



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ-ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ-ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΑΡΚΟΣ ΒΑΞΕΒΑΝΟΠΟΥΛΟΣ

Γεωλόγος MSc

Υπότροφος του Κοινωφελούς Ιδρύματος Αλέξανδρος Ωνάσης

Καταγραφή και μελέτη της αρχαίας μεταλλευτικής δραστηριότητας στο όρος Παγγαίο, Α. Μακεδονία

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Θεσσαλονίκη 2017



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ-ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ-ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΑΡΚΟΣ ΒΑΞΕΒΑΝΟΠΟΥΛΟΣ

Γεωλόγος MSc

Υπότροφος Κοινωφελούς Ιδρύματος Αλέξανδρος Ωνάσης

**Καταγραφή και μελέτη της αρχαίας μεταλλευτικής δραστηριότητας
στο όρος Παγγαίο, Α. Μακεδονία**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΥΠΟΒΛΗΘΗΚΕ ΣΤΟ ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΥ ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Θεσσαλονίκη 2017



Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-
Κοιτασματολογίας

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης:
23-01-2017

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από το Γεωλογικό Τμήμα του
Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης δεν υποδηλώνει αποδοχή των
απόψεων του συγγραφέα.

(N. 5343/1932, άρθρο 202, παρ. 2)



...στην ελευθερία που γεννά η αναζήτηση της αλήθειας.



© Μάρκος Βαξεβανόπουλος, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

Καταγραφή και μελέτη της αρχαίας μεταλλευτικής δραστηριότητας στο όρος Παγγαίο, Α. Μακεδονία.

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.



ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

1. Μιχάλης Βαβελίδης Καθηγητής Τμήματος Γεωλογίας
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας
2. Σπυρίδων Παυλίδης Καθηγητής Τμήματος Γεωλογίας
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Τομέας Γεωλογίας
3. Στέλιος Ανδρέου Καθηγητής Τμήματος Ιστορίας
και Αρχαιολογίας Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο
Θεσσαλονίκης
4. Βασίλης Μέλφος Επίκουρος Καθηγητής Τμήματος Γεωλογίας
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας
5. Λαμπρινή Παπαδοπούλου Επίκουρη Καθηγήτρια Τμήματος Γεωλογίας
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας
6. Νικόλαος Καντηράνης Επίκουρος Καθηγητής Τμήματος Γεωλογίας
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας
7. Ιωάννης Μπασιάκος Ερευνητής Α' Εθνικού Κέντρου Έρευνας Φυσικών
Επιστημών «Δημόκριτος»
Τομέας Επιστήμης Υλικών

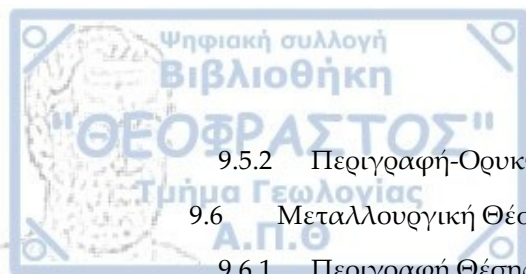
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ	12
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	18
2.1 Σκοπός έρευνας	18
2.2 Ευχαριστίες	20
3. ΤΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΤΗΣ ΑΡΧΑΙΟΤΗΤΑΣ.....	22
3.1 Χρυσός.....	23
3.1.1 Γενικά.....	23
3.1.2 Κοιτάσματα Χρυσού.....	24
3.1.3 Ο Χρυσός στην αρχαιότητα	26
3.2 Χαλκός	28
3.2.1 Γενικά.....	28
3.2.2 Ο Χαλκός στην αρχαιότητα.....	29
3.2.3 Κράματα Χαλκού στην αρχαιότητα.....	30
3.3 Κασσίτερος.....	31
3.4 Μόλυβδος-Άργυρος	32
3.4.1 Γενικά.....	32
3.4.2 Ο Μόλυβδος και ο Άργυρος στην αρχαιότητα.....	32
3.5 Σίδηρος.....	33
3.5.1 Γενικά.....	33
3.5.2 Ο Σίδηρος στην αρχαιότητα	34
3.6 Άλλα βασικά μέταλλα της αρχαιότητας	35
3.7 Αρχαία μεταλλευτική δραστηριότητα	36
3.7.1 Απόληψη προσχωματικών αποθέσεων	36
3.7.2 Μέθοδοι εξόρυξης.....	38
3.7.3 Εργαλεία και μεταφορές.....	43
3.7.4 Φωτισμός και αερισμός στην υπόγεια εκμετάλλευση.....	46
3.7.5 Μεταλλευτικά κέντρα της αρχαιότητας.....	48
3.8 Αρχαίες μεταλλουργικές μέθοδοι.....	59
3.8.1 Καθαρισμός μεταλλεύματος (εμπλουτισμός).....	59
3.8.2 Διαδικασία εκκαμίνευσης.....	62
3.8.3 Στοιχεία Μεταλλουργικής Καμίνου	68
3.8.4 Εκκαμίνευση Χαλκού.....	69

3.8.5	Εκκαμίνευση Αργυρούχου Μολύβδου.....	70
3.8.6	Εκκαμίνευση Σιδήρου	72
3.8.7	Απόληψη Χρυσού με πυρομεταλλουργική μέθοδο	74
3.8.8	Πυρομεταλλουργικές μέθοδοι για τον εξευγενισμό του χρυσού.....	75
3.9	Μεταλλουργικές Σκωρίες	77
3.9.1	Ορυκτά Μεταλλουργικών Σκωριών	78
3.9.2	Σκωρίες των μετάλλων της αρχαιότητας.....	80
3.9.3	Παράμετροι μελέτης των μεταλλουργικών σκωριών.....	81
3.9.4	Μεταλλουργικά κέντρα της αρχαιότητας.....	86
4.	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	89
4.1	Γεωγραφική τοποθέτηση	89
4.2	Ιστορικά στοιχεία της μεταλλευτικής περιοχής Παγγαίου	91
5.	ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΥ ΠΑΓΓΑΙΟΥ.....	99
5.1	Γενικά.....	100
5.2	Μάζα της Ροδόπης.....	102
5.3	Γεωτεκτονική εξέλιξη.....	104
5.4	Τεκτονική.....	105
5.5	Μαγματισμός στη μάζα της Ροδόπης	106
5.6	Τύποι μεταλλοφορίας στην ελληνική Ροδόπη	108
6.	ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ.....	113
6.1	Έρευνα Υπαίθρου.....	113
6.2	Εργασίες Εργαστηρίου.....	114
7.	ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΠΑΓΓΑΙΟΥ ΟΡΟΥΣ	116
7.1	Λιθοστρωματογραφία Παγγαίου.....	116
7.1.1	Κατώτερη Ενότητα Γνευσίων Παγγαίου	120
7.1.2	Ενότητα Λιθολογικών Εναλλαγών	120
7.1.3	Ανώτερα Μάρμαρα Παγγαίου.....	120
7.1.4	Πλουτωνίτης του Παγγαίου.....	122
7.1.5	Τριτογενή και Τεταρτογενή ιζήματα.....	123
7.2	Τεκτονική-Μεταμόρφωση.....	124
7.3	Εμφανίσεις μεταλλεύματος στο όρος Παγγαίο – Σύγχρονη Μεταλλευτική Δραστηριότητα	126
8.	ΑΡΧΑΙΑ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΣΤΟ ΟΡΟΣ ΠΑΓΓΑΙΟ.....	133
8.1	Μεταλλευτική Περιοχή Κοκκινοχώματος.....	134
8.1.1	Γεωγραφική Θέση.....	134
8.1.2	Γεωλογία-Τεκτονική.....	134

