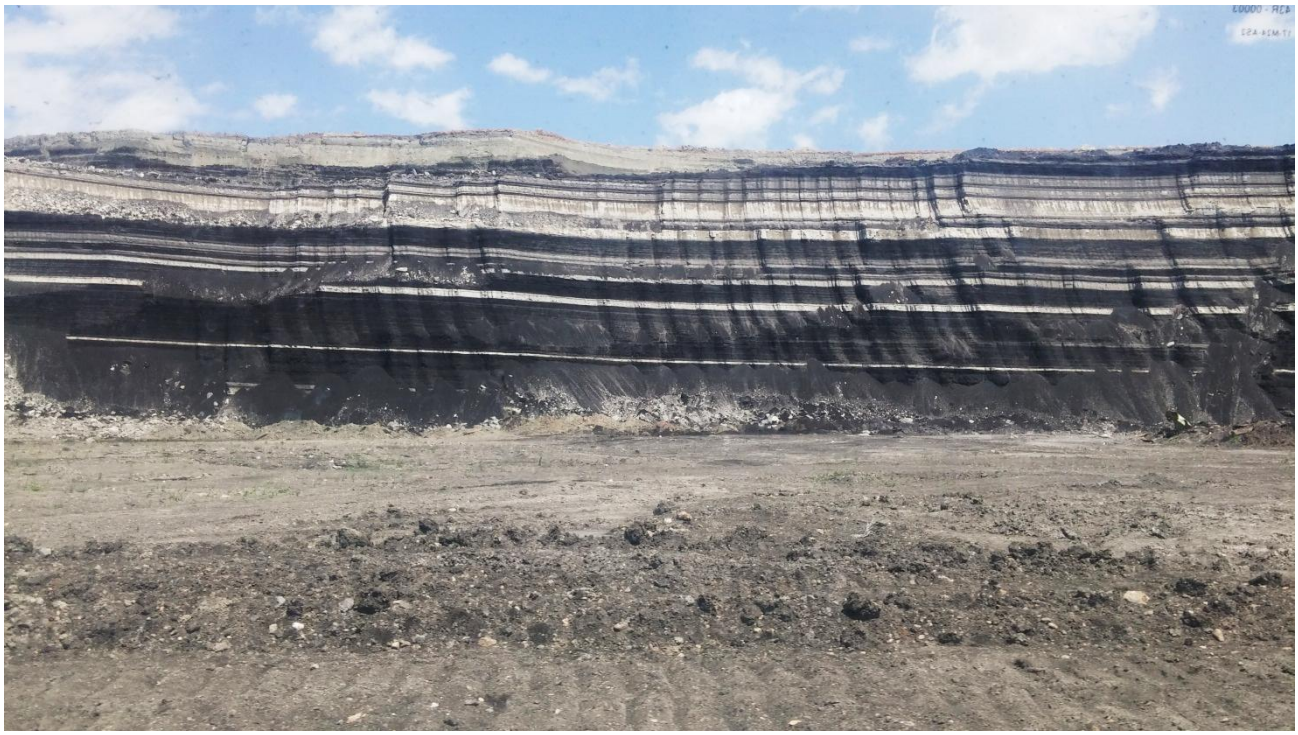
Ο σχηματισμός των κοιτασμάτων λιγνίτη του Ελληνικού χώρου συντελέστηκε από τις αρχές του Καινοζωικού αιώνα έως και τους πρόσφατους γεωλογικούς χρόνους. Η κύρια φάση λιγνιτογένεσης συμπίπτει με τη Νεοτριτογενή και Τεταρτογενή γεωλογική περίοδο. Τα σημαντικότερα κοιτάσματα λιγνίτη σχηματίστηκαν σε αβαθείς λίμνες και έλη κλειστών ενδοηπειρωτικών λεκανών.

Οι ελληνικοί λιγνίτες ανήκουν και αυτοί, όπως όλοι οι λιγνίτες, στους χαμηλού βαθμού γαιάνθρακες. Η ποιότητα τους είναι χαμηλή, καθώς παρουσιάζουν χαμηλή θερμογόνο δύναμη και υψηλή περιεκτικότητα σε πτητικά συστατικά, υγρασία και τέφρα. Συγκεκριμένα, η θερμογόνος τους δύναμη κυμαίνεται από 975-1380 kcal/kg στις περιοχές της Μεγαλόπολης, Αμυνταίου και Δράμας, από 1261-1615 kcal/kg στην περιοχή της Πτολεμαΐδας και από 1927-2257 kcal/kg στις περιοχές της Φλώρινας και της Ελασσόνας. **Η περιεκτικότητά τους σε τέφρα κυμαίνεται περίπου στο 30%** (Kolovos et al,2005). Η υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία και πτητικά συστατικά του λιγνίτη τον καθιστούν ευαίσθητο στην αυτανάφλεξη με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται σημαντικές δυσκολίες στην αποθήκευσή του με ασφάλεια. Επιπλέον, η χαμηλή του ενεργειακή απόδοση καθιστά επικίνδυνα δαπανηρή τη μεταφορά του σε αποστάσεις μακριά από τα ορυχεία δημιουργώντας την ανάγκη εγκατάστασης των Ατμοηλεκτρικών Σταθμών (ΑΗΣ) πολύ κοντά στις περιοχές των ορυχείων.

Σημαντικό χαρακτηριστικό των Ελληνικών κοιτασμάτων λιγνίτη αποτελούν οι στείρες ενστρώσεις που παρεμβάλλονται των λιγνιτικών οριζόντων. Λόγω του μικρού τους πάχους συχνά συναπολαμβάνονται από τους καδοφόρους εκσκαφείς και οδηγούνται αναπόφευκτα στην καύση ρίχνοντας ακόμη περισσότερο την ενεργειακή απόδοση των λιγνιτών που καταλήγουν στους ΑΗΣ (Ιορδανίδης κ.α, 2000; Κολοβός κ.α 2000; Kolovos et al, 2002; Kolovos et al, 2005). Επίσης, τα κοιτάσματα λιγνίτη του ελληνικού χώρου εμφανίζουν μικρή περιεκτικότητα σε θείο και μαζί με τη διαδικασία της φυσικής αποθείωσης που πραγματοποιείται με τη συνεισφορά του ασβεστίου, αποκτούν ένα σημαντικό πλεονέκτημα (Κολοβός κ.α 2000; Kolovos et al, 2002; Kolovos et al, 2005).

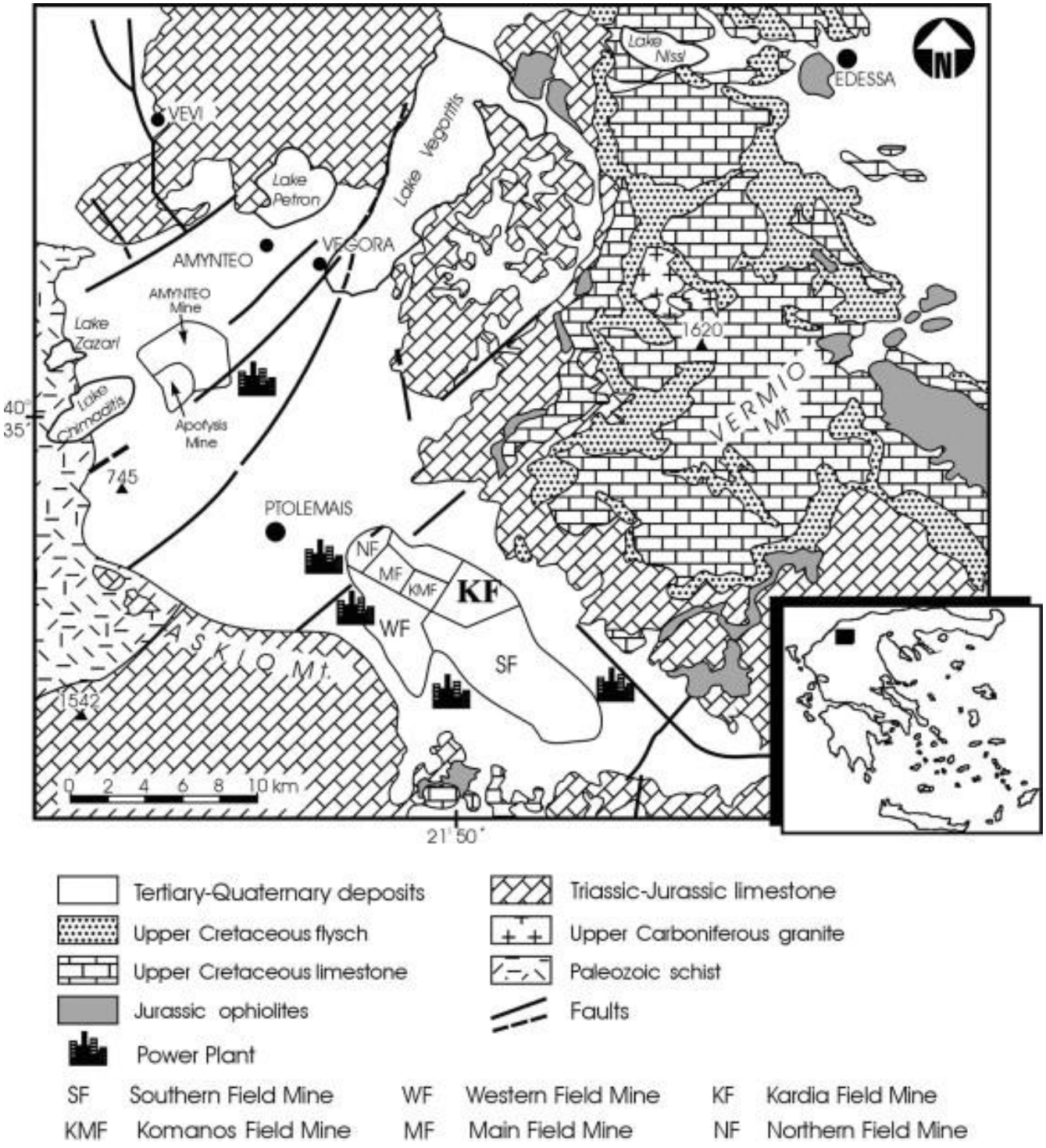
1.3.2 Λεκάνη Πτολεμαΐδας- Φλώρινας

Η λεκάνη της Πτολεμαΐδας αποτελεί μια τεκτονική τάφρο με προσανατολισμό ΒΒΔ-ΝΝΑ, προερχόμενη από την μετααλπική εφελκυστική τεκτονική που αναπτύχθηκε στις περιοχές της οπισθοτόξειας λεκάνης του τότε Ελληνικού ορογενούς. Τα ιζήματα της λεκάνης περικλείουν παλαιοζωικά μεταμορφωμένα πετρώματα και Μεσοζωικούς κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους (Παυλίδης, 1985; Pavlides and Moundrakis, 1987). Τα επεκτατικά ρήγματα που χαρακτηρίζουν την λεκάνη δημιούργησαν βυθίσματα και τάφρους τα οποία αποτέλεσαν τη βάση για τη δημιουργία αβαθών λιμνών και ελών. Ευνοϊκές κλιματικές συνθήκες οδήγησαν στην ανάπτυξη πλούσιας υδροχαρούς χλωρίδας, η συγκέντρωση της οποίας σε μεγάλες ποσότητες και η εναλλαγή της με γαιώδη υλικά, οδήγησε στο σχηματισμό των λιγνιτικών κοιτασμάτων τύπου «Ζέβρα». Τα κοιτάσματα αυτά χαρακτηρίζονται από πολυστρωματικότητα λιγνιτικών ενστρώσεων, ανάμεσα στις οποίες παρεμβάλλονται πολλές λεπτές ενδιάμεσες στείρες ενστρώσεις κυρίως αργιλικών, μαργαϊκών και αμμούχων σχηματισμών. Η μορφή αυτή του κοιτάσματος επιβάλλει την εκλεκτική εξόρυξη με καδοφόρο εκσκαφέα, κατά την οποία, αναπόφευκτα, λεπτές ενδιάμεσες στείρες ενστρώσεις συνεξορύσσονται με τις λιγνιτικές, υποβαθμίζοντας έτσι την ποιότητα του τελικού προϊόντος και επιβαρύνοντας τη διαδικασία της καύσης (Κολοβός κ.α, 2000; Κολοβός, 2001, Kolovos 2002; Kolovos et al, 2002).



Εικόνα 2. Λιγνιτικό κοίτασμα τύπου «ζέβρα», (ορυχείο Ν. Πεδίου).

Εικόνα 3. Λιγνιτικό κοίτασμα τύπου «ζέβρα», στιγμιότυπο κατά τη διαδικασία εξόρυξης με καδοφόρο εκσκαφέα, (ορυχείο Ν. Πεδίου).



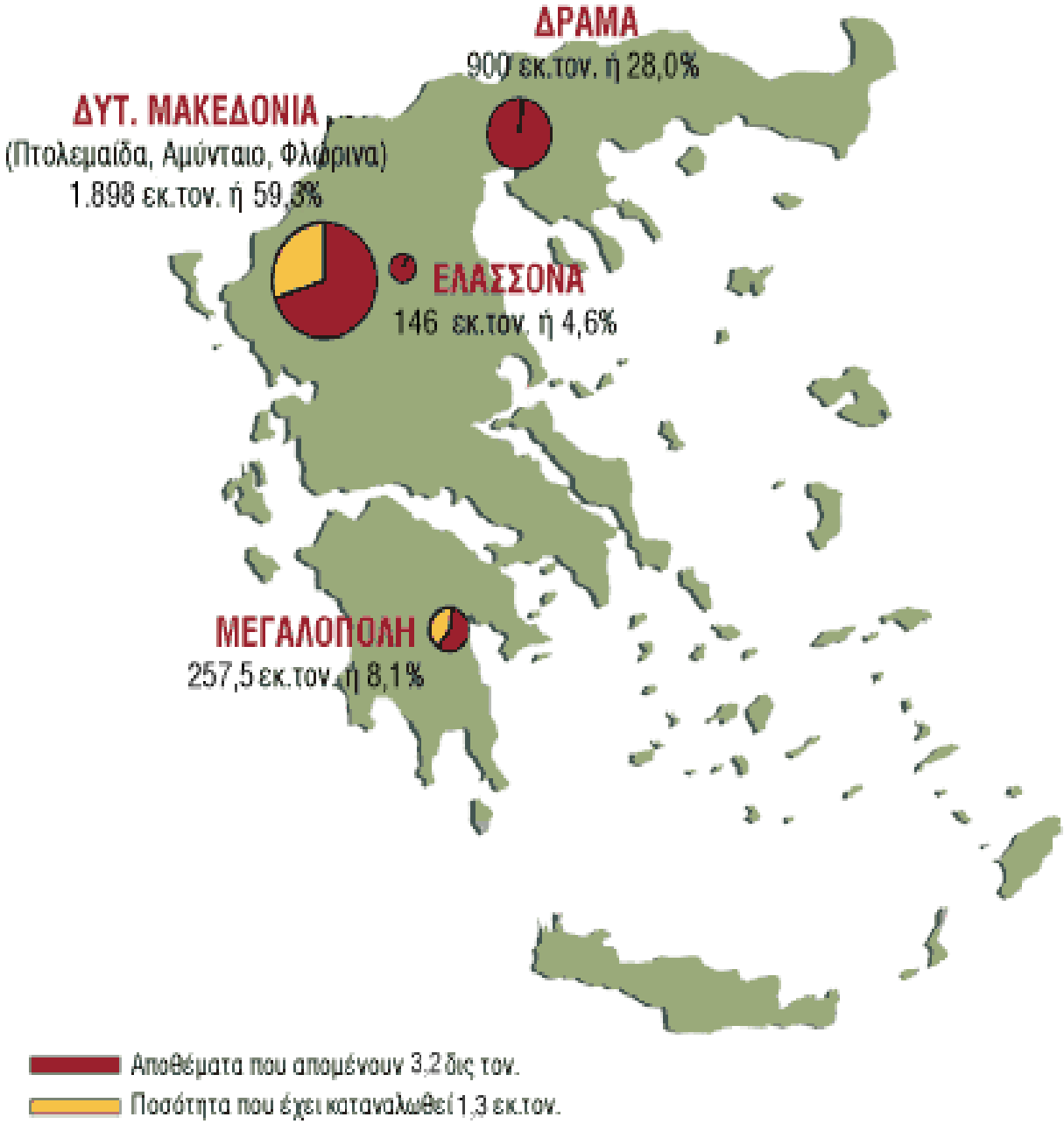
Εικόνα 4. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής (Iordanidis and Georgakopoulos, 2003).

1.3.3 Αξιοποίηση λιγνιτικών κοιτασμάτων

Στον Ελλαδικό χώρο απαντώνται αποκλειστικά κοιτάσματα χαμηλού βαθμού γαιανθράκων και συγκεκριμένα λιγνίτη και τύρφης. Η πρώτη σημαντική προσπάθεια αξιοποίησης αυτών των κοιτασμάτων ξεκίνησε το 1873 στο Αλιβέρι τη Εύβοιας. Σήμερα η παραγωγή λιγνίτη από τους Ατμοηλεκτρικούς Σταθμούς (ΑΗΣ) της ΔΕΗ καλύπτει έως και το 56% των αναγκών της χώρας σε ηλεκτρική ενέργεια και παράγεται από 7 ΑΗΣ σε όλη την Ελλάδα. Οι ΑΗΣ Πτολεμαΐδας, Αμυνταίου, Καρδιάς, Αγ. Δημητρίου και Μελίτης βρίσκονται στη Δυτική Μακεδονία και οι ΑΗΣ Μεγαλόπολης Α και Μεγαλόπολης Β στην Πελοπόννησο.

Τα συνολικά βεβαιωμένα γεωλογικά αποθέματα λιγνίτη στη χώρα ανέρχονται σε περίπου 5 δις. τόνους. Τα κοιτάσματα αυτά παρουσιάζουν αξιοσημείωτη γεωγραφική εξάπλωση στον ελληνικό χώρο. **Τα σημαντικότερα εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα λιγνίτη βρίσκονται στις περιοχές Πτολεμαΐδας, Αμυνταίου και Φλώρινας με υπολογισμένο απόθεμα 1,8 δις τόνους.** Στην περιοχή της Δράμας εντοπίζεται λιγνιτικό κοίτασμα με απόθεμα 900 εκ. τόνους και στην περιοχή Ελασσόνας με 169 εκ. τόνους. Επίσης στην Πελοπόννησο, στην περιοχή της Μεγαλόπολης, υπάρχει λιγνιτικό κοίτασμα με απόθεμα περίπου 223 εκ. τόνους.

Με βάση τα συνολικά εκμεταλλεύσιμα αποθέματα λιγνίτη της χώρας και τον προγραμματιζόμενο ρυθμό κατανάλωσης στο μέλλον, υπολογίζεται ότι τα αποθέματα αυτά επαρκούν για περισσότερο από 45 χρόνια. Μέχρι σήμερα οι εξορυχθείσες ποσότητες λιγνίτη φτάνουν περίπου στο 29% των συνολικών αποθεμάτων. Εκτός από λιγνίτη η Ελλάδα διαθέτει και ένα μεγάλο κοίτασμα Τύρφης στην περιοχή των Φιλίππων, Ανατολική Μακεδονία (Christanis et al,1998; Kalaitzidis and Christanis, 2002;).



Εικόνα 5. Συνολικά βεβαιωμένα αποθέματα λιγνίτη της Ελλάδας και ποσότητες αυτών (ΔΕΗ).

2. ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ

Κατά τη διαδικασία της καύσης των γαιανθράκων προκύπτει ένα άκαυστο λεπτά διαμερισμένο υπόλειμμα ανόργανης σύστασης που ονομάζεται τέφρα. Η τέφρα αυτή εμφανίζεται με δύο μορφές, την καταπίπτουσα τέφρα (bottom ash), που παραμένει στον πυθμένα της υψικαμίνου και την ιπτάμενη τέφρα (fly ash), που είτε διαφεύγει στην ατμόσφαιρα, είτε δεσμεύεται από τις εγκαταστάσεις αποκονίωσης (ηλεκτροστατικά φίλτρα).

Η ιπτάμενη τέφρα αποτελεί το 95% κ.β της συνολικής παραγόμενης ποσότητας τέφρας (Παπαγιάνη, 1981). Η ιπτάμενη τέφρα είναι ένα ετερογενές μείγμα συστατικών, η σύσταση του οποίου παρουσιάζει διακυμάνσεις ακόμα και σε τμήματα του ιδίου του κοιτάσματος λιγνίτη (Andriano et al, 1980). Η ορυκτολογική και χημική της σύσταση καθώς και οι φυσικοχημικές της ιδιότητες μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου και εξαρτώνται τόσο από τη σύσταση του κοιτάσματος λιγνίτη, όσο και από τη διαδικασία και τις συνθήκες της καύσης (Filippidis et al, 1992; Matsi, 1997). Οι ιδιότητες της τέφρας επηρεάζονται άμεσα από την επεξεργασία του λιγνίτη πριν από την καύση, τη θερμοκρασία της καύσης, τον χρόνο παραμονής του λιγνίτη και της ιπτάμενης τέφρας στην υψικάμινο, καθώς και από τους τρόπους δέσμευσής της, ώστε να μη διαφεύγει στην ατμόσφαιρα.

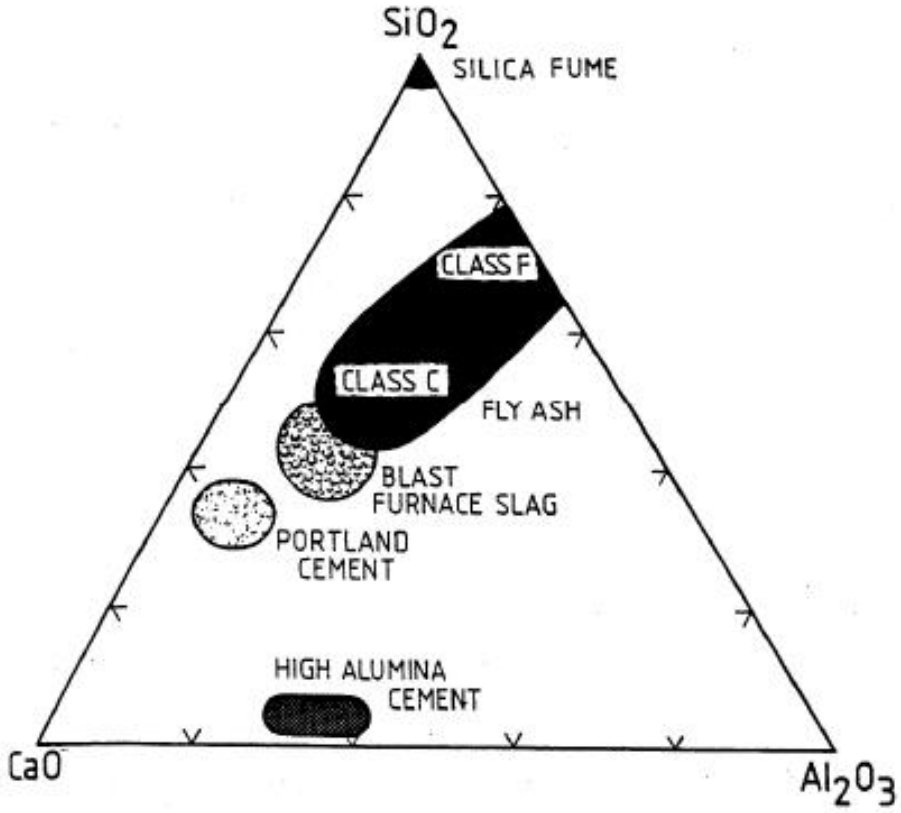
2.1 Τύποι της Ιπτάμενης τέφρας.

Η ιπτάμενη τέφρα με βάση τη χημική της σύσταση και τις ιδιότητες που αυτή της προσδίδει, διακρίνεται σε δύο τύπους:

$$\text{Τέφρα τύπου F : } SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 \geq 50\%$$

$$\text{Τέφρα τύπου C : } SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 \geq 70\%$$

Η βασική χημική διαφορά των δυο αυτών τύπων τέφρας σχετίζεται με την περιεκτικότητα τους σε οξείδιο του ασβεστίου (CaO). Η τέφρα τύπου F περιέχει μικρό ποσοστό οξειδίου του ασβεστίου (<5%) και είναι κυρίως αργιλοπυριτικής σύστασης (Dewey et al, 1994; Σταματάκης κ.α, 1997; Κούκουζας κ.α, 2000). Προέρχεται κυρίως από την καύση υψηλού βαθμού ανθράκων και εμφανίζει ποζολανικές ιδιότητες. Η τέφρα τύπου C είναι κυρίως ασβεσταργιλικής ή ασβεστοπυριτικής σύστασης και εμφανίζει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε οξείδιο του ασβεστίου (10-35%) , θειϊκό ασβέστιο ($CaSO_4$), οξείδιο του μαγνησίου (MgO), ενώ είναι πλούσια και σε υαλώδες υλικό με μεγάλη περιεκτικότητα σε ασβέστιο. Προέρχεται από την καύση χαμηλού βαθμού ανθράκων, κυρίως λιγνιτών και εμφανίζει υδραυλικές ιδιότητες (Naik T.R, 1991; Κούκουζας κ.α, 2000).



Διάγραμμα 1. Προβολή των ιπτάμενων τεφρών τύπου C και F με βάση τη χημική τους σύσταση, στο διάγραμμα SCM (Larry Sutter*, Class C and Class F Fly Ash: Comparisons, Applications, and Performance*, Michigan Technological University)

Οι ιπτάμενες τέφρες αποτελούνται από άμορφο αργιλοπυριτικό υλικό καθώς και από κρυσταλλικές φάσεις κυρίως χαλαζία (SiO_2), αστρίων $(Ca,Na)[(Si,Al)_4O_8]$–$(K,Na)[(Si,Al)_4O_8]$, μουλλίτη ($3Al_2O_32SiO_2$), άσβεστο (CaO), ασβεστίτη ($CaCO_3$), περικλάστου (MgO), γύψου ($CaSO_42H_2O$), ανυδρίτη ($CaSO_4$), γκελενίτη ($Ca2Al, AlSiO_7$), αιματίτη (Fe_3O_2) μαγνητίτη (Fe_3O_4), μοσχοβίτη ($KAl_2[(OH)_2/AlSi_3O_{10}]$) και ιλλίτη $(K,H_3O)Al_2[(OH,F)_2/(Si,Al)_4\ O_{10}]$. Οι ορυκτές φάσεις: χαλαζίας, άστριοι, ιλλίτης, γύψος και ασβεστίτης αποτελούν πρωτογενή ορυκτά του υλικού πριν από την καύση (λιγνίτης και συναπολαμβανόμενα), ενώ οι φάσεις αιματίτης, περίκλαστο, ανυδρίτης, γκελενίτης και το οξείδιο του ασβεστίου προκύπτουν μέσα από τις διεργασίες της καύσης ή κατά τη διαδικασία διαβροχής της τέφρας με νερό, ως δευτερογενή ορυκτά (Fillipidis and Georgakopoulos, 1992; Fillipidis et al 1996; Fillipidis et al 1997). Η ύπαρξη τις καθεμιάς φάσης στην τέφρα καθώς και η ποσοστιαία συμμετοχή της διαφέρει και εξαρτάται από τη χημική σύσταση του αρχικού υλικού, καθώς και από τις συνθήκες που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία της καύσης.

Η ακριβής γνώση της χημικής σύστασης, καθώς και της ορυκτολογίας της ιπτάμενης τέφρας είναι χρήσιμη για τη βέλτιστη αξιοποίηση της αλλά και για την ερμηνεία των μηχανισμών που προκαλούν τις σκωρίες και τις επικαθήσεις σε διάφορα τμήματα του μηχανολογικού εξοπλισμού της διαδικασίας ηλεκτροπαραγωγής, όπως για παράδειγμα τα ηλεκτροστατικά φίλτρα και οι υψικάμινοι.

