



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ - ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ –
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΚΟΥΣΙΝΟΒΑΛΗΣ ΜΑΡΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΙΣΟΤΟΠΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ
ΜΟΛΥΒΔΟΥ ΑΠΟ ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2019





ΚΟΥΣΙΝΟΒΑΛΗΣ ΜΑΡΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΙΣΟΤΟΠΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ
ΜΟΛΥΒΔΟΥ ΑΠΟ ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ

Υποβλήθηκε στο τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας – Πετρολογίας – Κοιτασματολογίας

Επιβλέποντες καθηγητές

Καθηγητής Μ. Βαβελίδης
Αναπληρωτής καθηγητής Β Μέλος



©Μάριος Α. Κουσινόβαλης, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας–Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΙΣΟΤΟΠΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΜΟΛΥΒΔΟΥ ΑΠΟ ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ–*Διπλωματική Εργασία*

©Marios A. Kousinovalis, School of Geology, Dept. of Mineralogy-Petrology-Economic Geology, 2019

All rights reserved.

DATABASE CREATION OF ISOTOPICAL ANALYSIS OF LEAD FROM ORES IN GREECE– *Bachelor Thesis*

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 χρήση 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.



Περιεχόμενα

Περίληψη.....	Error! Bookmark not defined.
Abstract	Error! Bookmark not defined.
1. Πρόλογος – Αντικείμενο εργασίας.....	Error! Bookmark not defined.
2. Εισαγωγή	Error! Bookmark not defined.
2.1 Βασικές έννοιες	Error! Bookmark not defined.
2.2. Ο μόλυβδος (Pb) και τα κοιτάσματά του	Error! Bookmark not defined.
2.3. Ισότοπα Pb	Error! Bookmark not defined.
3. Ιστορική αναδρομή	Error! Bookmark not defined.
4. Αττική – Λαύριο	Error! Bookmark not defined.
5. Χαλκιδική	Error! Bookmark not defined.
6. Θάσος	Error! Bookmark not defined.
7. Κυκλάδες.....	Error! Bookmark not defined.
7.1 Γενικά.....	Error! Bookmark not defined.
7.2 Σίφνος	Error! Bookmark not defined.
8. Αποτελέσματα από τις ισοτοπικές αναλύσεις αρχαίων νομισμάτων	Error! Bookmark not defined.
8.1 Αίγινα.....	Error! Bookmark not defined.
8.2 Κόρινθος	Error! Bookmark not defined.
9 Μακεδονία – Θράκη	Error! Bookmark not defined.
9.1. Παγγαίο.....	Error! Bookmark not defined.
9. 2 Σιταγροί.....	Error! Bookmark not defined.
9.3. Σκαπτή Ύλη (Παλιά Καβάλα)	Error! Bookmark not defined.
10. Μικρά Ασία	Error! Bookmark not defined.
11. Βόλος	Error! Bookmark not defined.
12. Εύβοια	Error! Bookmark not defined.
13. Ανατολικό Αιγαίο	Error! Bookmark not defined.
14. Συζήτηση και συμπεράσματα	Error! Bookmark not defined.
15. Βιβλιογραφία	Error! Bookmark not defined.



Περίληψη

Δημιουργία βάσης δεδομένων ισοτοπικών αναλύσεων μολύβδου από ελληνικά κοιτάσματα

Κουσινόβαλης Μάριος Αντώνιος ΑΕΜ: 5431

Σκοπός αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι η παρουσίαση, η ταξινόμηση και η ερμηνεία των δεδομένων που προέκυψαν από παλαιότερες αναλύσεις ισοτόπων μολύβδου (Pb) σε ελληνικά κοιτάσματα. Τέτοια κοιτάσματα βρέθηκαν σε όλη την έκταση του ελληνικού χώρου καθώς και σε περιοχές του Αρχαίου Ελληνικού κόσμου όπως η Μικρά Ασία. Η δομή της διπλωματικής αυτής είναι τέτοια ώστε να ξεκινάει από τα σημαντικότερα κοιτάσματα και ολοκληρώνεται με τα δευτερεύοντα. Στο τέλος υπάρχει μια μικρή σύνοψη των δεδομένων καθώς και συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη τους.

Abstract

A data-base of Pb isotopes from ore mineralizations in Greece

Kousinovalis Marios Antonios 5431

The purpose of this diploma thesis is to present, classify, and interpret the data derived from previous analyses of lead isotopes in Greek ore deposits. Such deposits are found throughout the Greek territory as well as in areas with the Ancient Greek civilization e.g. Asia Minor. This diploma thesis describes in the beginning the most important deposits, which are presented in details, and then depicts the less significant mineralizations. In the end, there is a small summary of the data as well as the conclusions drawn from their study.

1. Πρόλογος – αντικείμενο εργασίας

Ανάμεσα σε όλες τις αρχαιολογικές ανακαλύψεις που πραγματοποιήθηκαν στον ελληνικό χώρο ήδη από τον 19^ο αιώνα, συμπεριλαμβάνεται και η εύρεση πολυάριθμων ασημένιων (αργυρών) νομισμάτων σε αρκετές περιοχές. Περιοχές οι οποίες κατά την αρχαιότητα αποτελούσαν σημαντικά οικονομικά κέντρα της Ελλάδας, για παράδειγμα η Αθήνα (και γενικά η Αττική) ή η περιοχή της Ιωνίας στην Μ. Ασία.

Με χημικές μελέτες των νομισμάτων αποδείχθηκε πως σε κάθε αργυρό νόμισμα υπάρχουν και ίχνη μολύβδου (Pb) αφού ο άργυρος έχει χημική συγγένεια με τον μόλυβδο και συνήθως εντοπίζεται μέσα σε μεταλλεύματα γαληνίτη (PbS). Αυτό σημαίνει ότι με την ανάλυση των ισοτόπων μολύβδου στα αργυρά νομίσματα είναι δυνατός ο προσδιορισμός της ακριβούς τοποθεσίας του κοιτάσματος από το οποίο εξορύχθηκε ο άργυρος για να κοπεί το συγκεκριμένο νόμισμα. Επομένως, κύρια πηγή πληροφοριών σχετικά με τα ισότοπα του μολύβδου αποτελεί το σύνολο αυτών των νομισμάτων.

Σκοπός της εργασίας αυτής λοιπόν αποτελεί η συγκέντρωση και παρουσίαση των δεδομένων που προέκυψαν από αυτές τις μελέτες. Επιπλέον, σε αυτή την εργασία παρουσιάζονται, για κάθε τοποθεσία, οι αντίστοιχοι πίνακες και διαγράμματα που προκύπτουν από κάθε ισοτοπική ανάλυση.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στη περάτωση της παρούσας εργασίας και συγκεκριμένα τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Μιχάλη Βαβελίδη του Τομέα Ορυκτολογίας – Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας για την ιδέα και την ανάθεση του θέματος αυτού, καθώς για την διάθεση των ισοτοπικών αναλύσεων από το αρχείο του. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Βασίλη Μέλφο για την επίβλεψη και τις συμβουλές κατά την διάρκεια συγγραφής της εργασίας.

Όλα τα ηλεκτρονικά αρχεία της εργασίας παρατίθενται στον συνοδευόμενο ψηφιακό δίσκο.

2. Εισαγωγή

2.1 Βασικές έννοιες

Προτού προχωρήσουμε με την εργασία, είναι σημαντικό ο αναγνώστης να γνωρίζει τη σημασία κάποιων όρων που θα συναντήσει παρακάτω. Αυτοί είναι:

Ισότοπα: Θα μπορούσαν να χαρακτηρισθούν οι διάφορες «εκδοχές» του ίδιου χημικού στοιχείου, για παράδειγμα του άνθρακα. Τα ισότοπα αυτά παρόλο που έχουν τον ίδιο ατομικό αριθμό, συνεπώς τις ίδιες χημικές ιδιότητες (ανάλογα με το στοιχείο), διαφέρουν στον μαζικό τους αριθμό. Για τα ισότοπα του μολύβδου θα γίνει εκτενής αναφορά παρακάτω.

Σκωρία (slag): Πρόκειται συνήθως για ένα μείγμα οξειδίων μετάλλων και διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2). Αποτελεί το παραπροϊόν της μεταλλουργικής διεργασίας και έχει υαλώδη υφή. Συχνά αποτελεί το ίζημα σε μια κάμινο μεταλλουργίας. Πολλές φορές με τον όρο «σκωρία» αναφερόμαστε στην σκουριά που προκύπτει.

Παραπροϊόν: Με αυτόν τον όρο αναφερόμαστε στο υλικό το οποίο προκύπτει μέσα από μια χημική αντίδραση με τη διαφορά όμως πως αυτό έχει ελάχιστη έως καθόλου χρησιμότητα. Αλλιώς λέγεται και «υποπροϊόν». Ως ένα τέτοιο παραπροϊόν μπορεί να θεωρηθεί και ο λιθάργυρος.

Λιθάργυρος (litharge): Ορυκτό με σύσταση μονοξειδίου του μολύβδου και με χημικό τύπο PbO το οποίο προκύπτει από την εκμετάλλευση αργύρου ως παραπροϊόν. Σχηματίζεται ως επιφλοίωση ανάλογα με τον βαθμό οξείδωσης των πρωτογενών κοιτασμάτων. Συνήθως εμφανίζεται ως μία πορτοκαλοκίτρινη κρούστα σε μολυβδόχυα ορυκτά (πχ. Γαληνίτης).

Εποχή του Χαλκού: Ονομάζουμε την περίοδο της προϊστορίας που στον Αιγαίο χώρο εκτείνεται περίπου από την 3^η χιλιετία μέχρι το 1000 π.Χ. Χαρακτηρίζεται ως η εποχή όπου ανθίζει η κατεργασία μετάλλων και ειδικά του χαλκού, όπως φαίνεται από τα πολυάριθμα χάλκινα ευρήματα από εκείνη την περίοδο.

Εκμετάλλευση: Η μαζική εξόρυξη μετάλλου από ένα κοίτασμα με σκοπό την μετέπειτα κατεργασία του και αξιοποίησή του.

2.2 Ο μολύβδος και τα κοιτάσματά του

Όπως προαναφέρθηκε, μέσα από την χημική εξέταση των αργυρών νομισμάτων έχουν βρεθεί στο καθένα από αυτά και ίχνη μολύβδου. Επιπλέον, ο μολύβδος, όπως και ο ψευδάργυρος Zn , παρουσιάζει χημική συγγένεια με το θείο. Αυτός είναι ο λόγος που τα κοιτάσματα των μετάλλων αυτών είναι συγγενή με αυτά του χαλκού. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να συμπεριλάβουμε και μελέτες από χάλκινα ευρήματα.

Συνηθέστερη πηγή μολύβδου αποτελεί το μικτό μέταλλευμα από σιδηροπυρίτη, σφαλερίτη και γαληνίτη, το οποίο αποκαλείται και P.B.G. (Pyrite - Blende=Sphalerite - Galena). Στον ελληνικό χώρο είναι γνωστά και με την ονομασία «μεικτά θειούχα». Υδροθερμικά κοιτάσματα μεικτών θειούχων είναι πολύ διαδεδομένα στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου. Συνήθως, σε αυτά τα κοιτάσματα συνυπάρχει και ο χαλκοπυρίτης, επομένως υπάρχει και η ονομασία P.B.G.C. ($\text{C} \rightarrow \text{Chalcopyrite}$).

Σημαντικό βέβαια είναι να προσθέσουμε πως ο μόλυβδος, όπως και ο κασσίτερος, δεν εμφανίζεται ως αυτοφυής στη φύση παρά μόνο ως συστατικό κάποιων ορυκτών. Κύριες πηγές εξαγωγής μολύβδου αποτελούν τα ορυκτά: γαληνίτης (PbS) και κερουσίτης (PbCO₃). Δευτερεύον ορυκτό του μολύβδου αποτελεί και ο αγγλεσίτης (PbSO₄).

2.3 Ισότοπα

Τα ισότοπα του μολύβδου είναι τέσσερα (4): ²⁰⁴Pb, ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb και ²⁰⁸Pb. Βασικό τους χαρακτηριστικό είναι οι παρόμοιες χημικές ιδιότητες. Με βάση την αναλογία των ισοτόπων είναι δυνατή η εύρεση της περιοχής προέλευσης (κοίτασμα) της πρώτης ύλης που χρησιμοποιήθηκε κάθε φορά. Τρία από τα ισότοπα αυτά, τα ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb και ²⁰⁸Pb, μετατρέπονται διαρκώς μέσα στη μάζα των πετρωμάτων μέσω της μετασώματωσης σε τρία ραδιενεργά ισότοπα. Αυτά είναι αντίστοιχα: ²³⁸U, ²³⁵U και ²³²Th. Από τα 4 ισότοπα του μολύβδου, η συγκέντρωση του ²⁰⁴Pb δεν εξετάζεται. Αυτό επειδή η συγκέντρωσή του παραμένει αμετάβλητη ως προς τον χρόνο και συνεπώς στις χημικές αναλύσεις δρα ως σταθερός παράγοντας.

Συνεπώς, με βάση τα παραπάνω ισότοπα, εξετάζονται οι εξής αναλογίες:

- ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb
- ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb
- ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb

Κάθε πέτρωμα (και το αντίστοιχο κοίτασμα) διαθέτει μια διαφορετική αναλογία ισοτόπων μολύβδου. Επομένως, καθώς η έρευνα επικεντρώνεται στα αρχαία νομίσματα (Σχήμα 1), ανάλογα με την ισοτοπική αναλογία κάθε νομίσματος, είναι δυνατή η εύρεση του κοιτάσματος από το οποίο εξορύχθηκε το συγκεκριμένο μέταλλευμα (Σχήμα 7).

Επιπλέον γνωρίζουμε πως η ισοτοπική σύσταση δεν επηρεάζεται από οποιαδήποτε θερμική κατεργασία του μεταλλεύματος. Αυτό μας δίνει την πολυτέλεια να αρκεστούμε στην απλή μελέτη των ισοτόπων του μεταλλεύματος, χωρίς να μας απασχολεί η όποια μετέπειτα κατεργασία ακολούθησε.

Ωστόσο, μελέτες έδειξαν πως η ισοτοπική αναλογία μπορεί να μεταβληθεί μέσω μεταμορφικών διεργασιών ενός πετρώματος. Έτσι αποδείχθηκε ότι πετρώματα που βρίσκονται στον κατώτερο φλοιό και τον ανώτερο μανδύα περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες Pb σε σχέση με Th και U. Όμως αρκετά σημαντικά κοιτάσματα φαίνεται να περιέχουν «μίγματα» Pb και από τα δύο τμήματα.

3. Ιστορική αναδρομή

Ο ελληνικός χώρος, όπως είναι γνωστόν παρουσιάζει ίχνη κατοίκησης ήδη από τη Νεολιθική περίοδο. Και αξίζει να αναφερθεί πως πρόκειται για μία περιοχή με συνεχή δραστηριότητα στο πέρασμα των αιώνων μέχρι σήμερα. Επομένως, είναι

λογικό να κάνουμε λόγο και για μεταλλευτική δραστηριότητα στον ελλαδικό χώρο, λόγω και της κρίσιμης γεωγραφικής του θέσης αλλά και λόγω των σημαντικών κοιτασμάτων που υπάρχουν γύρω από το Αιγαίο. Σύμφωνα με αρχαίες πηγές, κατά την κλασική περίοδο (5^{ος} – 4^{ος} αιώνας π.Χ.) αλλά και στους ελληνιστικούς χρόνους (3^{ος} – 2^{ος} αιώνας π.Χ.) η εξόρυξη βρισκόταν στο αποκορύφωμά της.



Σχήμα 1. Μπροστινή και οπίσθια όψη αθηναϊκού τετράδραχμου (Wikipedia).