8.1.3	Περιγραφή Στοάς-Τεχνικές Εξόρυξης	136
8.1.4	Αρχαιολογικά Ευρήματα	139
8.1.5	Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Μεταλλεύματος	140
8.2	Μεταλλευτική Περιοχή Αγίας Τριάδας	144
8.2.1	Γεωγραφική Τοποθέτηση.....	144
8.2.2	Γεωλογία-Τεκτονική.....	144
8.2.3	Περιγραφή Στοάς-Τεχνικές Εξόρυξης	147
8.2.4	Αρχαιολογικά Ευρήματα	150
8.2.5	Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Μεταλλεύματος	150
8.3	Μεταλλευτική Περιοχή Μαυροκορφής.....	151
8.3.1	Γεωγραφική Θέση.....	151
8.3.2	Γεωλογία-Τεκτονική.....	152
8.3.3	Περιγραφή Στοάς-Τεχνικές Εξόρυξης	155
8.3.4	Αρχαιολογικά Ευρήματα	157
8.3.5	Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Μεταλλεύματος	158
8.4	Μεταλλευτική Δραστηριότητα στην Περιοχή Αβγού	161
8.4.1	Γεωγραφική Θέση.....	161
8.4.2	Γεωλογία-Τεκτονική.....	161
8.4.3	Περιγραφή Στοάς-Τεχνικές Εξόρυξης	164
8.4.4	Αρχαιολογικά Ευρήματα	165
8.4.5	Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Μεταλλεύματος	166
8.5	Μεταλλευτική Περιοχή Κορυφής – Τρίκορφο Παγγαίου.....	168
8.5.1	Γεωγραφική Θέση.....	168
8.5.2	Γεωλογία-Τεκτονική.....	168
8.5.3	Μεταλλείο Κόψης	172
8.5.4	Μεταλλευτική Στοά Τρίκορφο-1.....	176
8.5.5	Μεταλλευτική Στοά Τρίκορφο-2.....	178
8.5.6	Μεταλλευτική Στοά Τρίκορφο-3.....	179
8.5.7	Μεταλλευτική Στοά Τρίκορφο-4	180
8.5.8	Αρχαιολογικά Ευρήματα	182
8.5.9	Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Μεταλλεύματος	182
8.6	Μεταλλευτική Περιοχή Ασημότρυπες Παγγαίου.....	185
8.6.1	Γεωγραφική Θέση.....	185
8.6.2	Γεωλογία-Τεκτονική.....	186
8.6.3	Μεταλλευτική Στοά Ασημότρυπα-1	189

8.6.4	Ασημότρυπα-2, Ασημότρυπα-3 και Ασημότρυπα-8	191
8.6.5	Μεταλλευτική Στοά Ασημότρυπα-4.....	192
8.6.6	Μεταλλευτική Στοά Ασημότρυπα-5.....	193
8.6.7	Μεταλλευτική Στοά Ασημότρυπα-6.....	196
8.6.8	Μεταλλευτική Στοά Ασημότρυπα-7.....	198
8.6.9	Αρχαιολογικά Ευρήματα	199
8.6.10	Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Μεταλλεύματος	199
8.7	Μεταλλευτική Περιοχή Νεροστριάς.....	205
8.7.1	Γεωγραφική Θέση.....	205
8.7.2	Γεωλογία-Τεκτονική.....	206
8.7.3	Περιγραφή Στοάς -Τεχνικές Εξόρυξης	207
8.7.4	Αρχαιολογικά Ευρήματα	211
8.7.5	Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Μεταλλεύματος	212
8.8	Μεταλλευτική Περιοχή Δυτικού Παγγαίου	215
8.8.1	Επιφανειακή Εκμετάλλευση Νέας Φυλής.....	215
8.8.2	Υπόγειες Στοές Περιοχής Οφρυνίου	218
8.8.3	Αρχαιολογικά ευρήματα στις μεταλλευτικές εργασίες της περιοχής Δυτικού Παγγαίου	226
8.8.4	Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Μεταλλεύματος	227
9.	ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΣΤΟ ΟΡΟΣ ΠΑΓΓΑΙΟ	229
9.1	Μεταλλουργική Περιοχή Σίνα.....	230
9.1.1	Περιγραφή Θέσης	230
9.1.2	Περιγραφή – Ορυκτολογική και Χημική Σύσταση Υπολειμμάτων Μεταλλουργίας.....	232
9.1.3	Δρόμος με μεταλλουργικές σκωρίες	235
9.2	Μεταλλουργική Θέση Χρυσόκαστρου.....	236
9.2.1	Περιγραφή Θέσης	237
9.2.2	Περιγραφή – Ορυκτολογική και Χημική Σύσταση Μεταλλ. Σκωριών	237
9.3	Μεταλλουργική Περιοχή Παλαιοχωρίου	240
9.3.1	Περιγραφή θέσης.....	240
9.3.2	Περιγραφή – Ορυκτολογική και Χημική Σύσταση Μεταλλ. Σκωριών	242
9.4	Μεταλλουργική Περιοχή Νικήσιανης.....	245
9.4.1	Περιγραφή Θέσης	245
9.4.2	Περιγραφή – Ορυκτολογική και Χημική Σύσταση Υπολ. Μεταλλουργίας... ..	248
9.5	Μεταλλουργική Περιοχή Βαλτούδας	251
9.5.1	Περιγραφή Θέσης	251



9.5.2	Περιγραφή-Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Υπολειμμ. Μεταλλουργίας....	256
9.6	Μεταλλουργική Θέση Μουσθένης.....	261
9.6.1	Περιγραφή Θέσης	261
9.6.2	Περιγραφή-Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Υπολειμμ. Μεταλλουργίας....	262
9.7	Μεταλλουργική Περιοχή Πουλιάνας	265
9.7.1	Περιγραφή Θέσης	265
9.7.2	Περιγραφή-Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Υπολειμμ. Μεταλλουργίας....	266
9.8	Μεταλλουργική Θέση Αβγού	269
9.8.1	Περιγραφή Θέσης	269
9.8.2	Περιγραφή-Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Μεταλλουργικών Σκωριών....	270
9.9	Μεταλλουργική Θέση Ανάληψης	269
9.9.1	Περιγραφή Θέσης	272
9.9.2	Περιγραφή-Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Μεταλλουργικών Σκωριών....	272
9.10	Μεταλλουργική Θέση Δωματίων.....	275
9.10.1	Περιγραφή Θέσης	275
9.10.2	Περιγραφή-Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Μεταλλουργικών Σκωριών....	276
9.11	Μεταλλουργική Θέση Οφρυνίου.....	269
9.11.1	Περιγραφή Θέσης	278
9.11.2	Περιγραφή-Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Μεταλλουργικών Σκωριών....	279
	10. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΙΣΟΤΟΠΩΝ ΜΟΛΥΒΔΟΥ.....	280
10.1	Γενικά.....	280
10.2	Ισότοπα Μολύβδου σε δείγματα από το όρος Παγγαίο	280
	11. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΕΠΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	289
11.1	Συζήτηση επί της μεταλλοφορίας του όρους Παγγαίου	289
11.2	Μεταλλευτική δραστηριότητα στο όρος Παγγαίο.....	292
11.3	Μεταλλουργική δραστηριότητα στο όρος Παγγαίο.....	296
11.4	Μοντέλο παραγωγικής διαδικασίας.....	303
	12. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	307
	13. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	309
	14. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	330



1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο παρόν πόνημα εξετάζεται η αρχαία μεταλλευτική και μεταλλουργική δραστηριότητα στο όρος Παγγαίο στην Ανατολική Μακεδονία, μία από τις πλέον φημισμένες μεταλλευτικές περιοχές της αρχαίας Ελλάδας, μνημονευόμενη από πλήθος ιστορικών πηγών. Καταγράφονται συνολικά 9 περιοχές υπόγειας και επιφανειακής εξόρυξης μεταλλεύματος και 11 περιοχές με υπολείμματα μεταλλουργικής δραστηριότητας.

Οι μεταλλευτικές περιοχές που ερευνήθηκαν στο πλαίσιο του παρόντος στο κεντρικό-ανατολικό τμήμα του όρους χαρακτηρίζονται από την παρουσία μεταλλοφοριών με Au, Ag, Fe, Cu, Pb, Zn, As, Mn, καθώς και με περιεκτικότητες σε Bi, Te, W, V, Co, B, Sb, Cr και U. Οι μεταλλοφορίες αυτές αποτελούνται από τα ορυκτά σιδηροπυρίτης, αρσеноπυρίτης, χαλκοπυρίτης, γαληνίτης, σφαλερίτης, όπως επίσης και από τα ορυκτά βισμούθινίτης, τετραεδρίτης, μαλαχίτης, αζουρίτης, γκαιτίτης και ρουτίλιο.

Η μεταλλοφορία των περιοχών που μελετήθηκαν στο δυτικό τμήμα τους όρους αποτελείται από τα μεταλλικά στοιχεία Ag, Pb, Zn, Fe, Mn, As, Cu, καθώς και τα Ba, V, Sb, La, Ce, Cd, Hg, Sr και B. Τα ορυκτά που συνιστούν αυτόν τον τύπο μεταλλοφορίας είναι ο σιδηροπυρίτης, γκαιτίτης, βαρύτης και σμιθσονίτης.

Μέρος της μεταλλοφορίας εντοπίζεται σε φυλλώδεις χαλαζιακές φλέβες με παράλληλη έως υποπαράλληλη διάταξη στη μάζα του πλουτωνίτη του Παγγαίου, ενώ παρατηρείται επίσης και στην επαφή του με τα υπερκείμενα μάγμαρα. Η κύρια μάζα της μεταλλοφορίας τοποθετείται κατά μήκος των ασυνεχειών των μαρμάρων και λιγότερο των σχιστολίθων, ενώ οι αμφιβολίτες και οι ζώνες διάτμησης χαρακτηρίζονται ως τοπικά αδιαπέρατα φράγματα των υδροθερμικών διαλυμάτων. Για το λόγο αυτό τα περισσότερα μεταλλοφόρα σώματα εντοπίζονται σε τεκτονικές διακλάσεις που υπόκεινται φακών αμφιβολιτών ή ζωνών διάτμησης.