2.2 Ιπτάμενη τέφρα των ελληνικών λιγνιτών

2.2.1 Χημική σύσταση, ορυκτολογία και μορφολογία

Η ελληνική ιπτάμενη τέφρα ανήκει στις ασβεστιτικές τέφρες τύπου C (ASTM C 618), καθότι εμφανίζει υψηλά ποσοστά CaO. Παρόλα αυτά, οι χημικές συστάσεις των τεφρών διαφέρουν, ανάλογα με τον ΑΗΣ από τον οποίο προέρχονται. Οι ιπτάμενες τέφρες των ατμοηλεκτρικών σταθμών Αγ. Δημητρίου, Καρδιάς και Πτολεμαΐδας εμφανίζουν υψηλά έως και πολύ υψηλά ποσοστά CaO (Georgakopoulos, 2003; Georgakopoulos et al, 2003) . Το ποσοστό του CaO στον παλαιό σταθμό ΛΙΠΤΟΛ ήταν από υψηλό έως μέσο, στο σταθμό του Αμυνταίου μέσο, ενώ πολύ χαμηλά ποσοστά έχουν μετρηθεί στο σταθμό Μελίτης. Η περιεκτικότητα σε SiO_2 της Ι.Τ. των σταθμών Αμυνταίου και της Μελίτης εμφανίζεται ως αρκετά υψηλή ενώ αυτή των υπολοίπων ΑΗΣ βρίσκεται σε χαμηλότερα επίπεδα. Το ίδιο ισχύει και για τα ποσοστά του Al_2O_3 καθώς και των υπόλοιπων οξειδίων. Στον σταθμό της Μελίτης το Al_2O_3 εμφανίζει εξαιρετικά υψηλές τιμές (Georgakopoulos, 2003; Georgakopoulos et al, 2003; Kostakis, 2008). Η περιεκτικότητα της ιπτάμενης τέφρας σε ιχνοστοιχεία καθώς και η επίδραση αυτών στα εδάφη και νερά των περιοχών που φιλοξενούν λιγνιτικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας αποτέλεσε για χρόνια αντικείμενο επιστημονικής μελέτης (Georgakopouls et al, 1994; Fillipidis et al 1996). Σύμφωνα με παλαιότερες έρευνες, η ιπτάμενη τέφρα των λιγνιτικών σταθμών της Β. Ελλάδας, παρουσιάζεται εμπλουτισμένη στα ιχνοστοιχεία Ag, As, B, Cd, Ge, Hg, Mo, Ni, Sb, Se και U σε σχέση με τον φλοιό της Γης (Georgakopoulos et al 1994; Georgakopoulos et al, 2002; Georgakopoulos, 2003).

Η ορυκτολογία των ελληνικών ιπτάμενων τεφρών εμφανίζει και αυτή διαφοροποιήσεις όπως καταδεικνύεται από πληθώρα ερευνών (Fillipidis and Georgakopoulos 1992; Kassoli-Fournaraki et al 1992; Georgakopoulos et al 1994; Fillipidis et al 1994; Μιχαηλίδης κ.α 2000; Georgakopoulos, 2003; Kantiranis et al, 2005; Kostakis, 2008). Οι τέφρες των σταθμών Αγ. Δημήτριος, Καρδιά, και Πτολεμαΐδα αποτελούνται κυρίως από άμορφο υλικό, ανυδρίτη, άσβεστο, γκελενίτη, αστρίους, χαλαζία, και σε πολύ μικρές ποσότητες από ασβεστίτη, αιματίτη, περίκλαστο και μοσχοβίτη. Οι κύριες φάσεις που εντοπίζονται στις τέφρες από το σταθμό του Αμυνταίου είναι χαλαζίας, άστριοι, γκελενίτης, ανυδρίτης, άσβεστος και αρκετό άμορφο υλικό. Τέλος, οι τέφρες από τη Μελίτη εμφανίζουν σημαντικές ορυκτολογικές διαφορές από τις τέφρες των υπόλοιπων ΑΗΣ αποτελούμενες κυρίως από υψηλά ποσοστά άμορφων φάσεων, μουλλίτη, αστρίους, χαλαζία, αιματίτη, μαγνητίτη και σπινέλιο (Georgakopoulos, 2003; Kantiranis et al, 2005; Kostakis, 2008).

Η μορφολογία των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας παρατηρείται μέσω της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας (Scanning Electron Microscopy). Το 70-88% των σωματιδίων της τέφρας αποτελείται από κενοφαιρίδια και πληροσφαιρίδια. Το πληροσφαιρίδιο είναι επί της ουσίας ένα κενοσφαιρίδιο μέσα στο

οποίο εγκλωβίζεται πληθώρα μικρότερων σφαιριδίων μεγέθους ≤1μm. Ο σχηματισμός αυτών των σφαιριδίων είναι το αποτέλεσμα συνεχών φυσικοχημικών αντιδράσεων που συντελούνται κατά τη διαδικασία της καύσης (Georgakopoulos et al, 1994; Georgakopoulos, 2003; Iordanidis et al 2008; Iordanidis, 2010).

2.2.2 Μέτρα παγίδευσης και παραγόμενες ποσότητες

Για να αποφευχθεί η διαφυγή των σωματιδίων τέφρας στην ατμόσφαιρα, έχουν εγκατασταθεί στους ΑΗΣ ηλεκτροστατικά φίλτρα. Τα ηλεκτροστατικά φίλτρα είναι ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις που παράγουν ηλεκτρικά πεδία στις οδούς διέλευσης των καυσαερίων, με αποτέλεσμα τη φόρτιση των σωματιδίων της τέφρας, τα οποία έλκονται από τα αντίθετα φορτισμένα ηλεκτρόδια και απομακρύνονται από τον όγκο των καυσαερίων. Η απόδοση των ηλεκτροστατικών φίλτρων επηρεάζεται από τη χημική σύσταση της τέφρας. Κατά την καύση του λιγνίτη παράγεται ένα ποσοστό ελεύθερου CaO, το οποίο επεμβαίνει στην αποτελεσματικότητα των ηλεκτροστατικών φίλτρων, καθώς αυξάνει την ηλεκτρική αντίσταση της τέφρας με αποτέλεσμα την αύξηση των εκπομπών στερεών σωματιδίων από τους ΑΗΣ

Εικόνα 6,7. Εγκαταστάσεις διαβροχής της ιπτάμενης τέφρας κατά τη μεταφορά της, (ΔΕΗ).

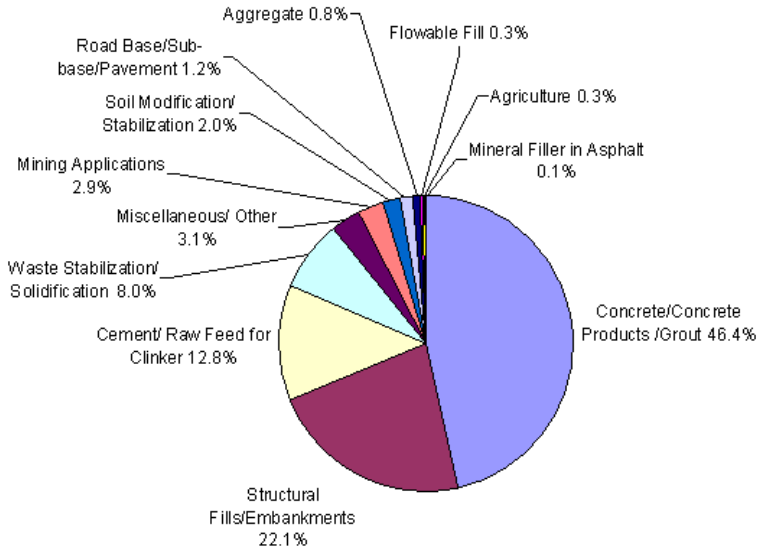
(Fillipidis et al, 1992; Fillipidis et al, 1996; Kassoli-Fournaraki et al, 1992). Επιπλέον, η υψηλή περιεκτικότητα της τέφρας σε ελεύθερο CaO δημιουργεί προβλήματα και στις εγκαταστάσεις αποκομιδής της τέφρας. Η αύξηση της θερμοκρασίας που συνοδεύει την ενυδάτωση του ελεύθερου CaO έχει ως συνέπεια την ξήρανση της διαβρεγμένης τέφρας, με αποτέλεσμα να απαιτούνται μεγάλες ποσότητες

νερού για να αποκτήσει η μεταφερόμενη τέφρα υγρασία 30%, όπως προβλέπεται από τους κανονισμούς (Κολοβός κ.α, 2000)

Κατά τη διάρκεια ενός έτους, από τις εγκαταστάσεις των ΑΗΣ της ΔΕΗ στην βόρεια Ελλάδα, παράγονται περίπου 12 εκατομμύρια τόνοι ιπτάμενης τέφρας. Στα ορυχεία του Λιγνιτικού Κέντρου Δυτικής Μακεδονίας συναποτίθενται μαζί με άγονα υλικά περίπου 8,6 εκατ. τόνοι τέφρας τον χρόνο (ΔΕΗ,2012).

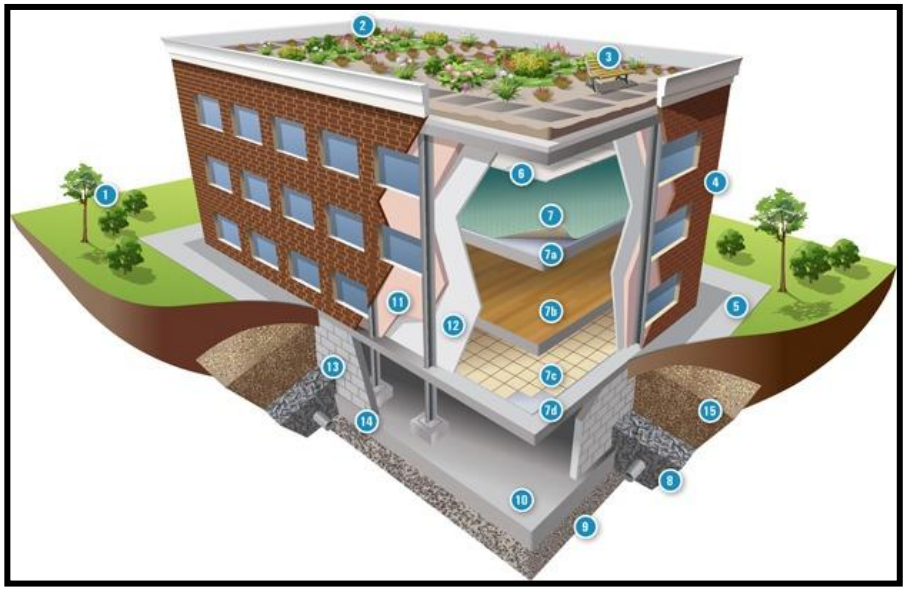
2.3 Εφαρμογές και δυνητικές χρήσεις

Λόγω του μικρού μεγέθους των σωματιδίων τους, αλλά και της ύπαρξης των πληροσφαιριδίων, οι ιπτάμενες τέφρες έχουν μεγάλη ειδική επιφάνεια και επομένως μεγάλη ικανότητα να συγκρατούν στοιχεία και να συμμετέχουν σε αντιδράσεις (Matsi, 1997; Kantiranis et al 2005). Η ικανότητα πρόσληψης της ελληνικής τέφρας και συγκεκριμένα των ΑΗΣ της Β. Ελλάδας κυμαίνεται από 89 έως 101 meq./100 g (Kantiranis et al, 2005). Η μονάδα μέτρησης meq/L αντιστοιχεί σε χιλιοϊσοδύναμα/λίτρο (milliequivalents per liter sample). Αυτές οι τιμές δείχνουν την ικανότητα της ιπτάμενης τέφρας να προσροφά ιόντα από υδατικά διαλύματα. Η εμφανιζόμενη δυνατότητα πρόσληψης της οφείλεται κυρίως στο άμορφο υλικό και τα μικροπορώδη ορυκτά (μαρμαρυγίες, άργιλοι) (Kantiranis et al, 2005). Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά των τεφρών προσδίδει τη δυνατότητα για αρκετές χρήσεις και εφαρμογές στην καθημερινότητα.



Εικόνα 8. Διάφορες εφαρμογές της ιπτάμενης τέφρας σε παγκόσμια κλίμακα (American Coal Ash Association,2006).

Μερικές από τις πλέον διαδεδομένες χρήσεις της είναι στην τσιμεντοβιομηχανία ως πρόσθετο βοηθητικό υλικό στο κλίνκερ, στην οδοποιία, στις θεμελιώσεις ως σταθεροποιητικό εδαφών, ενώ κατεργασμένη μπορεί να αξιοποιηθεί σε τεχνικά έργα (φράγματα, τοίχοι αντιστήριξης), για την παρασκευή προϊόντων σκυροδέματος (τσιμεντοσωλήνες, στραγγιστήρια, κυβόλιθοι κλπ), καθώς και στην κατασκευή σηράγγων ως πρόσθετο στο εκτοξευμένο σκυρόδεμα (Papayianni et al, 2005; Skodras et al, 2006). Μερικές από τις εφαρμογές της παρουσιάζονται παρακάτω (εικόνα 9).



1 2 Green Roofs & Landscaping

Green roofs are roofs covered with plants; they reduce storm runoff and provide insulation. Scrap tires can be used to make rubber tile for walkways. Bottom ash can be used as bedding material. Clean wood, recycled gypsum wallboard, and cardboard can be ground and used as soil amendments in both green roofs and landscaping applications.

3 Landscape Furniture

Benches can be made with plastic lumber containing fly ash or with recycled C&D wood.

4 Building Facing Material

Manufactured stone, which is concrete mixed with aggregates, is commonly used as building facing material. Fly ash can be used in the production of manufactured stone.

5 Sidewalks

Industrial materials can be used to make concrete sidewalks, and used tires can be recycled to create rubberized sidewalks. Asphalt concrete sidewalks can be made with recycled asphalt pavement and recycled asphalt shingles.

6 Ceiling Tile

Ceiling tile can contain flue gas desulfurization (FGD) gypsum (a material resulting from burning coal to produce electricity), fly ash, recycled gypsum wallboard, or air-cooled blast furnace slag.

7 Flooring

Industrial materials can be used in various flooring applications.

- **7a Carpet backing:** Used tires, fly ash, or recycled carpet.
- **7b Wood flooring:** Salvaged lumber or recycled wood.
- **7c Flooring tile:** Fly ash, blast furnace slag.
- **7d Tile underlayment:** Fly ash.

8 Backfill (Foundation Support)

Backfill surrounds the building foundation, supporting it and providing drainage. Scrap tires provide superior drainage, insulation, and wall pressure relief. Blast furnace slag and recycled concrete also can be used for drainage.

9 Foundation Structural Fill

Structural fill is an engineered fill that is constructed in layers and compacted to a desired density. Coal fly ash, bottom ash, slag, and spent foundry sand can all be used as structural fill. Concrete can be crushed and used onsite as structural fill.

10 Poured Concrete Foundation

Concrete, which is composed of cement, aggregate, and water, is used in a wide array of building applications. Industrial materials can be recycled in cement and concrete in many ways. Here are a few examples:

- Fly ash and ground granulated blast furnace slag can be used as partial cement replacements. Using these materials can produce stronger, longer-lasting concrete.
- Portland cement itself can be made with fly ash, FGD gypsum, foundry sand, recycled gypsum wallboard, blast furnace, and steel slag.
- Concrete aggregates can include bottom ash, foundry sand, crushed concrete, and blast furnace slag.

11 Insulation

Air-cooled blast furnace slag can be used to produce mineral or rock wool insulation (also known as slag wool insulation).

12 Drywall/Wallboard

FGD gypsum and recycled gypsum wall board can be used to manufacture drywall.

13 Mortars, Grouts, Stucco

Mortars, grouts, and stucco contain aggregate (sand), binder, and water. Fly ash, foundry sand, silica fume, and slag cement can all be used as partial cement replacements.

14 Masonry Blocks

Masonry blocks are made from cement and aggregate. Slag cement, fly ash, or silica fume can substitute partially for cement. Bottom ash, blast furnace slag, and recycled concrete aggregate can substitute for newly mined materials.

15 Base Material

Spent foundry sand can be used in place of natural soil as base material for the building site. In cold weather climates, this strategy can extend the construction season because foundry sands do not freeze as readily as most soils. Recycled concrete is also commonly used as base material.

Εικόνα 9. Εφαρμογές της ιπτάμενης τέφρας σε δομικά υλικά.

Η τέφρα των ελληνικών λιγνιτών εμφανίζει ορισμένα χαρακτηριστικά, εξαιτίας των οποίων δεν εμπίπτει στον υπάρχοντα ευρωπαϊκό κανονισμό για τις προδιαγραφές των δομικών υλικών (EN 206-1 και 2, EN 450-1 και 2). Το γεγονός αυτό καθιστά, σε ορισμένες περιπτώσεις, δύσκολη την αξιοποίησή της στις παραπάνω εφαρμογές. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι τα εξής (Παπαγιάννη, 1997):

- Ανομοιογένεια
- Υψηλή περιεκτικότητα σε CaO
- Κατά περιόδους υψηλή περιεκτικότητα σε θειϊκά
- Μικρό μέγεθος κόκκων (λεπτότητα)

2.3.1 Τσιμεντοβιομηχανία

Οι ιπτάμενες τέφρες ανήκουν στην κατηγορία των τεχνητών ποζολανών, δηλαδή των πυριτικών ή αργιλοπυριτικών υλικών που στη φυσική τους κατάσταση έχουν ασήμαντες υδραυλικές ιδιότητες, αλλά σε λεπτό διαμερισμό, παρουσία υγρασίας και σε συνήθεις θερμοκρασίες αντιδρούν χημικά με το υδροξείδιο του ασβεστίου σχηματίζοντας υλικά με υδραυλικές ιδιότητες (Dunstan et al, 1997; Δημητρούλα, 1997; Papayianni et al, 2005; Κούκουζας κ.α, 2000). Η χρήση της ιπτάμενης τέφρας στο τσιμέντο και σκυρόδεμα έγκειται στη βελτίωση αρκετών ιδιοτήτων του νωπού και του σκληρυμένου σκυροδέματος και στην αύξηση των αντοχών και της ανθεκτικότητάς του στο χρόνο (Tsimas et al, 2005; Κούκουζας κ.α, 2000). Παρότι η ελληνική ιπτάμενη τέφρα θεωρείται ότι παρουσιάζει αυξημένη περιεκτικότητα σε ραδιενεργή ακτινοβολία και συγκεκριμένα σε ^{226}Ra, έρευνες δείχνουν ότι το γεγονός αυτό δεν επηρεάζει την χρήση της ως πρόσθετο υλικό στα τσιμέντα εφόσον όμως η συμμετοχή της γίνεται σε περιορισμένες ποσότητες (Skodras et al, 2006).

Τα πλεονεκτήματα της προσθήκης ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα αντικαθιστώντας ποσοστό του τσιμέντου, συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα (Σταματάκης κ.α, 1997):

1. Αύξηση της θλιπτικής αντοχής.
2. Αύξηση εργασιμότητας και επεξεργασίας (μικροσκοπικά σωματίδια σφαιρικού σχήματος δημιουργούν ένα πιο ρευστό, ευκολότερο στο φινίρισμα σκυρόδεμα)
3. Αύξηση αντοχών.
4. Ελάττωση απόμειξης.
5. Αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος στην ύπαρξη πολλών θειικών.
6. Μείωση της απώλειας νερού στην επιφάνεια του σκυροδέματος.
7. Ελάττωση συστολών.
8. Ελάττωση θερμοκρασίας ενυδάτωσης.
9. Μείωση της διαπερατότητας/αύξηση της αντίστασης του σκυροδέματος στη διείσδυση νερού.
10. Ελάττωση της αντίδρασης μεταξύ τσιμέντου και δραστικών πυριτικών αδρανών
11. Είναι ευεργετική για το περιβάλλον.

Πίνακας 2. Πλεονεκτήματα που αποκτά το τσιμέντο με την προσθήκη Ι.Τ (Σταματάκης, 1997).

Οι ελληνικές ιπτάμενες τέφρες (υψηλού ασβεστίου-τύπου C) κατά την προσθήκη τους στο τσιμέντο αντιδρούν ταχύτερα και παρέχουν καλύτερη πρώιμη αντοχή (Naik T.R, 1991; Antiohos, 2004). Παρόλα αυτά, οι ιπτάμενες τέφρες τύπου C είναι γενικά λιγότερο αποτελεσματικές όσον αφορά στην καταστολή διαστολών λόγω αντιδράσεων μεταξύ αλκαλίων και διοξειδίου του πυριτίου (ASR) και στην καταστολή της αρνητικής επίδρασης των μεγάλων ποσοστών θειϊκών στο τσιμέντο, σε σύγκριση με τις τέφρες τύπου F. Βέβαια, η ύπαρξη θειϊκών στην ελληνική ιπτάμενη τέφρα μπορεί να αξιοποιηθεί ώστε να αντικατασταθεί η προσθήκη γύψου στο τσιμέντο Portland. Η γύψος προστίθεται στο τσιμέντο Portland σε ποσοστό έως και 5% προσφέροντάς του την απαραίτητη εργασιμότητα που χρειάζεται, ώστε να μην πήζει αυτόματα με την προσθήκη νερού (Dewey, 1994; Papadakis and Tsimas, 2005**). Στο ρόλο αυτόν μπορεί να αξιοποιηθούν τα θειϊκά που περιέχουν οι ελληνικές ιπτάμενες τέφρες με τη μορφή του ανυδρίτη** (Papadakis and Tsimas, 2005). Επίσης, πιστεύεται ότι η αντικατάσταση της πυριτικής φάσης από το ασβέστιο αυξάνει την αντιδραστικότητα των τεφρών C οδηγώντας στον σχηματισμό ασβεστοπυριτικών και ασβεσταργιλικών φάσεων χωρίς την παρουσία κάποιας εξωτερικής τροφοδοσίας σε ασβέστιο (Antiohos, 2004).

Στην ελληνική τσιμεντοβιομηχανία οι τέφρες χρησιμοποιούνται ως προσθετικό υλικό, ανάλογα με τον τύπο του τσιμέντου που παράγεται. Το μεγαλύτερο ποσοστό τέφρας, **9.5%** προστίθεται στο τσιμέντο τύπου II 32.5N. Η μονάδα 32.5N αναφέρεται στην αντοχή του τσιμέντου και δηλώνει ότι στις 28 μέρες το τσιμέντο αντέχει ασκούμενη δύναμη έως και 32.5 Newton. Στο τσιμέντο τύπου II 42.5N προστίθεται 4% τέφρα. Αντίστοιχα η μονάδα 42.5N δηλώνει ότι στις 28 μέρες το τσιμέντο αντέχει ασκούμενη δύναμη έως και 42.5 Newton. **Στα τσιμέντα τύπου I δεν προστίθεται τέφρα.** Τα ποσοστά αυτά παρουσιάζουν μικρές αυξομειώσεις εξαρτώμενες από τα αποτελέσματα των δοκιμών αντοχής που γίνονται στα τσιμέντα. Τα τσιμέντα τύπου I αποτελούν τσιμέντα υψηλής αντοχής και ποιότητας. Γι' αυτόν το λόγο δεν προστίθεται τέφρα σε αυτά. Τα τσιμέντα τύπου II απευθύνονται σε εφαρμογές που απαιτούν μικρότερες αντοχές γι' αυτό και η προσθήκη τέφρας σε μικρά ποσοστά δεν επηρεάζει την ποιότητά τους.

2.3.2 Κατασκευές

Παρά τη μεγάλη διαθεσιμότητά τους και το σχετικά χαμηλό κόστος παραγωγής, οι ιπτάμενες τέφρες εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται στον κατασκευαστικό τομέα με εξαιρετική επιφυλακτικότητα. Αυτό είναι το αποτέλεσμα της εγγενούς μεταβλητότητάς τους, αλλά και της ποικιλομορφίας που χαρακτηρίζει τις μεθόδους επεξεργασίας που εφαρμόζονται παγκοσμίως. Η πλειονότητα των διαδικασιών επεξεργασίας στοχεύει στην απομάκρυνση των πιο χονδρών κλασμάτων της ιπτάμενης τέφρας, καθώς αυτά συνήθως είναι πλούσια σε ανεπιθύμητο υπολειμματικό άνθρακα και επιπλέον θεωρούνται λιγότερο δραστικά (ή ακόμη και χημικά αδρανή) στο περιβάλλον τσιμέντου. Εν τούτοις, τα ίδια κλάσματα εμπλουτίζονται συνήθως με διοξείδιο του πυριτίου το οποίο αποτελεί τον κύριο φορέα των ποζολανικών αντιδράσεων (Antiohos et al, 2005).

Η ιπτάμενη τέφρα με τη συμμετοχή της στο σκυρόδεμα συνεισφέρει στη μείωση του κόστους και στην παραγωγή φτηνού σκυροδέματος (Papayianni et al, 2012). Μια από τις χρήσεις που αξιοποιείται το χαμηλού κόστους και ποιότητας σκυρόδεμα, είναι στα οδοστρώματα. Η ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιείται στο σκυρόδεμα αυτού του είδους ως υδραυλικό συνδετικό σε συνδυασμό με αδρανή (Papayianni et al, 2012).

Η ανθεκτικότητα των δομών σκυροδέματος επηρεάζεται έντονα από τη διείσδυση χλωριούχων ιόντων. Μια σχετικά ανέξοδη μέθοδος για τη μείωση του πορώδους και της διαπερατότητας του σκυροδέματος και επομένως για την προστασία του οπλισμένου σκυροδέματος από την προσβολή του με χλωριούχα άλατα είναι η χρήση βιομηχανικών παραπροϊόντων ή αποβλήτων ως αντικατάσταση τσιμέντου κατά τη διάρκεια της κατασκευής του σκυροδέματος (Chousidis et al,2016). Η ενσωμάτωση της ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα οδηγεί σε βελτιωμένη απόδοση του σκυροδέματος λόγω της παραγωγής του C-S-H.

3. ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν τρία δείγματα ιπτάμενης τέφρας από τρείς διαφορετικούς λιγνιτικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας της Β. Ελλάδας. Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε στους σταθμούς Αγ. Δημητρίου, Αμυνταίου και Καρδιάς, τον Φεβρουάριο του 2016 από την οποία προέκυψαν τρία δείγματα (AD,AM,KAR), ένα από τον κάθε σταθμό.

Οι ερευνητικές εργασίες περιλάμβαναν:

- Κοκκομετρικό διαχωρισμό των δειγμάτων και ταξινόμηση των διαφορετικών κλασμάτων.
- Μελέτη της μορφολογίας και χημική ανάλυση κύριων στοιχείων των διαφορετικών κοκκομετρικών κλασμάτων με τη μέθοδο της Ηλεκτρονικής μικροσκοπίας (SEM).
- Προσδιορισμό της ορυκτολογίας με περιθλασιμετρία ακτίνων-Χ (XRD).
- Δοκιμές διόγκωσης.

3.1 Κοκκομετρικός διαχωρισμός

Τα τρία δείγματα που συλλέχθηκαν αρχικά ζυγίστηκαν και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε φούρνο στους 80^{o}C, ώστε να εξατμιστεί και να υπολογιστεί η υγρασία που πιθανόν περιέχεται σε αυτά. Τα συγκεκριμένα δείγματα λόγω του ότι αποτελούν προϊόντα καύσης περιείχαν ελάχιστη έως μηδενική ποσότητα υγρασίας.

Στη συνέχεια, περίπου 100 gr από το κάθε δείγμα αδειάστηκαν μέσα σε κόσκινο με διάμετρο βροχίδων 2mm κάτω από το οποίο υπήρχε ένας δίσκος. Αφού κοσκινίστηκε για 10’ κατόπιν χωρίστηκε το υλικό που έμεινε μέσα στο κόσκινο από το υλικό που έμεινε στο δίσκο. Στα συγκεκριμένα δείγματα λόγω μικρής κοκκομετρίας, δεν έμεινε σημαντική ποσότητα υλικού στο κόσκινο των 2mm. Το υλικό που έμεινε μέσα στο δίσκο πέρασε μέσα από μία σειρά κόσκινα με διαφορετική διάμετρο βροχίδων, με το ανώτερο να έχει διάμετρο βροχίδων 500μm και το κατώτερο 45μm. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν 8 κόσκινα με τις εξής διαμέτρους:

- Κόσκινο 1φ: διάμετρος βροχίδων 500μm
- Κόσκινο 1.5φ: διάμετρος βροχίδων 350μm
- Κόσκινο 2φ: διάμετρος βροχίδων 250μm
- Κόσκινο 2.5φ: διάμετρος βροχίδων 175μm
- Κόσκινο 3φ: διάμετρος βροχίδων 125μm
- Κόσκινο 3.5φ: διάμετρος βροχίδων 95μm
- Κόσκινο 4φ: διάμετρος βροχίδων 63μm
- Κόσκινο 4.5φ: διάμετρος βροχίδων 45μm

- Δίσκος Βάσης: υλικό με μέγεθος κόκκων <45μm

Κάτω από τα κόσκινα τοποθετήθηκε **δίσκος βάσης** και όλη η σειρά μεταφέρθηκε σε δονητή, που τέθηκε σε λειτουργία για 15-20'. Στη συνέχεια τα κόσκινα ανοίχθηκαν από αυτά με τη μεγαλύτερη διάμετρο προς αυτά με τη μικρότερη και αδειάστηκε το περιεχόμενο του καθενός σε ένα καθαρό χαρτί. Το υλικό του κάθε κόσκινου ζυγίστηκε και το κάθε βάρος αντιστοιχήθηκε στο αντίστοιχο μέγεθος. Στο τέλος ζυγίστηκε και το περιεχόμενο του δίσκου βάσης της σειράς των κοσκίνων, ο οποίος περιείχε τα υλικά με μέγεθος κόκκων μικρότερο από 45μm. Ακολούθησε ο υπολογισμός των ποσοστών κατά βάρος για κάθε κλάσμα και το συνολικό ποσοστό των δύο τελευταίων κλασμάτων (4, 4.5φ) και του δίσκου βάσης.

3.2 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο (SEM)

Η μορφολογία των κόκκων καθώς και η χημική τους σύσταση μελετήθηκε σε όλα τα κλάσματα που προέκυψαν από τον κοκκομετρικό διαχωρισμό των τριών δειγμάτων. Χρησιμοποιήθηκε σαρωτικό ηλεκτρονικό μικροσκόπιο του Α.Π.Θ, τύπου JEOL JSM-840, εφοδιασμένου με μικροαναλυτή LINK AN 10000 EDS, σε δοκίμια επικαλυμμένα με άνθρακα (carbon coated samples).