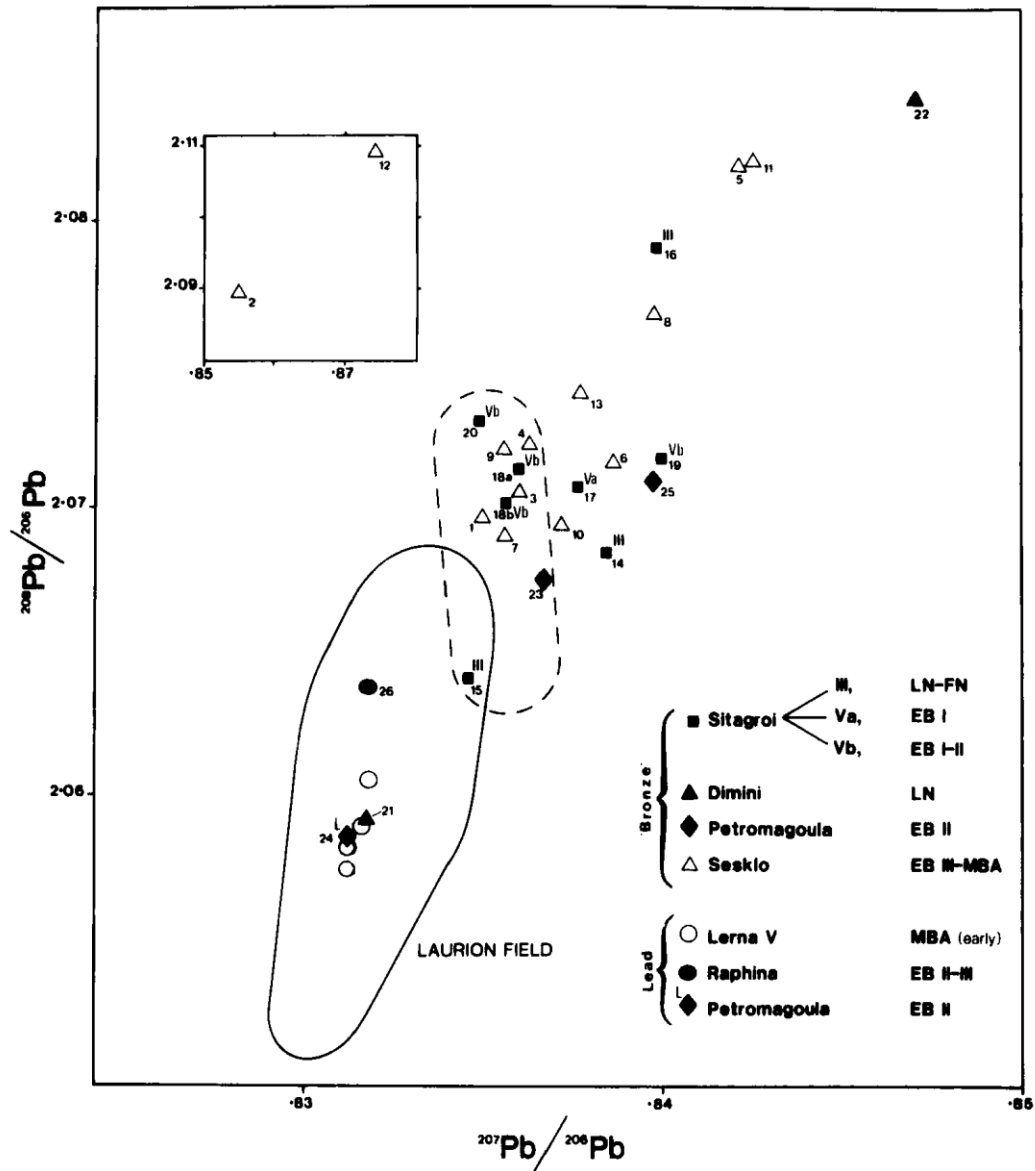
Δυστυχώς όμως, πολλά από τα αρχαία μεταλλεία καταστράφηκαν από την εξόρυξη σιδήρου κατά τον 19^ο αιώνα. Άλλα που βρίσκονται σε βαθύτερα σημεία έχουν πλημμυρίσει και βρίσκονται πλέον κάτω από το επίπεδο της θάλασσας. Πέρα από το Λαύριο, περιοχές της Βόρειας Ελλάδας όπως η Θάσος, η ΒΑ Χαλκιδική και η Σκαπτή Ύλη κατέχουν εξέχουσα θέση στην εκμετάλλευση αργύρου-μολύβδου από την προϊστορική περίοδο μέχρι την Τουρκοκρατία.

Ξεκινώντας, είναι σημαντικό να ξεκαθαρίσει ο αναγνώστης το τι ακριβώς εννοούμε με τον όρο «προϊστορικοί χρόνοι». Οι προϊστορικοί χρόνοι, όχι μόνο για την Ελλάδα, χωρίζονται σε δύο εποχές. Ξεκινάνε με την εποχή του Λίθου (περίπου 2,5 εκατομμύρια χρόνια πριν έως το 3.300 π.Χ.) και συνεχίζουν με την εποχή του Χαλκού (3.300 π.Χ. – 1.000 π.Χ.). Για τη μελέτη που αφορά αυτή την εποχή, έχουν επιλεγθεί ορισμένες περιοχές του ελληνικού χώρου. Από αυτές, οι Σιταγροί (νομός Δράμας) παρουσίασαν την αρχαιότερη ένδειξη μεταλλουργίας στον ελληνικό χώρο, η οποία χρονολογείται κατά την Νεολιθική περίοδο (McGeehan et al. 1988)

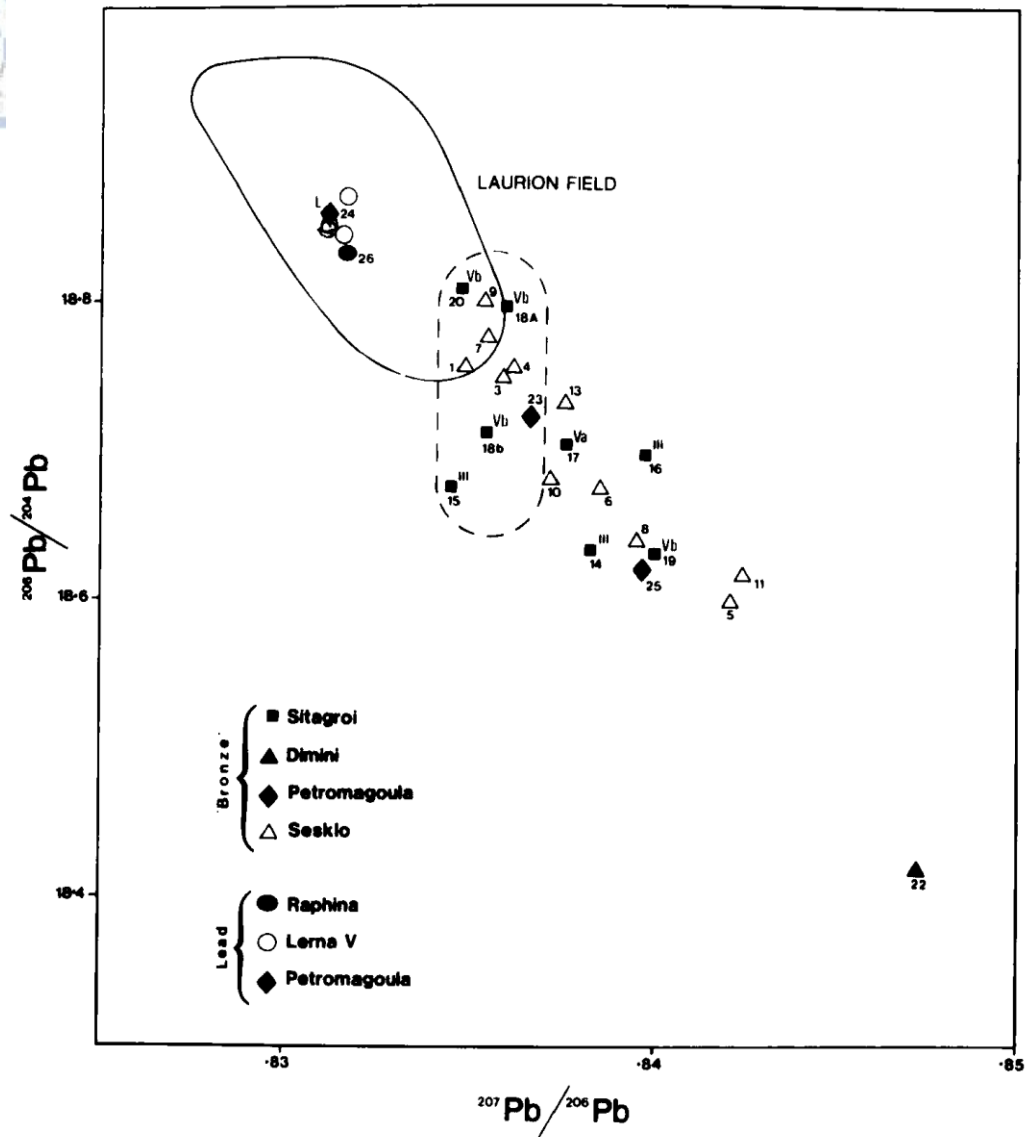
Σε γενικές γραμμές, εξαγωγή γαληνίτη πραγματοποιούνταν, σύμφωνα με αντίστοιχα ευρήματα, ήδη από τη Μέση εποχή του Χαλκού. Αυτό φαίνεται από την εύρεση αντικειμένων σε τοποθεσίες όπου άκμαζε κάποτε ο Μυκηναϊκός πολιτισμός (Μυκήνες, Πελοπόννησος, Στερεά Ελλάδα, Κυκλάδες). Το έτος 483 π.Χ. φαίνεται να ήταν, σύμφωνα με τον Ηρόδοτο, η χρονιά με την μεγαλύτερη εξαγωγή μεταλλεύματος στον ελλαδικό χώρο.

Σε εκείνες τις περιοχές, παρατίθενται τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις για τις ισοτοπικές αναλογίες $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ και $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ως προς $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$. Αξίζει να σημειώσουμε πως τα μολύβδινα αντικείμενα από Σιταγρούς, Ραφήνα, Πετρομάγουλα και Λέρνη εμφανίζουν αποτελέσματα παρόμοια με αυτά του Λαυρίου (McGeehan Et al. 1988). Στα σχήματα 2 και 3 δίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων σχηματοποιημένα.

Μέσα από τις αναλύσεις σε μόλυβδο από την περιοχή των Κυκλάδων αποδείχθηκε πως κατά την Πρώιμη εποχή του Χαλκού, αποθέματα μολύβδου από το Λαύριο έχουν φτάσει μέχρι τα νησιά Σύρος, Νάξος και Αμοργός (McGeehan et al. 1988).

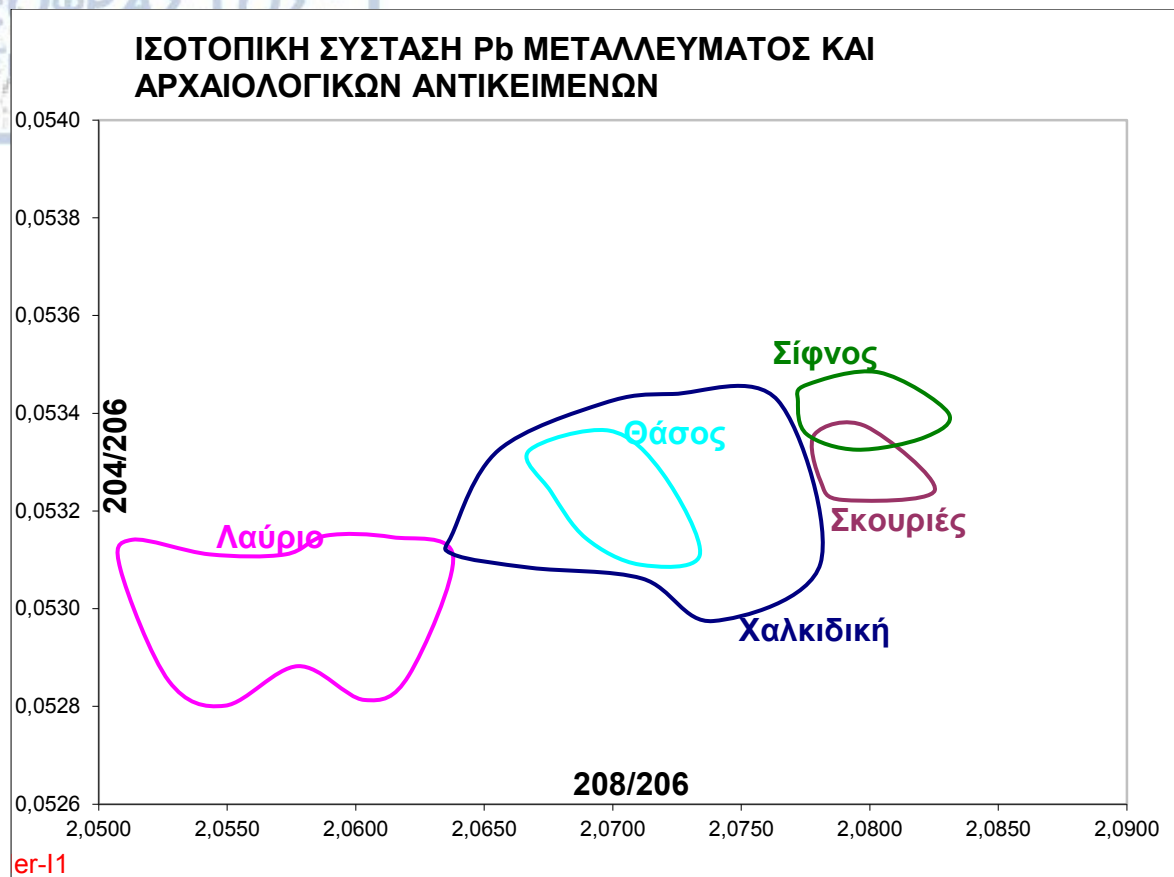


Σχήμα 2. Διάγραμμα για τις αναλογίες $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ και $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (McGeehan et al. (1988)).

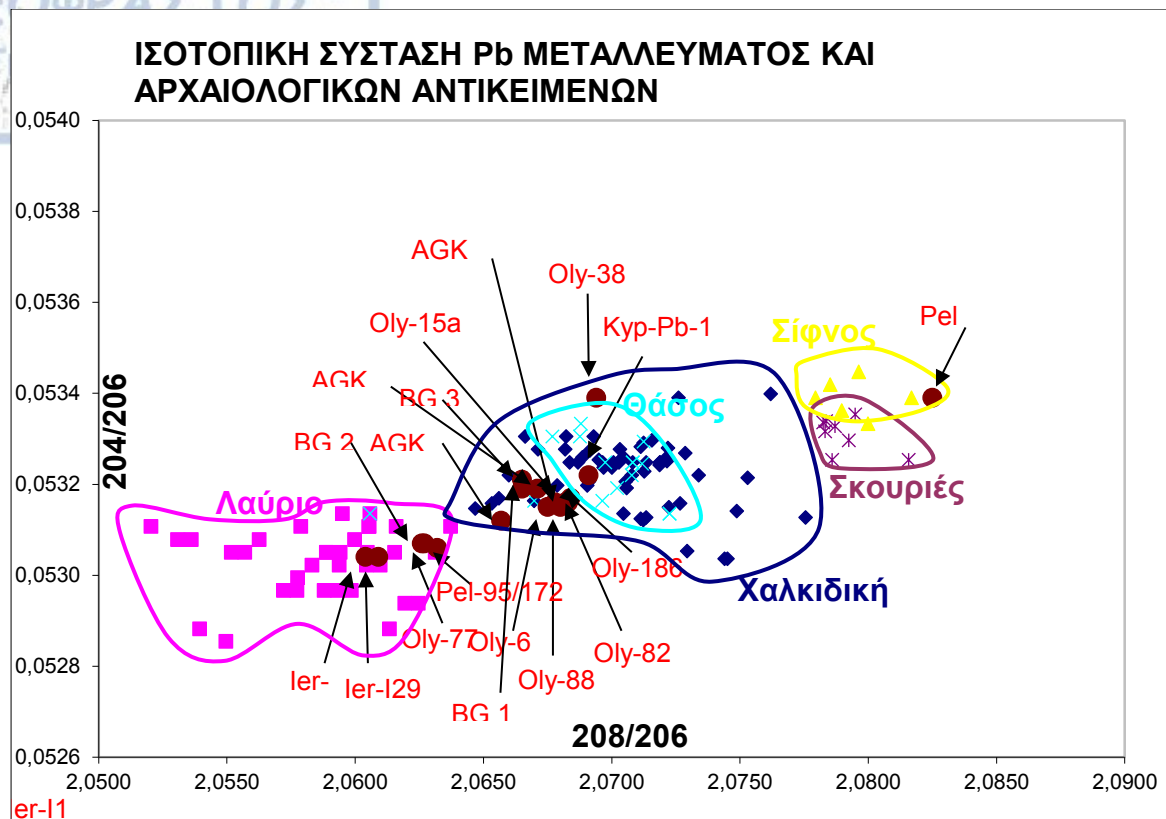


Σχήμα 3. Το αντίστοιχο διάγραμμα για τις αναλογίες $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ και $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (McGeehan et al. 1988).