Η εκμετάλλευση κατά τους αρχαίους χρόνους αποσκοπούσε στην εξόρυξη της οξειδωμένης μεταλλοφορίας με περιεκτικότητα σε Au, Ag και κατά θέσεις σε Cu και Pb. Η εξόρυξη πραγματοποιείται κυρίως σε υπόγειες μεταλλευτικές στοές, οι οποίες ακολουθούν τη μεταλλοφορία διαμέσου των τεκτονικών ασυνεχειών και των επιφανειών σχιστότητας των μαρμάρων. Τα βασικά χρησιμοποιούμενα εργαλεία είναι το μεταλλευτικό σφυρί και το καλέμι, ενώ δευτερευόντως η τσάπα και η σφήνα. Το μέταλλευμα που παρουσιάζει υψηλές περιεκτικότητες σε Au, Ag, Cu, Pb και Fe μεταφέρεται στα μεταλλουργικά κέντρα όπου καθαρίζεται και κατόπιν πραγματοποιείται η εκκαμίνευσή του.

Από τη μελέτη των μεταλλουργικών σκωριών συμπεραίνεται ότι η εκκαμίνευση αποσκοπούσε πιθανώς στην εξαγωγή Au, Ag και Cu από το

μετάλλευμα. Είναι δύσκολο να διακριθούν οι περιοχές και οι περίοδοι όπου η μεταλλουργία προσανατολιζόταν σε ένα από αυτά τρία μέταλλα, καθώς και αν πραγματοποιούνταν δευτερογενής παραγωγή Pb ή Fe. Εξαίρεση αποτελεί η μεταλλουργική θέση των Δωματίων, όπου καταγράφεται αποκλειστικά μεταλλουργία Fe με πιθανή ανάτηξη σκωριών.

Η μεταλλευτική και μεταλλουργική δραστηριότητα στην περιοχή του Παγγαίου είναι δύσκολο να χρονολογηθεί χωρίς ευρύτερα ανασκαφικά δεδομένα. Στην περιοχή της Βαλτούδας όπου πραγματοποιήθηκε αρχαιομεταλλουργική ανασκαφή η αρχαία μεταλλουργική διαδικασία που αποσκοπούσε κυρίως στην παραγωγή Cu χρονολογείται στους ρωμαϊκούς χρόνους. Στις περισσότερες θέσεις με βάση επιφανειακά αρχαιολογικά ευρήματα παρατηρείται εντατικοποίηση της μεταλλευτικής και μεταλλουργικής διαδικασίας κατά τη ρωμαϊκή περίοδο, ενώ η πρωιμότερη κεραμική χρονολογείται στους ελληνιστικούς χρόνους. Επίσης, έντονη δραστηριότητα καταγράφεται επιπλέον στους υστεροβυζαντινούς και οθωμανικούς χρόνους.

Με βάση τα μελετηθέντα στοιχεία της παρούσας διατριβής το όρος Παγγαίο χαρακτηρίζεται ως μία από τις σημαντικότερες μεταλλευτικές περιοχές της αρχαίας Ελλάδας, αποτελώντας ένα ενδιάμεσο μοντέλο μεταβατικής παραγωγής μετάλλων τοπικού χαρακτήρα πιθανότατα εντασσόμενο σε μία πιο ευρεία μεταλλευτική περιοχή.



RECORDING AND STUDY OF ANCIENT MINING ACTIVITY ON MOUNT PANGAEON, E. MACEDONIA, GREECE.

By Markos Vaxevanopoulos

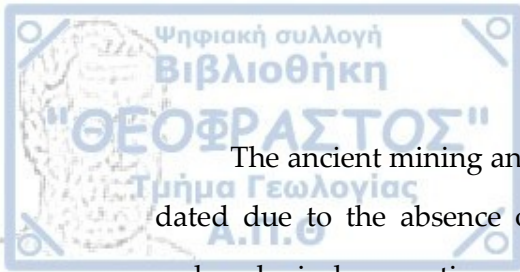
ABSTRACT

The present thesis studies the ancient mining and metallurgical process in the Mount Pangaeon in northeastern Greece one of the most mentioned gold and silver prospecting sites among ancient writers. Totally, 9 mining sites and 11 metallurgical areas were recorded and studied in the mass of the mountain.

The ores at the studied mining areas at the central-eastern part of the mountain based on the present study's analyses contain Au, Ag, Fe, Cu, Pb, Zn, As, Mn and substantial quantities of Bi, Te, W, V, Co, B, Sb, Cr and U, related with various mineral assemblages including pyrite, arsenopyrite, galena, chalcopyrite, sphalerite as well as minor bismuthinite, tetrahedrite, malachite, limonite and rutile. The ore at the studied mining areas at western part of Pangaeon contains Ag, Pb, Zn, Fe, Mn, As, Cu and minor Ba, V, Sb, La, Ce, Cd, Hg and Sr.

The ore is hosted in sheeted quartz veins at the mass of the plutonite as well as in the contact with the overlying marbles. The main ore deposits are found along fissures mainly in marbles and less in schists. Amphibolites and shear zones play a damming role in the hydrothermal fluids movement with the main ore deposition in tectonic discontinuities just below them.

The mining process during antiquity was focused on the oxidized ore following the main tectonic discontinuities and the schistosity of the marbles. The ore is enriched in Au, Ag as well as in Cu and Pb. The main mining tools were the hammer and the chisel. The extracted ores rich in Au, Ag, Cu, Pb and Fe were transferred to the metallurgical centers where enrichment and smelting was carried out. The metals produced from the smelting were Au, Ag and Cu based on the analysis of metallurgical slags. The production was focused on noble metals and also in the secondary extraction of Cu and Pb. Only in the Domatia metallurgical site Fe production is recorded with a probable slag resmelting.



The ancient mining and metallurgical process in Pangaeon is very difficult to be dated due to the absence of excavation data. Only in the Valtuda area where an archaeological excavation was carried out the metallurgical process of Cu is dated to Roman times. The oldest pottery finds are dated to Hellenistic times. An intensification of the mining and metallurgical process according to archaeological surface findings is recorded during Roman times. An intense activity is also reported during post-byzantine and ottoman times.

On the basis of the studied data Pangaeon Mount constitutes one of the most important mining and metallurgical areas of ancient Greece with an intermediate model of local metal production included in a broader metal production system.





... ἐκ δεξιῆς χειρὸς τὸ Πάγγαιον ὄρος ἀπέργων,
ἐὼν μέγα τε καὶ ὑψηλόν,
ἐν τῷ χρύσεά τε καὶ ἀργύρεα ἐνὶ μέταλλα,...
Ηρόδοτος, Ιστορίες, 7.112

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

2.1 Σκοπός έρευνας

Τα μέταλλα αποτέλεσαν και αποτελούν σημαντικό πυλώνα της ανθρώπινης ιστορίας και εξέλιξης. Η αναζήτηση, η εξόρυξη και η επεξεργασία των μετάλλων αποτέλεσαν σημαντικούς παράγοντες οικονομίας και της πολιτικής διαμόρφωσης των περισσότερων κοινωνιών από την αρχαιότητα μέχρι και τους τελευταίους αιώνες. Ακόμη και περίοδοι της ανθρώπινης ιστορίας και προϊστορίας διαχωρίζονται με βάση τα χρησιμοποιούμενα από τον άνθρωπο μέταλλα (Forbes, 1964). Η τέχνη, ο πολιτισμός, η οικονομία, τα ήθη και τα έθιμα, οι πόλεμοι, η μυθολογία και άλλες όψεις της ζωής των ανθρώπων επηρεάστηκαν καταλυτικά από την εξέλιξη της μεταλλευτικής και της μεταλλουργίας. Οι πολιτισμοί που αναπτύχθηκαν στον Ελλαδικό χώρο οφείλουν πολλά στα μέταλλα της ελληνικής γης (Healy, 1978; Κονοφάγος, 1980; Treister, 1996; Κακαβογιάννης, 2005; Βαβελίδης, 2007).