3.3 Περιθλασιμετρία ακτίνων-Χ (XRD)

Η ορυκτολογική σύσταση των τριών δειγμάτων τέφρας, καθώς και το ποσοστό του άμορφου υλικού που περιέχεται σε αυτά, υπολογίστηκε με τη μέθοδο της PXRD (powdered X-ray diffraction). Χρησιμοποιήθηκε περιθλασίμετρο Philips PW 1710, με χρήση ακτινοβολίας i-filtered CuKa, σε τυχαία προσανατολισμένα δείγματα. Η σάρωση έγινε σε γωνία 2θ 3-63^{o}, με ταχύτητα σάρωσης 1.2^{o}/min. Τα ποσοστά των ορυκτολογικών φάσεων που υπολογίστηκαν βασίστηκαν στην ένταση των επιμέρους ανακλάσεων, την πυκνότητα και τους συντελεστές απορρόφησης μάζας των στοιχείων στην ακτινοβολία CuKa.

3.4 Δοκιμές διόγκωσης

Στα τρία δείγματα ιπτάμενης τέφρας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές διόγκωσης σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM C 114 και C 311.

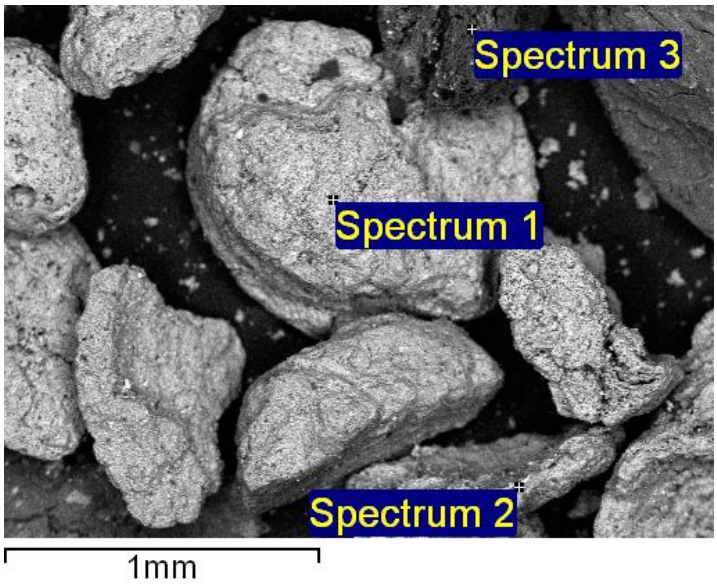
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.1 Μορφολογία ιπτάμενης τέφρας και χημικές αναλύσεις

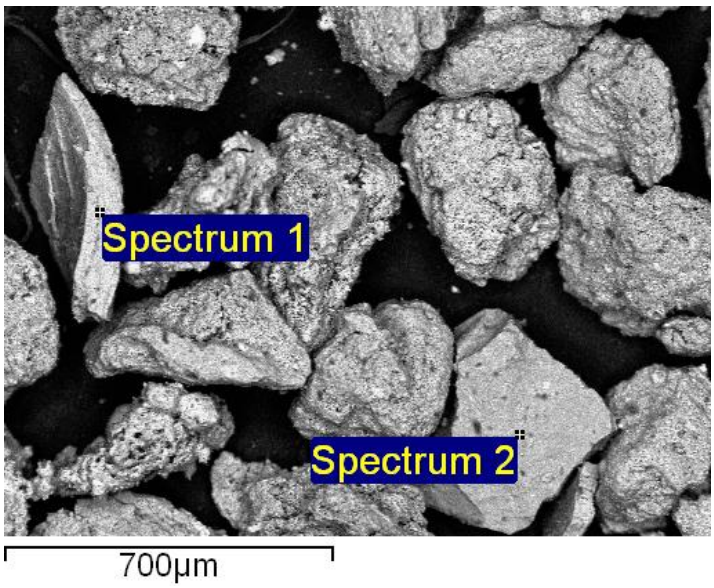
Η μορφολογία των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας μελετήθηκε συνδυαστικά με τις χημικές αναλύσεις. Οι διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται και στις χημικές αναλύσεις αλλά και στη μορφολογία αναπτύσσονται ξεχωριστά για το κάθε δείγμα και στο τέλος γίνεται αναφορά στις διαφοροποιήσεις που εντοπίζονται ανά δείγμα.

4.1.1 Ιπτάμενη Τέφρα ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου

Η γενική εικόνα της μορφολογίας των σωματιδίων της τέφρας του ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου δομείται από **πληροσφαιρίδια** (φωτογραφίες 7,11,15,17) και **κενοσφαιρίδια** (φωτογραφίες 3,19), κυρίως αποτελούμενα από πυριτικό περίβλημα, τα οποία, είτε βρίσκονται πληρωμένα με πολύ μικρότερης διαμέτρου σφαιρίδια (<5μm), είτε έχουν κολλημένα στο περίβλημά τους τα μικρότερα αυτά σφαιρίδια. Επίσης, από τις φωτογραφίες γίνεται αντιληπτό πως τα σωματίδια της τέφρας εμφανίζουν την ικανότητα να δημιουργούν **συσσωματώματα** δίνοντας πολλές φορές την εντύπωση ύπαρξης μεγαλύτερης κοκκομετρίας σωματιδίων (φωτογραφίες 5,9,13). Τα συσσωματώματα αυτά, είναι στην ουσία πολλά μικρότερα σωματίδια που κόλλησαν μεταξύ τους κατά τη διαδικασία της καύσης. Επιπλέον, σημαντικό χαρακτηριστικό αποτελεί η έντονη διαβάθμιση στο μέγεθός των σωματιδίων της τέφρας. Συχνή είναι η εικόνα κατά την οποία παρατηρούμε σε πρώτο πλάνο κάποιο πληροσφαιρίδιο ή συσσωμάτωμα σφαιριδίων και στο φόντο πληθώρα, κατά πολύ μικρότερου μεγέθους σωματιδίων, τα οποία είναι δύσκολο να μελετηθούν ακόμη και με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (φωτογραφίες 13,15). Από χημικής άποψης, η ιπτάμενη τέφρα του ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου θα μπορούσε να χαρακτηριστεί **ασβεστοπυριτική** (πίνακες 5,6,9,10,11), καθώς κυριαρχούν, όπως φαίνεται από τις αναλύσεις, τα οξείδια του Si και του Ca.



Φωτο.1: Κόκκοι τέφρας μεγέθους >500μm.



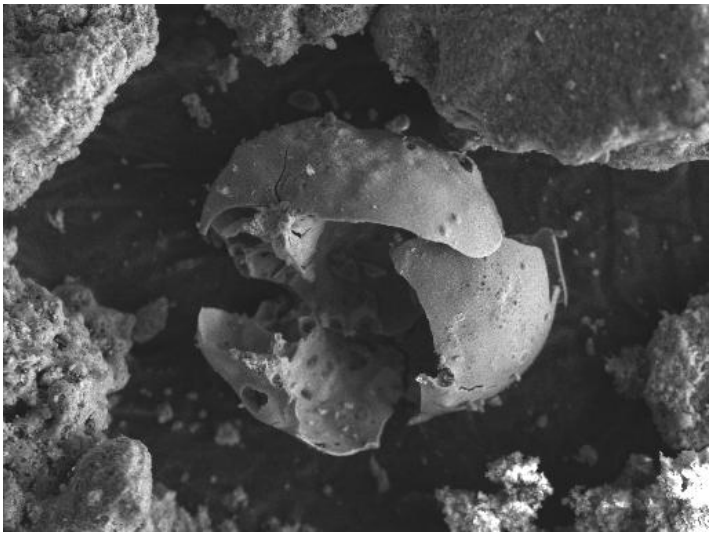
Φωτο.2: Κόκκοι τέφρας μεγέθους <350μm. Οι κόκκοι που φαίνεται να ξεπερνούν αυτό το μέγεθος είναι επιμήκεις και περνούν από το κόσκινο με τη μικρή τους διάμετρο.

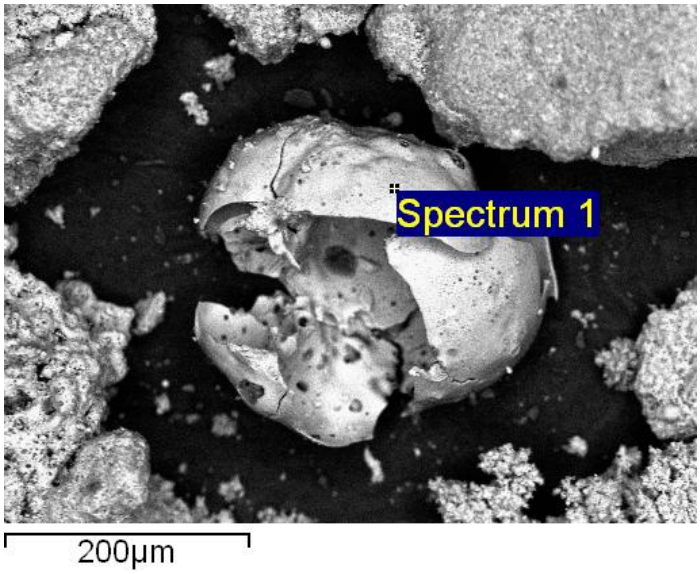
Οξείδια	Spectrum 1 (%)	Spectrum 2(%)	Spectrum 3(%)
Na_2O	0.16	0.14	0
MgO	1.25	2.45	0.79
Al_2O_3	11.9	25.59	2.89
SiO_2	28.3	53.56	0
P_2O_5	2.81	0.87	0
SO_3	18.92	2.19	21.18
K_2O	3.14	1.84	0.88
CaO	30.7	5.17	67.2
TiO_2	0.84	0.93	0
MnO	0	0.12	0.97
FeO	2.19	7.14	6.76

Πίνακας 3. Χημική ανάλυση της φωτογραφίας 1.

Οξείδια	Spectrum 1(%)	Spectrum 2(%)
Na_2O	0.24	0.04
MgO	1.22	0.74
Al_2O_3	1.33	5.29
SiO_2	2.4	85.31
P_2O_5	0	0.53
SO_3	8.2	0.97
K_2O	0.26	0.72
CaO	85.37	4.82
TiO_2	0.67	0.08
MnO	0	0
FeO	0.59	1.78

Πίνακας 4. Χημική ανάλυση της φωτογραφίας 2.

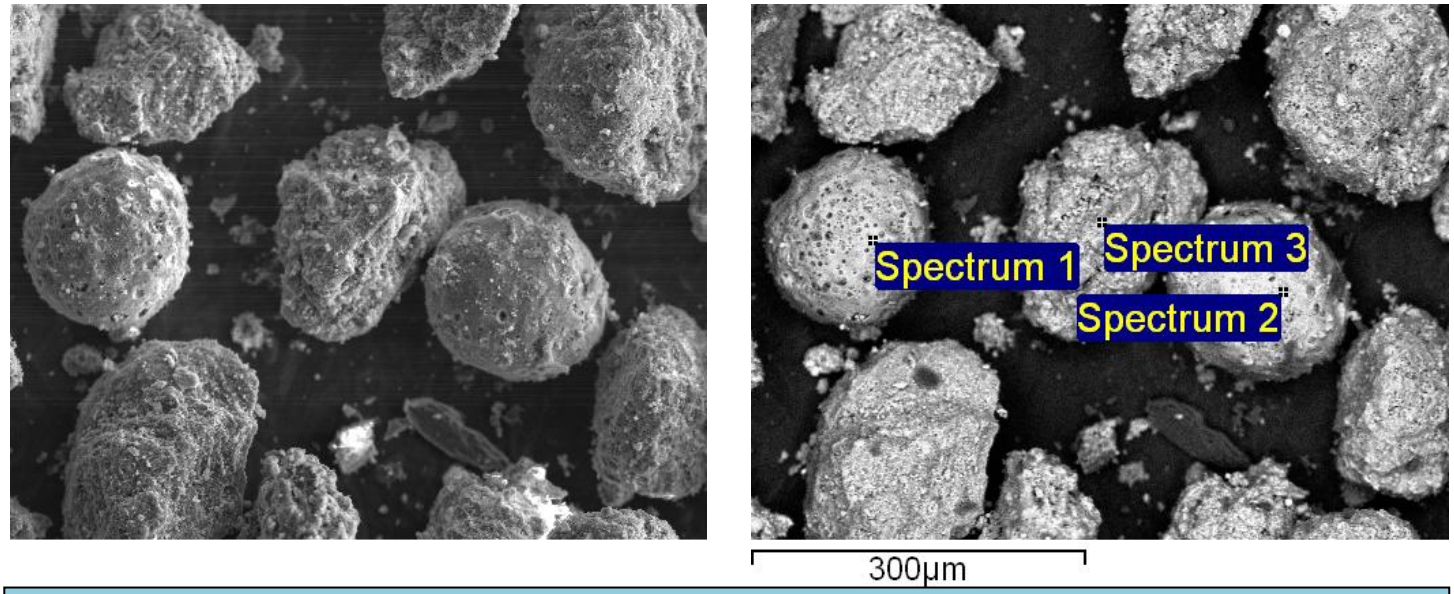




Φωτο.3,4: Κενοσφαιρίδιο μεγέθους <250μm. Πρόκειται για πυριτικής σύστασης περίβλημα το οποίο έσκασε κατά τη διαδικασία της καύσης λόγω των υψηλών θερμοκρασιών.

Οξείδια	Spectrum 1(%)
Na_2O	0
MgO	14.1
Al_2O_3	17.38
SiO_2	43.29
P_2O_5	0
SO_3	0.94
K_2O	2.8
CaO	1.42
TiO_2	1.31
MnO	0.42
FeO	18.5

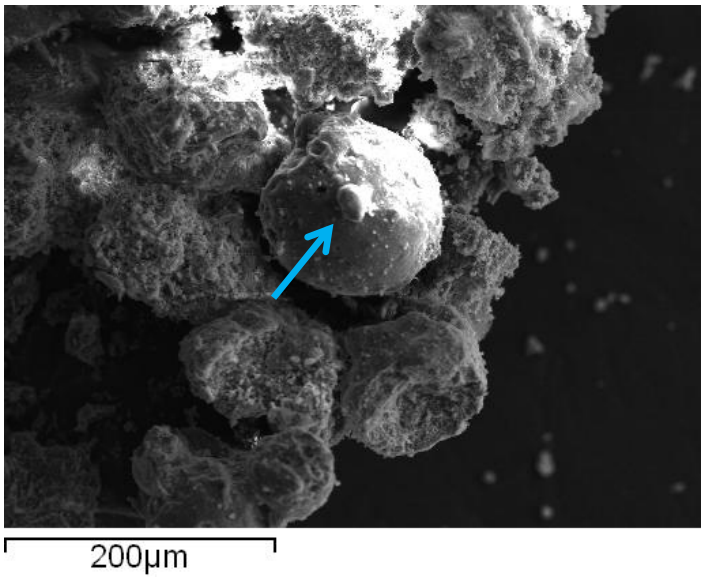
Πίνακας 5. Χημική Ανάλυση της φωτογραφίας 4.



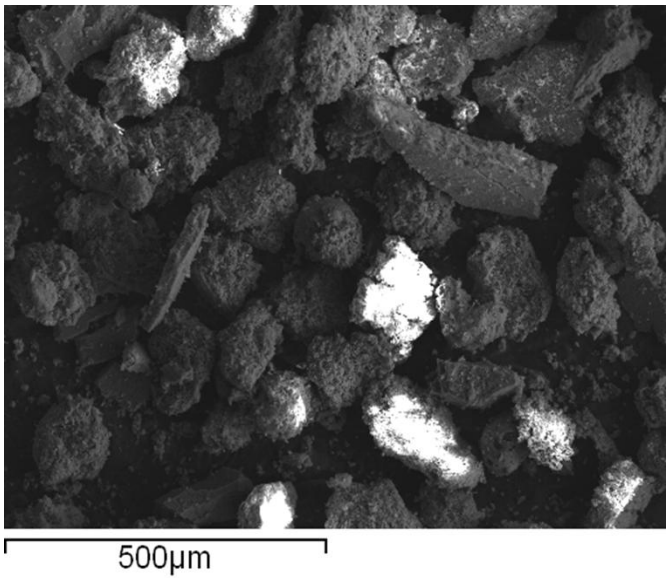
Φωτο.5,6: Χαρακτηριστική εικόνα σφαιριδίων και συσσωματωμάτων τέφρας μεγέθους <200μm.

Οξείδια	Spectrum 1(%)	Spectrum 2 (%)	Spectrum 3 (%)
Na_2O	0.3	0.14	0.21
MgO	3.71	5.54	4.01
Al_2O_3	20.8	27.08	22.94
SiO_2	49.3	44.88	44.9
P_2O_5	0.48	0.04	0.38
SO_3	0	0.45	1.16
K_2O	1.17	0.65	3.1
CaO	15.24	16.32	6.11
TiO_2	1.87	0.53	4.48
MnO	0.09	0	0.35
FeO	7.18	4.45	12.34

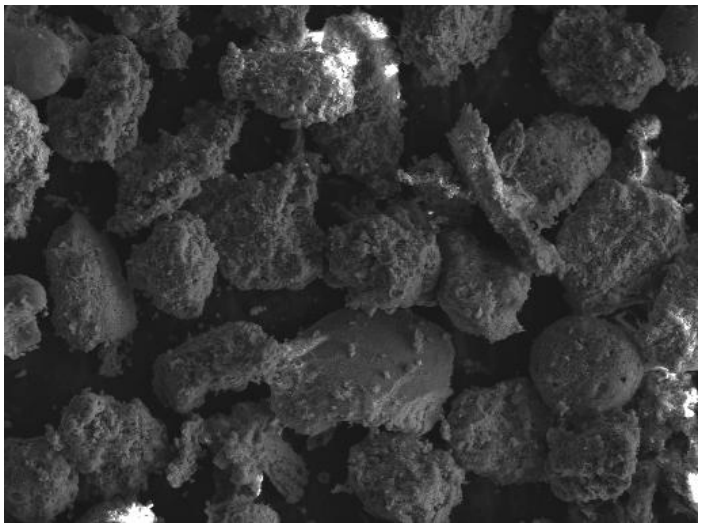
Πίνακας 6. Χημική ανάλυση της φωτογραφίας 6.

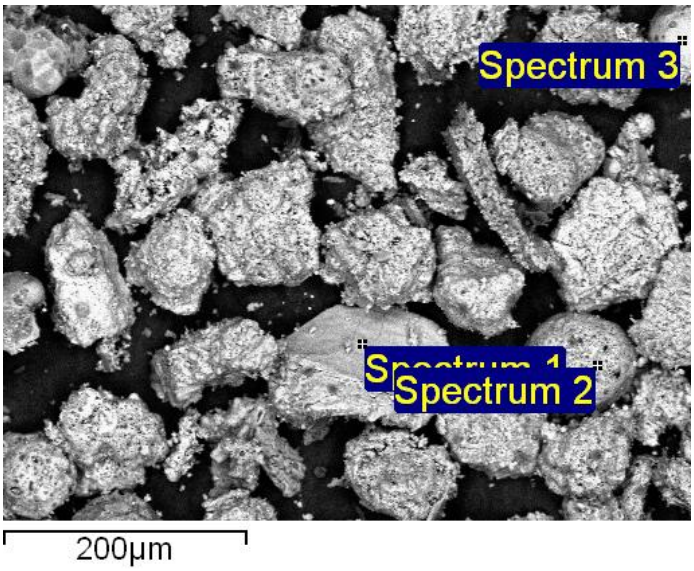


Φωτο.7: Πιθανό πληροσφαιρίδιο με πυριτικό περίβλημα, πάνω στο οποίο επικάθονται μικρότερου μεγέθους σφαιρίδια (βέλος). Η χημική σύσταση έδειξε κυρίως την παρουσία των στοιχείων Si και Ca.



Φώτο.8: Γενική εικόνα συσσωματωμάτων τέφρας μεγέθους <125μm. Οι κόκκοι που φαίνεται να ξεπερνούν αυτό το μέγεθος είναι επιμήκεις και περνούν από το κόσκινο με τη μικρή τους διάμετρο.

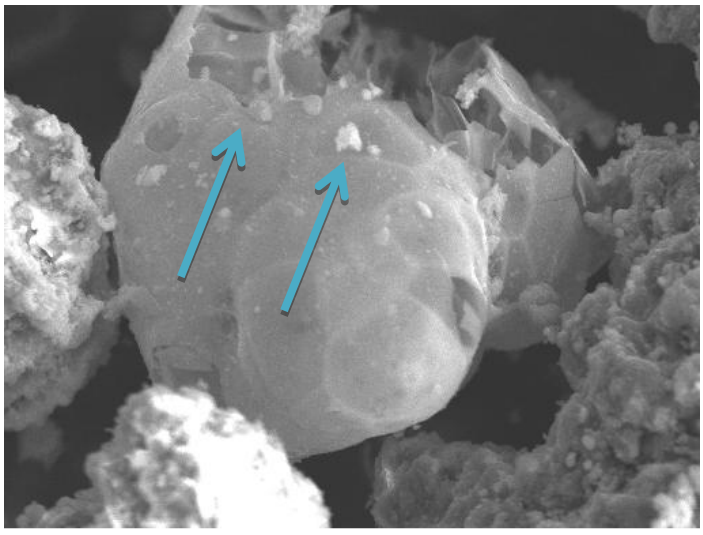


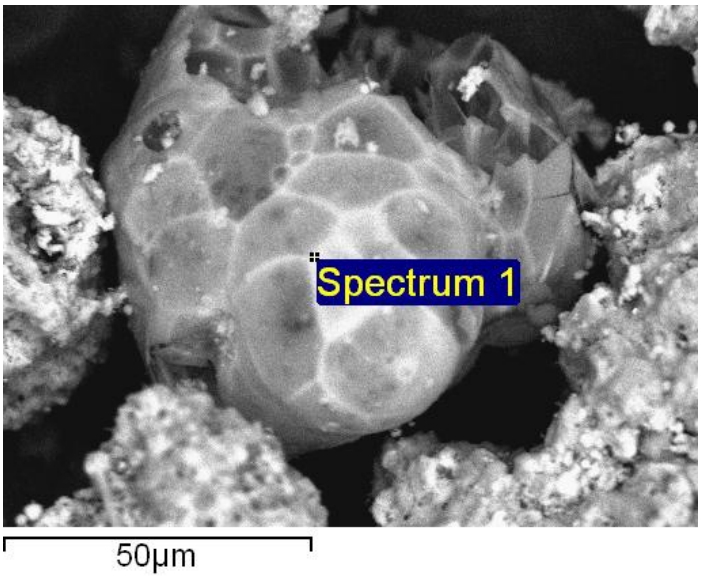


Φωτο.9,10: Χαρακτηριστική εικόνα σφαιριδίων και συσσωματωμάτων τέφρας μεγέθους <100 μm.

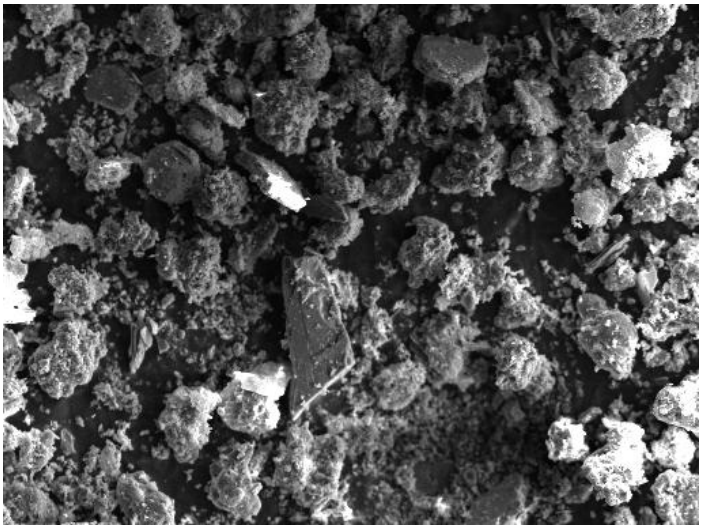
Οξείδια	Spectrum 1(%)	Spectrum 2(%)	Spectrum 3(%)
Na_2O	0.09	0.58	0
MgO	0.17	5.57	5.53
Al_2O_3	0.02	26.82	17.64
SiO_2	0.21	47.2	38.85
P_2O_5	0.05	0.37	0.47
SO_3	2.12	1.88	0.24
K_2O	0.5	5.71	1.27
CaO	93.65	7.74	26.55
TiO_2	0.81	0.57	0.91
MnO	1.45	0	0.01
FeO	0.93	3.63	8.58

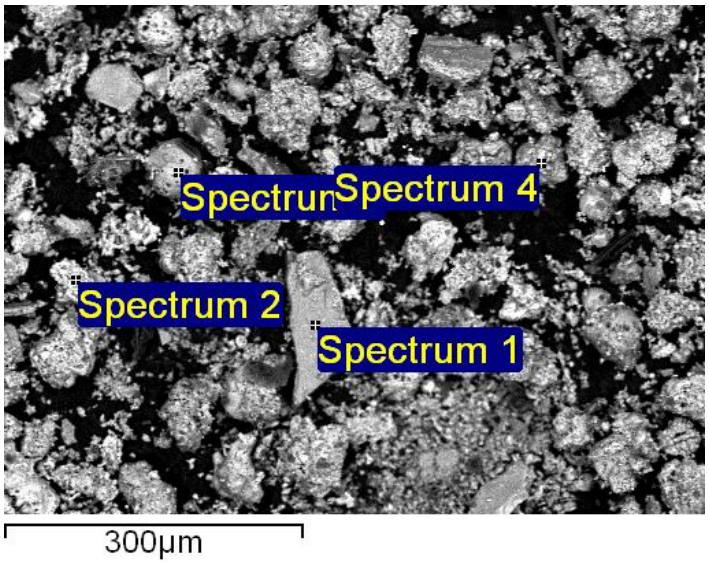
Πίνακας 7. Χημική ανάλυση των σημείων 1,2,3 της φωτογραφίας 10.





Φωτο.11,12: Τυπική εικόνα πληροσφαιριδίου που έσκασε απελευθερώνοντας καυτά αέρια και μικρότερου μεγέθους σφαιρίδια που βρίσκονταν στο εσωτερικό του (βέλη). Στην φωτογραφία απεικονίζεται το πυριτικό περίβλημα που απέμεινε.

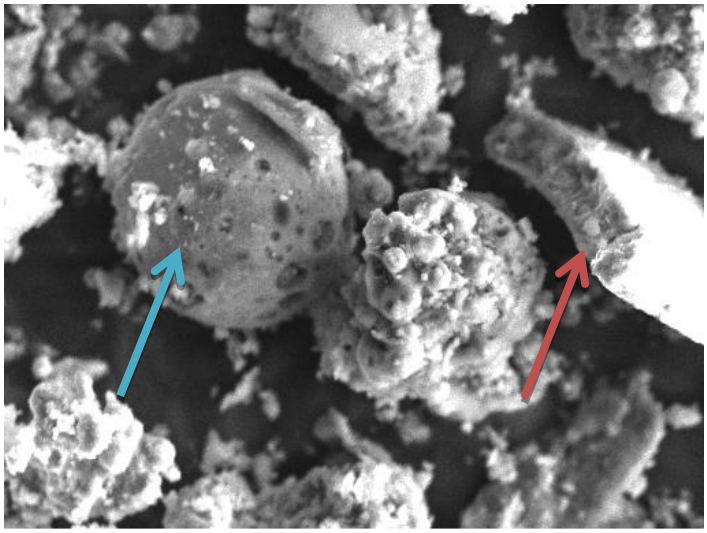


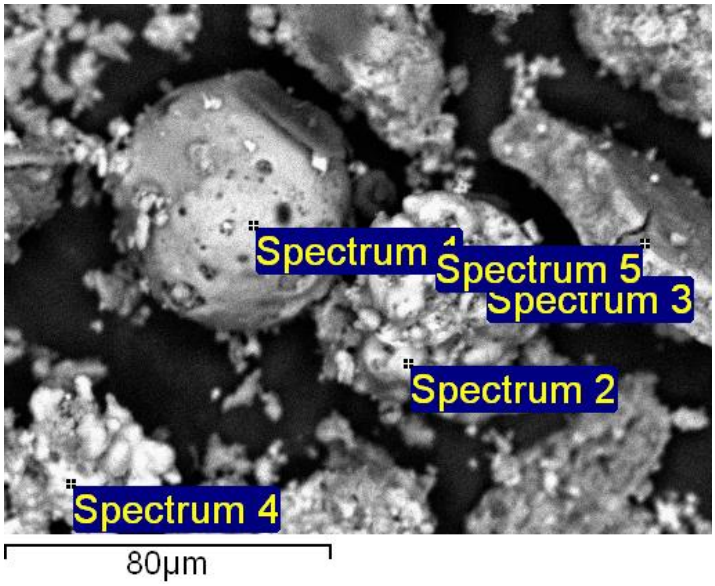


Φωτο.13,14: Γενική εικόνα συσσωματωμάτων και σφαιριδίων τέφρας μεγέθους <60μm. Διακρίνονται στο φόντο μικρότερα σφαιρίδια, πιθανόν εισπνεύσιμου μεγέθους.