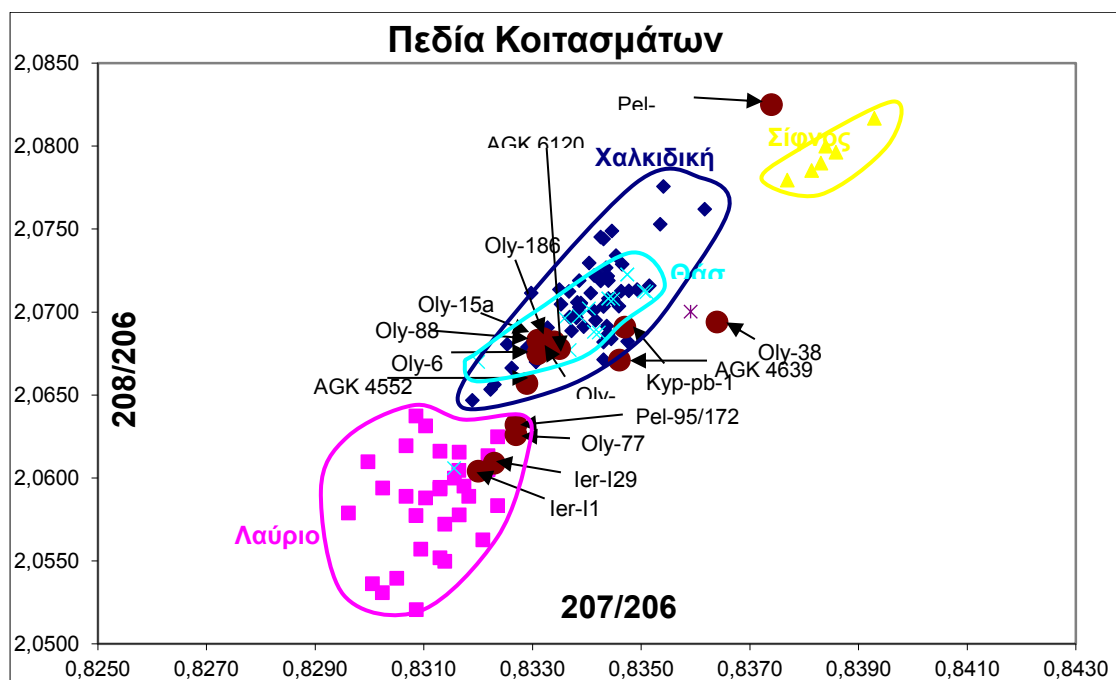
Στα επόμενα τρία διαγράμματα (Σχ. 4,5,6) παρατίθεται τα εύρη τιμών που προέκυψαν από μετρήσεις των ισοτοπικών αναλογιών μολύβδου. Συγκεκριμένα, στα πρώτα δύο παρουσιάζονται οι αναλογίες $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ και $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, ενώ στο τρίτο οι αναλογίες $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ και $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, τα εξεταζόμενα δείγματα από το Λαύριο, τη Σίφνο, τη Θάσο, τις Σκουριές και την ευρύτερη Χαλκιδική. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το πως η κάθε περιοχή παρουσιάζει ξεχωριστό εύρος τιμών από τις υπόλοιπες. Εξαιρείται η Θάσος, η οποία παρουσιάζεται ,και στα τρία διαγράμματα, εντός του εύρους της Χαλκιδικής.



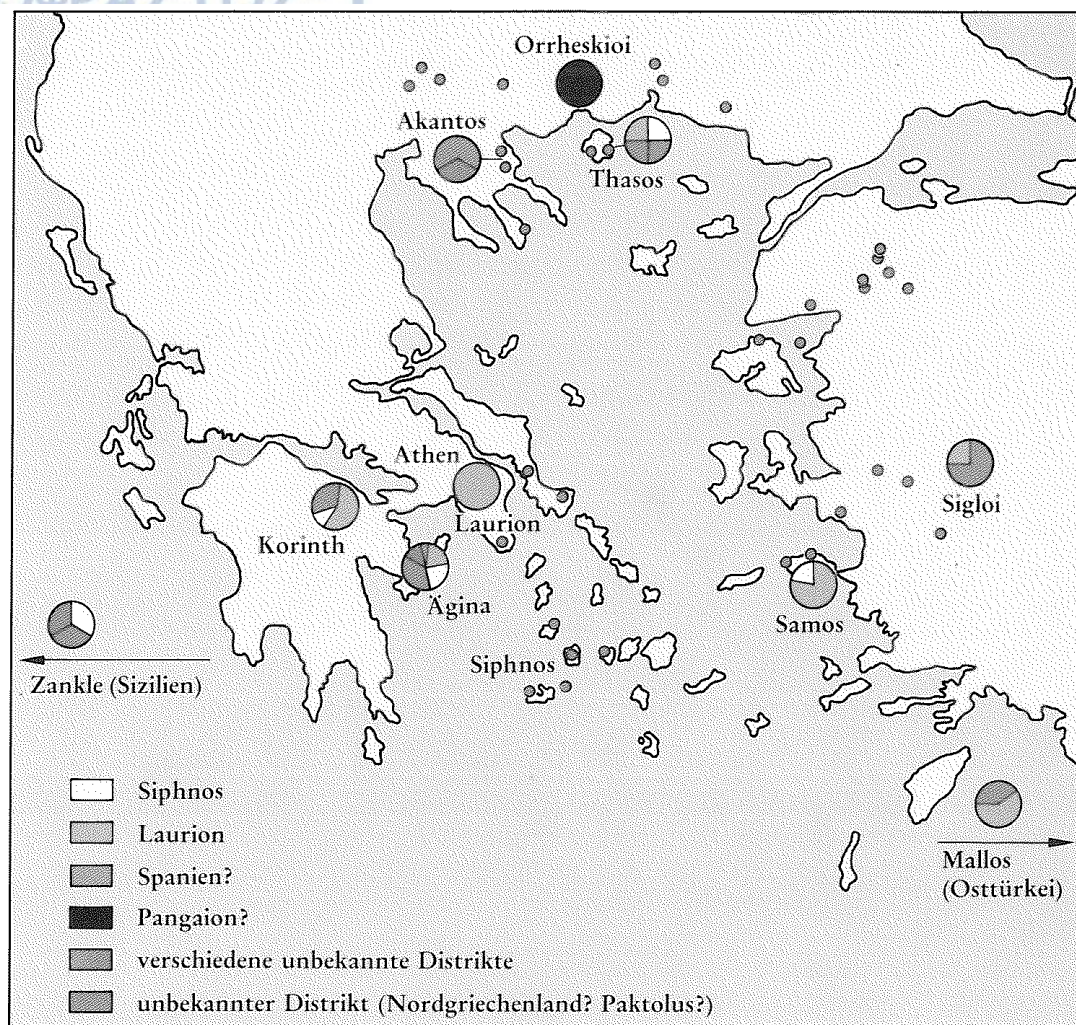
Σχήμα 4. Διάγραμμα το οποίο δείχνει τα εύρη τιμών που προέκυψαν για τις ισοτοπικές αναλογίες $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ και $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$. Όπως φαίνεται στο σχήμα, συμπεριελήφθησαν δείγματα από το Λαύριο, Χαλκιδική, Σκουριές, Θάσο και Σίφνο. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός πως η κάθε περιοχή, με εξαίρεση την Θάσο, παρουσιάζει ξεχωριστό εύρος τιμών από τις υπόλοιπες (από Καθηγητή Μ. Βαβελίδη, αδημοσίευτο).



Σχήμα 5. Το ίδιο διάγραμμα, στο οποίο όμως βρίσκονται σημειωμένες οι κωδικές ονομασίες των τοποθεσιών από τις οποίες προέκυψαν τα δείγματα με τις αντίστοιχες τιμές αναλογιών (από Καθηγητή Μ. Βαβελίδη, αδημοσίευτο).



Σχήμα 6. Διάγραμμα το οποίο δείχνει τις τιμές για τις αναλογίες $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ και $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ομοιότητα της κατανομής του εύρους τιμών για κάθε περιοχή, με την αντίστοιχη κατανομή στο προηγούμενο διάγραμμα (από Καθηγητή Μ. Βαβελίδη, αδημοσίευτο).



Σχήμα 7. Χάρτης του ελλαδικού χώρου με σημειωμένες τις κυριότερες τοποθεσίες όπου βρέθηκαν ασημένια νομίσματα. Δίπλα στην κάθε ονομασία εμφανίζεται κυκλικό διάγραμμα που δείχνει το ποσοστό συμμετοχής του κάθε κοιτάσματος ως προς το υλικό των νομισμάτων. (Wagner and Pernicka 1982)

4. Αττική – Λαύριο

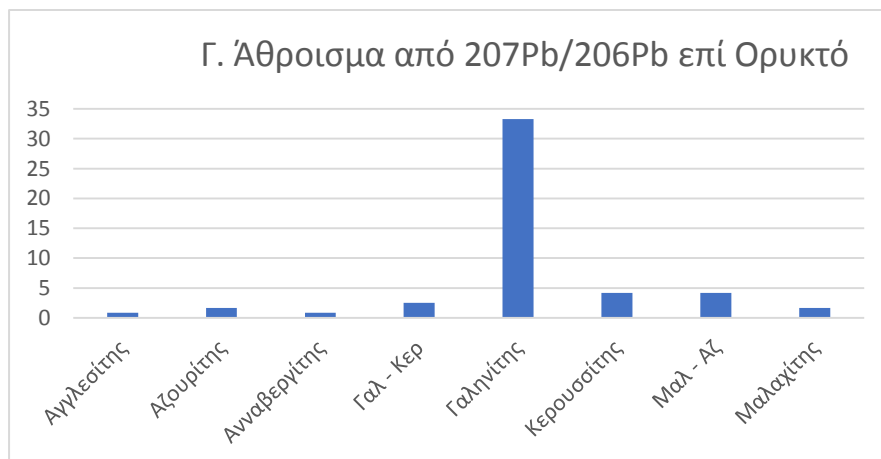
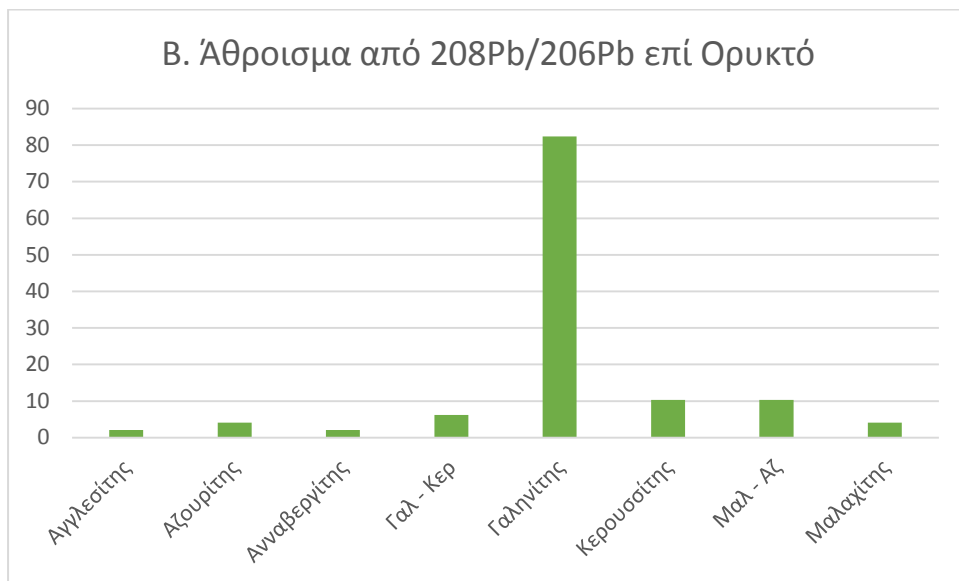
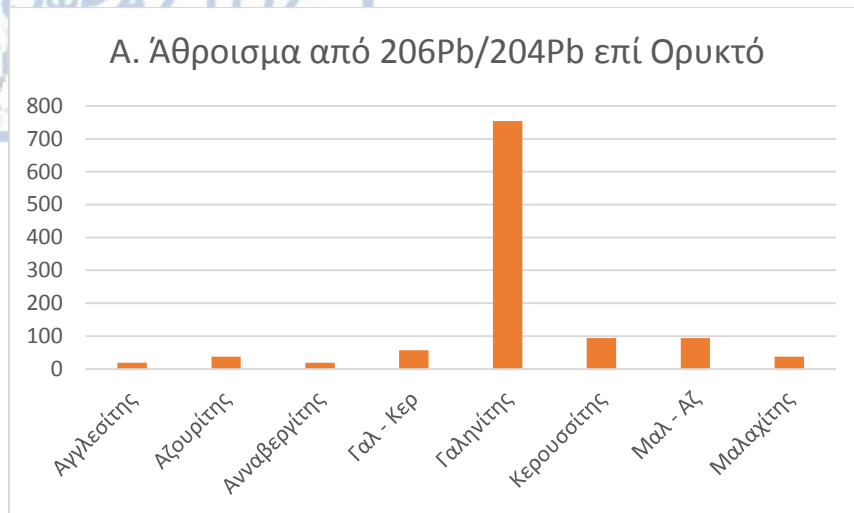
Ξεκινώντας με την παρουσίαση των περιοχών όπου βρέθηκαν κοιτάσματα, δε γινόταν να μην ξεκινήσουμε από τη περιοχή του Λαυρίου στην Αττική. Είναι ευρέως γνωστή, από ποικίλες πηγές, η μεγάλη σημασία κατείχε αυτή η περιοχή για τους αρχαίους Έλληνες (και δη τους Αθηναίους). Αυτό γιατί τα μεγαλύτερα και σπουδαιότερα κοιτάσματα για τον αρχαίο ελληνισμό, βρισκόντουσαν σε αυτή τη περιοχή. Πολλοί ιστορικοί όπως ο Ηρόδοτος, έχουν κάνει αρκετές αναφορές για αυτά τα κοιτάσματα από τα οποία έχουν εξορυχθεί ποικίλα μέταλλα, ανάμεσα από τα οποία και ο μόλυβδος (Κονοφάγος 1980, Τσάιμου 1997, Κακαβογιάννης 2005).

Ξεκινώντας λοιπόν με το Λαύριο, ισοτοπικές αναλύσεις μολύβδου από γαληνίτη και διάφορα οξειδία έδειξαν ένα μικρό εύρος τιμών (γύρω στο 0,3‰). Σε γενικές γραμμές, αποτελέσματα έδειξαν πως το μετάλλευμα από το Λαύριο περιέχει σχετικά χαμηλή αναλογία $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ όπως και χαμηλή αναλογία $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$.