Το Παγγαίο όρος, αν και μνημονεύεται από πλήθος αρχαίων ιστορικών, δεν έτυχε ευρείας και ενδελεχούς έρευνας σε σχέση με άλλες περιοχές, που αποτέλεσαν μεταλλευτικά κέντρα της αρχαιότητας, όπως το Λαύριο, η Θάσος, η βορειοανατολική Χαλκιδική και η Σίφνος. Αποτελεί ένα σχετικά ανεξερεύνητο βουνό που στην πυκνή του βλάστηση κρύβει ίχνη της ανθρώπινης προσπάθειας για την κατάκτηση των μετάλλων. Αρχαία μεταλλεία, θέσεις μεταλλουργικής δραστηριότητας, τειχισμένα φρούρια βρίσκονται σε πολλά σημεία αυτού του ορεινού όγκου, που στέκει απομονωμένος και περικυκλωμένος από το όρος Φαλακρό, το Μενοίκιο, τα όρη της Λεκάνης, το Σύμβολο και τα Κερδύλια. Παλαιότερες προσπάθειες των Unger and Schütz (1980, 1981, 1982) κατέγραψαν βασικές αρχαιολογικές, γεωγραφικές και γεωλογικές πληροφορίες που αφορούν στη μάζα του όρους, χωρίς όμως να υπεισέλθουν σε λεπτομέρειες της αρχαίας μεταλλευτικής ή της μεταλλουργίας.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στον Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Αντικείμενό της είναι:

- i. Ο εντοπισμός, η καταγραφή και μελέτη των μεταλλοφόρων εμφανίσεων του Παγγαίου σε όλη τη μάζα του και ο τρόπος με τον οποίο εξορύχτηκαν κατά την αρχαιότητα.
- ii. Ο εντοπισμός, η καταγραφή και η μελέτη των θέσεων μεταλλουργικής δραστηριότητας στο όρος Παγγαίο.

Η έρευνα λοιπόν είναι δυνατό να διακριθεί στη διερεύνηση της μεταλλευτικής, δηλαδή του τρόπου εξαγωγής του μεταλλεύματος από τη γη και η μελέτη της μεταλλουργίας, του τρόπου εξαγωγής του ζητούμενου μετάλλου από το μέταλλευμα.

Αρχικά σαρώθηκε το μεγαλύτερο μέρος του βουνού προκειμένου να εντοπιστούν οι υπόγειες και επιφανειακές εξορύξεις, αλλά και οι περιοχές εκκαμίνευσης του μεταλλεύματος, το οποίο αποτέλεσε και το πιο δύσκολο και επίπονο κομμάτι της έρευνας υπαίθρου. Στη συνέχεια μελετήθηκαν όλες οι μορφές εκμετάλλευσης στους μεταλλευτικούς χώρους και ο τρόπος εκκαμίνευσης με βάση τα μεταλλουργικά υπολείμματα. Σε συνεργασία με τη ΙΗ' Εφορεία Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων (νυν Εφορεία Αρχαιοτήτων Καβάλας), κατά τα έτη 2012 και 2013, πραγματοποιήθηκε ανασκαφή στη μεταλλευτική περιοχή Ασημότρυπες και αρχαιομεταλλουργική ανασκαφή στην περιοχή της Βαλτούδας. Μέρος των αποτελεσμάτων αυτών των ανασκαφών παρουσιάζονται στο παρόν πόνημα.

Απώτερος στόχος της παρούσας διατριβής είναι η κατανόηση της μεταλλευτικής και της μεταλλουργικής γνώσης στο διάβα των αιώνων σε αυτόν τον περιορισμένο γεωγραφικά χώρο του Παγγαίου, χωρίς βέβαια να αγνοηθούν οι σχέσεις του και οι αλληλεπιδράσεις του με άλλες περιοχές μετάλλων. Για πρώτη φορά καταγράφονται επισταμένα οι τεχνικές εκμετάλλευσης των μεταλλοφοριών του όρους Παγγαίου και χαρτογραφούνται λεπτομερώς οι υπόγειες στοές στη μάζα του. Επιπλέον ομαδοποιούνται οι μεταλλοφορίες που έτυχαν εκμετάλλευσης και συσχετίζονται τόσο χωρικά με τις θέσεις μεταλλουργίας όσο και χρονικά ανάλογα με την περίοδο εκμετάλλευσης όπου αυτό είναι δυνατό.

Το παρόν πόνημα αποκρυσταλλώνει τις άγνωστες μέχρι τώρα λεπτομέρειες της μεταλλευτικής δραστηριότητας και της μεταλλουργίας στο όρος Παγγαίο και δίνει τη δυνατότητα για περαιτέρω συγκριτική έρευνα σε σχέση με τις άλλες γνωστές μεταλλευτικές περιοχές του ελληνικού χώρου. Είναι σίγουρο ότι δεν πρόκειται να δοθούν επαρκείς απαντήσεις σε σαφή ιστορικά ερωτήματα, αλλά αναμφίβολα αποκρυσταλλώνεται η εικόνα της μεταλλευτικής και της μεταλλουργικής δραστηριότητας σε αυτόν τον ιστορικό ορεινό όγκο.

2.2 Ευχαριστίες

Για την ολοκλήρωση της διδακτορικής μου διατριβής θα ήθελα να ευχαριστήσω εγκάρδια τον Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ. Μιχάλη Βαβελίδη για την ανάθεση του θέματος, την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την ουσιαστική βοήθεια τόσο στο έργο μου στο ύπαιθρο, όσο και στη σύνθεση των διαφόρων κομματιών του δύσκολου παζλ που λέγεται αρχαία μεταλλευτική και μεταλλουργία. Επιπλέον τον ευχαριστώ για την κάλυψη μέρους των οδοιπορικών εξόδων κατά την επίσκεψή μας στους χώρους μελέτης του όρους Παγγαίου.

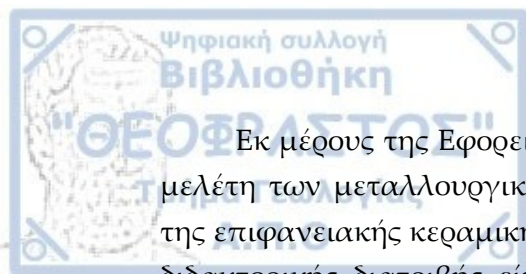
Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα δύο μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, τον Καθηγητή Τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ. Σπυρίδωνα Παυλίδη και τον Καθηγητή του Τμήματος Ιστορίας και Αρχαιολογίας Στέλιο Ανδρέου για τη συμβολή τους και τις χρήσιμες συμβουλές τους στην εκπόνηση της διατριβής.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ. Βασίλη Μέλφο για τις πολύτιμες συμβουλές του σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής, για τη συμβολή του στην επιτόπια έρευνα, αλλά και για τις διορθώσεις του επί του κειμένου.

Ευχαριστώ επίσης την Επίκουρη Καθηγήτρια του Τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ. Λαμπρινή Παπαδοπούλου για την ακούραστη συμβολή της στη μελέτη των δειγμάτων στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

Επιπλέον, ευχαριστώ τα υπόλοιπα δύο μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής, τον Επίκουρο Καθηγητή Τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ. Νικόλαο Καντηράνη και τον Ερευνητή Α' Εθνικού Κέντρου Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος» διδάκτορα Γεωλογίας Ιωάννη Μπασιάκο, για τις αξιόλογες διορθώσεις τους επί του κειμένου της διατριβής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω το Διευθυντή Ορυκτολογίας-Πετρολογίας του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών διδάκτορα Γεωλογίας Γιώργο Οικονόμου για τη βοήθειά του στις μικροαναλύσεις των δειγμάτων, καθώς και τους βοηθούς Μιχάλη Σακαλή και Παναγιώτα Κοντοχριστοπούλου. Τη συντηρήτρια της Εφορείας Αρχαιοτήτων Μαγνησίας Ελένη Ασδεράκη για την αρωγή της στη χρήση του φορητού XRF. Τον πρώην Διευθυντή του παραρτήματος Αν. Μακεδονίας-Θράκης του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών Νικόλαο Επιτρόπου και το διδάκτορα Γεωλογίας, γεωλόγο του παραρτήματος Θεσσαλονίκης του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών ερευνών Γιάννη Χατζηπαναγή τους ευχαριστώ για τις συμβουλές τους και την παροχή σημαντικών βιβλιογραφικών αναφορών. Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον Dr. Martin Rosner, υπεύθυνο του εργαστηρίου Isoanalysis στο Βερολίνο, για τις συμβουλές του επί των αναλύσεων ισοτόπων του Pb.



Εκ μέρους της Εφορείας Αρχαιοτήτων Καβάλας σημαντική συνεισφορά στη μελέτη των μεταλλουργικών και μεταλλευτικών ευρημάτων, στη χρονολόγηση της επιφανειακής κεραμικής αλλά και συμβολή στην αρχαιολογική επιμέλεια της διδακτορικής διατριβής είχε η Δρ. Δήμητρα Μαλαμίδου, την οποία ευχαριστώ θερμά.