Οξείδια	Spectrum 1(%)	Spectrum 2(%)	Spectrum 3(%)	Spectrum 4(%)
Na2O	4.88	0	0.1	0
MgO	0.34	4.06	3.83	1.43
Al2O3	23.69	2.84	18.81	13.06
SiO2	62.48	4.71	54.25	53.35
P2O5	0	0.43	0.69	0
SO3	0.07	10.59	0	2.02
K2O	0.99	-0.02	1.99	1.59
CaO	7.19	70.55	14.22	21.9
TiO2	0	0	0.38	0.63
MnO	0.26	0	0.22	0
FeO	0.5	7.45	5.83	6.9

Πίνακας 8. Χημική ανάλυση σημείων 1,2,3,4 της φωτογραφίας 13.

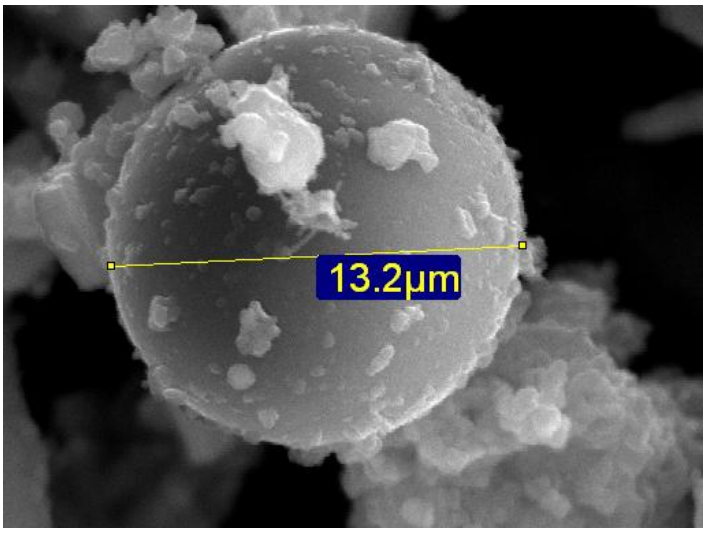


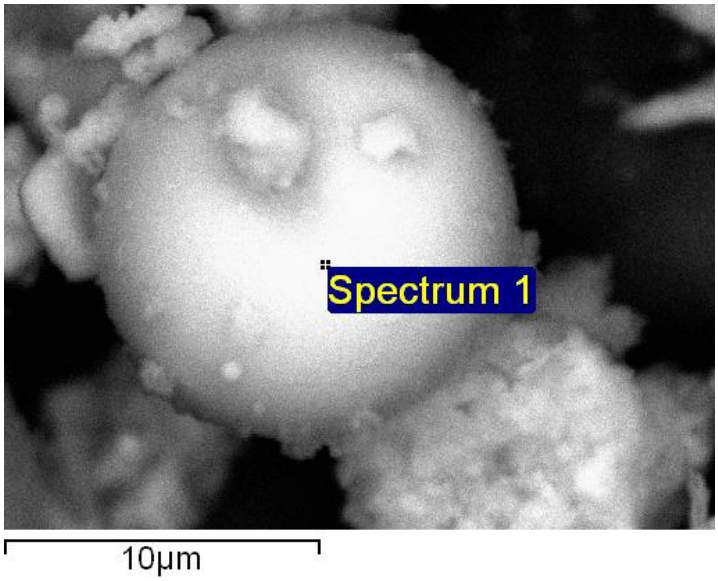


Φωτο.15,16: Πιθανό πληροσφαιρίδιο μεγέθους <80μm (βέλος μπλε). Στο φόντο της εικόνας επικρατούν συσσωματώματα μικρότερων σφαιριδίων, καθώς και μια πιθανή ορυκτή φάση ασβεστίτη (βέλος κόκκινο).

Οξείδια	Spectrum 1(%)	Spectrum 2(%)	Spectrum 4(%)	Spectrum 5(%)
Na_2O	0.05	0.14	0.01	0
MgO	3.78	4.2	1.61	0.73
Al_2O_3	18.61	11.03	2.97	4.01
SiO_2	52.29	36.54	1.51	5.09
P_2O_5	0.16	0.08	0	0.23
SO_3	1.44	0.22	2.47	15.68
K_2O	2.33	0.19	0.36	0.22
CaO	16.27	43.93	80.87	72.97
TiO_2	0.59	0.2	0	0.31
MnO	0	0	0.23	0
FeO	4.74	3.5	10.71	1.14

Πίνακας 9. Χημική ανάλυση των σημείων 1,2,4,5 της φωτογραφίας 16.

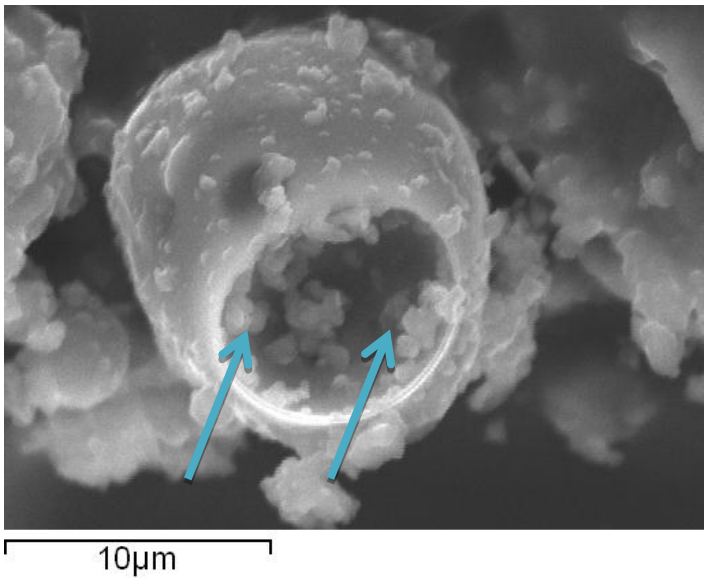


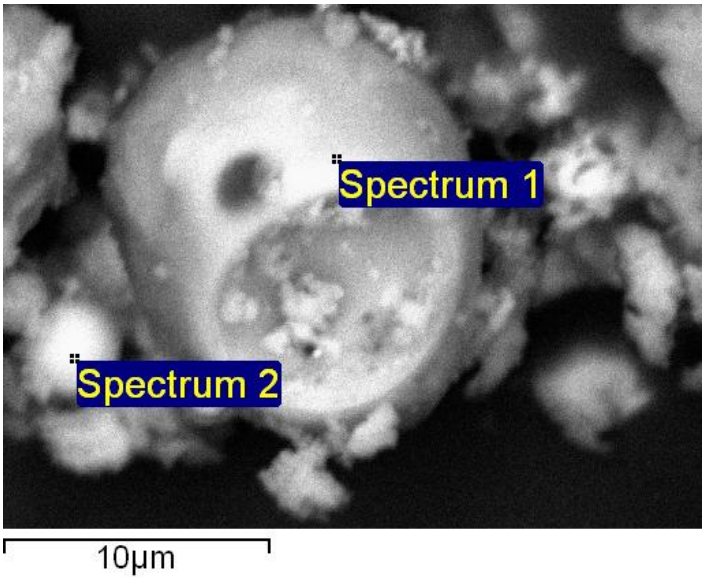


Φωτο.17,18: Πληροσφαιρίδιο τέφρας οριακά εισπνεύσιμου μεγέθους με μικρότερα σφαιρίδια κολλημένα επάνω στο περίβλημά του.

Οξείδια	Spectrum 1(%)
Na_2O	0.13
MgO	2.97
Al_2O_3	13.27
SiO_2	38.31
P_2O_5	0.09
SO_3	0.03
K_2O	1.34
CaO	25.79
TiO_2	0.17
MnO	0
FeO	17.94

Πίνακας 10. Χημική ανάλυση του σημείου 1 της φωτογραφίας 18.

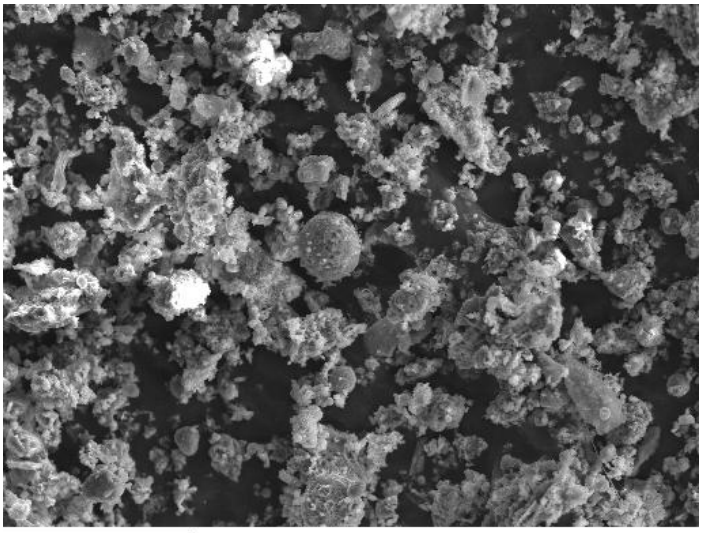




Φωτο.19,20: Χαρακτηριστική εικόνα κενοσφαιριδίου εισπνεύσιμου μεγέθους(≈10μm). Με βέλη υποδεικνύονται τα μικρότερου μεγέθους σφαιρίδια που απελευθερώνονται από το εσωτερικό του.

Οξείδια	Spectrum 1(%)
Na_2O	0
MgO	6.96
Al_2O_3	19.5
SiO_2	35.24
P_2O_5	0
SO_3	0.83
K_2O	1.37
CaO	28.56
TiO_2	1.12
MnO	0.22
FeO	6.43

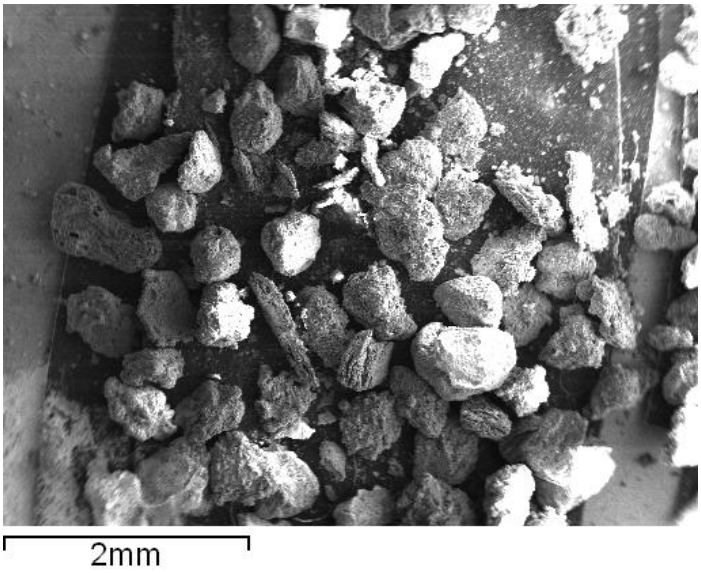
Πίνακας 11. Χημική ανάλυση του σημείου 1 της φωτογραφίας 20.



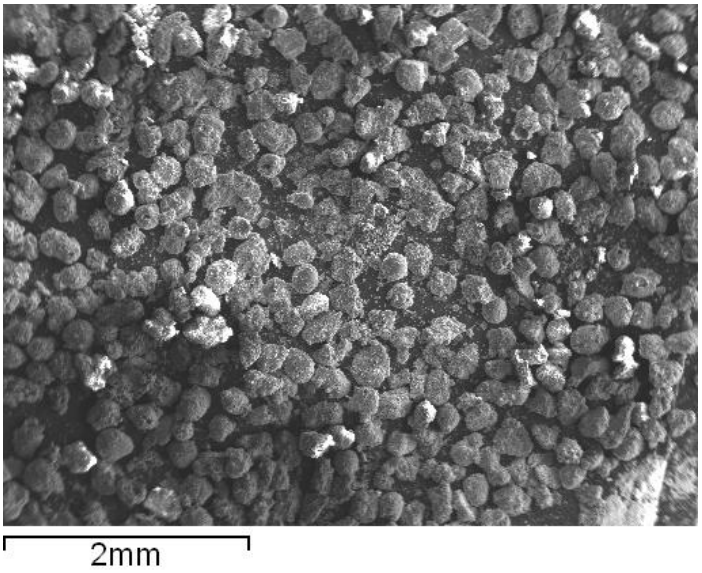
Φωτο.21: Γενική εικόνα σφαιριδίων και συσσωματωμάτων τέφρας μεγέθους ≤50μm. Εντοπίζονται πολλά από αυτά σε εισπνεύσιμα μεγέθη.

4.1.2 Ιπτάμενη Τέφρα ΑΗΣ Αμυνταίου

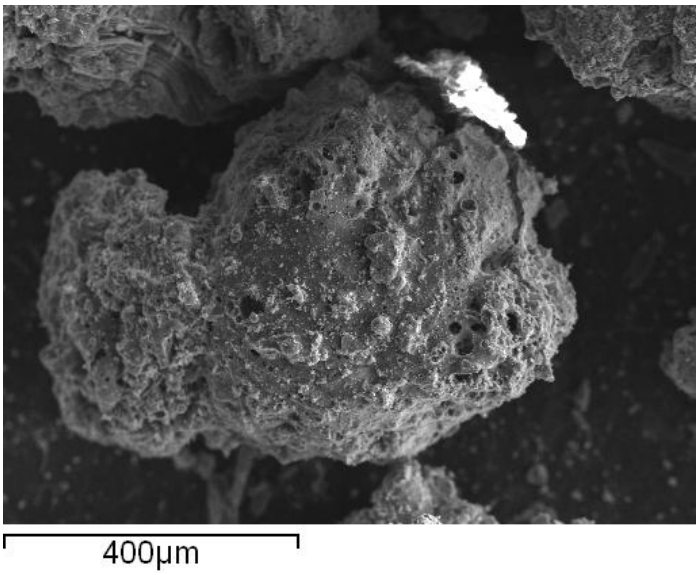
Τα σωματίδια της ιπτάμενης τέφρας του ΑΗΣ Αμυνταίου αποτελούνται από καλοσχηματισμένα **πληροσφαιρίδια** (φωτογραφίες 27,30,31,33) και **κενοσφαιρίδια** (φωτογραφία 47), με χαρακτηριστικό, **πυριτικής σύστασης περίβλημα** (φωτογραφίες 27,33,47) το οποίο συναντάται και στα τρία δείγματα, αλλά εντονότερα στην τέφρα του Αμυνταίου. Όπως και στην τέφρα Αγ. Δημητρίου, έτσι και στο Αμύνταιο εντοπίζουμε μικρότερης κοκκομετρίας σφαιρίδια να επικάθονται σε μεγαλύτερης διαμέτρου κόκκους, καθώς και πληθώρα από τα χαρακτηριστικά **συσσωματώματα** (φωτογραφίες 22,23,24) σφαιριδίων τέφρας. Ξεχωριστό μορφολογικό χαρακτηριστικό της τέφρας Αμυνταίου αποτελούν οι **ινώδεις ορυκτές φάσεις** πυριτικής σύστασης (χαλαζίας), οι οποίες εμφανίζονται αρκετά συχνά και σε μεγέθη που ποικίλλουν (φωτογραφίες 35,38,40,41,42). Επιπλέον, **εντοπίζονται εντυπωσιακές δομές απολιθωμάτων**,(φωτογραφίες 45,46,49) που λόγω της πυριτικής τους σύστασης δεν επηρεάστηκαν από τη διαδικασία της καύσης. Από χημικής άποψης, η τέφρα του ΑΗΣ Αμυνταίου θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως η πιο πυριτική, καθώς περιέχει την **υψηλότερη περιεκτικότητα σε οξείδιο του Si** (πίνακες 14,17,19) από τα υπόλοιπα δείγματα. Επιπλέον, παρουσιάζονται και **υψηλά ποσοστά οξειδίου του Fe** (φωτογραφία 26) υποδηλώνοντας την ύπαρξη αιματίτη.

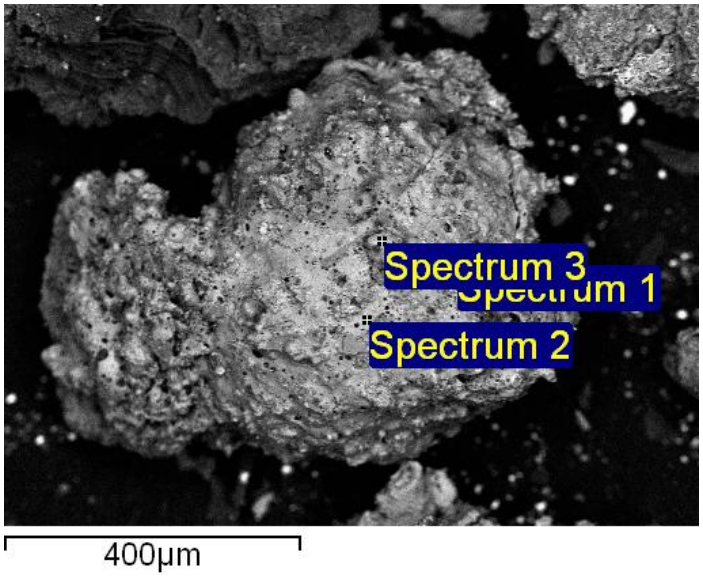


Φωτο.22: Χαρακτηριστική εικόνα συσσωματωμάτων τέφρας και άκαυστου λιγνίτη μεγέθους >500μm



Φωτο.23: Γενική εικόνα συσσωματωμάτων και σφαιριδίων τέφρας μεγέθους <200μm.

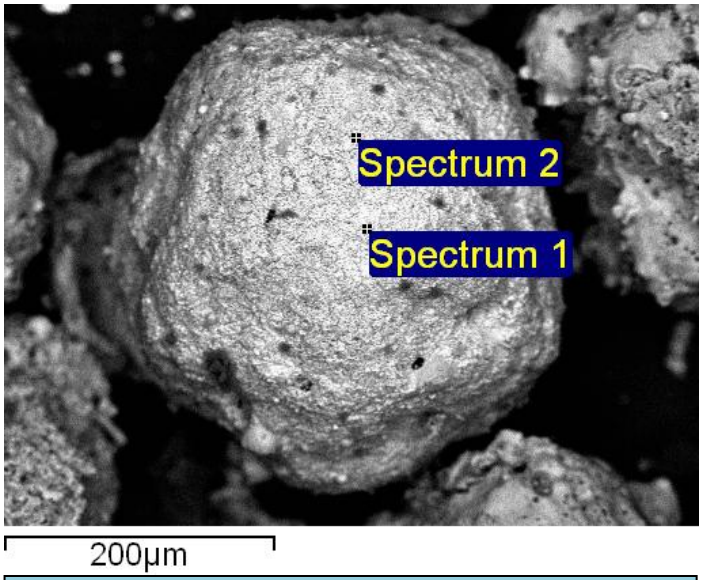




Φωτο.24.25: Συσσωμάτωμα κόκκων τέφρας, που προκύπτει λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται κατά την καύση

Οξείδια	Spectrum 1(%)	Spectrum 2(%)	Spectrum 3(%)
Na_2O	9.37	0.64	0.99
MgO	0.58	2.78	1.35
Al_2O_3	19.7	13.08	16.69
SiO_2	66.07	43.2	59.82
SO_3	0.44	0.74	1.22
K_2O	0.78	1.7	5.46
CaO	2.15	29.67	11.14
TiO_2	0.04	0.85	1.14
MnO	0.03	0.4	0.2
FeO	0.83	6.93	2.01

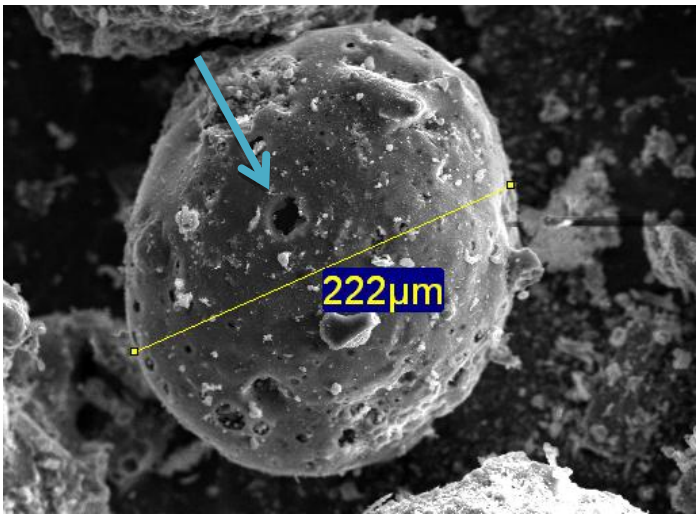
Πίνακας 12. Χημική ανάλυση των σημείων 1,2,3 της φωτογραφίας 25.

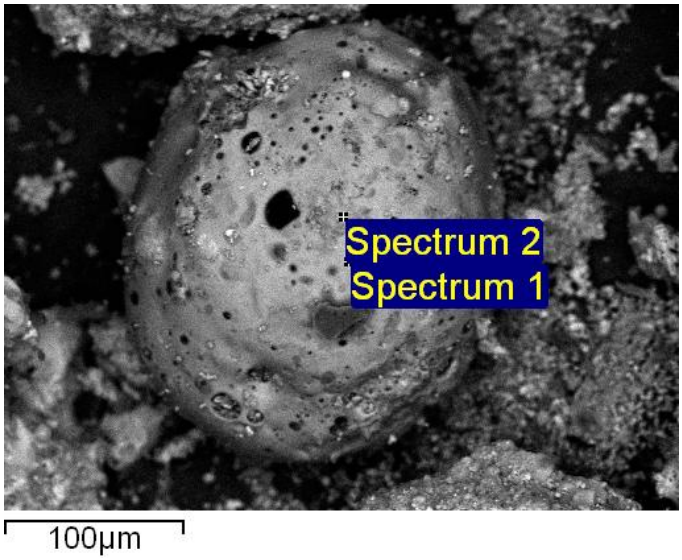


Φωτο.26: Συσσωμάτωμα σφαιρικής μορφής με παρουσία αιματίτη (αυξημένο FeO)

Οξείδια	Spectrum 1(%)	Spectrum 2(%)
Na_2O	1.51	0.97
MgO	1.9	1.8
Al_2O_3	6.53	7
SiO_2	20.29	26.24
SO_3	0.7	1.02
K_2O	0.39	0.24
CaO	10.83	11.54
TiO_2	0.12	0.22
MnO	0.12	0
FeO	57.61	51.01

Πίνακας 13. Χημική ανάλυση των σημείων 1,2 της

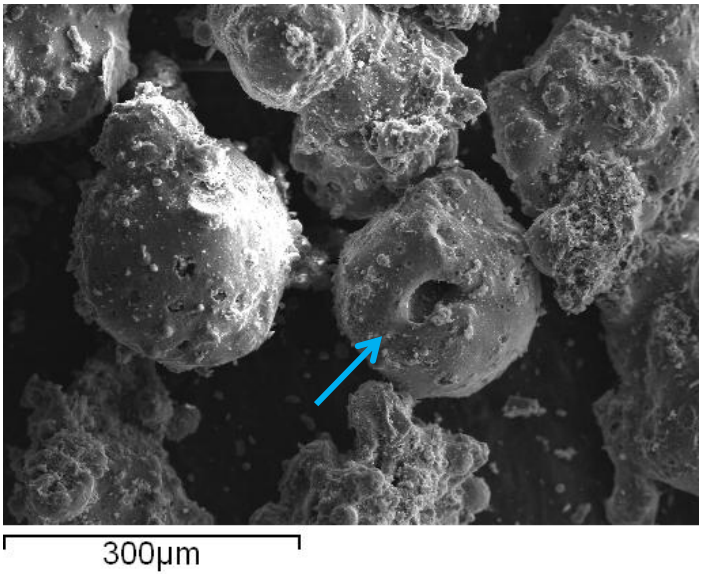




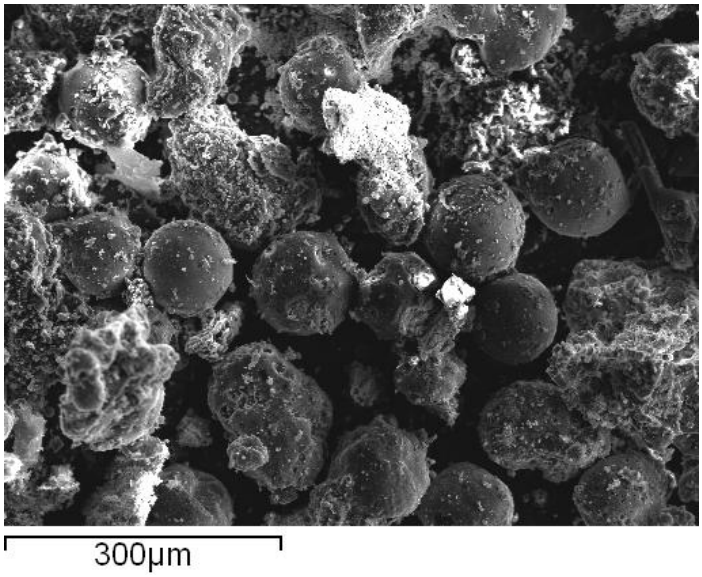
Φωτο.27,28: Πιθανό πληροσφαιρίδιο με πυριτικό περίβλημα και μικρότερα σφαιρίδια κολλημένα στην επιφάνειά του. Λόγω οπής (βέλος) στο περίβλημά του πιθανολογείται ότι έχουν ήδη απελευθερωθεί κατά τη διαδικασία της καύσης, τα αέρια και τα μικρότερα σφαιρίδια που περιείχε.

Οξείδια	Spectrum 1(%)	Spectrum 2(%)
Na_2O	0.64	0.65
MgO	3.1	3.08
Al_2O_3	13.54	10.84
SiO_2	44.41	57.54
SO_3	0.33	0.78
K_2O	2.31	3.8
CaO	21.91	17.09
TiO_2	1.1	0.61
MnO	0.48	0
FeO	12.19	5.64

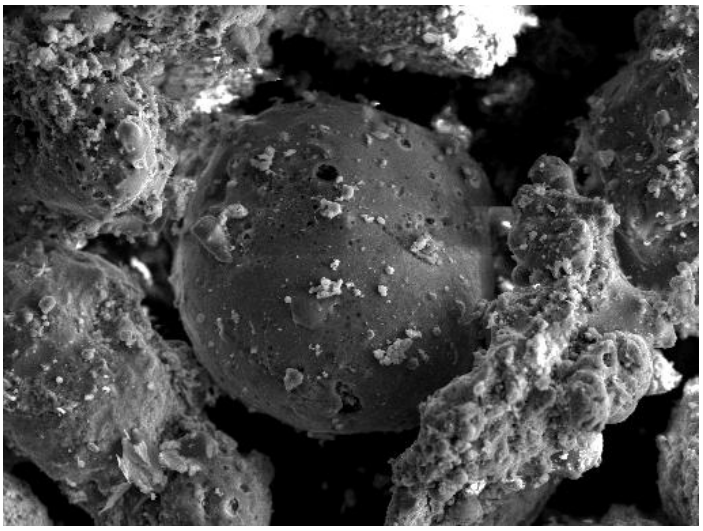
Πίνακας 14. Χημική ανάλυση των σημείων 1,2 της φωτογραφίας 28.

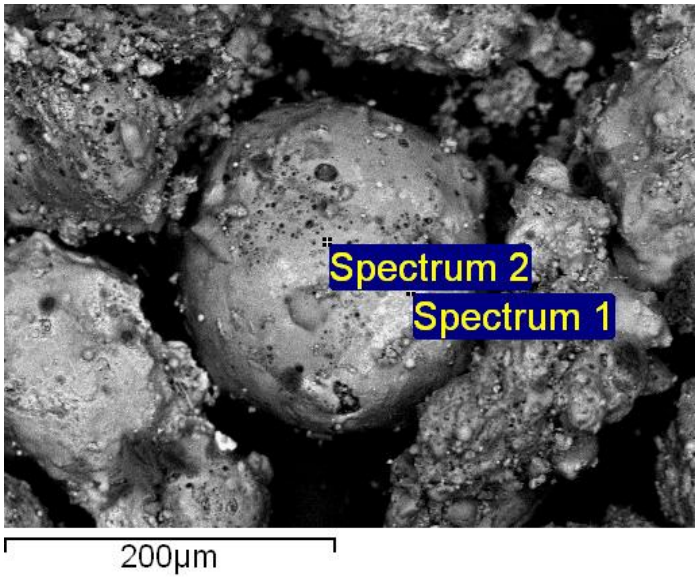


Φωτο.29: Χαρακτηριστική εικόνα σφαιριδίων τέφρας με μικρότερα σφαιρίδια προσκολλημένα στο περίβλημά τους. Διακρίνεται και ένα κενοσφαιρίδιο (βέλος).



Φωτο.30: Γενική εικόνα καλοσχηματισμένων σφαιριδίων τέφρας μεγέθους <125μm.