Μια σημαντική παράκτια πόλη της ΝΑ Αττικής κατά την αρχαιότητα αποτελούσε ο Θορικός. Βρισκόταν σε κοντινή απόσταση από τα μεταλλεία του Λαυρίου και είχε συμπληρωματικό ρόλο όσον αφορά την εξόρυξη μεταλλευμάτων. Το μετάλλευμα του Θορικού αποτελεί ένα μείγμα κερουσίτη και λιθαργύρου (Mussche 1963 – 1976). Δείγμα από τον Θορικό του 5^{ου} αιώνα π.Χ. προβάλλεται στο διάγραμμα $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ μέσα στο πεδίο των αποτελεσμάτων του Λαυρίου.

Μέσω των ισοτοπικών αναλύσεων από τη περιοχή του Λαυρίου προέκυψε το συμπέρασμα πως κατά την αρχαιότητα, αποτέλεσε την κυριότερη πηγή για τα περισσότερα από τα αθηναϊκά νομίσματα (Gentner et al. 1978). Τα αποτελέσματα των ισοτοπικών αναλύσεων παρουσιάζονται στο σχήμα 8 (Α – Β – Γ).

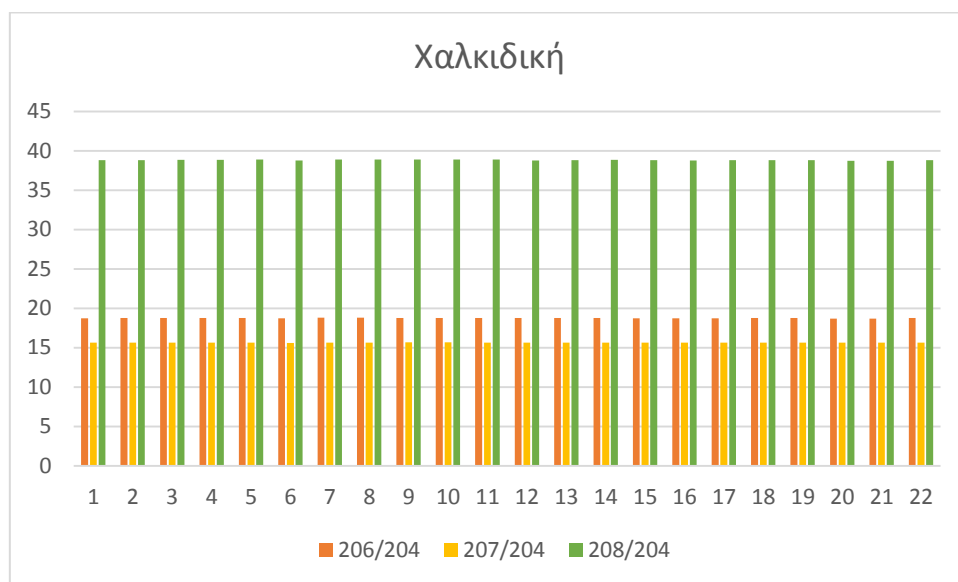
Επίσης ενδιαφέρον είναι να προσθέσουμε πως τη περίοδο 450 – 420 π.Χ. λόγω της λεγόμενης «Συμμαχίας της Δήλου», εισήχθησαν στην Αθήνα μεγάλες ποσότητες αργύρου από πολλές περιοχές του ευρύτερου ελληνικού χώρου. Ίσως αυτός να είναι ο λόγος ύπαρξης και ασημένιων νομισμάτων από την αρχαία Αθήνα, με ισοτοπική αναλογία διαφορετική αυτής του μεταλλεύματος του Λαυρίου.



Σχήμα 8 (Α – Β – Γ). Σε αυτά τα διαγράμματα διακρίνεται το άθροισμα των τριών ισοτοπικών αναλογιών ως προς το κάθε ορυκτό – μετάλλευμα. Για την κάθε αναλογία, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο αντίστοιχο διάγραμμα. Παρατηρείστε το γεγονός πως και στις τρεις περιπτώσεις οι τιμές για τον γαληνίτη παρουσιάζουν σημαντικό προβάδισμα έναντι των υπολοίπων, ενώ για τον αναβεργίτη και τον αγγλεσίτη τείνουν στο μηδέν.

5. Χαλκιδική

Παρακάτω παρατίθεται ένα διάγραμμα (Σχ. 9) των αποτελεσμάτων από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στη περιοχή της Χαλκιδικής. Υπενθυμίζουμε πως οι αναλογίες μολύβδου που εξετάζουμε είναι: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ και $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$.



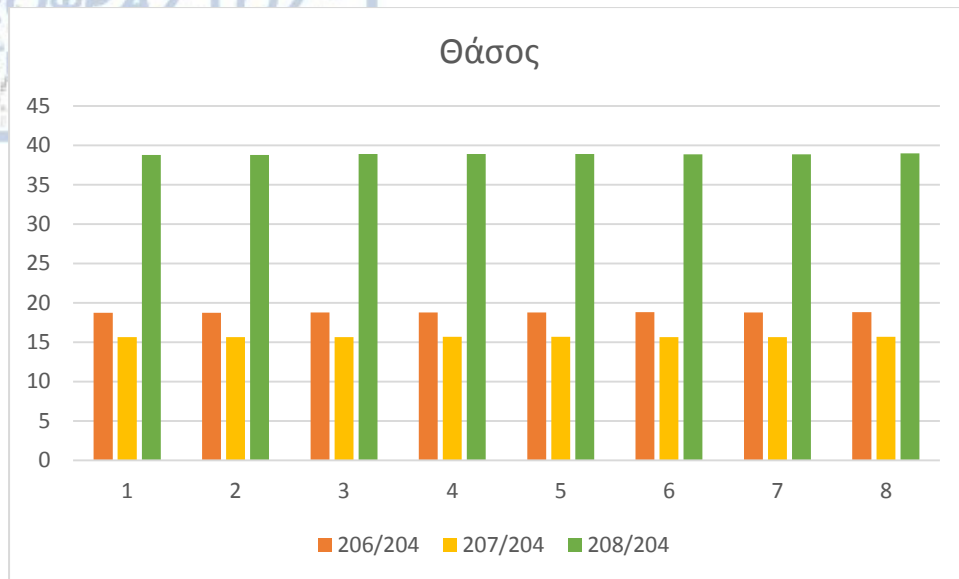
Σχήμα 9. Αποτελέσματα των αναλύσεων στη περιοχή της Χαλκιδικής. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η υψηλή αναλογία $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ σε σχέση με τις υπόλοιπες. Παρακάτω θα δούμε πως αυτό το μοτίβο εμφανίζεται σχεδόν σε κάθε περίπτωση. (Chalkias and Vavelidis 1988)

6. Θάσος

Αναφορά αξίζει να γίνει και για το νησί της Θάσου καθώς έχουν προκύψει ενδιαφέροντα αποτελέσματα από τις ισοτοπικές αναλύσεις, τα οποία θα μπορούσαν να συγκριθούν με αυτά της Χαλκιδικής (Πίνακας 1, Σχ. 10) (Chalkias et al. (1988), Koukouli-Chrisanthaki et al. (1988), Chalkias and Vavelidis (1989).

Πίνακας 1. Πίνακας που προβάλλει τα αποτελέσματα από τις ισοτοπικές αναλύσεις στο νησί της Θάσου.

$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
18,75	15,64	38,79
18,76	15,64	38,79
18,78	15,67	38,89
18,8	15,68	38,92
18,79	15,68	38,91
18,81	15,65	38,88
18,78	15,66	38,87
18,82	15,71	39



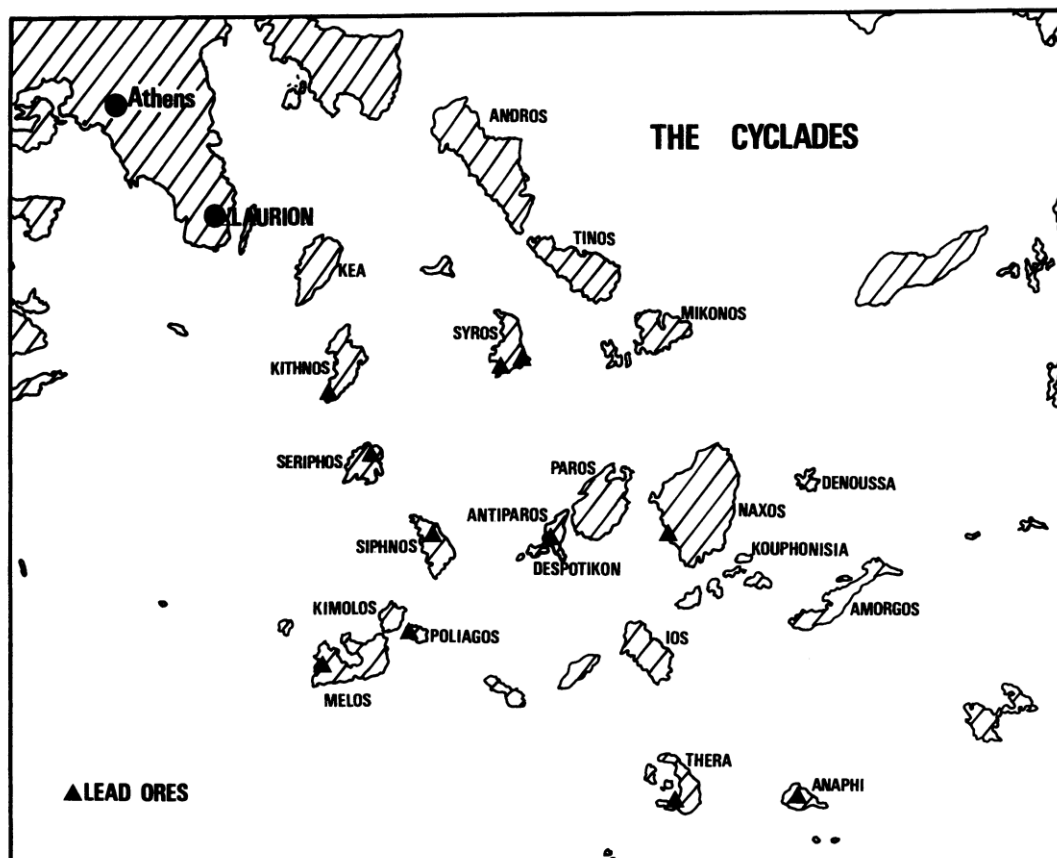
Σχήμα 10. Διάγραμμα των αποτελεσμάτων του παραπάνω πίνακα για το νησί της Θάσου. Παρατηρείται μια παρόμοια κατάσταση με αυτή των αποτελεσμάτων της Χαλκιδικής. (S. Chalkias and M. Vavelidis 1988)

7. Κυκλάδες

7.1 Γενικά

Η πρώτη μελέτη περί Κυκλαδίτικης μεταλλουργίας, η οποία συμπεριλάμβανε και την ανάλυση χάλκινων ευρημάτων, πραγματοποιήθηκε το 1967 μέχρι το 1972 από τον Renfrew (Gale and Stos-Gale 1981). Από αυτή την μελέτη όμως απουσίαζε ο άργυρος και ο μόλυβδος, που κατείχαν μεγάλο ρόλο στην κυκλαδίτικη μεταλλουργία, κατά την προϊστορία (περίπου το 40% των αντικειμένων). Επομένως δεν υπήρχαν σαφή συμπεράσματα σχετικά με την κατεργασία και προέλευση του αργύρου και του μολύβδου. Έκτοτε, έχουν δημοσιευθεί αρκετές εργασίες με σκοπό να μελετήσουν την χρήση των μετάλλων αυτών στην περιοχή των Κυκλάδων, καθώς και στο πώς συνδέεται αυτή με τον ευρύτερο αιγιακό χώρο.

Λόγω της αυξημένης σημασίας της μεταλλουργίας μολύβδου/αργύρου στα Κυκλαδίτικα νησιά, είναι ασφαλές να υποθέσουμε την σχετική αφθονία αυτών των μετάλλων στη περιοχή, σε αντίθεση με τον χρυσό. Τα νησιά στα οποία έχουν ανακαλυφθεί κοιτάσματα μολύβδου είναι: Μήλος, Πολύαιγος, Κύθνος, Νάξος, Αντίπαρος, Σέριφος, Σαντορίνη (Θήρα), Ανάφη, Σύρος και Σίφνος (Σχ. 11). Περαιτέρω έρευνες για τυχόν κοιτάσματα χρειάζεται να πραγματοποιηθούν σε: Κέα, Μακρόνησο και Κουφονήσια.

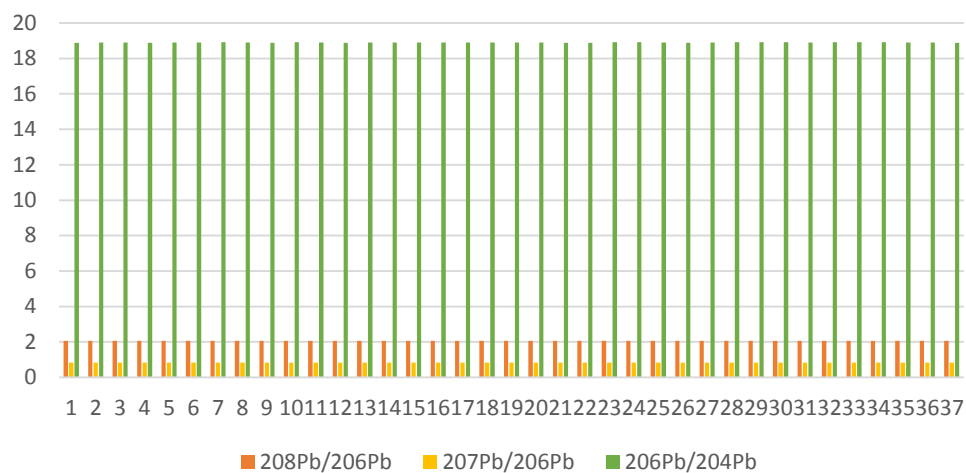


Σχήμα 11. Χάρτης των Κυκλάδων στον οποίο είναι σημειωμένες όλες οι περιοχές στις οποίες ανακαλύφθηκαν αργυρούχα κοιτάσματα (Gale and Stos-Gale 1981).

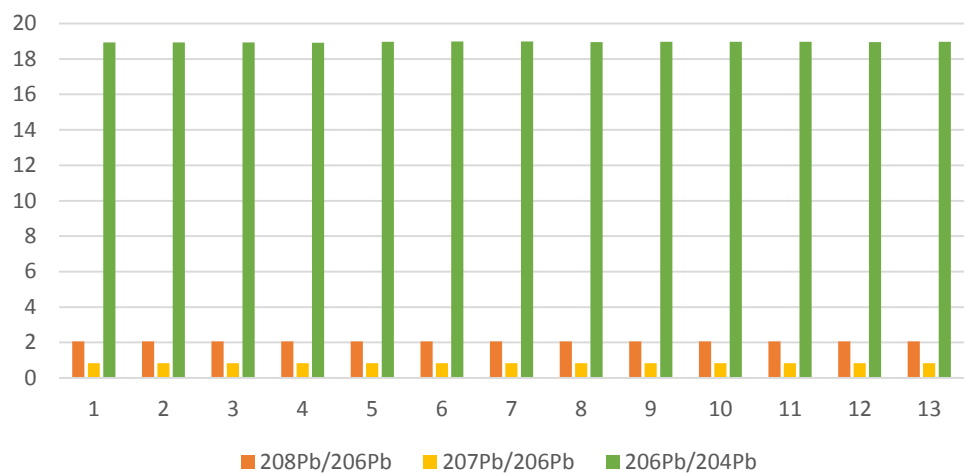
Το νησί με το οποίο θα ασχοληθούμε περισσότερο σε αυτή την εργασία, είναι το νησί της Σίφνου. Εκεί έχουν ανακαλυφθεί, από την δράση ανασκαφών, αρχαία μεταλλεία αργύρου-μολύβδου.