Στην έρευνα υπαίθρου θα επιθυμούσα να επισημάνω την καταλυτική βοήθεια της MSc Γεωλόγου Αγγελικής Ρεϊζοπούλου, καθώς και των μελών της Σπηλαιολογίας Θεσσαλονίκης «Πρωτέας» Γιώργου Κονίδη, Ευγενίας Κιουρεξίδου, Κασσάνδρας Θέμελη, Ματίνας Σγουρομύτη και Γιώργου Σωτηριάδη, καθώς και των μελών της Εταιρείας Σπηλαιολογικών Ερευνών Θεσσαλίας ο «Χείρων», Βασίλη Κατσούλη, Ελένη Τσαγανού και Νίκο Γιαννάκη.

Τέλος, ακρογωνιαίοι λίθοι της άντλησης στοιχείων αποτέλεσαν οι τοπικοί πληροφορητές, ο Θεόδωρος Λυμπεράκης, ο Νίκος Κασίδης, ο Παύλος Κουτσούκος, ο Μιχάλης Κεμεκενίδης, ο Στέλιος Γαϊταντζής, ο Νεκτάριος Κοντούδης, ο Βασίλης Κοντούδης, ο Αναστάσιος Δημητρακούδης, Νικόλαος Χρυσαφούδης, ο Άρης Μεντίζης, ο Θανάσης Γιώτσος, ο Τόνυ Μπετίνι, Αριστείδη Φούσια, Κώστα Γεωργούλα τους οποίους ευχαριστώ για τη συμβολή τους. Επίσης να ευχαριστήσω τον Κωσταντίνο Τάσση, ιδιοκτήτη του ξενοδοχείου Δασικό Χωριό για τη διαμονή και διατροφή που μας προσέφερε στο κατάλυμα του κατά τη διάρκεια της έρευνας υπαίθρου.

3. ΤΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΤΗΣ ΑΡΧΑΙΟΤΗΤΑΣ

Τα μεταλλικά στοιχεία που βρίσκονται αυτοφυή στη φύση, όπως ο χρυσός, ο άργυρος, ο χαλκός, ο μόλυβδος και ο σίδηρος, προσέλκυαν από πολύ νωρίς το ενδιαφέρον του ανθρώπου (Tylecote, 1962; Tylecote, 1987; Craddock, 1995). Στη φύση συναντώνται αυτοφυώς και τα μεταλλικά ορυκτά της ομάδας του λευκόχρυσου – PGM (Λευκόχρυσος, Ιρίδιο, Ρουθήνιο, Παλλάδιο, Ρόδιο και Όσμιο), αλλά χωρίς να έχουν τύχει ευρείας εκμετάλλευσης στην αρχαιότητα¹. Εκτός όμως από τα αυτοφυή μεταλλικά στοιχεία, χημικές ενώσεις δομούν μεταλλικά ορυκτά που αποτέλεσαν την πρώτη ύλη για την εξαγωγή μετάλλων, όπως για παράδειγμα ο μαλαχίτης για την εξαγωγή χαλκού ή ο μαγνητίτης για την εξαγωγή σιδήρου (Bachmann, 1982).

Ο χαλκός και τα οξείδια του σιδήρου συλλέγονται από τον άνθρωπο κατά την Παλαιολιθική Εποχή και χρησιμοποιούνται αρχικά ως χρωστικές ουσίες (Tylecote, 1987). Ο χρυσός επίσης είναι ένα μέταλλο που πιθανότατα κίνησε το ενδιαφέρον του ανθρώπου και συλλέχθηκε αρχικά από τις προσχώσεις ποταμών κατά την Παλαιολιθική και τη Νεολιθική Εποχή, χωρίς όμως να υπάρχουν απτές αποδείξεις (Tylecote, 1987; Craddock, 1995). Ο χρυσός αποτέλεσε στοιχείο επίδειξης και σύμβολο δύναμης και ήδη συναντάται σε ταφές από την 5^η χιλ. π.Χ. στην Ευρώπη (Eluère, 1989a; b). Ο χαλκός όμως χρησιμοποιήθηκε από την αρχή όχι μόνο για λόγους καλαισθησίας, αλλά και ως χρηστικό αντικείμενο. Ορυκτά όπως ο αυτοφυής χαλκός, ο μαλαχίτης και ο αζουρίτης που χρησιμοποιήθηκαν για χιλιετίες ως πρώτη ύλη σε ψηφίδες και διάφορες χρωστικές από το 11.000 π.Χ. (Radivojevic et al, 2010) γίνονται πρώτη ύλη στις πρώτες μεταλλουργικές προσπάθειες στο Çayönü Tepesi στην ανατολική Τουρκία (Maddin et al, 1999). Στην Ευρώπη εκαμινεύεται από το τέλος της 6^{ης} χιλ. π.Χ. όπου συναντώνται υπολείμματα μεταλλουργικής δραστηριότητας στο Belovode (Radivojevic et al, 2010), στη Rudna Glava και στο Ai Bunar στα Βαλκάνια (Jovanovic, 1971; Chernykh, 1978), καθώς και στο Cerro Virtud στη νοτιοανατολική Ισπανία (Ruiz Taboada and Montero-Ruiz, 1999 από Radivojevic et al, 2010). Στη συνέχεια επίσης πολύ πρόωμα ο άργυρος μαζί με το μόλυβδο εξορύσσονται και συνδυάζονται με την ανακάλυψη της κυπέλλωσης. Η ευρεία χρήση του σιδήρου από τα τέλη της 2^{ης} χιλ. π.Χ. άλλαξε άρδην τα μεταλλευτικά και μεταλλουργικά δεδομένα, διευρύνοντας κατά πολύ τη συμβολή των μετάλλων στη ζωή των ανθρώπων (Knauth et al, 1974).

¹ Το 1200π.χ. οι Αιγύπτιοι εισάγουν χρυσό με ίχνη λευκόχρυσου από το βασίλειο της Νουβίας (Scott, 1980; Klemm et al, 2009), ενώ το 700π.Χ. η περιφέρεια σαρκοφάγος της «Shepenupet» κόρης του βασιλιά των Θηβών της Αιγύπτου, είναι διακοσμημένη με ιερογλυφικά σε χρυσό, άργυρο και κράμα των PGM (Jones, 2005).

Η μεταλλευτική, η μεταλλουργία και η μεταλλοτεχνία αποτελούν όψεις της τεχνολογίας των μετάλλων. Σύμφωνα με τον Κακαβογιάννη (2005), με τον όρο «μεταλλευτική» ορίζουμε την ακολουθούμενη διαδικασία για τον εντοπισμό και εξόρυξη ενός μεταλλεύματος. Ο μετέπειτα καθαρισμός του εξορυχθέντος μεταλλεύματος, η τήξη του, η δημιουργία κραμάτων και η επεξεργασία του ονομάζεται «μεταλλουργία». Η κατασκευή στη συνέχεια μεταλλικών αντικειμένων ονομάζεται «μεταλλοτεχνία».

Τα μέταλλα που ήταν γνωστά κατά την αρχαιότητα και έγιναν αντικείμενο εκμετάλλευσης από τον άνθρωπο, ειδικά στον ελληνικό και ρωμαϊκό κόσμο, είναι επτά. Ο χρυσός, ο χαλκός, ο άργυρος, ο μόλυβδος, ο κασσίτερος, ο σίδηρος και ο υδράργυρος (Healy, 1978). Σίγουρα γινόταν χρήση και άλλων μετάλλων, αλλά χωρίς να υπάρχει ιδιαίτερη επίγνωση ότι αποτελούν ξεχωριστά μέταλλα, όπως το αρσενικό και το αντιμόνιο (Healy, 1978).

Τα λεγόμενα «επτά μέταλλα της αρχαιότητας» ήταν γνωστά μέχρι και τον 14^ο αιώνα, ωστόσο ανακαλύφθηκαν επιπλέον το αρσενικό, ο ψευδάργυρος και το αντιμόνιο (Cramb, 2012). Τον 16^ο αιώνα ανακαλύφθηκε ο λευκόχρυσος (Pt). Τον 18^ο αιώνα ανακαλύφθηκαν άλλα 12 ορυκτά, ενώ τον 20^ο αιώνα έγινε γνωστό ένα σύνολο 86 ορυκτών.

Τα επτά βασικά μέταλλα της αρχαιότητας ήταν διαδεδομένα στις περιοχές της Μεσοποταμίας, της Αιγύπτου, της Ελλάδας και της Ρώμης. Εκτός από το μόλυβδο και τον κασσίτερο, τα υπόλοιπα βρίσκονται ως αυτοφυή στη φύση (Healy, 1978).