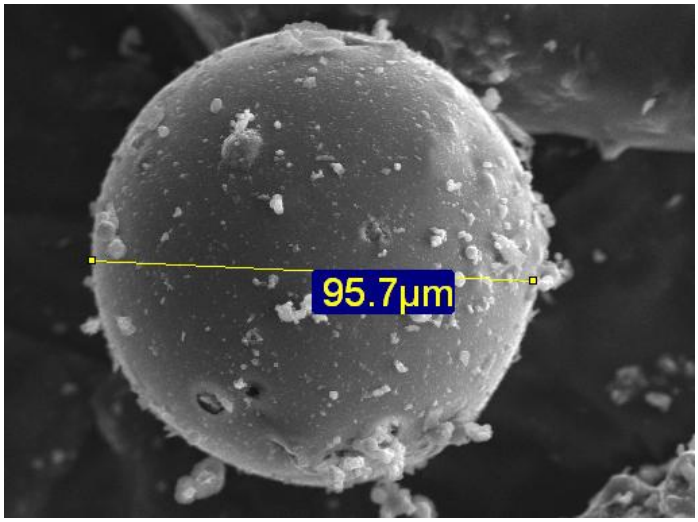


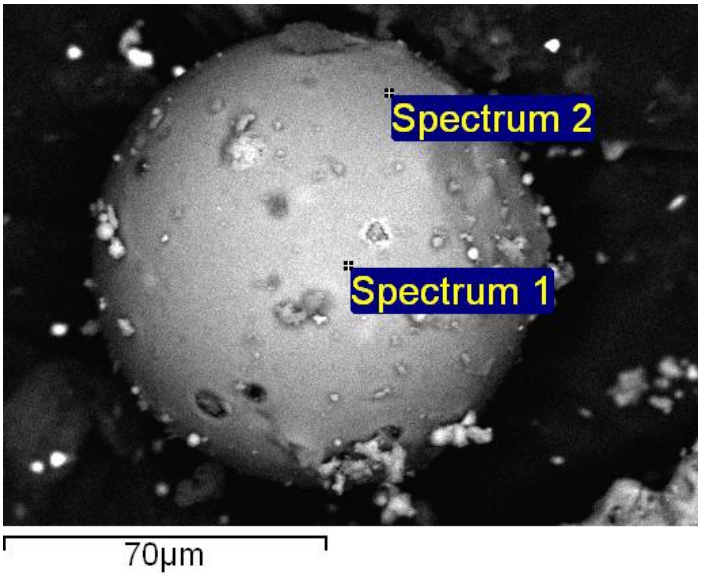


Φωτο.31,32: Τυπική εικόνα σφαιριδίου μεγέθους <200μm με μικρότερους κόκκους προσκολλημένους πάνω στο πυριτικής σύστασης περίβλημα.

Οξείδια	Spectrum 1(%)	Spectrum 2(%)
Na_2O	0.25	0.21
MgO	5.75	3.33
Al_2O_3	11.03	14.79
SiO_2	25.97	41.95
P_2O_5	0.28	0
SO_3	0	0.08
K_2O	0.53	2.87
CaO	17.83	26.17
TiO_2	1.34	1.06
MnO	0	0.36
FeO	37.27	9.53

Πίνακας 15. Χημική ανάλυση των σημείων 1,2 της φωτογραφίας 32.

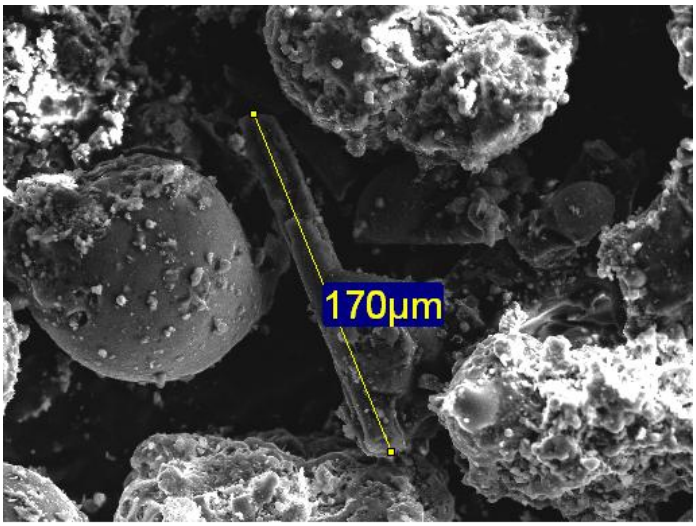


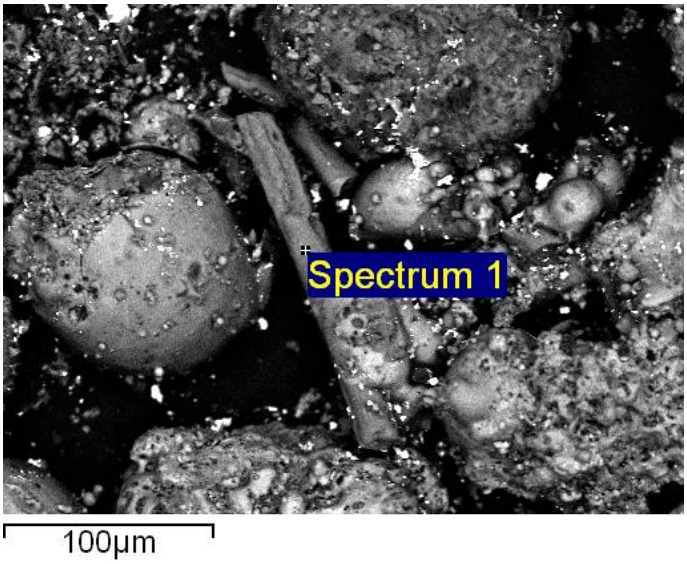


Φωτο.33,34: Χαρακτηριστική εικόνα πληροσφαιριδίου με πυριτικό περίβλημα και μικρότερα σφαιρίδια κολλημένα στην επιφάνειά του.

Οξείδια	Spectrum 1(%)	Spectrum 2(%)
Na_2O	1.13	0.85
MgO	2.95	4.18
Al_2O_3	13.31	15.62
SiO_2	40.73	42.56
P_2O_5	0.57	3.72
SO_3	0	0.1
K_2O	1.32	1.46
CaO	32.71	26.84
TiO_2	0.57	0.34
MnO	0.32	0.06
FeO	7.33	4.28

Πίνακας 16. Χημική ανάλυση των σημείων 1,2 της φωτογραφίας 34.

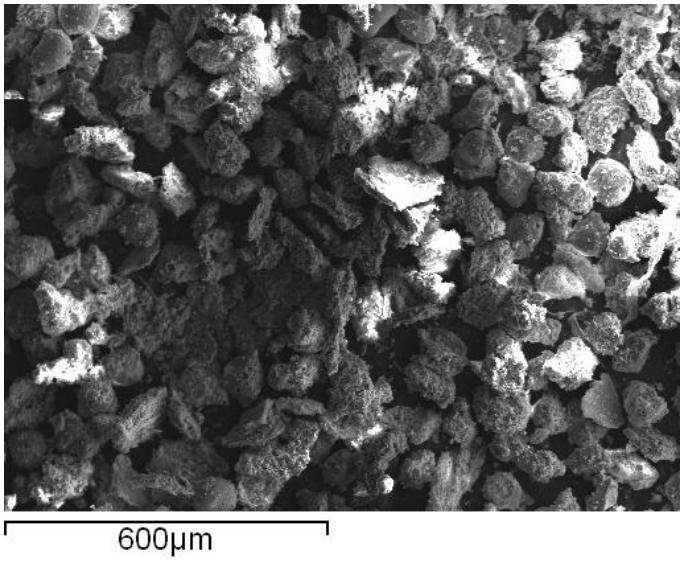




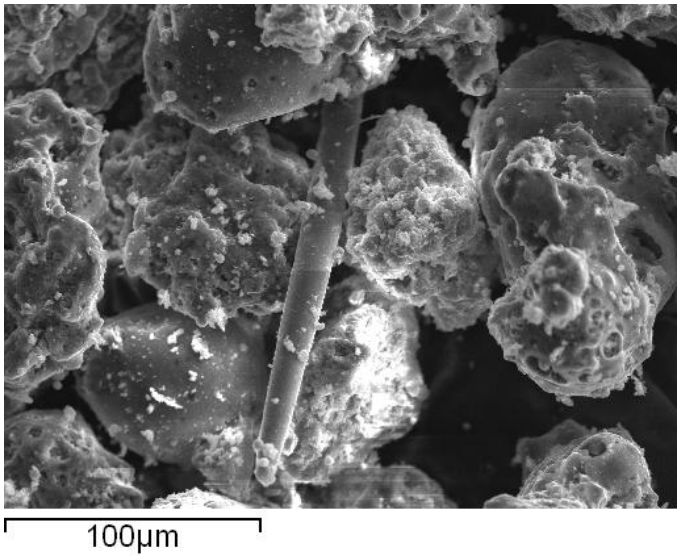
Φωτο.35,36: Συσσωματώματα και σφαιρίδια τέφρας μεγέθους <125μm. Εξαίρεση αποτελεί ινώδης ορυκτή φάση πυριτικής σύστασης (χαλαζίας) μήκους 170μm, η οποία διαπέρασε το κόσκινο με την μικρή της διάμετρο.

Οξείδια	Spectrum 1(%)
Na_2O	0.42
MgO	0
Al_2O_3	0.17
SiO_2	99.87
P_2O_5	0
SO_3	0.01
K_2O	0.63
CaO	0.54
TiO_2	0.07
MnO	0
FeO	0

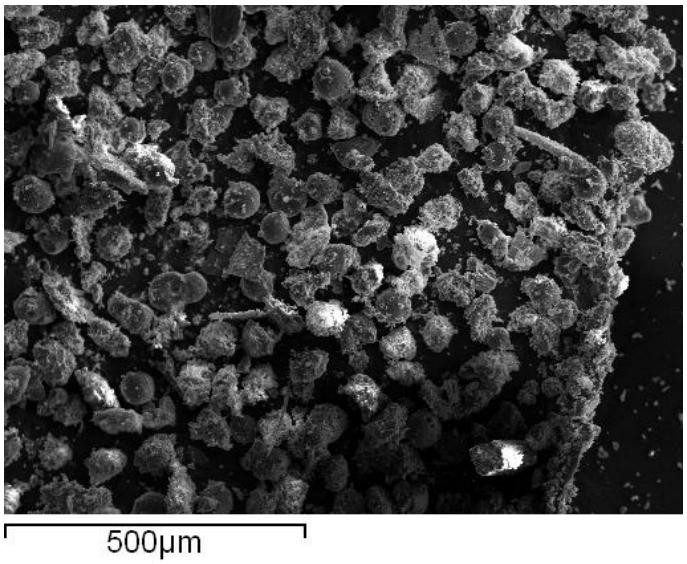
Πίνακας 17. Χημική ανάλυση του σημείου 1 της φωτογραφίας 36.



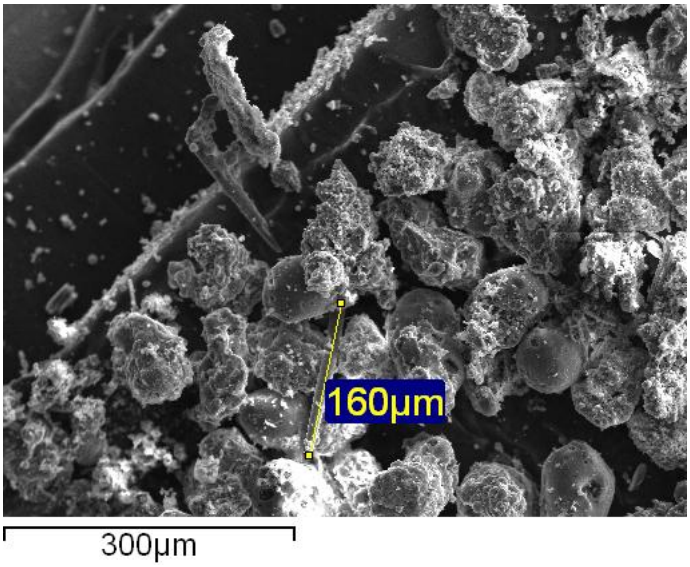
Φωτο.37: Χαρακτηριστική εικόνα συσσωματωμάτων και σφαιριδίων μεγέθους <100μm.



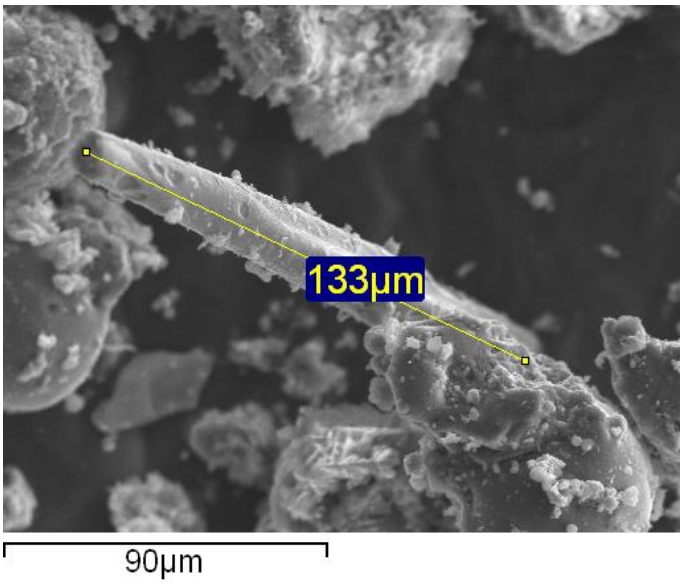
Φωτο.38: Γενική εικόνα συσσωματωμάτων τέφρας μεγέθους <100μm. Στην φωτογραφία εντοπίζεται ινώδης ορυκτή φάση, πιθανόν πυριτικής σύστασης, μήκους >100μm.



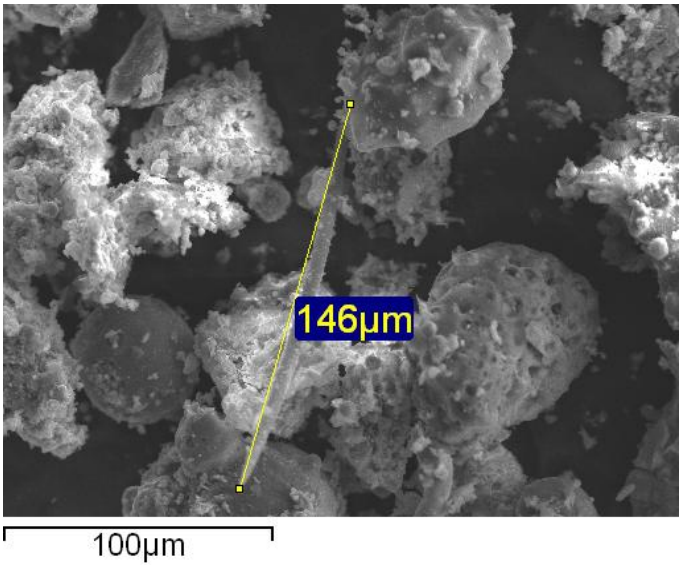
Φωτο.39: Γενική εικόνα συσσωματωμάτων και σφαιριδίων τέφρας μεγέθους <63μm.



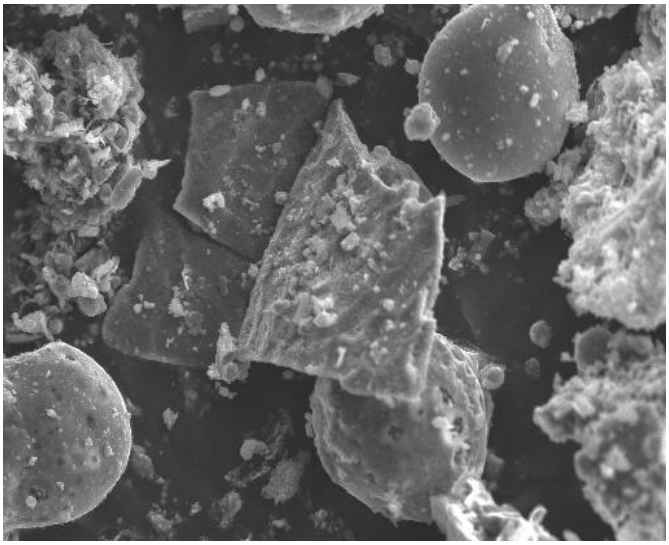
Φωτο.40: Γενική εικόνα συσσωματωμάτων και σφαιριδίων τέφρας με χαρακτηριστική ινώδη ορυκτή φάση μεγέθους 160μm.

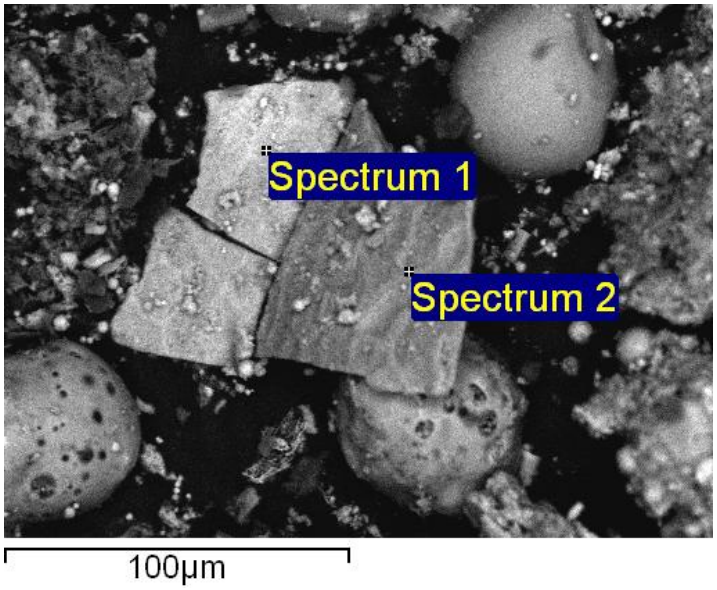


Φωτο.41: Ινώδης Ορυκτή φάση, πιθανόν πυριτικής σύστασης.



Φωτο.42: Χαρακτηριστική ινώδης ορυκτή φάση , πιθανόν πυριτικής σύστασης μεγέθους 146μm.

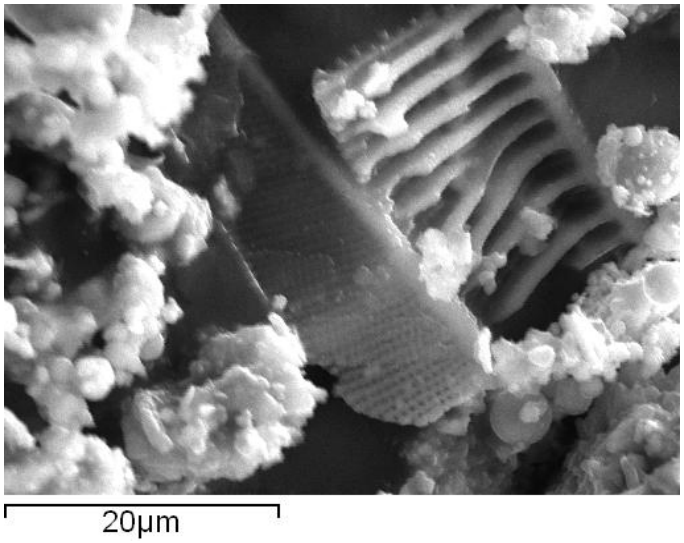




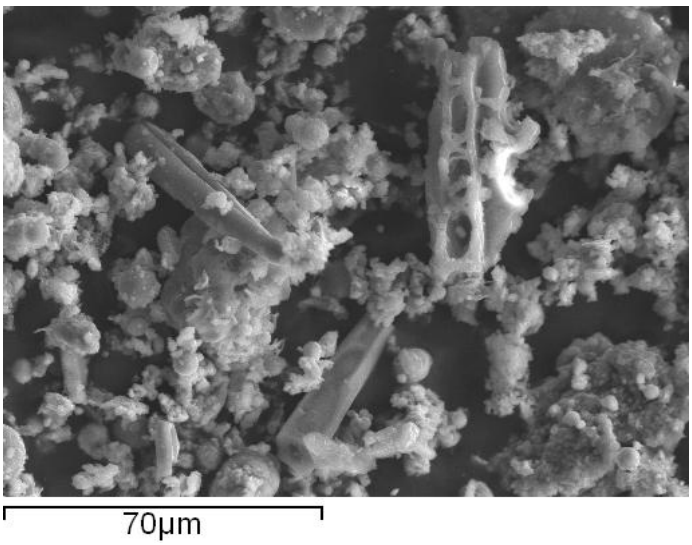
Φωτο.43,44: Συσσωματώματα και σφαιρίδια τέφρας μεγέθους <63μm. Εντοπίζεται ορυκτή φάση ασβεστιτικής σύστασης (ασβεστίτης), ενώ τα υψηλά θειϊκά πιθανολογούν την παρουσία ανυδρίτη.

Οξείδια	Spectrum 1(%)	Spectrum 2(%)
Na_2O	0	0.52
MgO	1.04	0.27
Al_2O_3	0	1.6
SiO_2	0.8	3.49
P_2O_5	0.27	0.42
SO_3	10.97	17.32
K_2O	0	0.57
CaO	86.86	74.58
TiO_2	0	1.31
MnO	0.18	0
FeO	0.6	0.49

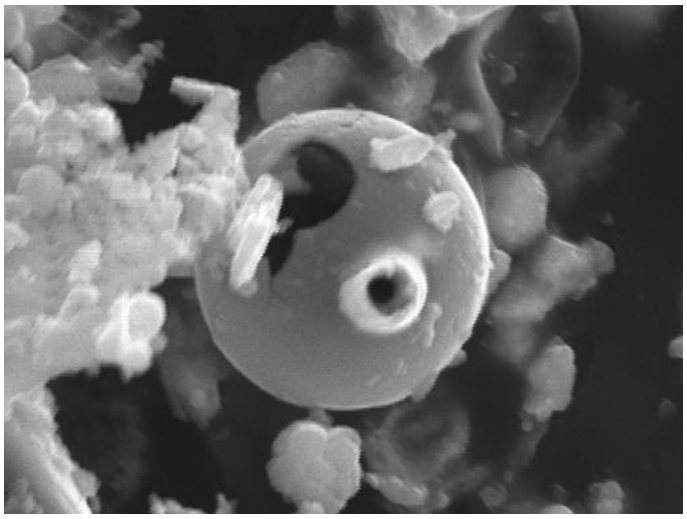
Πίνακας 18. Χημική ανάλυση των σημείων 1,2 της φωτογραφίας 44.

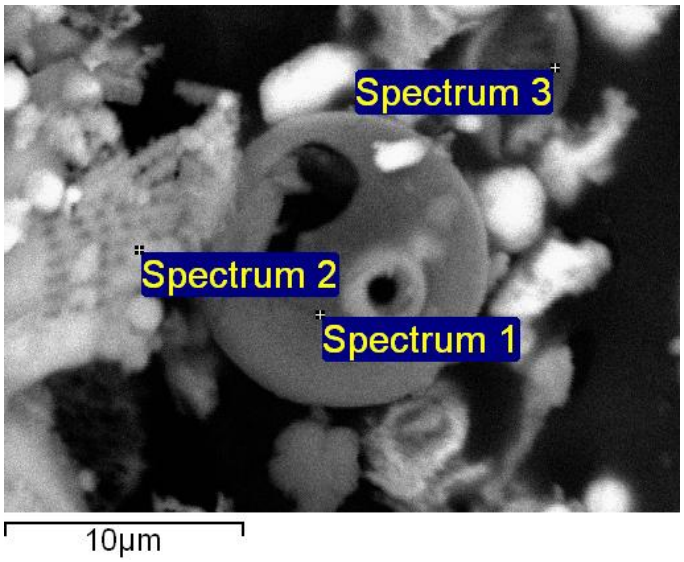


Φωτο.45: Χαρακτηριστική παρουσία απολιθωμάτων πυριτικής σύστασης.



Φωτο.46: Γενική εικόνα συσσωματωμάτων και σφαιριδίων τέφρας μεγέθους <50μm. Στα μεγέθη αυτά συμπεριλαμβάνονται και τα εισπνεύσιμα κλάσματα (<10μm). Στην φωτογραφία εντοπίζονται χαρακτηριστικές δομές απολιθωμάτων, καθώς και ινώδεις πυριτικές φάσεις.

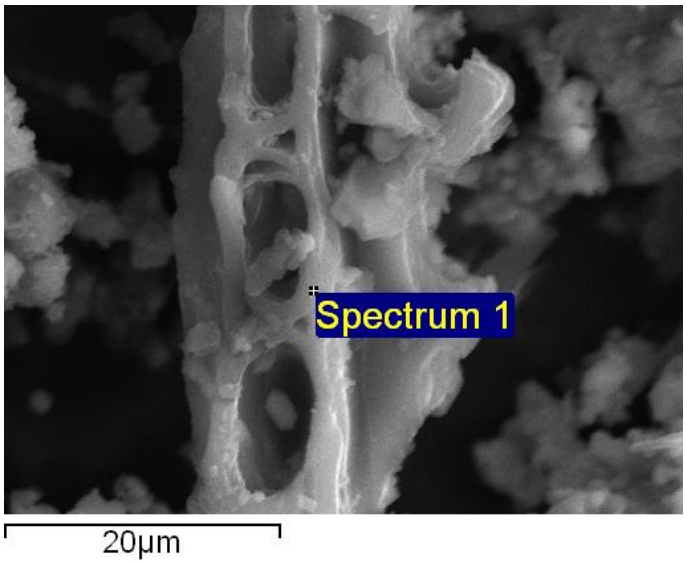




Φωτο.47,48: Κενοσφαιρίδιο τέφρας εισπνεύσιμου μεγέθους. Εντοπίζεται οπή στο πυριτικής σύστασης περίβλημα του σφαιριδίου από την οποία βγήκαν τα καυτά αέρια κατά τη διαδικασία καύσης του λιγνίτη.

Οξείδια	Spectrum 1(%)	Spectrum 2(%)
Na_2O	0.4	0.04
MgO	1.52	1.14
Al_2O_3	3.09	3.4
SiO_2	69.73	69.79
P_2O_5	0.52	0.09
SO_3	6.99	8.13
K_2O	0.49	1.15
CaO	13.75	13.67
TiO_2	0.19	0.14
MnO	0.06	0.34
FeO	3.26	2.12

Πίνακας 19. Χημική ανάλυση των σημείων 1,2 της φωτογραφίας 48.



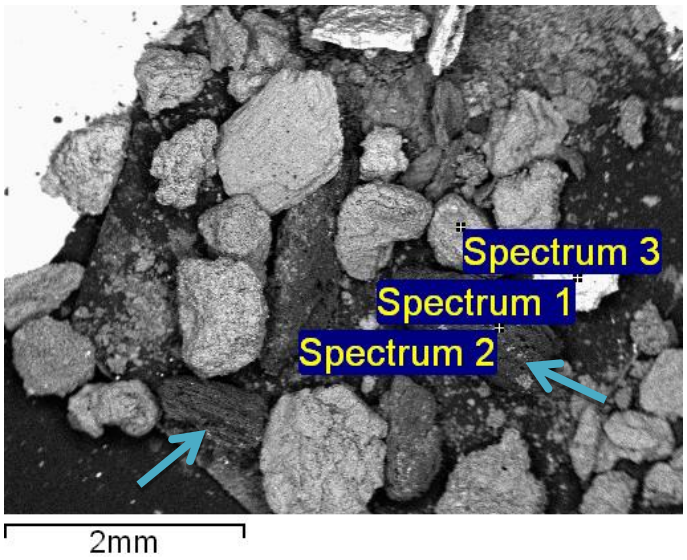
Φωτο.49: Χαρακτηριστική δομή απολιθώματος.

Οξείδια	Spectrum 1(%)
Na_2O	17.79
MgO	9.96
Al_2O_3	6.45
SiO_2	16.3
P_2O_5	2.15
SO_3	4.25
K_2O	1.25
CaO	38.49
TiO_2	0.15
MnO	1.04
FeO	2.18

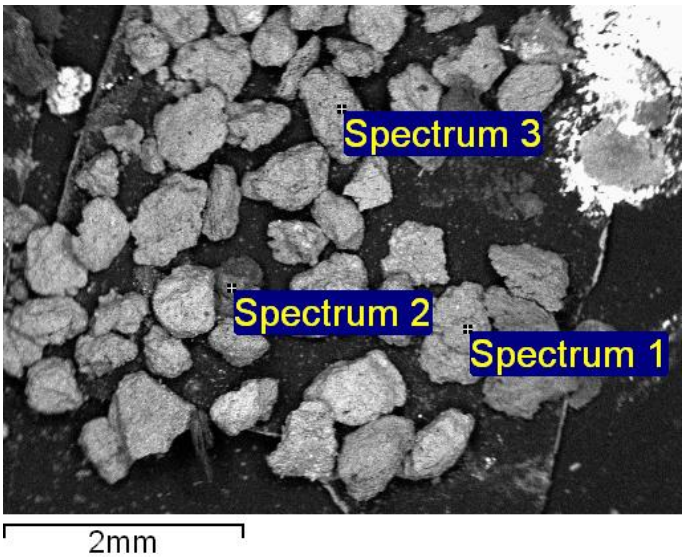
Πίνακας 20. Χημική ανάλυση του σημείου 1 της φωτογραφίας 47.