Παρακάτω δίνονται διαγράμματα (Σχ. 12 A-Z) που προκύπτουν από τους αντίστοιχους πίνακες τιμών για το κάθε νησί και συγκεκριμένα για την Σέριφο (Σχ. 12Α), για την Κύθνο (Σχ. 12Β), για την Σύρο (Σχ. 12Γ), για την Αντίπαρο (Σχ. 12Δ), για την Πολύαιγο (Σχ. 12Ε), για την Θήρα (Σχ. 12ΣΤ) και την Κέα (Σχ. 12Ζ). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν μόνο σε γαληνίτες και οι αναλογίες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ και $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (Stos- Gale et al. 1996).

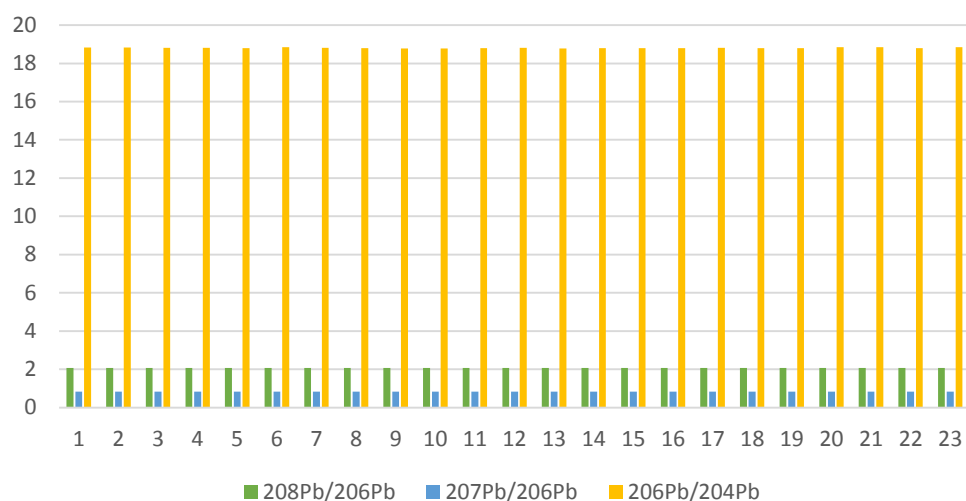
Α. Γαληνίτης - Σέριφος



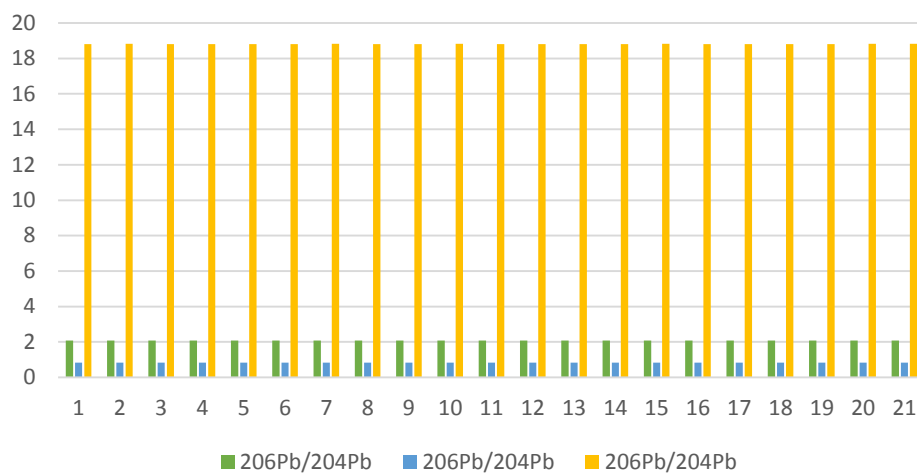
Β. Γαληνίτης - Κύθνος



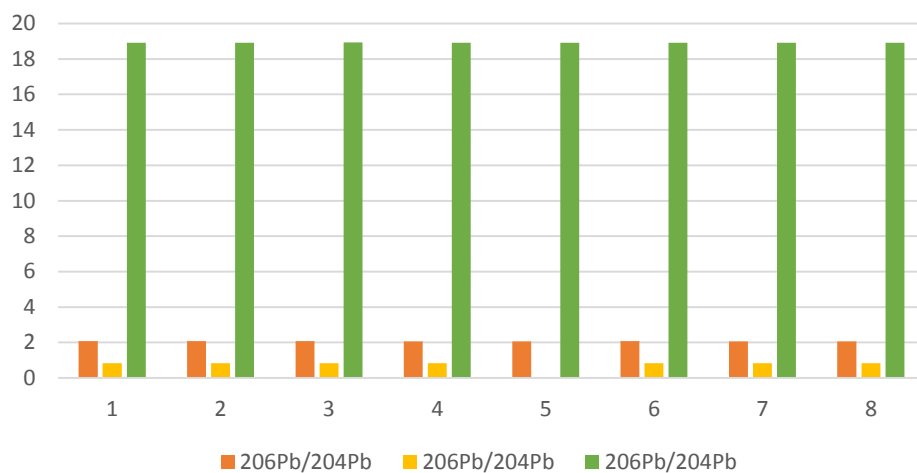
Γ. Γαληνίτης - Σύρος



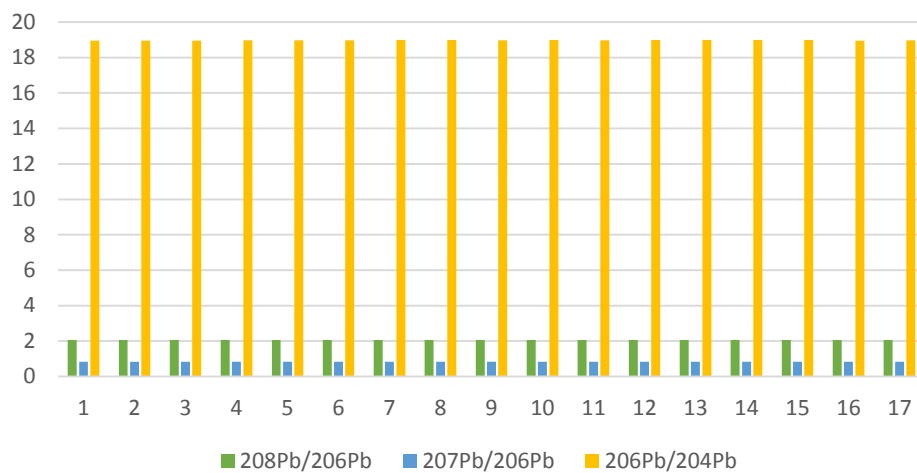
Δ. Γαληνίτης - Αντίπαρος

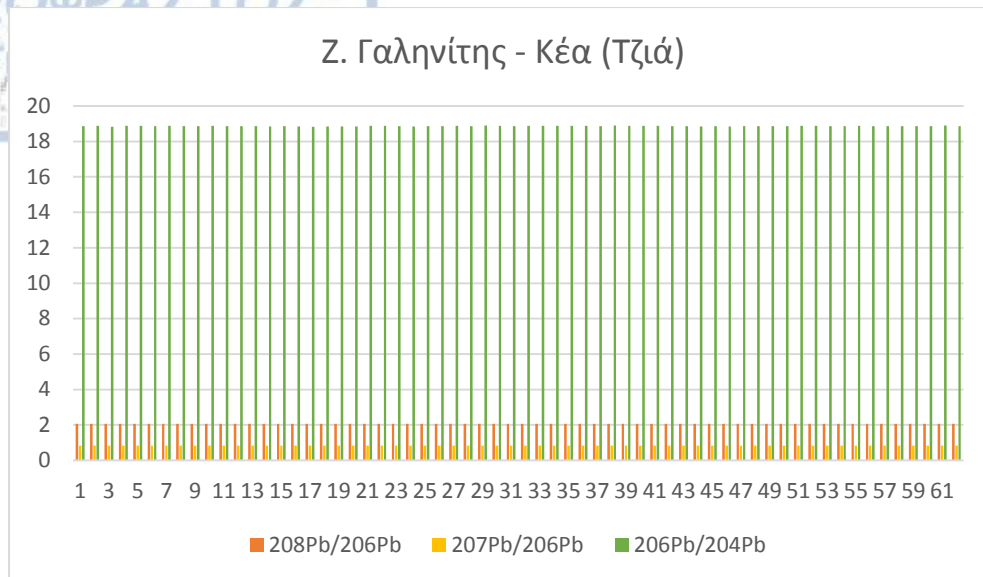


Ε. Γαληνίτης - Πολύαιγος



ΣΤ. Γαληνίτης - Θήρα





Σχήμα 12 (A – B – Γ – Δ – E – ΣΤ – Ζ). Κοινό και αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό όλων των διαγραμμάτων αποτελούν οι κατά πολύ υψηλότερες τιμές για την αναλογία $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ σε σχέση με τις άλλες δύο (Stos-Gale et al. 1996)

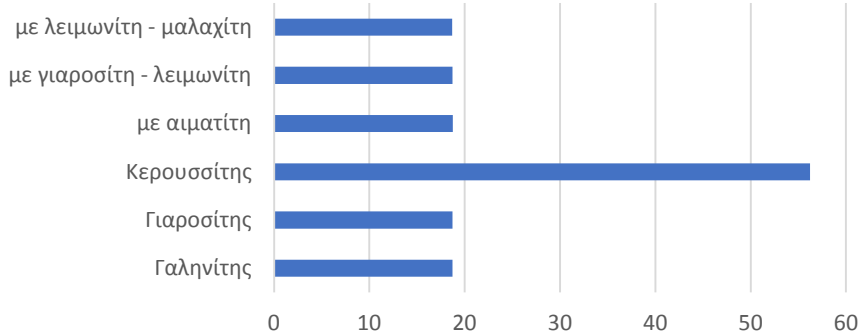
Ακολουθεί λεπτομερέστερη αναφορά για το νησί της Σίφνου:

7.2 Σίφνος

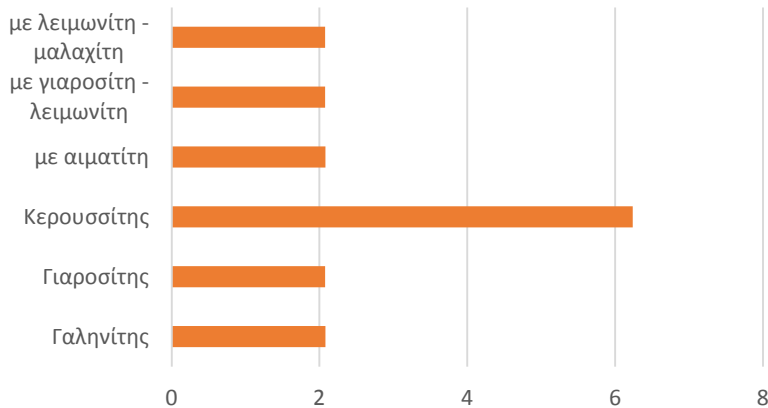
Στο νησί της Σίφνου λειτουργούσε κατά την αρχαιότητα, σύμφωνα με τον Ηρόδοτο, σημαντικό ορυχείο χρυσού και αργύρου, ειδικότερα στην περιοχή «Άγιος Σώστης» (Wagner and Weisgeber 1985, Vavelidis 1996). Στους Δελφούς μάλιστα αναφέρεται κατά το 525 π.Χ. ως ένα νησί ιδιαίτερα πλούσιο σε μέταλλευμα. Στις μέρες μας είναι γνωστό το γεγονός πως περίπλοκα κοιτάσματα μολύβδου – αντιμονίου – αργύρου υπήρξαν υπό εκμετάλλευση στο συγκεκριμένο νησί κατά την εποχή του Χαλκού. Αυτοφυή μολύβδο συναντάμε σε τόσο ελάχιστες περιπτώσεις που μπορούμε να τον παραλείψουμε. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 13 (A – B – Γ).

Συνοπτικά, αξίζει να αναφέρουμε πως με τις έρευνες (Wagner and Weisgeber 1985, Vavelidis 1996) προσδιορίστηκαν τρεις διαφορετικές περιόδοι μεταλλευτικής δραστηριότητας. Συγκεκριμένα έχουμε: Κατά την πρώτη εποχή του Χαλκού (3^η χιλιετηρίδα π.Χ.) και όπως και στην αρχαία Ελλάδα (6^ο και 5^ο αιώνα π.Χ.) πραγματοποιήθηκε αντίστοιχα εκμετάλλευση μεταλλεύματος μολύβδου – αργύρου. Αντίθετα, κατά τον 19^ο και 20^ο αιώνα περιοριζόμαστε στην εκμετάλλευση σιδήρου. Συγκεκριμένα κατά την τελευταία αυτή περίοδο, εφόσον τα κοιτάσματα Pb-Ag βρισκόντουσαν μέσα σε κοιτάσματα Fe, καταστράφηκαν με σκοπό την εκμετάλλευση κατά την σύγχρονη περίοδο. Πιθανόν ούτε κατά την αρχαιότητα πραγματοποιήθηκε εκμετάλλευση χρυσού, τουλάχιστον όχι σε μεγάλο βαθμό (Wagner and Weisgeber 1985, Vavelidis 1996).

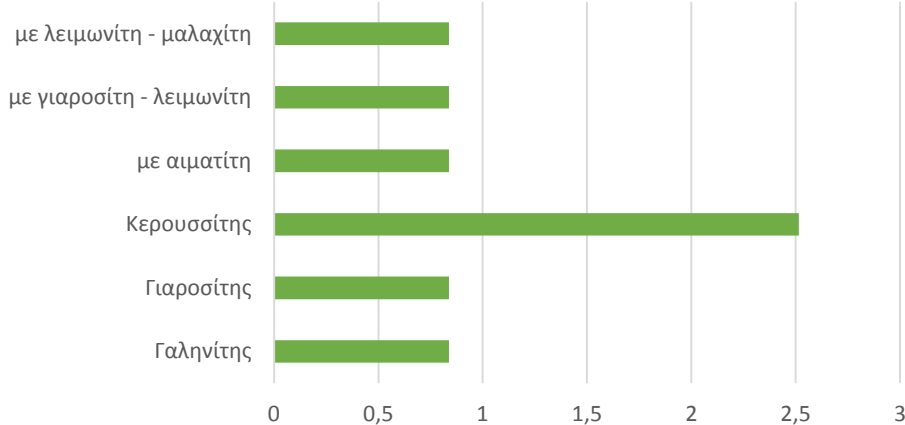
Α. Άθροισμα από $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ επί Ορυκτό



Β. Άθροισμα από $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ επί Ορυκτό

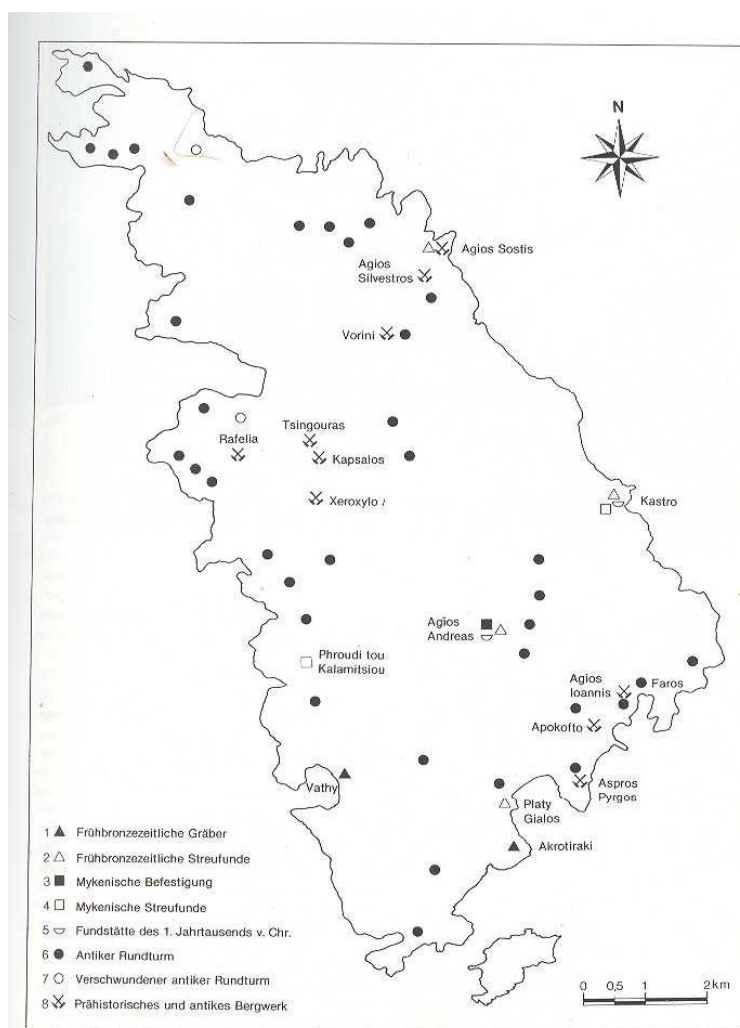


Γ. Άθροισμα από $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ επί Ορυκτό