3.1 Χρυσός

3.1.1 Γενικά

Ο χρυσός στο φλοιό της Γης παρουσιάζεται στο μεγαλύτερο ποσοστό του σε αυτοφυή κατάσταση. Βασικές του ιδιότητες είναι η χημική σταθερότητα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η ελατότητα και η ολκιμότητα (Macdonald, 2007). Τα χαρακτηριστικά αυτά του προσέδιδαν από την αρχαιότητα μεγάλη αξία. Χρησιμοποιήθηκε συχνά ως πρότυπο για την εκτίμηση του κόστους εργασίας, των αγαθών, νομισμάτων και των εθνικών οικονομιών. Λειτουργήσε ως πρότυπο για πολλά νομίσματα (Macdonald, 2007). Το σύμβολο του Χρυσού (Au) προέρχεται από το λατινικό προσωνύμιο Aurum (λαμπρή αυγή).

Φυσική πηγή του χρυσού είναι ο αυτοφυής χρυσός (πάνω από 85 wt%) και το θαλασσινό νερό². Ρευστά που μεταφέρουν πάνω από 10 ppb Au είναι άριστα διαλύματα για τη δημιουργία κοιτασμάτων χρυσού (Macdonald, 2007). Ο χρυσός

² Οι ωκεανοί περιέχουν περίπου 1350 εκατομμύρια km³ νερού και μια μέση περιεκτικότητα σε χρυσό 0,000006 ppm αντιπροσωπεύει 8200 km³ καθαρού χρυσού (Macdonald, 2007).

βρίσκεται αυτοφυής, συνήθως με άργυρο, χαλκό, βισμούθιο, υδράργυρο, ορυκτά της πλατίνας, σε τελλουρίδια και σεληνίδια. Ο αυτοφυής χρυσός διακρίνεται από τα άλλα ορυκτά από τη χαρακτηριστική του μεταλλική λάμψη και απόχρωση, όπως το σιδηροπυρίτη, μαρκασίτη, χαλκοπυρίτη, μιλερίτη όλα γνωστά με τον όρο «fools' gold». Δεν αντιδρά με το οξυγόνο, ώστε να παραγάγει οξείδια. Η αντίστασή του στην οξείδωση τον κατατάσσει στα ευγενή μέταλλα (Macdonald, 2007).

Ο συνδυασμός των φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών του χρυσού τον κάνει μοναδικό και ανεκτίμητο με πολλές εφαρμογές (Macdonald, 2007). Είναι ένα από πιο ανενεργά χημικώς μέταλλα. Μένει ανεπηρέαστος από τις αλλαγές τις θερμοκρασίας και από την εισαγωγή του σε ισχυρά αλκαλικά διαλύματα και σε καθαρά οξέα (εκτός από τα σεληνικά H_2SeO_4). Έχει πυκνότητα 19,3 φορές μεγαλύτερη από το νερό και ζυγίζει 19000 kg/m^3 (Macdonald, 2007). Ο χρυσός είναι το πιο ελατό και το πιο όλκιμο μέταλλο στη γη.

3.1.2 Κοιτάσματα Χρυσού

Ο χρυσός συναντάται σε πολλά και ποικίλα γεωτεκτονικά περιβάλλοντα σε όλη τη γη. Τα κοιτάσματά του διακρίνονται σε πρωτογενή ή υπογενετικά, στα υπεργενετικά και στα προσχωματικά. Τα πρωτογενή κοιτάσματα δημιουργούνται από τη δράση υδροθερμικών διαλυμάτων σε διάφορα γεωτεκτονικά περιβάλλοντα (Hagemann and Brown, 2000; Robert et al, 2007; Χαριστός, 2010), τα υπεργενετικά σύμφωνα με τους Freyssinet et al (2005) δημιουργούνται από τη χημική και μηχανική αποσάθρωση των υπογενετικών μεταλλοφοριών και διακρίνονται σε λατεριτικά και μη λατεριτικά κοιτάσματα χρυσού, ενώ τα προσχωματικά κοιτάσματα προέρχονται από την ιζηματογενή απόθεση κλαστικών ορυκτών (Els and Ericsson, 2005).

Οι Robert et al (2007) κατατάσσουν τα πρωτογενή κοιτάσματα χρυσού σε δεκατρείς κατηγορίες, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1.2.1. Τα προσχωματικά κοιτάσματα χρυσού σύμφωνα με τους Garnett and Basset (2005) ανάλογα με τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά τους κατατάσσονται σε έξι κατηγορίες: 1) Ελλουβιακά 2) Κολουβιακά 3) Ποτάμια 4) Αιολικά 5) Θαλάσσια 6) Παγετωνικά.

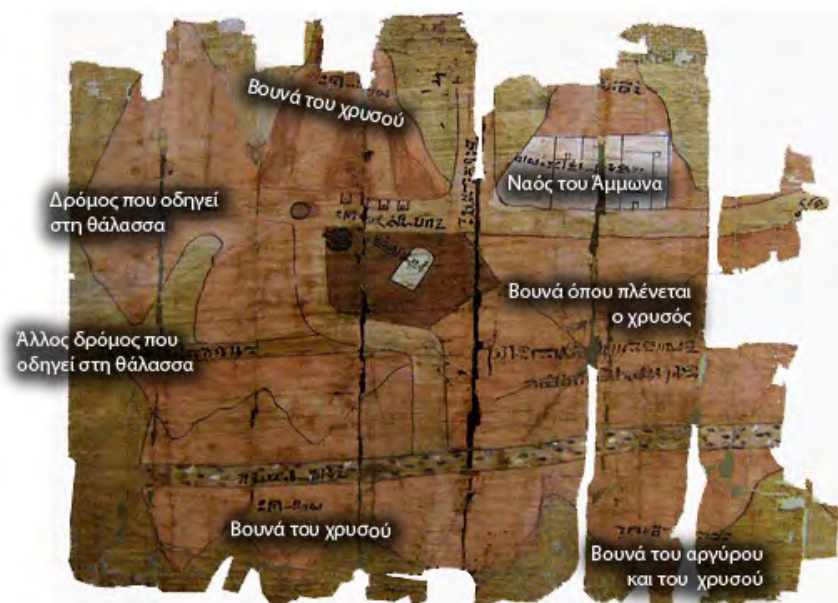
Πίνακας 3.1.2.1 Χαρακτηριστικά επιλεγμένων τύπων κοιτασμάτων χρυσού (Robert et al, 2007).

Κατηγορίες	Τύπος Κοιτάσματος	Χαρακτηριστικά σε μεγα-κλίμακα	Βασικά χαρακτηριστικά που αυξάνονται με την εγγύτητα
Ορυγενετικά	Σε Βασικά Πυριγενή	-Βασικά πυριγενή ηφαιστειακών ή ιζηματογενών ζωνών -Μεγάλες ζώνες διάτμησης -Κροκαλοπαγή	-Ζωνώδης ανθρακική εξαλλοίωση με σερική-σιδηροπυρίτη -Χρυσοφόρες φλέβες ή ζώνες με διάσπαρτα σουλφίδια -Au > Ag, As, παρουσία W
	Σε Φλέβες Τουρβιδιτών	-Πτυχωμένη τουρβιδιτική ακολουθία -Γρανιτικές διεισδύσεις -Μεγάλα ρήγματα -Πρασινοσχ. μεταμόρφωση	-Ανθρακική εξαλλοίωση με Fe-Mg -Συγκεντρώσεις Au, χαλαζιακές φλέβες -Au > Ag, παρουσία As
	Ταινωτές Σιδηρούχες Αποθέσεις (BIF)	-Ζώνες με παχείς σιδηρούχους σχηματισμούς -Πτυχωμένα και μεταμορφωμένα	-Σουλφιδίωση των σιδηρούχων σχηματισμών -Χλωριτική-Ανθρακική ή αμφιβολιτική εξαλλοίωση -Au > Ag, As
Συνδεόμενα με Πλουτωνικές Διεισδύσεις (Ανηγμένα)	Συνδεόμενα με Πλουτωνικές Διεισδύσεις - Μεσοζωνικά	- Πυριτικές-κλαστικές ακολουθίες -Ζώνες με διεισδύσεις -Συσχέτιση με W-Sn ± Mo	-Πρώιμη εξαλλοίωση K-αστρίων και όψιμη εξαλλοίωση σερική-ανθρακική εξαλλοίωση -Εμφάνιση φυλλωδών φλεβών και φλεβιδίων - Au>Ag, Bi, As, W, Mo - Au :Bi συσχέτιση
	Συνδεόμενα με Πλουτωνικές Διεισδύσεις - Επιζωνικά	- Πυριτικές-κλαστικές ακολουθίες -Ζώνες με μέτρια ανηγμένες διεισδύσεις -Συσχέτιση με W-Sn ± Mo και/ή ζώνες Sb	-Φυλλώδεις φλέβες και φλεβίδια - Au>Ag, As, Sb +/-Hg
	Συνδεόμενα με Πλουτωνικές Διεισδύσεις – Σε ιζήματα	-Ρηγματωμένες και πτυχωμένες πυριτικές-κλαστικές ακολουθίες -Ζώνες με μέτρια ανηγμένες διεισδύσεις -Συσχέτιση με W-Sn ± Mo και/ή ζώνες Sb	-Πρώιμη εξαλλοίωση K-Αστρίων και όψιμη ανθρακική εξαλλοίωση -Φυλλώδη φλεβίδια, πλέγμα φλεβών, σμήνος φλεβών - Au>Ag, Bi, As, W, παρουσία Mo
Συνδεόμενα με Πλουτωνικές Διεισδύσεις (Οξειδωμένα)	Εμπλουτισμένα σε Au Πορφυριτικά	-Ασβεσταλκαλικά-αλκαλικά μαγματικά τόξα -Τοπικού χαρακτήρα τόξα με παράλληλα ρήγματα -Σύγχρονο ηφαιστειακό κάλυμμα	-Αργιλική εξαλλοίωση (ανώτερα τμήματα) ή προπυλιτική -Πλέγμα φλεβιδίων σε εξαλλοιωμένα πετρώματα -Εξαλλοίωση K-αστρίων με φλέβες μαγνητίτη -Au-Ag, παρουσία Cu
	Επιθερμικά Υψηλής Θείωσης	-Ασβεσταλκαλικά-αλκαλικά τόξα -Τοπικού χαρακτήρα τόξα με παράλληλα ρήγματα -Διατηρ. ηφαιστειακό κάλυμμα	-Αργιλική εξαλλοίωση -Πυριτική εξαλλοίωση - Au-Ag, As, Cu, Sb, Bi, παρουσία Hg