4.1.3 Ιπτάμενη Τέφρα ΑΗΣ Καρδιάς

Η γενική εικόνα της τέφρας του ΑΗΣ Καρδιάς, μορφολογικά διαφέρει ελάχιστα από τους άλλους δύο σταθμούς, αποτελούμενη και αυτή από **σφαιρίδια** (φωτογραφίες 59,66,68,70) διαφόρων μεγεθών και συσσωματώματα (φωτογραφίες 52,58,61) σφαιριδίων τέφρας. Σημαντικό χαρακτηριστικό αποτελεί η ύπαρξη άκαυστου λιγνίτη (φωτογραφίες 50,51,54), η παρουσία του οποίου εξαρτάται από τις συνθήκες καύσης και μπορεί να εμφανίζεται σε οποιοδήποτε δείγμα τέφρας. Στο συγκεκριμένο δείγμα παρατηρείται πως ορισμένα πληροσφαιρίδια αποτελούνται από **ασβεστοθειούχας σύστασης περίβλημα** με ασβεστιτικής σύστασης μικρότερα σφαιρίδια να επικάθονται σε αυτό (φωτογραφία 59). Συχνή εμφάνιση κάνουν ασβεστιτικές, **σιδηρούχες** και καλιούχες φάσεις (πίνακες 21,29,30), οδηγώντας στο συμπέρασμα πως από χημικής άποψης η τέφρα του **ΑΗΣ Καρδίας θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ασβεστοθειούχα και σίγουρα ως η πιο ασβεστούχα από τα τρία δείγματα** (πίνακες 25,25,27,28,30,31,32). Σημαντικό χαρακτηριστικό αποτελεί η πληθώρα σωματιδίων εισπνεύσιμου μεγέθους <10μm και <2,5 μm (φωτογραφίες 66,67,68,70).



Φωτο.50: Γενική εικόνα συσσωματωμάτων τέφρας και άκαυστου λιγνίτη (βέλη), μεγέθους κόκκων >500μm.



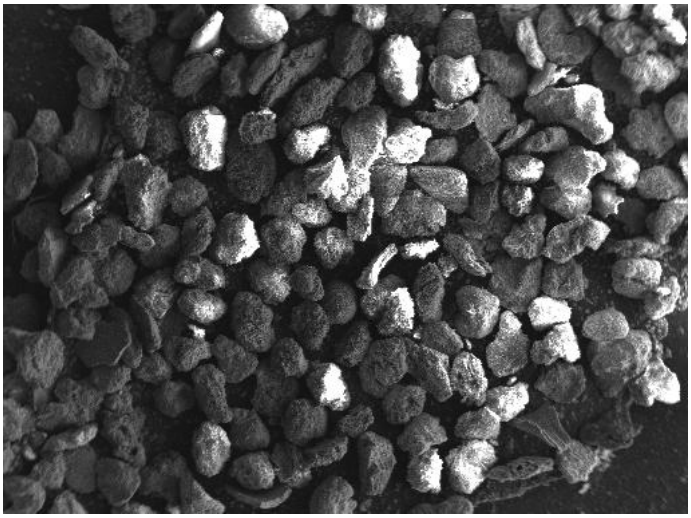
Φωτο.51: Χαρακτηριστική εικόνα συσσωματωμάτων τέφρας μεγέθους κόκκων <500μm.

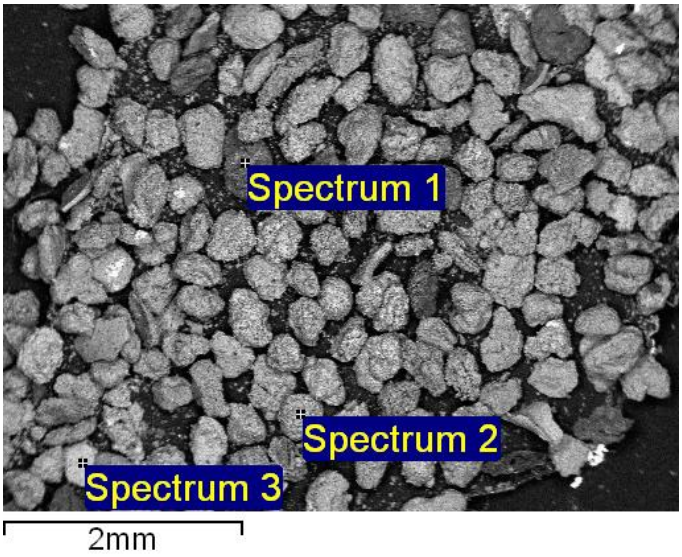
Οξείδια	Spectrum 1(%)	Spectrum 2(%)	Spectrum 3(%)
Na_2O	0	0	0.19
MgO	0.46	0.21	3.00
Al_2O_3	2.31	9.67	23.80
SiO_2	2.53	8.43	53.49
P_2O_5	0.80	1.25	0.60
SO_3	0.95	46.32	2.85
K_2O	0	2.10	0.74
CaO	1.25	27.72	8.42
TiO_2	0.10	1.35	0.46
MnO	0	0	0.27
FeO	92.32	3.85	6.18

Πίνακας 21. Χημική ανάλυση των σημείων 1,2,3 της φωτογραφίας 50.

Οξείδια	Spectrum 1(%)	Spectrum 2(%)	Spectrum 3(%)
Na_2O	1.41	0.40	0.22
MgO	2.23	2.50	2.24
Al_2O_3	13.53	14.40	16.49
SiO_2	41.49	35.03	32.74
P_2O_5	0.32	1.11	0.24
SO_3	4.82	8.27	18.62
K_2O	1.34	1.40	2.66
CaO	23.70	29.32	21.48
TiO_2	1.41	1.67	1.27
MnO	0	0	0
FeO	10.15	5.94	4.41

Πίνακας 22. Χημική ανάλυση των σημείων 1,2,3 της φωτογραφίας 51.

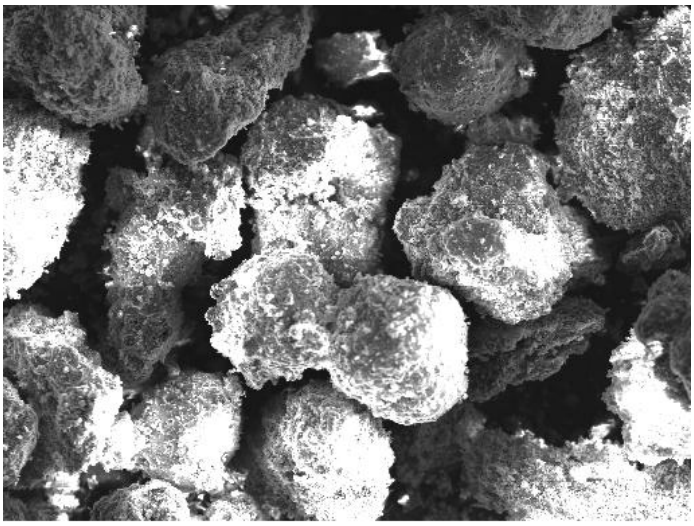


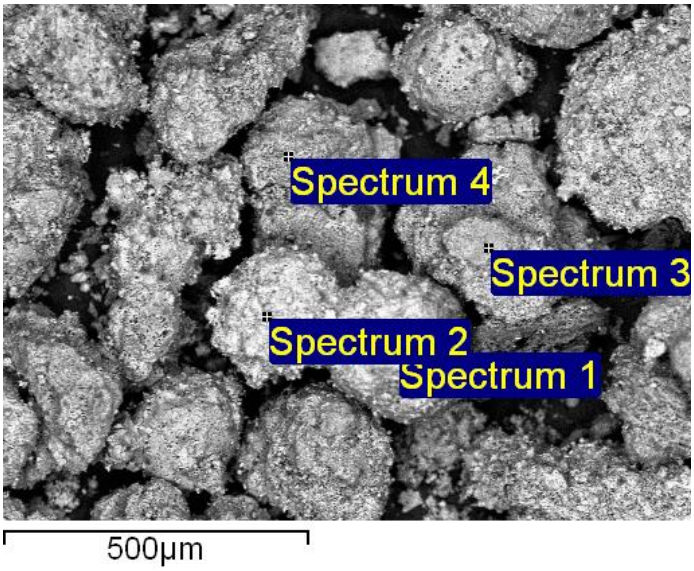


Φωτο.52,53: Γενική εικόνα συσσωματωμάτων τέφρας μεγέθους < 350 μm.

Οξείδια	Spectrum 1(%)	Spectrum 2(%)	Spectrum 3(%)
Na_2O	0.58	0.04	0.48
MgO	13.27	4.50	0.16
Al_2O_3	9.49	20.73	1.72
SiO_2	7.46	43.25	1.63
P_2O_5	0	0.63	0
SO_3	17.02	4.47	11.33
K_2O	-0.23	2.39	0.17
CaO	48.63	14.82	84.75
TiO_2	0.19	1.31	0.02
MnO	0	0.00	0
FeO	5.13	7.87	0.26

Πίνακας 23. Χημική ανάλυση των σημείων 1,2,3 της φωτογραφίας 53

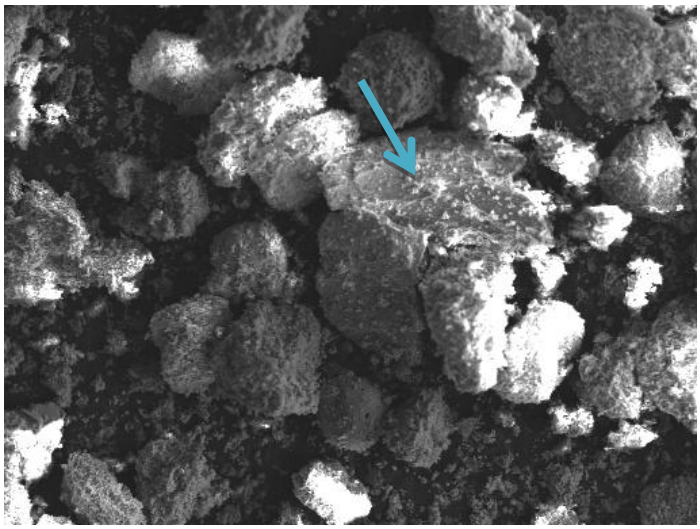


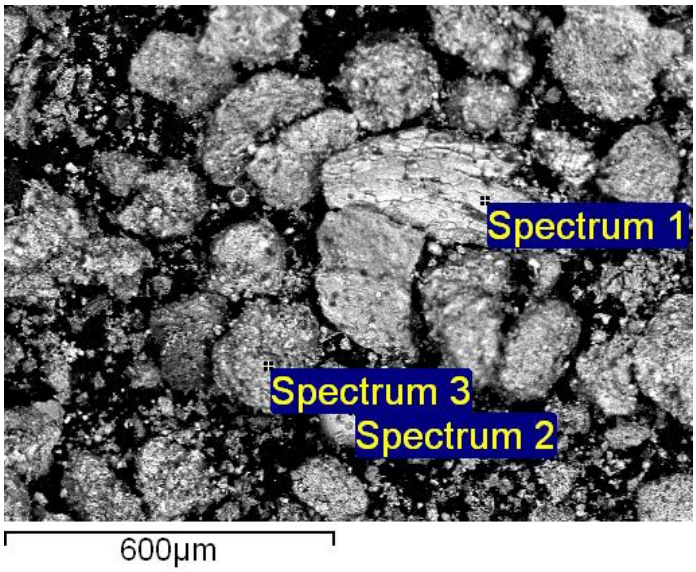


Φωτο.54,55: Γενική εικόνα κόκκων τέφρας μεγέθους <250μm, στην οποία κυριαρχούν συσσωματώματα αλλά και ορισμένοι σφαιρικοί κόκκοι.

Οξείδια	Spectrum 1(%)	Spectrum 2(%)	Spectrum 3(%)	Spectrum 4(%)
Na_2O	0	0	0	0.56
MgO	0	1.52	4.08	5.43
Al_2O_3	3.88	4.60	17.74	14.59
SiO_2	20.20	5.91	42.10	26.34
P_2O_5	0	0	0.24	0.22
SO_3	0.71	4.53	7.01	10.08
K_2O	0.33	3.31	1.53	0.93
CaO	54.29	34.57	20.85	32.44
TiO_2	0.25	0.56	0.84	0.06
MnO	0.25	0	0.24	0.03
FeO	20.73	48.37	5.38	9.32

Πίνακας 24. Χημική ανάλυση των σημείων 1,2,3,4 της φωτογραφίας 55

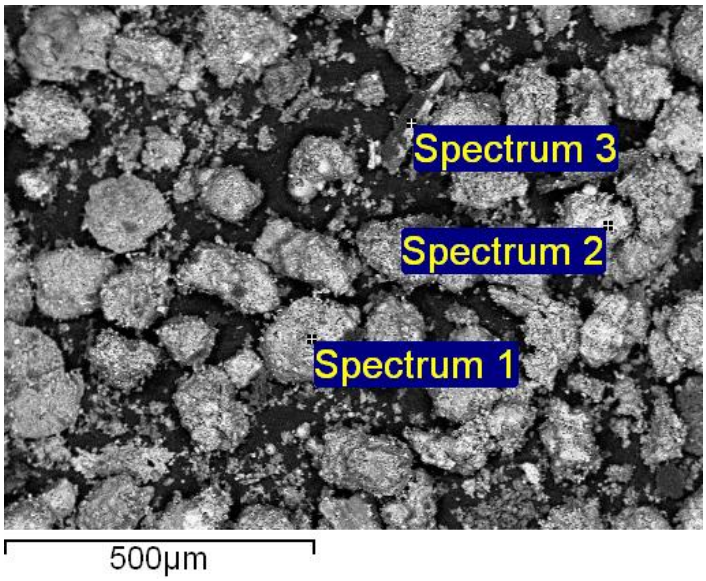




Φωτο.56,57: Συσσωματώματα τέφρας μεγέθους <200μm. Εντοπίζεται ορυκτή φάση ασβεστιτικής σύστασης (ασβεστίτης, βέλος).

Οξείδια	Spectrum 1(%)	Spectrum 2(%)	Spectrum 3(%)
Na_2O	0	0	0
MgO	0	1.28	2.52
Al_2O_3	0.78	1.43	18.75
SiO_2	0.86	1.09	44.43
P_2O_5	0	0.16	0
SO_3	5.06	0.68	1.57
K_2O	0.49	0.17	0.56
CaO	92.41	24.68	22.95
TiO_2	0.62	0	2.39
MnO	0.45	2.93	0.22
FeO	0.04	69.42	7.09

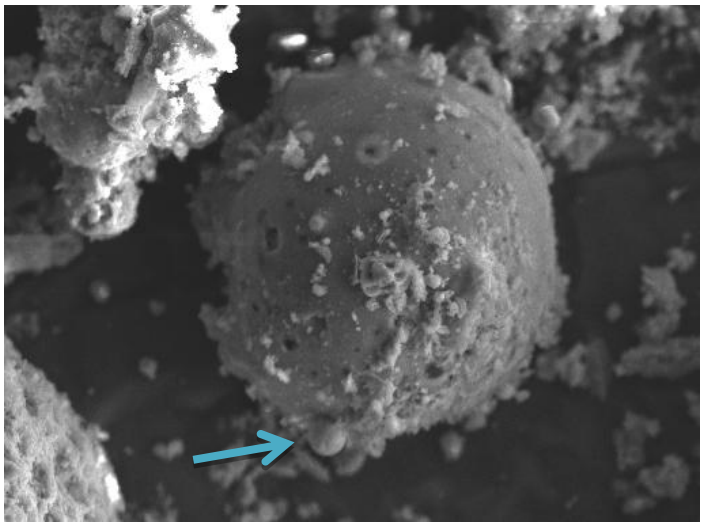
Πίνακας 25. Χημική ανάλυση των σημείων 1,2,3 της φωτογραφίας 57

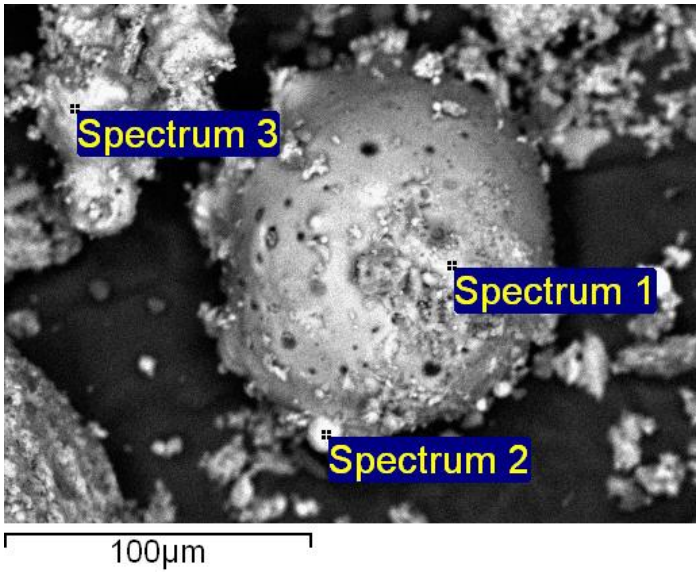


Φωτο.58: Χαρακτηριστική εικόνα συσσωματωμάτων τέφρας μεγέθους <125μm. Εντοπίζονται πυριτική φάση (spectrum 1) καθώς και ασβεστιτικές φάσεις (spectrum 2,3)

Οξείδια	Spectrum 1(%)	Spectrum 2(%)	Spectrum 3(%)
Na_2O	0.12	0	0
MgO	1.01	0.95	0.30
Al_2O_3	10.35	5.55	1.45
SiO_2	67.45	4.51	3.36
P_2O_5	0	0.09	0
SO_3	0.34	3.13	3.85
K_2O	1.80	0	0.31
CaO	8.39	79.84	90.79
TiO_2	0.35	0.81	0
MnO	1.03	0	0
FeO	9.33	5.37	0.74

Πίνακας 26. Χημική ανάλυση των σημείων 1,2,3 της φωτογραφίας 58

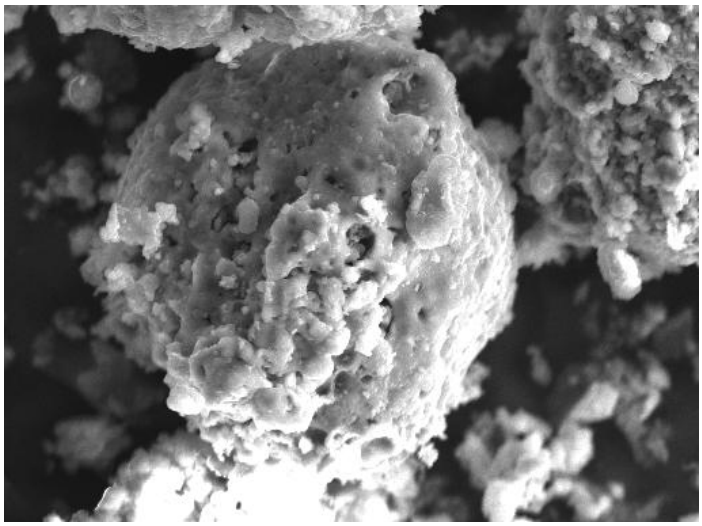


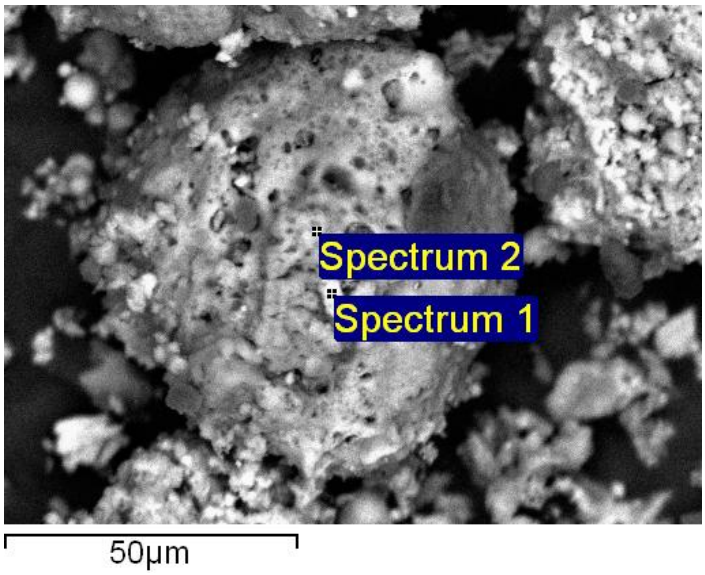


Φωτο.59,60: Πληροσφαιρίδιο τέφρας μεγέθους 100μm με ασβεστοθειούχας σύστασης περίβλημα πάνω στο οποίο επικάθονται μικρότερα σφαιρίδια εισπνεύσιμου μεγέθους και ασβεστιτικής κυρίως σύστασης (βέλος).

Οξείδια	Spectrum 1(%)	Spectrum 2(%)	Spectrum 3(%)
Na_2O	0.46	0	0
MgO	2.96	1.07	0.18
Al_2O_3	8.55	3.04	0.23
SiO_2	24.70	16.61	1.55
P_2O_5	0	0	0
SO_3	17.07	1.79	1.76
K_2O	0.36	0.03	0.81
CaO	40.30	54.26	78.19
TiO_2	0.59	0	0
MnO	0	0.31	0.24
FeO	5.73	23.45	18.70

Πίνακας 27. Χημική ανάλυση των σημείων 1,2,3 της φωτογραφίας 60

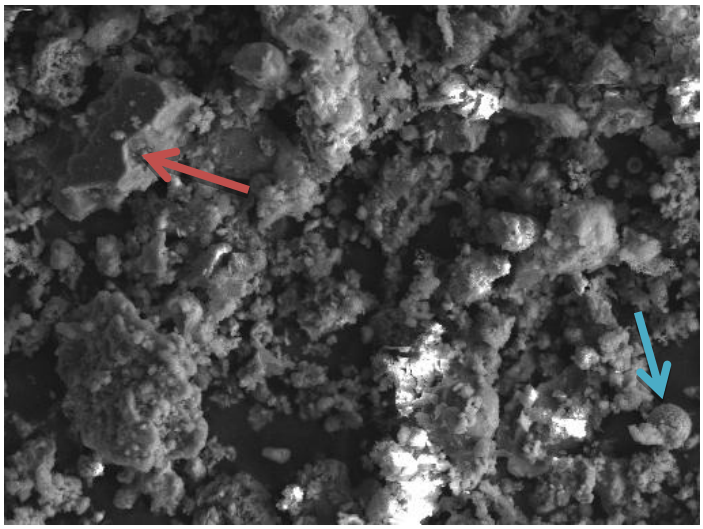


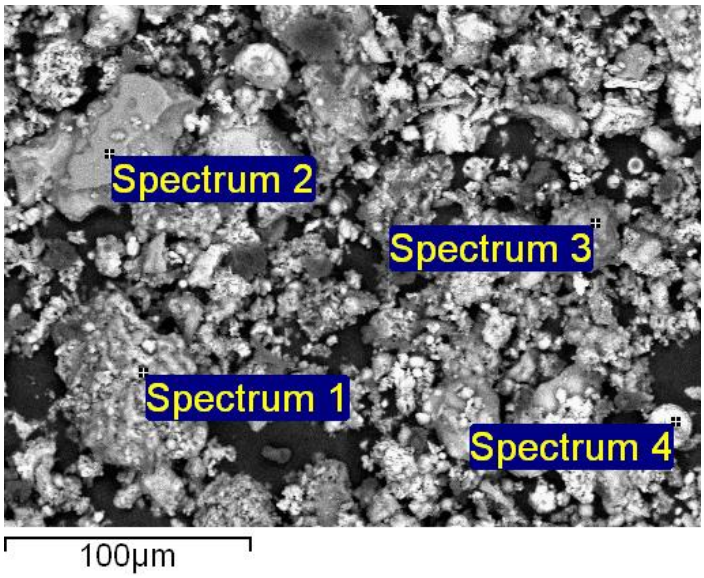


Φωτο.61,62: Συσσωμάτωμα τέφρας μεγέθους <100μm. Στην φωτογραφία γίνεται έντονα αντιληπτή η συγκόλληση πολλών μικρών σφαιριδίων τέφρας με διαφορετικές χημικές συστάσεις (πίνακας 28) που δίνουν την εικόνα ενός συσσωματώματος.

Οξείδια	Spectrum 1(%)	Spectrum 2(%)
Na_2O	0.06	0
MgO	2.64	6.05
Al_2O_3	7.01	23.46
SiO_2	14.00	48.98
P_2O_5	0	0
SO_3	11.18	0.00
K_2O	0.68	0.90
CaO	62.69	12.35
TiO_2	0.31	1.28
MnO	0.39	0.37
FeO	1.16	6.64

Πίνακας 28. Χημική ανάλυση των σημείων 1,2 της φωτογραφίας 62.

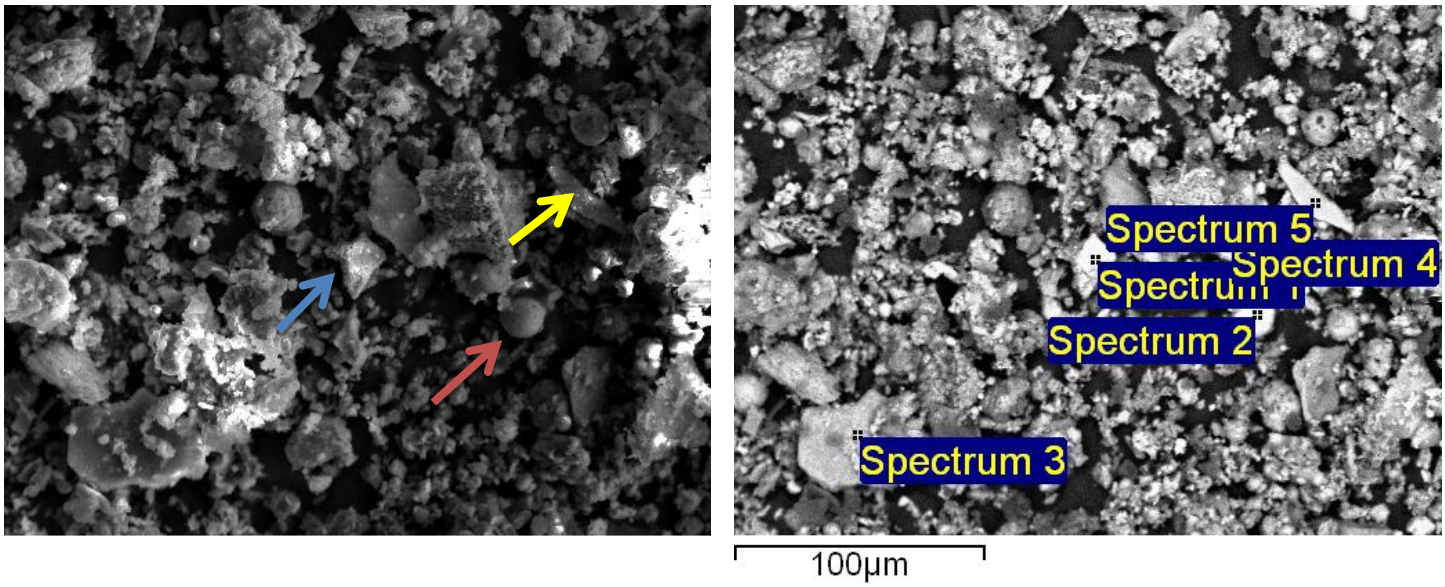




Φωτο.62,63: Γενική εικόνα συσσωματωμάτων και σφαιριδίων μεγέθους <63μm. Εντοπίζεται σιδηρούχα φάση, πιθανόν αιματίτης (μπλε βέλος) και καλιούχα φάση, πιθανόν άστριος (κόκκινο βέλος).