Σχήμα 13 (Α – Β – Γ). Σε αυτά τα διαγράμματα διακρίνεται το άθροισμα των τριών ισοτοπικών αναλογιών ως προς το κάθε ορυκτό – μετάλλευμα. Για την κάθε αναλογία, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο αντίστοιχο διάγραμμα. Παρατηρείστε το γεγονός πως και στις τρεις περιπτώσεις οι τιμές για τον κερουσίτη παρουσιάζουν σημαντικό προβάδισμα έναντι των υπολοίπων οι οποίες σχεδόν ισοβαθμούν. Τα δεδομένα προέρχονται από τους Wagner and Weisgeber (1985)

Κατά την Αρχαϊκή – Κλασική εποχή ανθίζει η μεταλλευτική δραστηριότητα στο νησί, η οποία όμως αποκτά μια φθίνουσα πορεία κατά την Ελληνιστική περίοδο. Αυτό επειδή εκείνη την περίοδο επικαλύπτεται σταδιακά το νησί με αγροκτήματα, όπως φαίνεται και από τα πολυάριθμα ευρήματα περιτοιχισμένων στρογγυλών πύργων. Τα κοιτάσματα της Σίφνου απαντούν στο κεντρικό τμήμα του νησιού (μόλυβδος – ψευδάργυρος – άργυρος), όπως και στο νοτιοανατολικό τμήμα (χρυσός) (Σχ. 14). (Vavelidis 1996)



Σχήμα 14. Χάρτης της Σίφνου στον οποίο είναι σημειωμένα όλα τα κοιτάσματα και μεταλλεία που έχουν ανακαλυφθεί από κάθε χρονική περίοδο (Wagner and Weisgeber 1985, Vavelidis 1996).

8. Αποτελέσματα από τις ισοτοπικές αναλύσεις των ισοτοπικών αναλύσεων

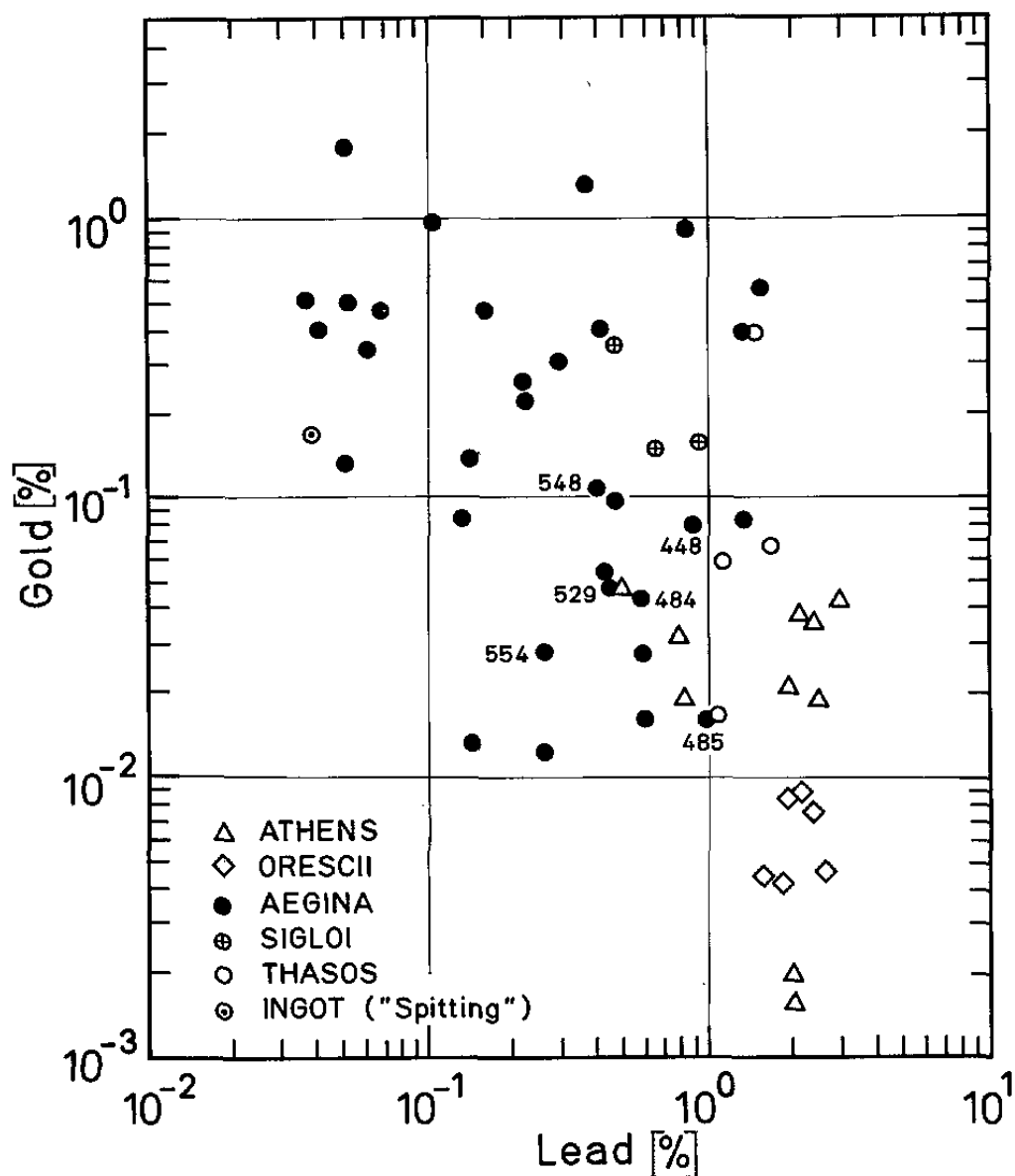
Εξχωριστή αναφορά αξίζει να γίνει για τα νομίσματα που βρέθηκαν στη Κόρινθο και στο νησί της Αίγινας. Αυτές οι δύο τοποθεσίες αποτελούν ειδικές περιπτώσεις, καθώς σχετικά με τη προέλευση των νομισμάτων έχουν προκύψει αρκετές εικασίες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η αναφορά της Ισπανίας ως υποψήφια πηγή αργύρου για τα νομίσματα της Αίγινας (Gentner et al. 1978). Λεπτομέρειες θα αναφερθούν παρακάτω.

8.1. Αίγινα

Σχετικά με το νησί της Αίγινας, είναι σημαντικό να προσθέσουμε το γεγονός πως η εξαιρετικά άγονη φύση του ώθησε τους κατοίκους του προς το εμπόριο και τη ναυτιλία, σύμφωνα με τον Ηρόδοτο (Gentner et al. 1978). Η Αίγινα αποτελούσε μεγάλη ναυτική δύναμη μέχρι την κατάκτησή της από τους Αθηναίους το 457 π.Χ. Οι επιρροές τους έφταναν από τις Κυκλάδες μέχρι και το νησί της Κρήτης.

Στο ίδιο το νησί δεν έχουν ανακαλυφθεί κοιτάσματα αργύρου. Αυτό σε συνδυασμό με το ναυτικό του παρελθόν, οδήγησε στο συμπέρασμα πως για τα νομίσματα χρησιμοποιούσαν άργυρο από διάφορες πηγές στην Ελλάδα. Μία από τις πιθανές πηγές αποτελεί το νησί της Σίφνου χωρίς όμως να έχουν βρεθεί ιστορικά έγγραφα που να αποδεικνύουν αυτή την υπόθεση. Πιο πιθανή είναι η εξάρτηση του νησιού από την περιοχή του Λαυρίου, προφανώς λόγω κοντινής απόστασης, καθώς και από την ευρύτερη περιοχή της Μακεδονίας – Θράκης. Το τελευταίο μάλιστα επιβεβαιώνεται και από το γεγονός πως κατά τα μέσα του 6^{ου} αιώνα π.Χ., ο άργυρος αποτελούσε το πιο διαδεδομένο υλικό εξαγωγής (Gentner et al. 1978).

Έτσι η Σίφνος παραμένει μια πιθανή πηγή αργύρου για την Αίγινα, αλλά μια όχι τόσο πιθανή (αλλά ούτε και απίθανη) πηγή χρυσού, όπως φαίνεται στο σχήμα 15. (Gentner et al. 1978)



Σχήμα 15. Διλογαριθμικό διάγραμμα ποσοστού χρυσού έναντι ποσοστού μολύβδου σε διάφορα νομίσματα από ποικίλες περιοχές. Με νούμερα σημειώνονται κάποια αθηναϊκά νομίσματα, των οποίων οι τιμές σχεδόν συμπίπτουν με αντίστοιχες κάποιων νομισμάτων από την Αίγινα (Gentner et al. 1978).

8.2 Κόρινθος

Με βάση μελέτες που πραγματοποιήθηκαν από τους Kraay and Emeleus (1962), αποδείχθηκε πως η Κόρινθος κατά τον 6^ο αιώνα π.Χ. χρησιμοποιούσε άργυρο τόσο από την Αθήνα όσο και από την Αίγινα. Επιπλέον μελέτες έδειξαν και την παρουσία μια τρίτης πηγής αργύρου, η οποία παραμένει άγνωστη ακόμα και τώρα. Τα ποσοστά αργύρου και από τις τρεις πηγές φαίνεται να ήταν περίπου ίσα. Παρόλα αυτά, δε φαίνεται, τουλάχιστον μέχρι τώρα, να παίζει σημαντικό ρόλο στην μελέτη μας. Επίσης, αποτελεί απλά μια υπόθεση, η οποία υπάρχει περίπτωση και να μην ευσταθεί.

9. Μακεδονία – Θράκη

9.1. Παγγαίο

Πλήθος ιστορικών πηγών μαρτυρούν την ιδιαίτερη σημασία που είχε το όρος Παγγαίο στην αρχαία Ελλάδα στην ανατολική Μακεδονία. Καταγράφονται συνολικά 9 περιοχές υπόγειας και επιφανειακής εξόρυξης μεταλλεύματος και 11 περιοχές με υπολείμματα μεταλλουργικής δραστηριότητας. Ανάμεσα στο πλήθος μετάλλων που εξορύχτησαν, σημαντικές είναι και οι ποσότητες γαληνίτη, του ορυκτού δηλαδή που απαιτείται για την εξαγωγή μολύβδου (Βαξεβανόπουλος 2017).

Τη δεκαετία του 1960 δύο ερευνητικές ομάδες (Brill and Wampler 1965, Grogler 1966) πρότειναν την μέθοδο των ισοτοπικών αναλύσεων για τον γεωγραφικό προσδιορισμό του μεταλλεύματος. Με σκοπό την εποπτεία των ισοτοπικών αναλύσεων μολύβδου σε μεταλλεία, υπάρχει και η βάση δεδομένων OXALID (Oxford Archaeological Lead Isotope Database).

Συνολικά έχουν ληφθεί (5) δείγματα μεταλλεύματος από μεταλλευτικές περιοχές του Παγγαίου και (5) από μεταλλουργικές σκωρίες από τις περιοχές μεταλλουργίας. Τα δείγματα πάρθηκαν από τις περιοχές

- Στοά Κοκκινοχώματος
- Στοά Αγίας Τριάδας
- Τρίκορφο
- Ασημότρυπα
- Οφρύνιο

Τα δείγματα μεταλλικών σκωριών πάρθηκαν από τις περιοχές:

- Σίνα
- Βαλτούδα
- Παλαιοχώρι
- Δωμάτια
- Οφρύνιο

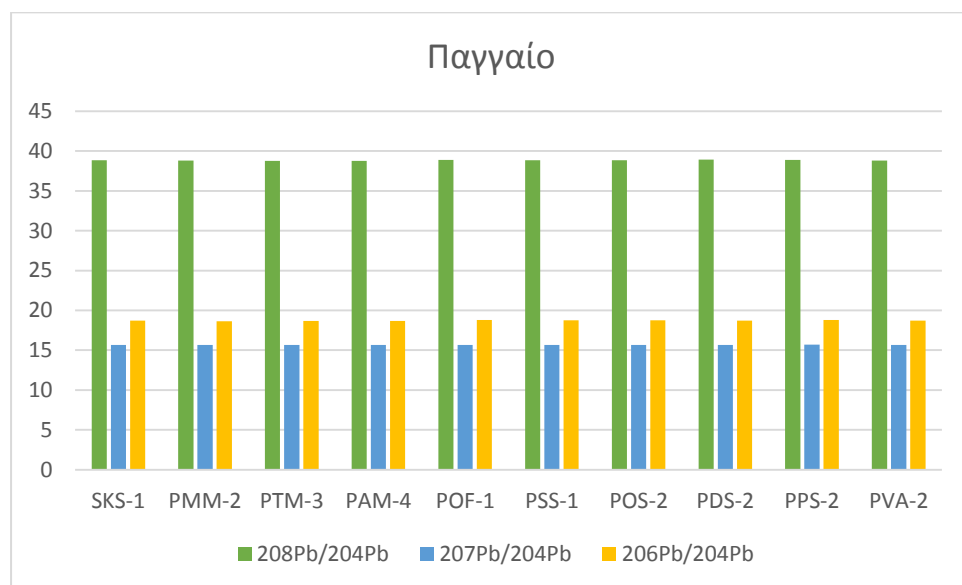
Παρακάτω παρατίθενται δύο πίνακες (Πίνακας 3, 4) και ένα σχήμα (Σχ. 16) με τα αποτελέσματα από τις δέκα (10) περιοχές συνολικά.:

Πίνακας 3. Πίνακας με τα αποτελέσματα ισοτοπικών αναλύσεων από δείγματα στη περιοχή του Παγγαίου. (Βαξεβανόπουλος 2017)

ΔΕΙΓΜΑ	ΤΥΠΟΣ	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
SKS-1	Μετάλλευμα	38,837	15,675	18,724
PMM-2	Μετάλλευμα	38,802	15,667	18,629
PTM-3	Μετάλλευμα	38,779	15,663	18,684
PAM-4	Μετάλλευμα	38,771	15,658	18,678
POF-1	Μετάλλευμα	38,907	15,677	18,785

Πίνακας 4. Συνέχεια του πίνακα 3. (Βαξεβανόπουλος 2017)

ΔΕΙΓΜΑ	ΤΥΠΟΣ	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
PSS-1	Σκωρία	38,838	15,674	18,740
POS-2	Σκωρία	38,860	15,669	18,745
PDS-2	Σκωρία	38,940	15,650	18,696
PPS-2	Σκωρία	38,876	15,685	18,776
PVA-2	Σκωρία	38,809	15,672	18,696



Σχήμα 16. Οι δύο προηγούμενοι πίνακες σε μορφή διαγράμματος. Αξιοσημείωτη είναι η διαφορά μεταξύ της αναλογίας $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (πράσινο) με τις υπόλοιπες. Τα δεδομένα προέρχονται από την εργασία του Βαξεβανόπουλου η οποία δημοσιεύτηκε το 2017.