	Επιθερμικά Χαμηλής Θείωσης Αλκαλικά	-Εφελκυστικό περιβάλλον σχετιζόμενο με νησιωτικό τόξο και ράχη	-Εκτεταμένη ανθρακική εξαλλοίωση -Εγγύς εξαλλοίωση σερικίτη -Συγκεντρώσεις Au - Au > Ag, Te, V, Pb, παρουσία Zn
Άλλες κατηγορίες	Επιθερμικά Χαμηλής Σουλφιδίωσης Υποαλκαλικά	-Ενδο-τοξικό και οπισθοτοξικό εφελκυστικό καθεστώς -Ηφαιστειότητα δύο τύπων (βασάλτινη-ρυολιτική)	-Προπυλιτική προς αργιλική εξαλλοίωση -Συγκεντρώσεις ταινιωτών φλεβών τύπου LS - Au < Ag, Zn, Pb, Cu, As παρουσία Hg
	Carlin	-Ρηγματωμένες και ρηγματωμένες ακολουθίες μειογεωσυγκλίνου -Οξίνος μαγματισμός	-Πυριτώση κατά μήκος τεκτονικών ζωνών -Λατυποπαγή διάλυσης -Εμφανίσεις ορυκτών του As, Sb και Hg - Au > Ag, As, Sb, TI παρουσία Hg
	Εμπλουτισμένα σε Au VMS	-Ρηξιγενή τόξα -Βασικά-όξινα υποθαλάσσια ηφαιστειακά	-Ημισύμφωνη εξαλλοίωση και μείωση του Na -Χλωριτική-σερικιτική εξαλλοίωση προς αργιλική - Au < Ag, Cu, Zn, παρουσία As
	Παλαιο- προσχωματικά	-Ωριμα ιζήματα σε κρατονικές περιοχές -Οπισθοτοξικές λεκάνες	-Πυροφυλιτική-χλωριτική εξαλλοίωση -Χρυσός σε δένδριτικό σιδηροπυρίτη αρενιτών και κροκαλοπαγών Au > Ag, παρουσία U

3.1.3 Ο Χρυσός στην αρχαιότητα

Η πιο εκτεταμένη και μία από τις πρωιμότερες παρουσίες χρυσών τεχνουργημάτων στην Ευρώπη καταγράφεται στο Νεολιθικό νεκροταφείο της Βάρνας, στη Βουλγαρία (Eluère 1989a; b; Makay, 1991; Eluère and Raub, 1991) που χρονολογείται την 5^η χιλιετία π.Χ. Από την 4^η χιλιετία π.Χ. καταγράφεται οργανωμένη εκμετάλλευση κοιτασμάτων χρυσού στην Αίγυπτο (Sutherland, 1959). Στη Βόρεια Αφρική οι πλέον χρυσοφόρες περιοχές ήταν η ανατολική έρημος και η Νουβία, όπου υπολειμματικοί σβόλοι χρυσού Πλειστοκαινικών αποθέσεων συλλέγονταν στις ξηρές κοιλάδες-wadis (Klemm, 2001). Σε πάπυρο του 1160 π.Χ. μάλιστα, που θεωρείται ο παλαιότερος τοπογραφικός και γεωλογικός χάρτης που έχει βρεθεί (Εικ. 3.1.3.1), απεικονίζεται η χρυσοφόρος κοιλάδα Hammamat με αρκετές λεπτομέρειες για την εκμετάλλευση των χρυσοφόρων κοιτασμάτων.



Εικόνα 3.1.3.1 Χάρτης σε πάπυρο του 1160 π.Χ. της χρυσοφόρου κοιλάδας Hammamat στην Αίγυπτο (Μουσείο Egizio, Τορίνο). Τροποπ. από <https://egyptsites.wordpress.com/2010/09/14/wadi-hammamat>.

Η κύρια πηγή του χρυσού ήταν αρχικά οι κοίτες χρυσοφόρων ποταμών, όπως ο Πακτωλός στη Μικρά Ασία ή ο Εχέδωρος στη Μακεδονία (Rammage and Craddock, 2000; Βαβελίδης, 2007). Εκεί ο προσχωματικός χρυσός συλλεγόταν με διάφορες υδρομηχανικές μεθόδους. Στη Μικρά Ασία και συγκεκριμένα στην περιοχή της Λυδίας ο Ηρόδοτος³ περιγράφει κατ' αυτόν ένα αξιοπερίεργο φαινόμενο. Ψήγματα χρυσού κατεβαίνουν από την οροσειρά του Τμώλου μέσω του ποταμού Πακτωλού⁴ που πηγάζει από αυτήν και χύνεται στο μεγαλύτερο ποταμό Έρμο. Αναφέρει επίσης⁵ ότι οι Λυδοί πρώτοι έκοψαν νόμισμα από χρυσό και ασήμι. Η χρήση του χρυσού ως ανταλλακτικό μέταλλο ή ως επίδειξη πλούτου είναι πολύ παλαιότερη. Αλλά η χρήση σβόλων χρυσού ως νόμισμα τοποθετείται πιθανώς την εποχή του βασιλιά των Λυδών, Αλυάττη του Β', πατέρα του Κροίσου λόγω της ανάγκης για πληρωμή μισθοφορικού στρατού για να αντιμετωπίσει τους Μηδούς στα μέσα του 7^{ου} αιώνα π.Χ. (Rammage and Craddock, 2000).

Στον ελληνικό χώρο, ο χρυσός ήταν σχετικά σπάνιο μέταλλο από τη Νεολιθική εποχή μέχρι και τα κλασικά χρόνια σύμφωνα με το Healy (1978). Την εποχή του χαλκού παρατηρείται ευρεία χρήση του στις Μυκήνες και στην Κρήτη, αλλά χωρίς να είναι γνωστές με σιγουριά οι πηγές του. Ο Davies (1932) υποστηρίζει ότι την Εποχή του Χαλκού στο Αιγαίο οι τοπικές πηγές του χρυσού εξαντλήθηκαν πολύ σύντομα. Ο μύθος της Αργοναυτικής Εκστρατείας που

³ Ηρόδοτος, Ιστορίες, 1. 93

⁴ Ηρόδοτος, Ιστορίες, 5.101

⁵ Ηρόδοτος, Ιστορίες, 1.94

τοποθετείται στο τέλος της Εποχής του Χαλκού, ίσως να αποτελεί φιλολογική περιγραφή των προσπαθειών εξεύρεσης νέων πηγών χρυσού, ειδικά στην περιοχή της Κολχίδας, όπου ο προσχωματικός χρυσός ήταν άφθονος στον ποταμό Φάση⁶. Ο Tylecote (1987) υποστηρίζει ότι το χρυσόμαλλο δέρας χρησιμοποιούνταν σε κοίτες ποταμών για τη συγκράτηση του χρυσού.

Η χημική σύσταση των χρυσών αντικειμένων που βρίσκονται στα νεκροταφεία της αρχαϊκής, κλασσικής και ελληνιστικής εποχής στη Μακεδονία και στη Θράκη σύμφωνα με το Βαβελίδη (2007; 2009) παρουσιάζει σε πολλές περιπτώσεις ομοιότητες με τη χημική σύσταση χρυσού από κοιτάσματα αυτών των περιοχών.