Οξείδια	Spectrum 1(%)	Spectrum 2(%)	Spectrum 3(%)	Spectrum 4(%)
Na_2O	0	0	0.02	0
MgO	3.03	0.87	2.99	1.53
Al_2O_3	11.78	11.30	26.93	1.14
SiO_2	19.98	44.26	54.35	1.50
P_2O_5	0.72	0	0.37	0.30
SO_3	4.07	1.76	2.93	2.02
K_2O	1.71	37.49	1.11	0
CaO	43.65	2.63	5.81	3.12
TiO_2	2.67	0.25	1.28	0.05
MnO	0.11	0.13	0.16	0.31
FeO	12.31	1.85	4.07	90.57

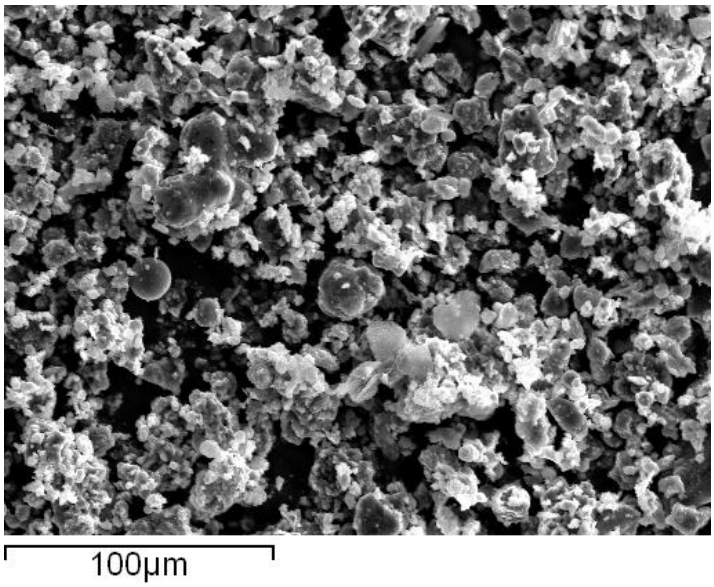
Πίνακας 29. Χημική ανάλυση των σημείων 1,2,3,4 της φωτογραφίας 63



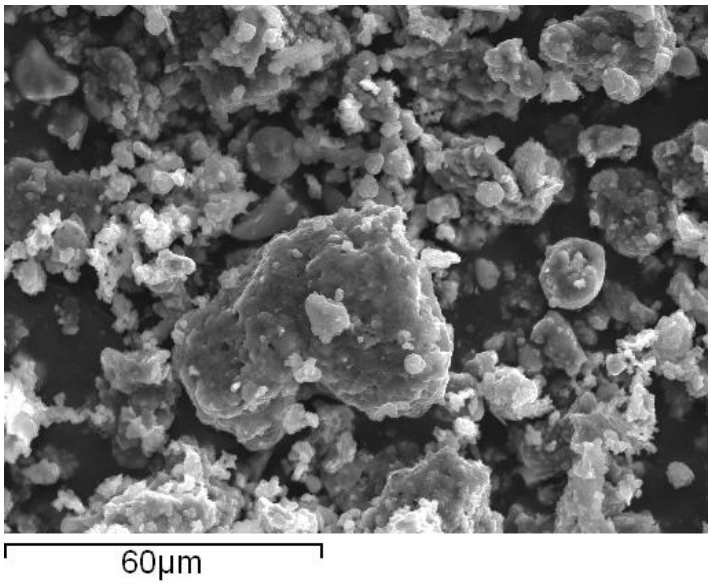
Φωτο.64,65: Χαρακτηριστική εικόνα κόκκων τέφρας μεγέθους <63μm, με εντυπωσιακά καλοσχηματισμένα σφαιρίδια. Εντοπίζονται σιδηρούχα φάση, πιθανόν αιματίτης, (κόκκινο βέλος), ασβεστιτική φάση (μπλε βέλος) , πυριτική φάση (κίτρινο βέλος).

Οξείδια	Spectrum 1(%)	Spectrum 2(%)	Spectrum 3(%)	Spectrum 4(%)	Spectrum 5(%)
Na_2O	0.25	0.42	0	0.44	0.07
MgO	2.45	0.16	0.47	1.66	2.49
Al_2O_3	0.47	0.42	17.10	2.19	21.74
SiO_2	1.32	1.01	40.61	5.43	54.21
P_2O_5	0.64	0.36	0.44	0	0
SO_3	9.38	0.80	1.74	5.85	0.77
K_2O	0.13	0	25.41	0.12	12.74
CaO	84.38	2.05	6.37	82.98	1.44
TiO_2	0.21	0.05	0.18	0.39	0.02
MnO	0.15	0	1.64	0	0
FeO	0.62	95.13	6.07	1.39	7.02

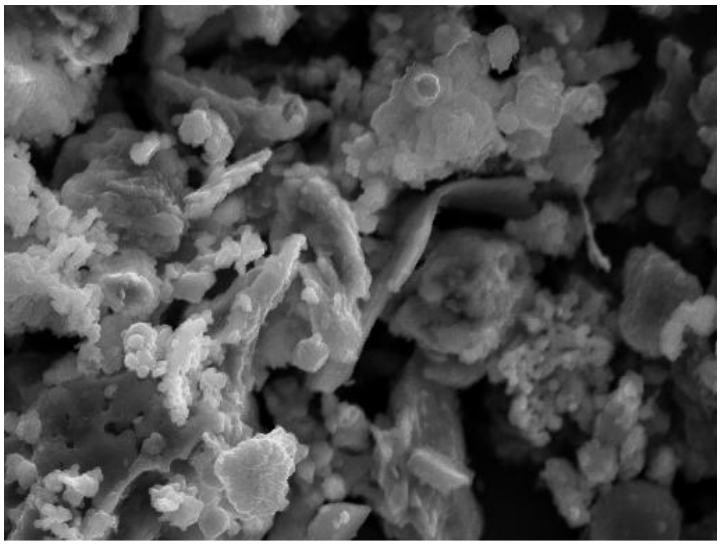
Πίνακας 30: Χημική ανάλυση των σημείων 1,2,3,4,5 της φωτογραφίας 65

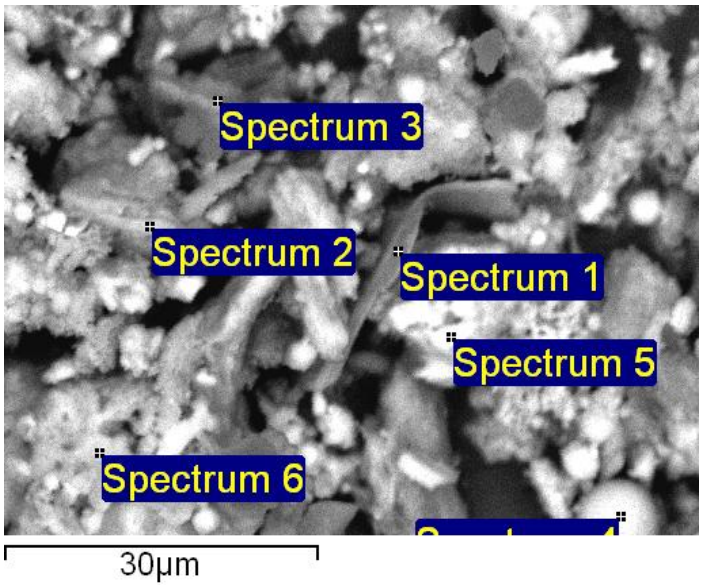


Φωτο.66: Γενική εικόνα συσσωματωμάτων και σφαιριδίων τέφρας μεγέθους <50μm. Σε αυτά τα κλάσματα συμπεριλαμβάνονται και σφαιρίδια εισπνεύσιμου μεγέθους (<10μm).



Φωτο.67: Συσσωμάτωμα μεγέθους <50μm. Στο φόντο φαίνεται η πληθώρα σφαιριδίων εισπνεύσιμου μεγέθους (<10μm).





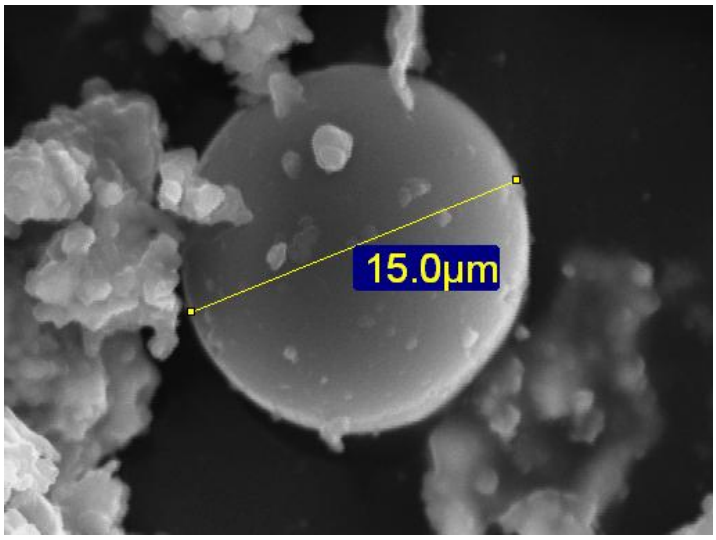
Φωτο.68,69: Χαρακτηριστική εικόνα σφαιριδίων και συσσωματωμάτων τέφρας μεγέθους <50μm. Κατά σημεία εντοπίζονται σφαιρίδια εισπνεύσιμου μεγέθους (<10μm)

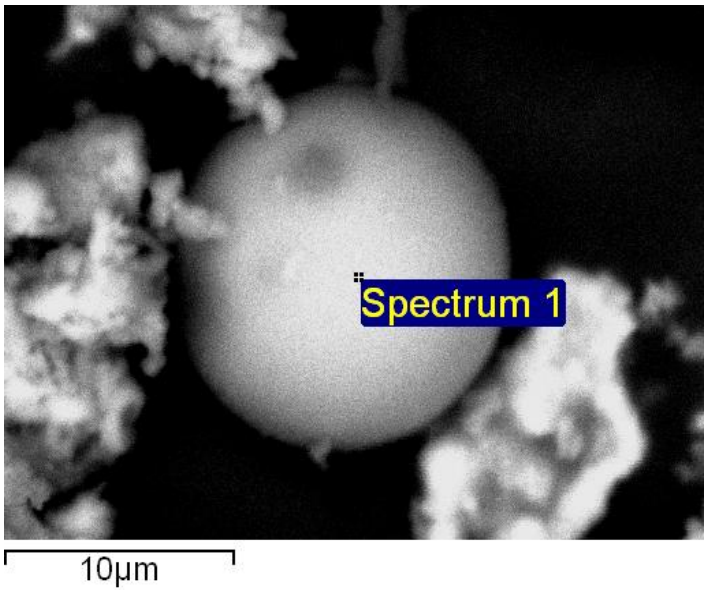
Οξείδια	Spectrum 1(%)	Spectrum 2(%)	Spectrum 3(%)
Na_2O	0	0.52	0
MgO	2.15	3.54	5.33
Al_2O_3	16.52	26.59	15.74
SiO_2	31.16	53.07	28.69
P_2O_5	0	0.07	0.63
SO_3	9.20	2.07	17.51
K_2O	3.58	4.36	0.79
CaO	34.41	3.58	27.66
TiO_2	0.06	0.64	0.05
MnO	0.01	0.30	0.19
FeO	3.24	5.25	3.69

Πίνακας 31: Χημική ανάλυση των σημείων 1,2,3, της φωτογραφίας 69.

Οξείδια	Spectrum 4(%)	Spectrum 5(%)	Spectrum 6(%)
Na_2O	0	0	0.18
MgO	1.37	1.63	4.19
Al_2O_3	5.08	3.09	20.92
SiO_2	19.34	6.59	46.12
P_2O_5	0.22	0	0
SO_3	1.35	10.47	0.91
K_2O	15.39	0.49	1.24
CaO	31.09	77.50	16.66
TiO_2	0.66	0.04	1.20
MnO	0	0	0
FeO	26.03	0.70	9.17

Πίνακας 32: Χημική ανάλυση των σημείων 4,5,6 της φωτογραφίας 69.





Φωτο.70,71: Σφαιρίδιο τέφρας με πυριτικής σύστασης περίβλημα. Μικρότερα σφαιρίδια επικάθονται στην επιφάνεια του περιβλήματος.

Οξείδια	Spectrum 1(%)
Na_2O	0.88
MgO	5.46
Al_2O_3	14.04
SiO_2	43.66
P_2O_5	0
SO_3	0
K_2O	1.10
CaO	28.80
TiO_2	1.51
MnO	0
FeO	4.89

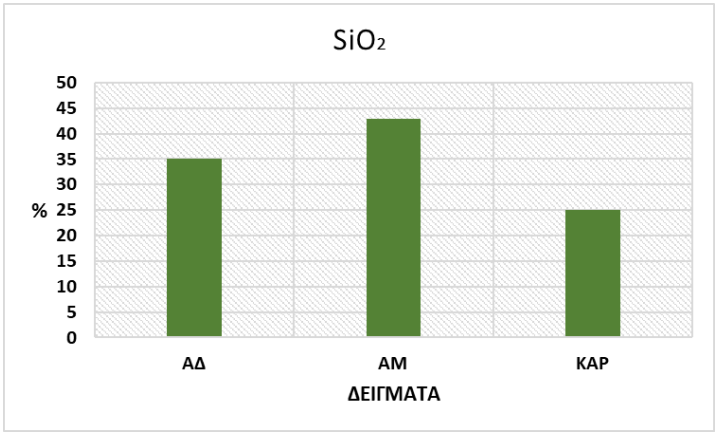
Πίνακας 33: Χημική ανάλυση του σημείου 1 της φωτογραφίας 69.

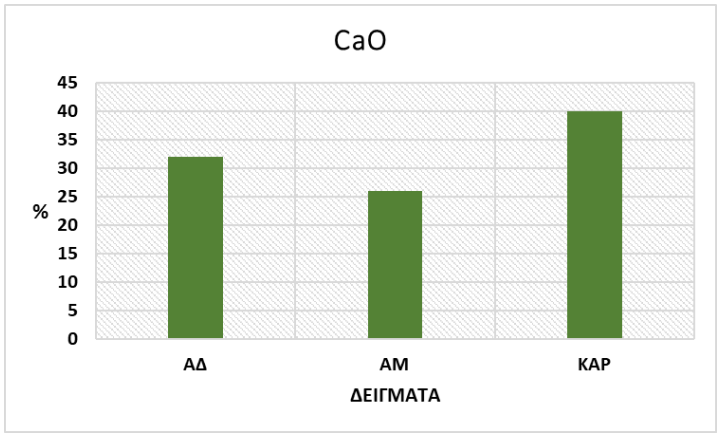
4.1.4 Χημική ανάλυση

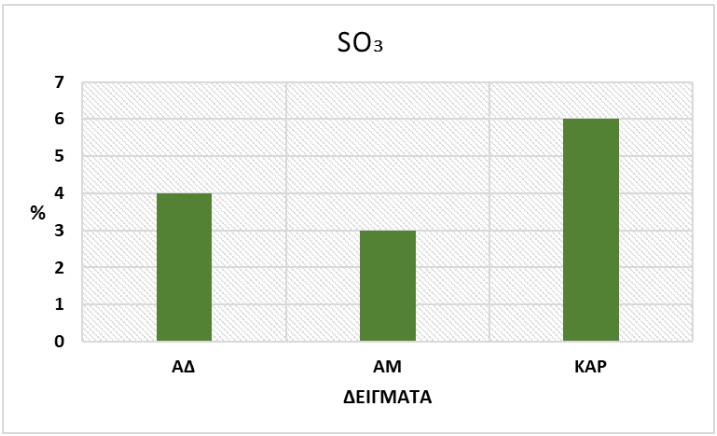
Η χημική ανάλυση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, ταυτόχρονα με τη μελέτη της μορφολογίας. Η χημική σύσταση των τεφρών δεν θεωρείται σταθερή, καθώς σχετίζεται άμεσα με τη χημική σύσταση του λιγνίτη τροφοδοσίας και των στείρων ενστρώσεων, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται διαφοροποιήσεις σε αυτήν ακόμα και σε δείγματα από τον ίδιο ΑΗΣ. Εντούτοις, παρατηρήθηκε από τις αναλύσεις που έγιναν πως υπάρχουν στοιχεία που εμφανίζονται σε μεγαλύτερη συγκέντρωση στην τέφρα συγκεκριμένων ΑΗΣ σε σχέση με άλλους. Συγκεκριμένα:

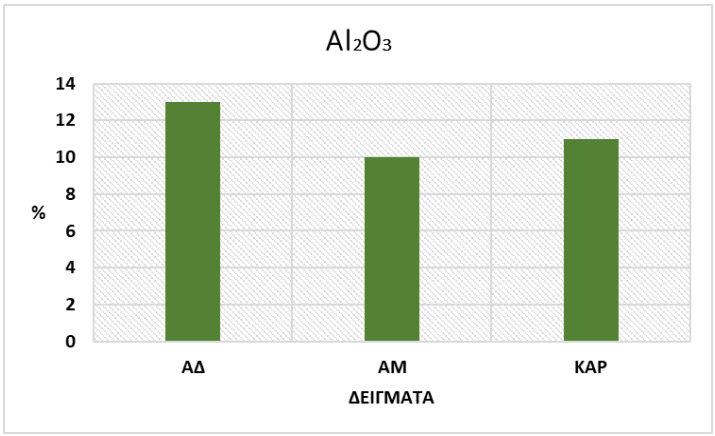
- Το **SiO_2** εντοπίζεται σε μεγαλύτερη συγκέντρωση στην τέφρα του ΑΗΣ Αμυνταίου με μέσο όρο εμφάνισης 43%.
- Το **CaO** εντοπίζεται σε μεγαλύτερη συγκέντρωση στην τέφρα του ΑΗΣ Καρδιάς με μέσο όρο εμφάνισης 40%.
- Το **SO_3** εντοπίζεται σε μεγαλύτερη συγκέντρωση στην τέφρα του ΑΗΣ Καρδιάς με μέσο όρο εμφάνισης 6%.
- Το **Al_2O_3** εντοπίζεται σε μεγαλύτερη συγκέντρωση στην τέφρα του ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου με μέσο όρο εμφάνισης 13%.
- Το **FeO** εντοπίζεται σε μεγαλύτερη συγκέντρωση στην τέφρα του ΑΗΣ Καρδιάς με μέσο όρο εμφάνισης 16%.

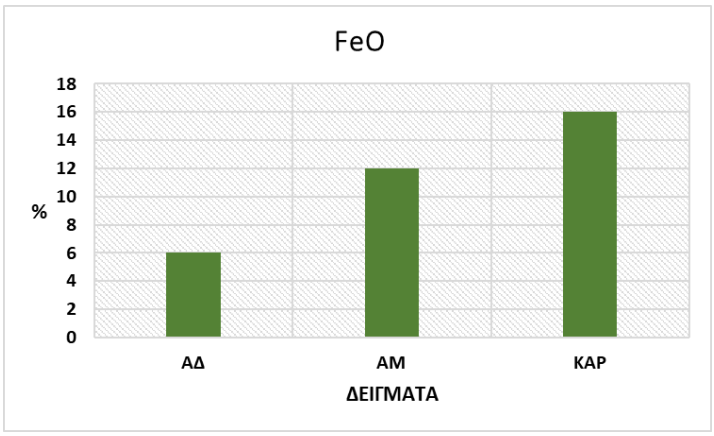
Στα Διαγράμματα 2-6 παρουσιάζονται σχηματικά οι διαφοροποιήσεις της ιπτάμενης τέφρας του κάθε ΑΗΣ στα παραπάνω οξείδια.











Διαγράμματα 2-6. Ποσοστιαία απεικόνιση της περιεκτικότητας στα οξείδια SiO_2, CaO, SO_3, Al_2O_3, FeO, της ιπτάμενης τέφρας των ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου (ΑΔ), Αμυνταίου (ΑΜ) και Καρδιάς (ΚΑΡ).

4.2 Κοκκομετρία ιπτάμενης τέφρας

Κατά τη διαδικασία του κοκκομετρικού διαχωρισμού που περιγράφεται και στο υποκεφάλαιο 3.1, προέκυψαν 9 διαφορετικά κοκκομετρικά κλάσματα για καθένα από τα τρία δείγματα. Τα σφάλματα που προέκυψαν κατά τη διαδικασία του ζυγίσματος του υλικού είναι <2% και συνεπώς είναι αποδεκτά. Τα αποτελέσματα του διαχωρισμού δίνονται στους παρακάτω πίνακες:

ΑΓ.ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ		
Αρχ.βάρος δείγματος: 90.40 gr		
φ	**Βάρος (gr)**	**%**
Δ.Β	44.24	49.41
4.5	18.68	20.88
4.0	8.01	8.95
3.5	6.33	7.07
3.0	5.25	5.88
2.5	3.85	4.30
2.0	1.72	1.93
1.5	0.94	1.0
1.0	0.44	0.50
ΣΥΝΟΛΟ	89.53	100.00
ΣΦΑΛΜΑ	0.87	0.96

Πίνακας 34. Κατά βάρος και ποσοστιαίος κοκκομετρικός διαχωρισμός της τέφρας ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου.

ΑΜΥΝΤΑΙΟ		
Αρχ.βάρος δείγματος: 100.18 gr		
φ	**Βάρος (gr)**	**%**
Δ.Β	53.16	53.76
4.5	11.15	11.28
4.0	8.55	8.65
3.5	7.94	8.03
3.0	7.75	7.83
2.5	5.93	6.00
2.0	2.60	2.63
1.5	1.31	1.32
1.0	0.49	0.50
ΣΥΝΟΛΟ	98.88	100.00
ΣΦΑΛΜΑ	1.30	1.31

Πίνακας 35. Κατά βάρος και ποσοστιαίος κοκκομετρικός διαχωρισμός της τέφρας ΑΗΣ Αμυνταίου.

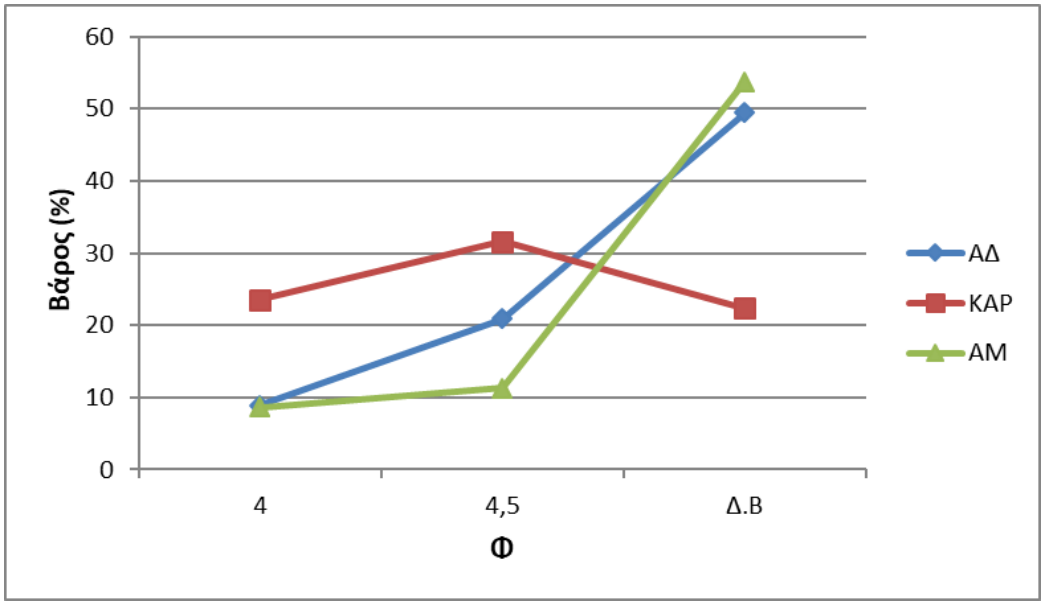
ΚΑΡΔΙΑ		
Αρχ.βάρος δείγματος: 99.54 gr		
φ	**Βάρος (gr)**	**%**
Δ.Β	21.85	22.39
4.5	30.80	31.57
4.0	22.96	23.54
3.5	10.65	10.91
3.0	5.82	5.97
2.5	3.27	3.36
2.0	1.25	1.28
1.5	0.56	0.58
1.0	0.39	0.40
ΣΥΝΟΛΟ	97.55	100.00
ΣΦΑΛΜΑ	1.99	1.99

Πίνακας 36. Κατά βάρος και ποσοστιαίος κοκκομετρικός διαχωρισμός της τέφρας ΑΗΣ Καρδιάς.

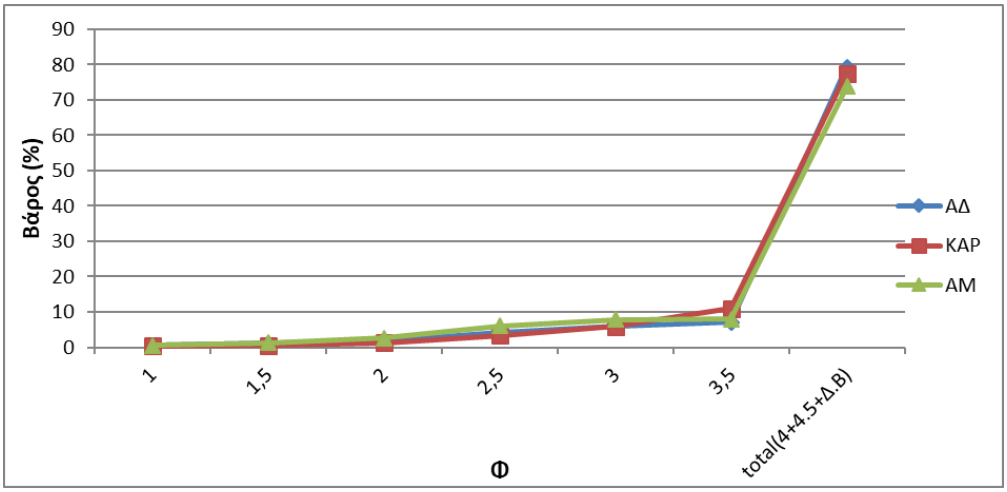
Με βάση τα αποτελέσματα του κοκκομετρικού διαχωρισμού παρατηρείται ομοιότητα μεταξύ των τριών δειγμάτων σε σχέση με την ποσότητα του υλικού που συγκεντρώνεται στα μεγέθη 500-95μm (ϕ=1 έως ϕ=3.5). Από την άλλη, παρατηρείται έντονη διαφοροποίηση στην ποσότητα του υλικού που συγκεντρώνεται στα κλάσματα 4, 4.5 και στο δίσκο βάσης. Παρόλα αυτά, το συνολικό (total) ποσοστό των τριών τελευταίων κλασμάτων εμφανίζεται παρόμοιο και στα τρία δείγματα. Έτσι, εάν συγκρίνουμε τα τρία δείγματα μεταξύ τους παίρνοντας ως μικρότερο κλάσμα το συνολικό (total) βλέπουμε πως τα δείγματα εμφανίζουν παρόμοιο κοκκομετρικό διαχωρισμό (διάγραμμα 7).

ϕ	ΑΓ.ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ(%)	ΑΜΥΝΤΑΙΟ(%)	ΚΑΡΔΙΑ(%)
4	8.95	8.65	23.54
4.5	20.88	11.15	31.57
Δ.Β	49.41	53.76	22.39
TOTAL	**78.94**	**73.68**	**77.5**

Πίνακας 37. Σύγκριση των τριών τελευταίων κλασμάτων (ϕ=4,4.5,Δ.Β) των τριών δειγμάτων και του αθροιστικού τους συνόλου (total).



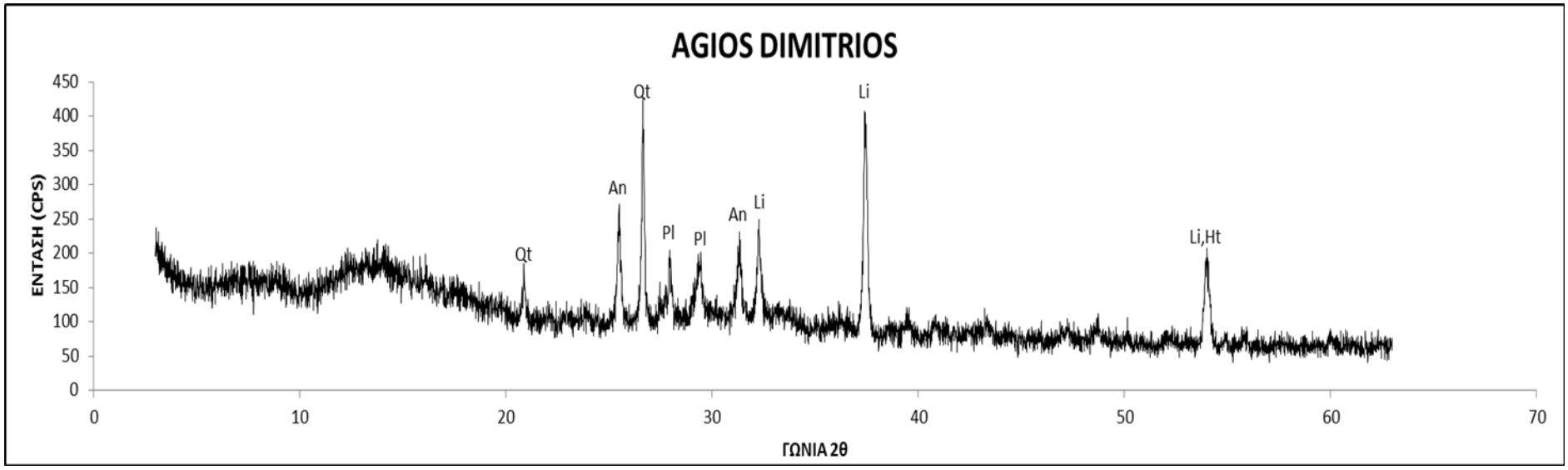
Διάγραμμα 7. Ποσοστιαία αποτύπωση των τριών τελευταίων κοκκομετρικών κλασμάτων σε καθένα από τα τρία δείγματα της τέφρας, (ΑΔ= Αγ. Δημήτριος, ΚΑΡ= Καρδιά, ΑΜ= Αμύνταιο).