9.2. Σιταγροί

Όπως προαναφέρθηκε, στο χωριό «Σιταγροί» νότια της Δράμας ανακαλύφθηκε η αρχαιότερη ένδειξη μεταλλουργίας στον ελληνικό χώρο (Νεολιθική εποχή). (McGeehan et al. 1988)

9.3. Σκαπτή Ύλη (Παλιά Καβάλα)

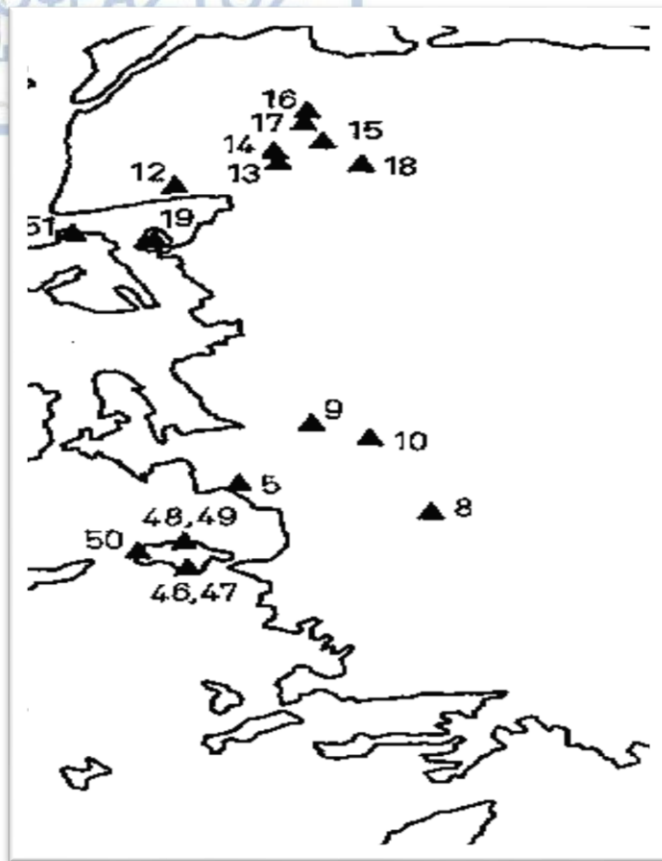
Η γνώση για την ύπαρξη και εκμετάλλευση των κοιτασμάτων της Παλιάς Καβάλας και της Σκαπτής Ύλης βρίσκει τις ρίζες της μέσα στα κείμενα Αρχαίων Ελλήνων συγγραφέων, όπως ο Ηρόδοτος, ο Στράβωνας, ο Αισχύλος, ο Ευριπίδης κ.ά. Ο λόγος που ήταν τόσο γνωστά τέτοια αρχαία μεταλλεία ήταν κυρίως η ύπαρξη Au και Ag σύμφωνα με τους Βαβελίδης κ.ά. (1996, 1997), Vavelidis et al. (1996a,b, 1997).

Τα κοιτάσματα εκτείνονταν βόρεια της Καβάλας και στο νότιο τμήμα της οροσειράς της Λεκάνης. Πρόκειται για μια περιοχή 100 km² στο όρος Λεκάνη-Σύμβολο, όπου εντοπίζονται πάνω από 150 εμφανίσεις μεταλλεύματος (Fornadel et al. 2011, Βαβελίδης κ.ά. 1996, 1997, Vavelidis et al. 1996a,b, 1997),

Γύρω από την Παλιά Καβάλα έχουν βρεθεί έως σήμερα πολλά αρχαία μεταλλεία με λαξευμένες οριζόντιες και κάθετες στοές, μεταλλεία με ένα πολύπλοκο σύστημα στοών, ένα άριστο σύστημα εξαερισμού και φωτισμού καθώς και αρκετά εργαλεία και υπολείμματα καμινιών. Τα ευρήματα, οι τρόποι και οι τεχνικές εξόρυξης, μαρτυρούν ότι τα μεταλλεία αυτά αξιοποιήθηκαν κατά τους προϊστορικούς Θρακικούς, τους Κλασικούς έως τους Ρωμαϊκούς χρόνους (πιθανώς και μεταγενέστερα), από τους Θράκες, τους Θασίους, τους Αθηναίους επί Πεισίστρατου και Μιλτιάδη, τους Μακεδόνες επί Φιλίππου Β' και Μεγάλου Αλεξάνδρου και τέλος από Ρωμαίους (Βαβελίδης κ.ά. 1996, 1997, Vavelidis et al. 1996a,b, 1997),

10. Μικρά Ασία

Στον χώρο της Μικράς Ασίας παρουσιάζεται, όπως φαίνεται στο σχήμα 17, πληθώρα τοποθεσιών οι οποίες κατά την αρχαιότητα αποτελούσαν πιθανές πηγές αργύρου. Ιδιαίτερη αναφορά αξίζει να γίνει για την αρχαία πόλη Σάρδεις (Sart στα τούρκικα), στην αρχαία περιοχή της Λυδίας, ή κατά τον Όμηρο στην Μαιονία. Σύμφωνα με τον Ηρόδοτο, ο βασιλιάς Κροίσος ήταν ο πρώτος που έκοψε νομίσματα από χρυσό και ασήμι σε εκείνη τη περιοχή. Αυτό οδήγησε τα κοιτάσματα της περιοχής στο να αποκτήσουν ξαφνικά μεταλλευτικό και οικονομικό ενδιαφέρον, ακριβώς όπως οι εμφανίσεις αλλουβιακού χρυσού στην κοιλάδα του ποταμού Πακτωλού (Gentner et al. 1978)



Σχήμα 17. Λεπτομέρεια χάρτη που δείχνει όλες τις πιθανές πηγές αργύρου κατά την αρχαιότητα στον Αιγαίο χώρο. Στη λεπτομέρεια δίνεται έμφαση στις αντίστοιχες που υπάρχουν στην Μικρά Ασία. Αξίζει να παρατηρήσουμε πως η πλειοψηφία των κοιτασμάτων αυτών βρίσκεται κοντά στην χερσόνησο Biga των Δαρδανελίων (Gentner et al. 1978)

11. Βόλος

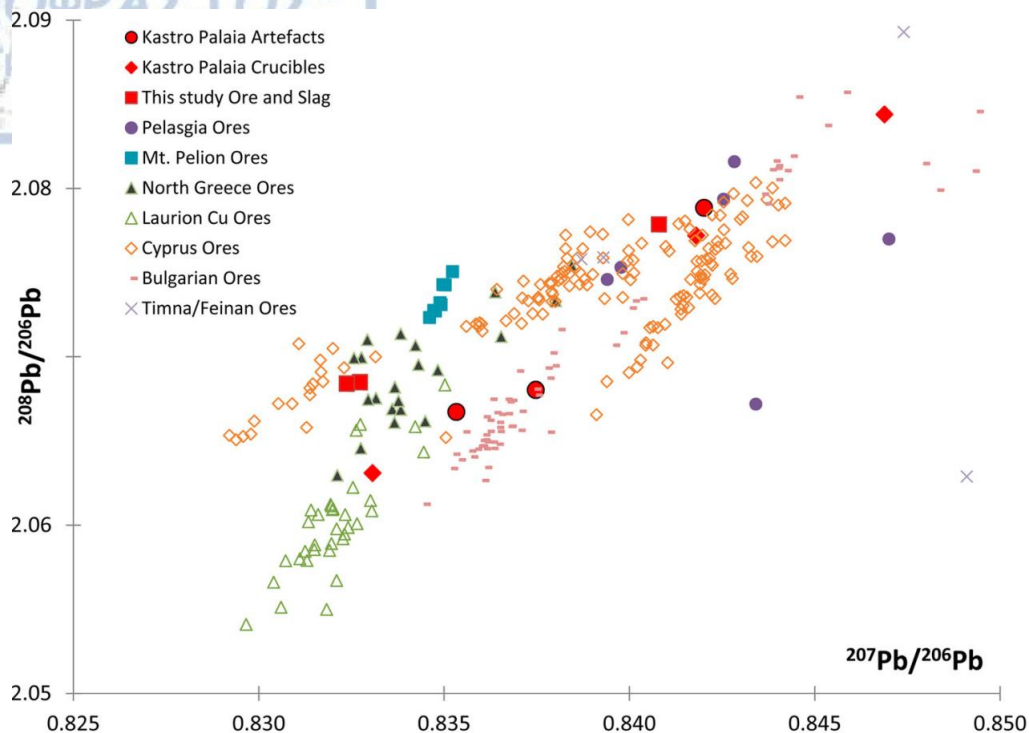
Σε αυτό το σημείο θα εξετάσουμε το κάστρο των Παλαιών που βρίσκεται δυτικά της σύγχρονης πόλης του Βόλου, στη Κεντρική – Βόρεια Ελλάδα (Σχ. 18). Πρόκειται για έναν τεχνητό λόφο, δημιούργημα αλληπάλληλων κατοικήσεων που ξεκινάνε από τους προϊστορικούς χρόνους (Asderaki-Tzoumerkioti et al. 2017).



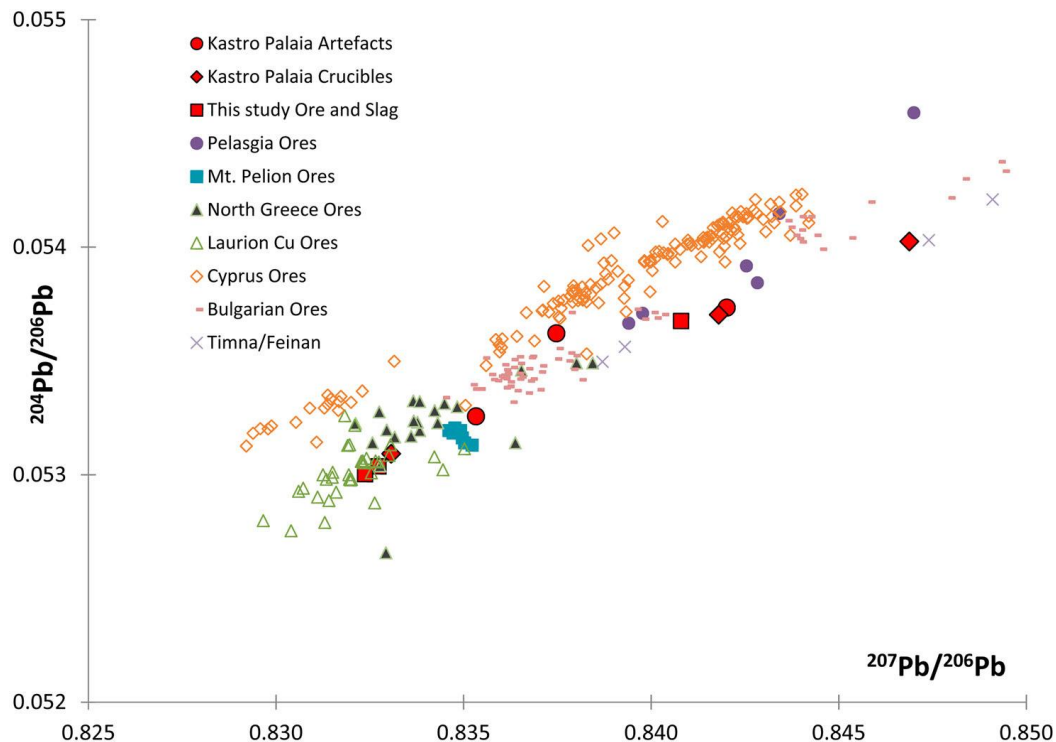
Σχήμα 18. Χάρτης του ελληνικού χώρου με σημειωμένη την τοποθεσία του Βόλου. (Asderaki-Tzoumerkioti et al. 2017)

Αξίζει να αναφέρουμε πως κατά την αρχαιότητα, ο οικισμός σε αυτήν την τοποθεσία ήταν γνωστός με την ονομασία «Ιωλκός». Σύμφωνα με τον μύθο, ήταν το σημείο αφετηρίας του Ιάσωνα προς την αναζήτησή του για το Χρυσόμαλλο Δέρας. Ανασκαφές που έχουν πραγματοποιηθεί ήδη από τον 20^ο αιώνα έφεραν ενδείξεις για κατοίκηση όλης της περιοχής του Βόλου κατά την εποχή του Χαλκού. Ενδείξεις όπως αρχιτεκτονικά ερείπια.

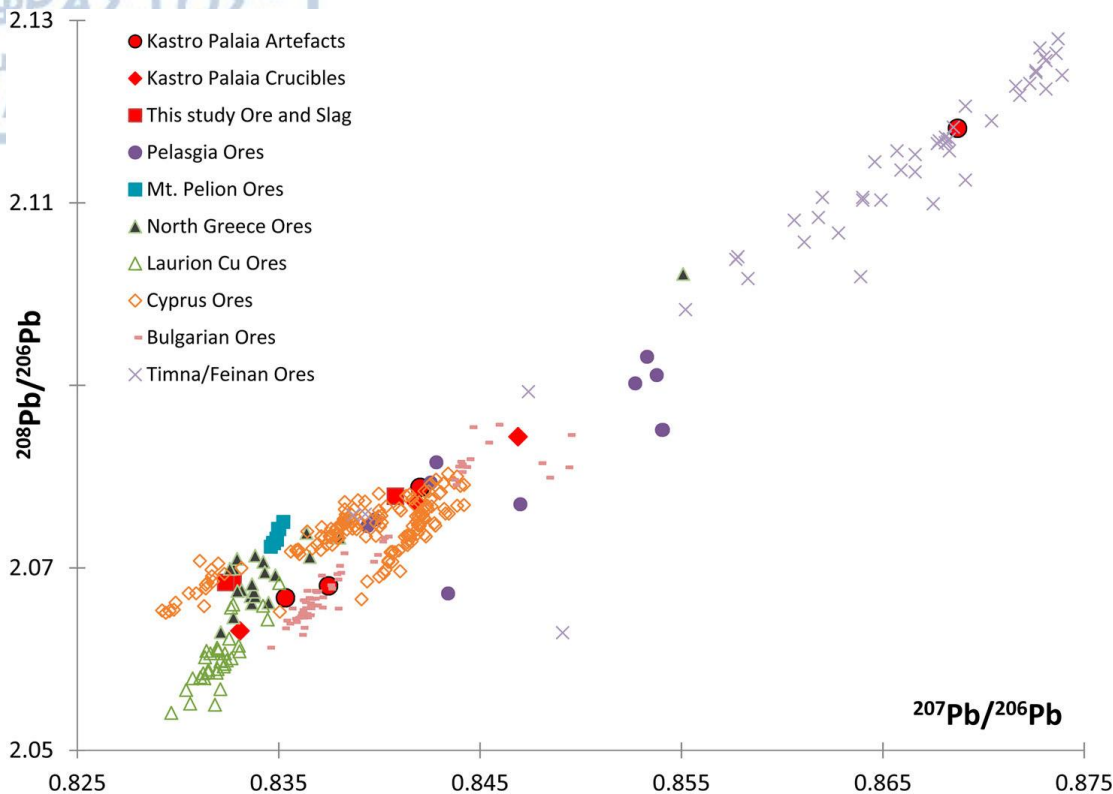
Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα, ήταν κυρίως μεταλλικά ευρήματα αλλά και υπολείμματα και σκωρίες που συλλέχθηκαν από τις γύρω περιοχές (Asderaki-Tzoumerkioti et al. 2017). Όλα χρονολογούνται από την Κατώτερη έως την Ανώτερη εποχή του Χαλκού. Εφόσον όμως η εργασία έχει ως θέμα τα ισότοπα μολύβδου, ας επικεντρωθούμε σε αυτά. Κατά τη διάρκεια των αναλύσεων εξετάστηκαν οι αναλογίες $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ και $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (Σχ. 19, 20, 21).



Σχήμα 19. Διάγραμμα που προβάλλει τον λόγο της αναλογίας $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ προς την αναλογία $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, επικεντρώνοντας στην ευρύτερη περιοχή του Βόλου (Asderaki-Tzoumerkioti et al. 2017)



Σχήμα 20. Διάγραμμα που προβάλλει τον λόγο της αναλογίας $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ προς την αναλογία $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, επικεντρώνοντας στην ευρύτερη περιοχή του Βόλου (Asderaki-Tzoumerkioti et al. 2017).