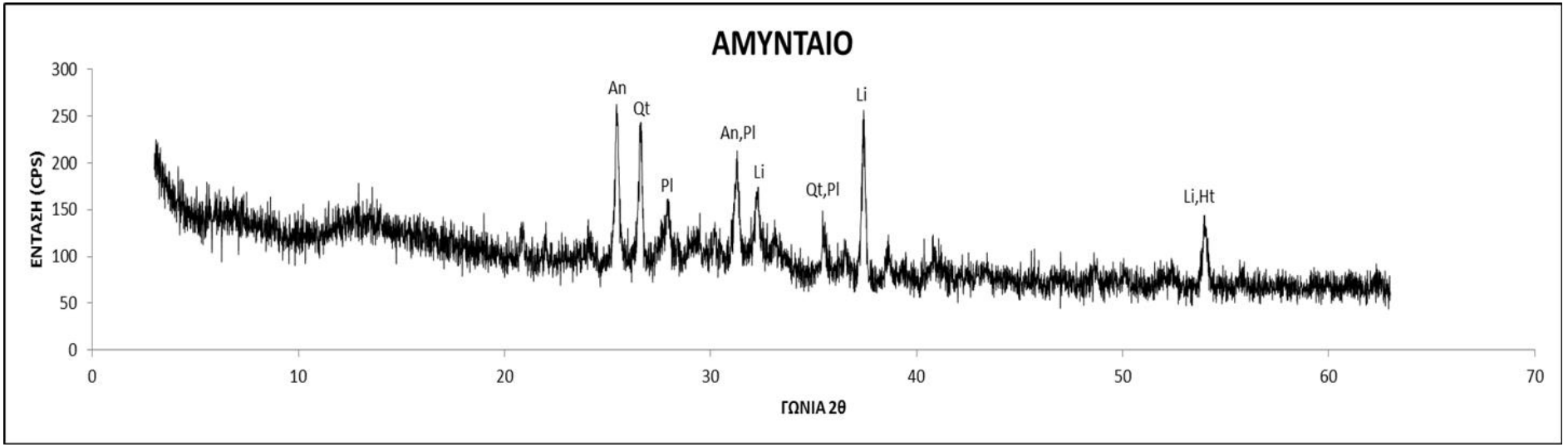
Διάγραμμα 8. Ποσοστιαία αποτύπωση ων κλασμάτων που προέκυψαν από το κοκκομετρικό διαχωρισμό των τριών δειγμάτων τέφρας, (ΑΔ= Αγ. Δημήτριος, ΚΑΡ= Καρδιά, ΑΜ= Αμύνταιο).

4.3 Ορυκτολογική σύσταση τέφρας

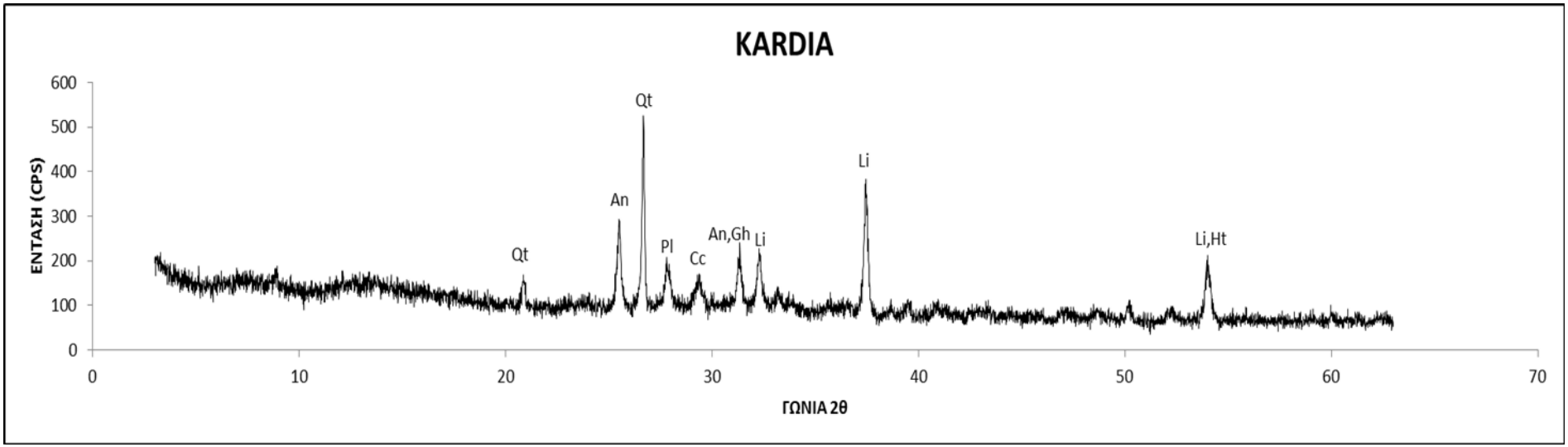
Η ορυκτολογική σύσταση των τριών δειγμάτων τέφρας προσδιορίστηκε με τη μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτίνων-Χ, από την οποία προέκυψαν τρία ακτινογράμματα. Η ερμηνεία των διαγραμμάτων και η ταυτοποίηση των ορυκτών έγινε με σύγκριση των δεδομένων γωνία **2θ^{o}, πλεγματική διάσταση (Å)** και **ένταση (Counts Per Second)**, που προέκυψαν από την περιθλασιμετρία του κάθε δείγματος, με τα μοναδικά δεδομένα πλεγματικών διαστάσεων του κάθε ορυκτού, όπως αυτά δίνονται από τις καρτέλες ASTM. Με την ερμηνεία των ακτινογραμμάτων του κάθε δείγματος προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα σχετικά με την ορυκτολογική σύσταση των δειγμάτων.



Διάγραμμα 9. Ακτινόγραμμα ιπτάμενης τέφρας του ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου. Qt=χαλαζίας , An=ανυδρίτης, Pl=πλαγιόκλαστο, Li=άσβεστος, Ht=αιματίτης.



Διάγραμμα 10. Ακτινόγραμμα ιπτάμενης τέφρας του ΑΗΣ Αμυνταίου. Qt=χαλαζίας , An=ανυδρίτης, Pl=πλαγιόκλαστο, Li=άσβεστος, Ht=αιματίτης.



Διάγραμμα 11. Ακτινόγραμμα ιπτάμενης τέφρας του ΑΗΣ Καρδιάς. Qt=χαλαζίας , An=ανυδρίτης, Pl=πλαγιόκλαστο, Cc=ασβεστίτης, Gh=γκελενίτης, Li=άσβεστος, Ht=αιματίτης.

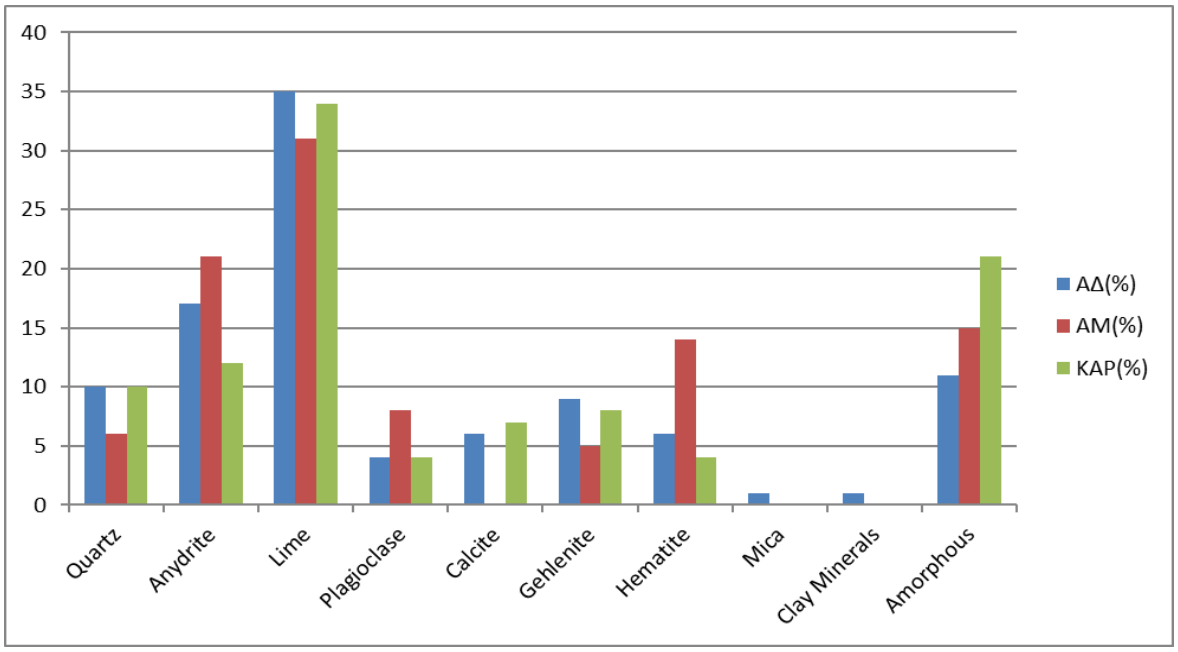
Τα κύρια ορυκτά που εντοπίζονται στα τρία δείγματα της ιπτάμενης τέφρας είναι: **χαλαζίας**, **ανυδρίτης**, **άσβεστος (lime)**, και **πλαγιόκλαστο**. Στα δείγματα Αγ. Δημητρίου και Καρδιάς εντοπίζεται και **ασβεστίτης**, ενώ στο δείγμα του Αμυνταίου όχι. Επουσιωδώς παρατηρούνται και στα τρία δείγματα **γκελενίτης**, **αιματίτης**, με μεγαλύτερο ποσοστό εμφάνισης στο δείγμα του Αμυνταίου ενώ **μαρμαρυγίες** και **αργιλικά ορυκτά** εντοπίζονται μόνο στο δείγμα του Αγ. Δημητρίου και σε πολύ μικρή ποσότητα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η ποσοτική ορυκτολογική ανάλυση των τριών δειγμάτων τέφρας που αναλύθηκαν.

Ορυκτολογική Φάση	**ΑΔ(%)**	**ΑΜ(%)**	**ΚΑΡ(%)**
Quartz	10	6	10
Anydrite	17	21	12
Lime	35	31	34
Plagioclase	4	8	4
Calcite	6	0	7
Gehlenite	9	5	8
Hematite	6	14	4
Mica	1	0	0
Clay Minerals	1	0	0
Amorphous	11	15	21

Πίνακας 38. Ποσοστιαία ορυκτολογική ανάλυση της ιπτάμενης τέφρας των ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου (ΑΔ), Αμυνταίου (ΑΜ) και Καρδιάς (ΚΑΡ).

Το ποσοστό του άμορφου υλικού κυμαίνεται από 11-21% με το υψηλότερο να παρατηρείται στην τέφρα από τον ΑΗΣ Καρδιάς και το χαμηλότερο στην τέφρα από τον ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η συγκριτική ποσοτική ορυκτολογική ανάλυση των τριών δειγμάτων.



Διάγραμμα 12. Συγκριτική ποσοστιαία ορυκτολογική ανάλυση των τριών δειγμάτων τέφρας, (ΑΔ= Αγ. Δημήτριος, ΚΑΡ= Καρδιά, ΑΜ= Αμύνταιο).

4.4 Δοκιμές διόγκωσης

Στα τρία δείγματα της τέφρας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές διόγκωσης κατά την προσθήκη τους σε τσιμέντο σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM C114 & C311. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η υψηλή περιεκτικότητα των ελληνικών ιπτάμενων τεφρών σε ελεύθερο CaO, αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για την εφαρμογή τους στην παρασκευή τεφροτσιμέντου, καθώς δημιουργούνται προβλήματα διόγκωσης του υλικού. Το ελεύθερο CaO που εντοπίζεται υψηλό στις ελληνικές τέφρες σχετίζεται άμεσα με τη χημική σύσταση του λιγνίτη τροφοδοσίας. Σημαντικό ρόλο παίζουν και οι συναπολαμβανόμενες στείρες ενστρώσεις που τροφοδοτούνται για καύση μαζί με το λίγνίτη. Στις περιπτώσεις που οι στείρες ενστρώσεις αποτελούνται κυρίως από μάργες, τα ποσοστά του CaO είναι ιδιαίτερα υψηλά. Το επιτρεπτό όριο στα ποσοστά αυτά, ώστε να μη δημιουργούνται τα προβλήματα που προκαλεί το CaO, είναι περίπου 3%.

Εικόνα 9. Αποτελέσματα δοκιμών διόγκωσης από την προσθήκη τέφρας σε τσιμέντο.

4.5 Συμπεράσματα

Με βάση τα αποτελέσματα των μεθόδων ανάλυσης συμπεραίνεται ότι:

- Οι τέφρες που μελετήθηκαν εμφανίζουν ίδια κοκκομετρική διαβάθμιση. Διαφοροποίηση εντοπίζεται στα τρία τελευταία κλάσματα, το άθροισμα όμως των οποίων φαίνεται ίδιο και στα τρία δείγματα.
- Η ορυκτολογική σύσταση των τεφρών είναι ίδια όσον αφορά στο είδος των ορυκτών, με τα ποσοστά τους όμως να διαφέρουν από τέφρα σε τέφρα. Επιπλέον, στην τέφρα του ΑΗΣ Αμυνταίου δεν εντοπίζεται ασβεστίτης, ενώ τα επουσιώδη ορυκτά, μαρμαρυγίες και αργιλικά εντοπίζονται μόνο στην τέφρα του ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου.
- Η χημική σύσταση των τεφρών δεν είναι σταθερή ακόμη και όταν προέρχονται από την ίδια περιοχή. Παρόλα αυτά, με βάση τις χημικές αναλύσεις, βγαίνει το συμπέρασμα ότι η τέφρα του ΑΗΣ Αμυνταίου τείνει να είναι η πιο αργιλοπυριτική, ενώ η τέφρα του ΑΗΣ Καρδιάς τείνει να είναι η πιο ασβεστούχα. Η τέφρα του ΑΗΣ Αγ. Δημητρίου θα μπορούσε να ταυτιστεί ως ασβεστοπυριτική.

Η ιπτάμενη τέφρα που προκύπτει από την καύση του λιγνίτη της Β. Ελλάδας παρουσιάζει ορισμένα προβλήματα τα οποία αποτελούν εμπόδια, που μόνο όταν ξεπεραστούν, η τέφρα αυτή θα μπορεί να αξιοποιηθεί σε μεγάλες ποσότητες για διάφορες χρήσεις και κυρίως ως βελτιωτικό τσιμέντου που είναι και μια από τις κύριες της εφαρμογές. Με βάση τα αποτελέσματα από τις μεθόδους ανάλυσης που εφαρμόστηκαν στα τρία δείγματα της ιπτάμενης τέφρας, τα προβλήματα που αυτή παρουσιάζει είναι:

1. **Ανομοιογένεια στη χημική σύσταση.** Η χημική σύσταση της τέφρας επηρεάζεται από τη χημική σύσταση των υλικών (λιγνίτης και στείρα) που εισέρχονται για καύση. Η χημική σύσταση των υλικών αυτών, καθώς και η ποσότητα των στείρων που εισέρχονται προς καύση διαφέρουν σε κάθε ΑΗΣ, με αποτέλεσμα να προκύπτουν διαφορετικής σύστασης τέφρες σε, σχεδόν, κάθε ΑΗΣ. Το βασικό πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι οι στείρες ενστρώσεις παρουσιάζουν έντονη διαφοροποίηση σε σχέση με το πάχος, τη συχνότητα εμφάνισης και τη χημική τους σύσταση. Συνεπώς καθίσταται δύσκολο να παραχθεί τέφρα με σταθερή χημική σύσταση.
2. **Πυριτικό περίβλημα.** Η τέφρα αποτελείται από διαφόρων μεγεθών σφαιρίδια τα οποία είτε είναι ελεύθερα είτε σχηματίζουν συσσωματώματα μεγαλύτερου μεγέθους. Χάρη σε αυτά η τέφρα εμφανίζει μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια και μπορεί να συμμετέχει σε αντιδράσεις και να συγκρατεί ιόντα. Τα σφαιρίδια αυτά αποτελούνται από περίβλημα πυριτικής σύστασης. Το πυριτικό περίβλημα δυσκολεύει τη χημική αλληλεπίδραση της τέφρας με τα συστατικά του τσιμέντου και δεν διευκολύνει γενικά την αξιοποίηση της.

3. **Ελεύθερο CaO.** Το ποσοστό του ελεύθερου CaO που περιέχεται στην τέφρα εκτός από τα περιβαλλοντικά και πρακτικά προβλήματα (αποθήκευση τέφρας) που προκαλεί, όταν βρίσκεται σε ποσοστά πάνω από το επιτρεπτό όριο (3.5-7%), δημιουργεί προβλήματα διόγκωσης καθώς και θερμοκρασιακές αυξήσεις που είναι ανεπιθύμητες.

Η ιπτάμενη τέφρα των ΑΗΣ Β. Ελλάδας έχει αξιοποιηθεί στο τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των φραγμάτων Πλατανόβρυσης και Θησαυρού (Dunstan et al, 1997; Δημητρούλα, 1997). Για τη συμμετοχή της στις κατασκευές αυτές, κρίθηκε αναγκαίο το σπάσιμο του υαλώδους περιβλήματος καθώς και ο συνεχής έλεγχος της χημικής της σύστασης. Για να επιτευχθούν τα παραπάνω κατασκευάστηκε μια **μονάδα λειοτρίβησης** της τέφρας. Η μονάδα αυτή στεγαζόταν στις εγκαταστάσεις του ΑΗΣ Πτολεμαΐδας και σήμερα βρίσκεται υπό αποξήλωση.

Η μονάδα περιλάμβανε κινητήρες μεγάλης ισχύος, διότι σε μια ημέρα παρήγαγε τόνους λειοτριβημένης τέφρας, έτοιμης για χρήση στο τσιμέντο. Αποτελούταν από έναν επικλινή μακρόστενο σφαιρόμυλο μήκους 12-15m και πλάτους 1.5 m, ο οποίος ήταν γεμάτος με σφαιρίδια διαμέτρου 20cm από ειδικό κράμα χάλυβα. Η τροφοδοσία της τέφρας στο σφαιρόμυλο γινόταν από ψηλά και με την περιστροφή των σφαιριδίων γινόταν η άλεση της. Παράλληλα με αυτήν τη διαδικασία, λαμβάνονταν συνεχώς δείγματα από την τέφρα τροφοδοσίας του μύλου στην οποία γίνονταν χημικές αναλύσεις. Κύρια σημασία δινόταν στην ποσότητα των θειϊκών. Εάν αυτά ήταν εκτός των επιτρεπτών ορίων η τέφρα δεν εισερχόταν στο μύλο. Το γεγονός αυτό αποτελεί συνέπεια της ανομοιογένειας σε χημική σύσταση που εμφανίζει η τέφρα καθώς και των έντονων αυξομειώσεων στην περιεκτικότητά της σε θείο. Επιπλέον, εφαρμοζόταν ψεκασμός της τέφρας με νερό για τη μείωση του ελεύθερου CaO, το οποίο έπρεπε να είναι εντός των επιτρεπτών ορίων (3.5-7%). Στην περίπτωση που το ποσοστό του ελεύθερου CaO ξέφευγε παραπάνω από 7%, γινόταν ελεγχόμενη ενυδάτωση της τέφρας για μετατροπή του CaO σε CaOH.

Βιβλιογραφία

Anastasiou E.K., Liapis A., Papayianni I. (2015). Comparative life cycle assessment of concrete road pavements using industrial by-products as alternative materials.

Andriano D.C., Page A.L., Elseewi A.A., Chang A.C., Straughan I. (1980). Utilization and disposal of fly ash and other coal residues in terrestrial ecosystems.

Antiohos S., Maganari K., Tsimas S. (2005). Evaluation of blends of high and low calcium fly ashes for use as supplementary cementing materials.

Antiohos S.K, Tsimas S. (2006). A novel way to upgrade the coarse part of a high calcium fly ash for reuse into cemet systems.

ASTM C 114-07. (American Society for Testing and Materials). *Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement.*

ASTM C 311-07. (American Society for Testing and Materials). *Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete.*

ASTM C 618-15. (American Society for Testing and Materials). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.*

Chousidis N., Ioannou I., Rakanta E., Koutsodontis C., Batis G. (2016). Effect of fly ash chmical composition on the reinforcement corrosion, thermal diffusion and strength of blended cement concretes.

Christanis K., Georgakopoulos A., Fernández-Turiel J.L., Bouzinos A. (1998). Geological factors influencing the concentration of trace elements in the Philippi peatland, eastern Macedonia, Greece.

Dewey G.R., Kayser M.A., Sutter, L.L. (1994). Characterization of electric utility coal fly ash for use in Portland cement concrete.

Dunstan M. (1997). The use of fly ash in conrete with particular reference to the RCC in Platanovryssi dam.

EN 206-1. (European Standards). Concrete. Specification, performance, production and conformity.

EN 450-1. (European Standards). Fly ash for concrete. Part 1: Definition, specification and conformity criteria.

EN 450-2. (European Standards). Fly ash for concrete. Part 2: Conformity evaluation.

Fernandez-Turiel J.L., Georgakopoulos A., Gimeno D., Papastergios G., Kolovos N. (2004). Ash Deposition in a Pulverized Coal-Fired Power Plant after High-Calcium Lignite Combustion.

Filippidis A., Georgakopoulos A. (1992). Minerological and chemical investigation of fly ash from the Main and Northern lignite field in Ptolemais, Greece.

Filippidis A., Georgakopoulos A., Kassoli-Fournaraki A. (1996). Mineralogical components of some thermally decomposed lignite and lignite ash from the Ptolemais basin, Greece.

Filippidis A., Georgakopoulos A., Kassoli-Fournaraki A. (1996). Minerological components of some thermally decomposed lignite and lignite ash from the Ptolemais basin, Greece.

Filippidis A., Georgakopoulos A., Kassoli-Fournaraki A., Misaelides P., Yiakkoupis P., Broussoulis P. (1995). Trace element contents in cornposited samples of three lignite seams from the central part of the Drama lignite deposit, Macedonia, Greece.

Fosdyke, G. (2008). *Coal Mining- Reasearch, Technology and Safety.*

Georgakopoulos A. (2003). Chemistry and morhology of fly ash samples from the main lignite power stations of northern Greece.

Georgakopoulos A., Adamidou K., Amanatidou E., Tsikritzis L. (2003). Chemistry of the fly ash and its respirable-size fraction (<10μm) from the power units of Agios Dimitrios thermal power plant, northern greece.

Georgakopoulos A., Filippidis A., Kassoli-Fournaraki A., Fernández-Turiel J.L., Lorens J.F., Mousty F. (2002). Leachability of Major and Trace Elements of Fly Ash from Ptolemais Power Station, Northern Greece.

Georgakopoulos A., Filippidis A., Kassoli-Fournaraki A., Iordanidis A. (2002). Environmentally Important Elements in Fly Ashes and Their Leachates of the Power Stations of Greec.

Ioranidis A., Zoras S., Triantafyllou A.G., Buckman J., Asvesta A., Evagelopoulos V. (2008). Characterisation of airborne particles collected proximal to lignite mines and power plants of Ptolemais-Kozani area, northern Greece.

Iordanidis A. (2010). Fly ash from the main lignite-fired power plants of Northern Greece: Utilization constraints and environmental implications.

Iordanidis A., Georgakopoulos A. (2003). Pliocene lignites from Apofysis mine, Amynteo basin, Northwestern Greece: petrographical characteristics and depositional environment.

Kalaitzidis S., Christanis K. (2002). Mineral Matter in the Philippi peat in relation to peat/lignite-forming conditions in Greece.

Kantiranis N., Filippidis A., Georgakopoulos A. (2005). Investigation of the uptake ability of fly ashes produced after lignite combustion.

Kassoli-Fournaraki A., Georgakopoulos A., Filippidis A. (1992). Heating experiments of the Ptolemais lignite in the temperature range from 100C to 500C .

Kolovos N. (2002). The effects on the lignite ash quality characteristics by the coexcavated thin intercalations in Ptolemais Mines, Northern Greece.

Kolovos N., Georgakopoulos A., Filippidis A., Kavouridis C. (2002). Environmental Effects of Lignite and Intermediate Steriles Coexcavation in the Southern Lignite Field Mine of Ptolemais, Northern Greece.

Kolovos N., Georgakopoulos A., Filippidis A., Kavouridis C. (2002). The Effects on the Mined Lignite Quality Characteristics by the Intercalated Thin Layers of Carbonates in Ptolemais Mines, Northern Greece.

Kolovos N., Georgakopoulos A., Filippidis A., Kavouridis C. (2002). Utilization of Lignite Reserves and Simultaneous Improvement of Dust Emissions and Operation Efficiency of a Power Plant by Controlling the Calcium (Total and Free) Content of the Fed Lignite. Application on the Agios Dimitrios Power Plant, Ptolemais, Gre.

Kolovos N., Sotiropoulos D, Georgakopoulos A. (2005). Coontribution on lignite recovery from multi-seam deposits.

Kostakis G. (2008). Characterization of the fly ashes from the lignite burning power plants of northern Greecebased on their quantitive mineralogical composition.

Naik T.R., Singh S.S. (1991). Superplasticized structural concrete containing high volumes of Class C fly ash.

Papadakis V.G, Tsimas S. (2005). Greek supplementary cementing materials and their incorporation in concrete.

Papayianni I., Anastasiou E. (2012). Development of low-cost concrete for road pavements.

Papayianni I., Milud I.A. (2005). Production of foamed concrete with high calcium fly ash.

Pavlides S.B, Moundrakis D.M. (1987). Extensional tectonics of northwestern Macedonia, Greece, since the late Miocene.

Skodras G., Grammelis P., Kakaras E., Karangelos D., Anagnostakis M., Hinis E. (2006). Quality characteristics of Greek fly ashes and potential uses.

Swaine D.J. (1994). Trace elements in coal and their dispersal during combustion.

Swaine D.J. (1995). *Division oj Coal and Energy Technology.*

Trethowan J. (1990). *The chemistry of brown coal.*

Tsimas S., Moutsatsou-Tsima A. (2005). High-calcium fly ash as the fourth constituent in concrete: problems, solutions and perspectives.

Δημητρούλα Μ. (1997). Ορυκτολογική μελέτη του τεφροσκυροδέματος απο το φράγμα Πλατανόβρυσης (Ν. Δράμας).

Ζησάκης Χ. (2011). Ανάλυση περιβαλλοντικών επιπτώσεων της λιγνιτικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρισμού ΑΗΣ Καρδιάς- Σύγκριση με μονάδα παραγωγής ηλεκτρισμού με καύσιμο φυσικό αέριο.

Ιορδανίδης Α., Γεωργακόπουλος Α., Φιλιππίδης Α., Κασώλη-Φουρναράκη Α. (2000). Γεωχημική μελέτη του λιγνιτικού κοιτάσματος Αμυνταίου.

Κολοβός Ν. (2005). Αξιολογηση των γεωλογικων και κοιτασματολογικων μελετων σε λιγνιτικα πολυστρωματικα κοιτασματα.

Κολοβός Ν. (2001). Το λιγνιτικό κοίτασμα του Νότιου Πεδίου της λεκάνης της Πτολεμαϊδας. *Διδακτορική διατριβή.*

Κολοβός Ν., Γεωργκόπουλος Α., Φιλλιπίδης Α., Καβουρίδης Κ., Κασώλη-Φουρναράκη Α., Καντηράνης Ν., Σταμούλης Κ., Σωτηρόπουος Δ., Λάσκος Κ. (2000). Οικονομική και περιβαλλοντική σημασία της συνεξόρυξης των ενδιάμεσων στείρων υλικών του λιγνιτορυχείου Νότιου πεδίου και του ΛΚΠ-Α.

Κούκουζας Ν., Βασιλάτος Χ., Γλαράκης Ι. (2000). Ορυκτολογική και πετρογραφική μελέτη σκυροδέματος με χρήση ιπτάμενης τέφρας Πτολεμαϊδας.

Μάτση Θ. (1997). Επίδραση της ιπτάμενης τέφρας προερχόμενης απο την καύση λιγνιτών στις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους και στην πρόσληψη στοιχείων απο τα φυτά. *Διδακτορική διατριβή, ΑΠΘ*.

Μιχαηλίδης Κ., Τρωντσιος Γ. (2000). Μελέτη της μορφολογίας και της γεωχημείας ιπτάμενης τέφρας απο περιοχές του νομού Κοζάνης-Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Παπαγιάννη Ι. (1981). Έρευνα για την αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας Πτολεμαϊδας στην παραγωγή σκυροδέματος. *Διδακτορική διατριβή, ΑΠΘ*.

Παπαγιάννη Ι. (1997). Αξιολόγηση της ιπτάμενης τέφρας ως δομικής κονίας.

Παυλίδης Σ. (1985). Νεοτεκτονική εξέλιξη της λεκάνης Φλώρινας Βεγορίτιδα Πτολεμαϊδας,Δ. Μακεδονίας.

Σταματάκης Μ., Φραγκούλης Δ., Παπαγεωργίου Α. (1997). Η διακύμανση της ποιότητας της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας και η επίδρασή της στην παραγωγή τεφροτσιμέντου.