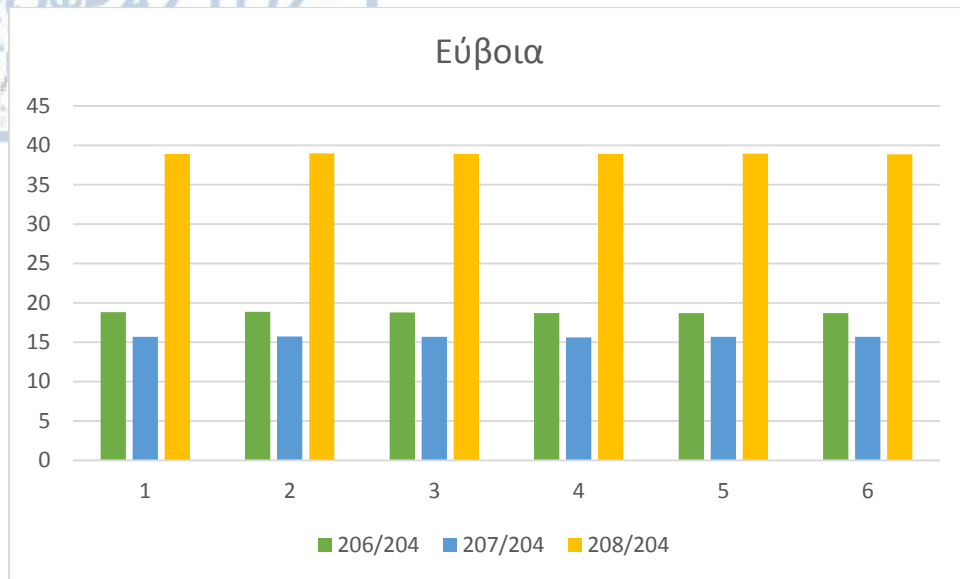


Σχήμα 21. Διάγραμμα που προβάλλει τον λόγο της αναλογίας $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ προς την αναλογία $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ το οποίο όμως περιλαμβάνει και δεδομένα από την μελέτη των Feinan και Timna (Asderaki-Tzoumerkioti et al. 2017).

Μέσα από τη μελέτη για αυτή τη περιοχή, αποδείχθηκε πως τα μεταλλουργεία κατά την εποχή του Χαλκού είχαν πρόσβαση σε ποικίλες πηγές, ιδίως τις κυριότερες πηγές του τότε γνωστού κόσμου όπως η Ιορδανία, το Λαύριο, καθώς και η Βόρεια Ελλάδα (Asderaki-Tzoumerkioti et al. 2017)..

12. Εύβοια

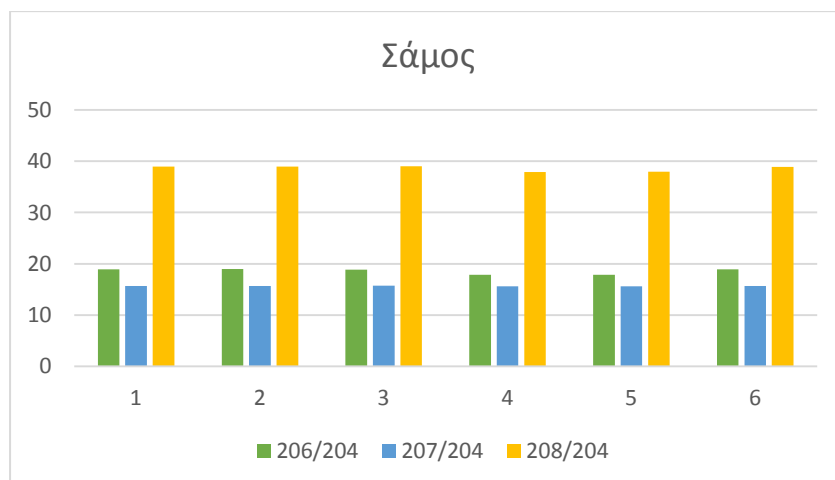
Από τα αποτελέσματα των ισοτοπικών αναλύσεων (Σχ. 22), παρατηρούμε πως για την αναλογία $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ παρατηρούνται αρκετά υψηλότερες τιμές από τις αντίστοιχες των αναλογιών $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ και $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. (S. Chalkias and M. Vavelidis 1988)



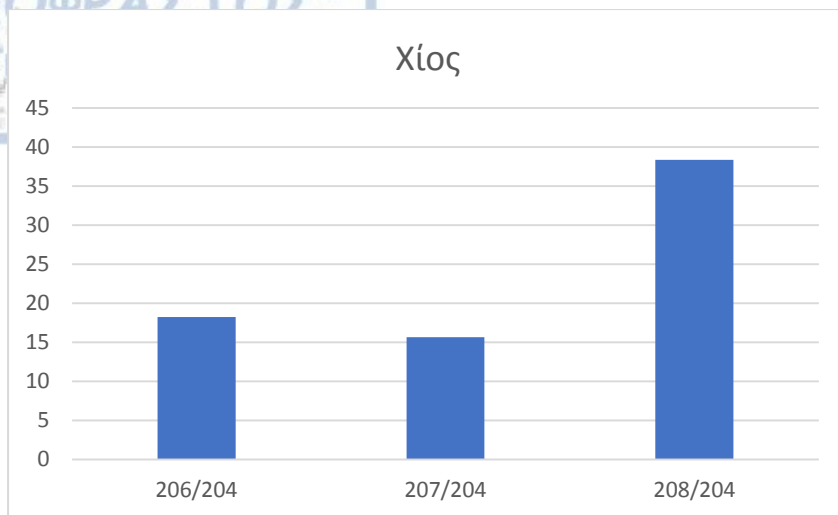
Σχήμα 22. Διάγραμμα που προβάλλει τα αποτελέσματα ισοτοπικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στην Εύβοια. (S. Chalkias and M. Vavelidis 1988)

13. Ανατολικό Αιγαίο

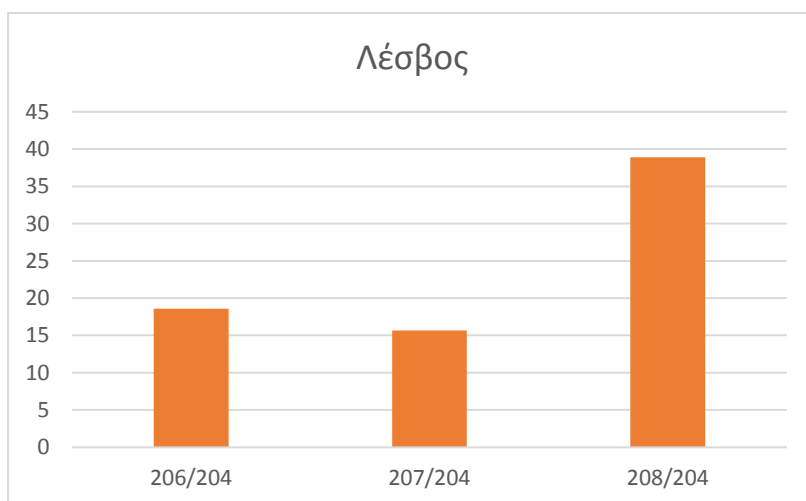
Παρακάτω παρατίθεται πίνακες από αντίστοιχες έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στο χώρο του βορειοανατολικού Αιγαίου, συγκεκριμένα στα νησιά Σάμος (Σχ. 23), Χίος (Σχ. 24) και Λέσβος (Σχ. 25). Αξιοσημείωτο και στους τρεις πίνακες είναι το πόσο υψηλότερες είναι οι τιμές για την αναλογία $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, σε σχέση με τις άλλες δύο αναλογίες. Παρατηρούμε με βάση τα παραπάνω, κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και με τα αποτελέσματα από τη περιοχή του Παγγαίου καθώς και από το νησί της Εύβοιας. Αυτό μπορεί να οδηγεί σε μια συσχέτιση μεταξύ των περιοχών αυτών. (S. Chalkias and M. Vavelidis 1988)



Σχήμα 23. Διάγραμμα που προβάλλει τα αποτελέσματα ισοτοπικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στο νησί της Σάμου. (Chalkias and Vavelidis 1988)



Σχήμα 24. Αποτελέσματα ισοτοπικών αναλύσεων μολύβδου στο νησί της Χίου. (Chalkias and Vavelidis 1988)



Σχήμα 25. Αποτελέσματα ισοτοπικών αναλύσεων μολύβδου στο νησί της Λέσβου. (Chalkias and Vavelidis 1988)

14. Συζήτηση και συμπεράσματα

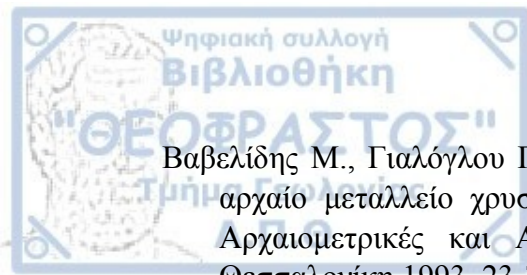
Ανακεφαλαιώνοντας, έχουμε τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Τα ισότοπα του μολύβδου αποτελούν ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο στον προσδιορισμό της γεωγραφικής προέλευσης του κάθε δείγματος.
- Σημαντικότερη πηγή μολύβδου στην αρχαία Ελλάδα υπήρξαν τα κοιτάσματα αργύρου και μεικτών θειούχων στη περιοχή του Λαυρίου, με όλες τις υπόλοιπες να παίζουν δευτερογενή ρόλο.
- Κυριότερη πηγή πληροφοριών που συνέβαλαν στην μελέτη το πλήθος των ασημένιων νομισμάτων που βρέθηκαν από αρχαιολογικές ανασκαφές.
- Σε όλα τα νησιά των Κυκλάδων δείχνει να υπερισχύει η ισοτοπική αναλογία $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ έναντι των άλλων δύο.
- Αντίθετα, στα νησιά Εύβοια, Σάμος, Χίος, Λέσβος καθώς και στο Παγγαίο, το ίδιο ισχύει για την αναλογία $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$.
- Όσον αφορά τα αργυρά νομίσματα που βρέθηκαν στην Αίγινα, κύριο τροφοδότη αποτελούσαν τα αντίστοιχα κοιτάσματα του Λαυρίου, ενώ ακολουθεί το Παγγαίο και (πιθανόν) η Σίφνος.
- Αντίστοιχα, στην Κόρινθο.
- Στο νησί της Σίφνου, και για τα τρεις ισοτοπικές αναλογίες τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον κερουσίτη μας δίνουν πολύ μεγαλύτερες τιμές ως προς τα αντίστοιχα από άλλα ορυκτά.

Χρειάστηκε να αφιερωθεί αρκετός χρόνος στην έρευνα, με σκοπό να προκύψουν αυτά τα αποτελέσματα. Ωστόσο, η κατάσταση είναι μεταβλητή. Η μελέτη συνεχίζεται και είναι πιθανόν σύντομα να προκύψουν καινούργια αποτελέσματα. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα την αναθεώρηση των μέχρι τώρα δεδομένων που έχουμε. Οπότε συνετό θα ήταν να διατηρηθεί και μια μικρή επιφύλαξη σχετικά με τις πληροφορίες που διαθέτουμε καθώς και με αυτές που θα προκύψουν.

15. Βιβλιογραφία

- Asderaki-Tzoumerkioti, E., Rehren, T., Skafida, E., Vaxevanopoulos, M., & Connolly, P. J. (2017). Kastro Palaia settlement, Volos, Greece: a diachronical technological approach to bronze metalwork. *STAR: Science & Technology of Archaeological Research*, 3(2), 179-193.
- Chalkias, S. & Vavelidis, M. (1989): Interpretation of lead-isotope data from Greek Pb-Zn deposits, based on an empirical two stage model. *Bull. Geol. Soc. Greece*, Vol. XXIII/2, 177-193.
- Chalkias, S., Vavelidis, M., Schmitt - Strecker, S. & Begemann, F. (1988): Geologische Interpretation der Blei-Isotopenverhaeltnisse von Erzen der Insel Thasos und der Agaeis. *Anschnitt, Bh. 6*, 59-74.
- Chalkias, S., & Vavelidis, M. (1998). Interpretation of lead-isotope data from Greek Pb-Zn deposits, based on an empirical two-stage model. *Bulletin of Geological Society of Greece*, 23, 177-193.
- Fornadel A.P., Spry P.G., Melfos V., Vavelidis M., Voudouris P. (2011). Is the Palea Kavala Bi-Te-Pb-Sb±Au district, northeastern Greece, an intrusion-related system? *Ore Geology Reviews*, 39, 119-133.
- Gentner, W., Müller, O., Wagner, G. A., & Gale, N. H. (1978). Silver sources of archaic Greek coinage. *Naturwissenschaften*, 65(6), 273-284.
- McGeehan- Liritzis, V., & Gale, N. H. (1988). Chemical and lead isotope analyses of Greek Late Neolithic and Early Bronze Age metals. *Archaeometry*, 30(2), 199-225.
- Pernicka, E., & Wagner, G. A. (1982). Lead, silver and gold in ancient Greece. In *Pact* (Vol. 7, No. 2, pp. 419-425).
- Stos- Gale, Z. A., Gale, N. H., & Annetts, N. (1996). Lead isotope data from the Isotrace Laboratory, Oxford: archaeometry data base 3, ores from the Aegean, part 1. *Archaeometry*, 38(2), 381-390.
- Vavelidis M., Christofides G., Melfos V. (1996a). The Au-Ag-bearing mineralization and placer gold of Palea Kavala (Macedonia, N. Greece). In: *Terranes of Serbia. The Formation of the Geologic Framework of Serbia and the Adjacent Regions*. Eds: Knezevic & Krstic, 311-316.
- Vavelidis M., Gialoglou G., Melfos V., Wagner G.A. (1996b). Goldgrube in Palaea Kavala/Griechenland: Entdeckung von Skaptehyle? *Erzmetall: The World of Metallurgy*, 49, 547-554.
- Vavelidis M., Melfos V., Eleftheriadis G. (1997). Mineralogy and micro thermometric investigations in the Au-bearing sulphide mineralization of Palea Kavala (Macedonia, Greece). In: *Mineral Deposits: Research and Exploration Where do They Meet?* Ed: Papunen, 343-346.
- Vavelidis, M. (1996). Gold-bearing quartz veins and placer gold on Sifnos island, Aegean Sea, Greece. In: *Mineral Deposits* (ed: Papunen). 335-338.
- Wagner, G. A., & Weisgeber, G. (1985). Silber, Blei und Gold auf Sifnos (Der Anschnitt, Beiheft 3). Bochum: Deutsches Bergbau-Museum.



- Βαβελίδης Μ., Γιαλόγλου Γ., Wagner G.A., Μέλφος Β. (1996). Σκαπτή Ύλη: Ένα αρχαίο μεταλλείο χρυσού στην τοποθεσία Μάνδρα Καρή, Παλιάς Καβάλας. Αρχαιομετρικές και Αρχαιολογικές Έρευνες στη Μακεδονία και Θράκη. Θεσσαλονίκη 1993. 23-35.
- Βαβελίδης Μ., Χριστοφίδης Γ., Μέλφος Β. (1997). Αρχαία μεταλλευτική δραστηριότητα στην ευρύτερη περιοχή Καβάλας-Φιλίππων. «Αρχαία Ελληνική Τεχνολογία». Θεσσαλονίκη. 95-101.
- Βαξεβανόπουλος, Μ. (2017). Καταγραφή και μελέτη αρχαίας μεταλλευτικής δραστηριότητας στο όρος Παγγαίο, Α. Μακεδονία (Doctoral dissertation, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Σχολή Θετικών Επιστημών. Τμήμα Γεωλογίας. Τομέας Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας).
- Koukouli-Christanthaki, Ch., Weisgerber, G., Gialoglou, G. & Vavelidis, M. (1988): Praehistorischer - und juenger Bergbau auf Eisenpigmente auf Thasos. Anschnitt, Bh. 6, 241-244.