Σύμφωνα με το Βαβελίδη (2009) τα σημαντικότερα κοιτάσματα χρυσού στην Ελλάδα εντοπίζονται στη Μακεδονία και στη Θράκη, ενώ επιπλέον εμφανίσεις καταγράφονται στην Εύβοια, στη Σίφνο και στη Μήλο. Στη Μακεδονία ιδιαίτερα σημειώνονται οι αρχαίες μεταλλευτικές περιοχές της Θάσου, της Σκαπτής Ύλης και του Παγγαίου. Ο Healy (1978) αναφέρει ότι οι ντόπιες πηγές χρυσού στον Ελλαδικό χώρο κατά την αρχαϊκή και κλασική περίοδο είναι κυρίως προσχωματικά κοιτάσματα, όπως στα Δολιανά, από όπου προέρχονται πολύ πιθανώς τα χρυσά αντικείμενα που βρέθηκαν στην Αρκαδία. Επίσης, εισαγωγή χρυσού στην Ελλάδα από την Αίγυπτο δεν μπορεί να αποκλειστεί, μιας και η εξόρυξη και η παραγωγή του εκεί είχαν ήδη αρχίσει από πολύ νωρίς, όπως και από βορειότερες περιοχές στην κοιλάδα του Δούναβη. Ο Ηρόδοτος αναφέρει τις βασικές χρυσοφόρες περιοχές του ελληνικού χώρου στη Μακεδονία και στη Θράκη, τα όρη Δύσωρο⁷ (Κρούσια) και Παγγαίο⁸.

Ο Davies (1935) υποστηρίζει ότι ο μακεδονικός χρυσός γίνεται γνωστός στο νότιο Ελλαδικό χώρο, όταν οι γνωστές πηγές χρυσού της Λυδίας εξαντλούνται ή δεν είναι εύκολα διαθέσιμες. Με την εκστρατεία του Μεγάλου Αλεξάνδρου στην ανατολή άφθονος χρυσός εισρέει στον ελληνικό χώρο και η ντόπια παραγωγή σαφώς κρίνεται ασύμφορη.

3.2 Χαλκός

3.2.1 Γενικά

Ο χαλκός έγινε αντικείμενο εκμετάλλευσης στην αρχαιότητα με βασικές πηγές τον αυτοφυή χαλκό και ορυκτά του χαλκού (μαλαχίτης, αζουρίτης, χρυσόκολλα κ.ά.). Το χαλκοκόκκινο χρώμα του αυτοφυούς χαλκού και τα πράσινα, κυανά χρώματα των περισσότερων ορυκτών του αποτέλεσαν πιθανώς διακριτικά χαρακτηριστικά για τον εντοπισμό του από τους αρχαίους

⁶ Στράβων, Γεωγραφικά, XI, 2.19

⁷ Ηρόδοτος, Ιστορίες, 5.17

⁸ Ηρόδοτος, Ιστορίες, 7.112

μεταλλευτές. Ο Θεόφραστος⁹ αναφέρει ότι τα ορυκτά του χαλκού τα βρίσκουμε στα ίδια μεταλλεία με αυτά του χρυσού. Χρησιμοποιεί για τα πράσινα ορυκτά του χαλκού το όνομα «χρυσοκόλλα» και για αυτά που έχουν γαλάζιο χρώμα το «κυανός».

3.2.2 Ο Χαλκός στην αρχαιότητα

Τα οξειδία του χαλκού, όπως και του σιδήρου, χρησιμοποιήθηκαν για χιλιετίες ως χρωστικές. Ιδιαίτερα ο χαλκός ανευρίσκεται με τη μορφή κυανών και πράσινων σφυρηλατημένων ψηφίδων στο σπήλαιο Shanidar στο Βόρειο Ιράκ και στην περιοχή Rosh Horesha στο Ισραήλ την 11^η χιλιετία π.Χ. (Bar-Yosef Mayer and Porat, 2008; Solecki et al, 2004). Στο τέλος της 9^{ης} χιλιετίας π.Χ. ο αυτοφυής χαλκός σφυρηλατείται εν θερμώ, στην περιοχή Çayönü Teresi της ανατολικής Τουρκίας (Maddin et al, 1999). Ακολουθούν εκατοντάδες χρόνια εδραίωσης της χρήσης του χαλκού στη Μέση Ανατολή και ευρύτερα. Η επεξεργασία του γινόταν σε κανονικές συνθήκες ή σε φωτιά που δεν ξεπερνούσε τις λίγες εκατοντάδες °C (Radivojevic et al, 2010).

Η πρωιμότερη εκμετάλλευση αυτοφυούς χαλκού και άλλων οξειδίων του στον ευρωπαϊκό χώρο αναφέρεται σε περιοχές όπως το Lepenski Vir (Srejovic, 1972) και το Divostin στη Σερβία (Glumac, 1988) και το Durankulak στη Ρουμανία (Todorova, 1999) από την 6^η χιλ. π.Χ. Επίσης η ύπαρξη μεταλλείων στη Rudna Glava της Σερβίας από το τέλος της 6^{ης} χιλ. (Johanovic, 1991; Pernicka et al, 1993) και στο Ai Bunar της Βουλγαρίας από την αρχή της 5^{ης} χιλ. π.Χ. δείχνει την εδραίωση της χρήσης του μετάλλου στην ευρωπαϊκή ήπειρο.

Ως βασικό κέντρο έναρξης της μεταλλουργίας του χαλκού και γενικότερα της αρχαίας μεταλλουργίας, η Radivojevic (2010) θεωρεί την περιοχή του Belonode στην ανατολική Σερβία που ανήκει στον πολιτισμό της Vinca (τέλη της 6^{ης} και αρχές της 5^{ης} χιλ. π.Χ.). Αυτό στηρίζεται στις μεταλλουργικές σκωρίες που εντοπίζονται και στα χάλκινα τέχνηρα και γενικά στα υπολείμματα μίας εντυπωσιακής για την εποχή θέσης μεταλλουργίας του χαλκού.

Στις αρχές της 5^{ης} χιλιετίας π.Χ. χρονολογούνται και τα πρώτα χάλκινα αντικείμενα στους Σιταγρούς της Δράμας στη φάση II (Renfrew and Slater, 2003). Στο πρώτο μισό της 5^{ης} χιλιετίας π.Χ. χρονολογούνται ίχνη μεταλλουργίας χαλκού από την περιοχή του Προμαχώνα-Topolnica που συνδέεται με τη φάση Σιταγροί II (Koukouli-Chrysanthaki and Basiakos, 2002). Στη φάση II των Σιταγρών έχουν βρεθεί 4 χάλκινα αντικείμενα, ενώ στη φάση III 11 χάλκινα αντικείμενα, ένα χρυσό, μία σκωρία χαλκού και ένα πιθανό μέταλλευμα χαλκού (McGeehan and Liritzis, 1983). Από την Πρώιμη Εποχή του Χαλκού η μεταλλευτική και η

⁹ Θεόφραστος, Περί Λίθων 26 και 39

μεταλλουργία, ιδιαίτερα του χαλκού, ανθίζουν στο ελληνικό χώρο (Bassiakos and Philaniotou, 2007; Nerantzis and Papadopoulos, 2013; Nerantzis et al, 2016).

Στην αρχαία Ελλάδα κοιτάσματα χαλκού που έτυχαν υφίστανται στις Κυκλάδες, στη Μακεδονία, στη Θράκη, στη Χαλκιδική, στη Θάσο, στην Κρήτη, στην Όθρυ, στη Χαλκίδα (Healy, 1978; Βαβελίδης, 2009). Στο αρχαίο Λαύριο ευρήματα χαλκού καταγράφονται στο σπήλαιο του Κίτσου ήδη από το 4500 π.Χ. (Kakavogianni et al, 2004).

3.2.3 Κράματα Χαλκού στην αρχαιότητα

Ως κράμα ορίζεται το υλικό που αποτελείται από δύο ή περισσότερες χημικές ουσίες. Στα μεταλλικά κράματα συνήθως συμμετέχει ένα μέταλλο ως κύριο συστατικό και ένα ή περισσότερα άλλα μέταλλα ή αμέταλλα. Ο χαλκός ίσως περισσότερο από κάθε άλλο μέταλλο της αρχαιότητας είναι γνωστός από τα κράματά του, τα οποία με σειρά παλαιότητας είναι ο αρσενικούχος χαλκός, το κρατέρωμα (μπρούντζος) και ο ορείχαλκος.

Αρσενικούχος Χαλκός (Arsenic Copper)

Ο αρσενικούχος χαλκός αποτελεί ένα σημαντικό κράμα του χαλκού και κρίκο μετάβασης από τη μεταλλουργία του καθαρού χαλκού στο κράμα χαλκού-κασσίτερου (Charles, 1967). Αποτελείται από μεταλλικό Cu και ποσότητα As (συνήθως σε περιεκτικότητα 2,5-3,5 %) και παράγεται ευρέως την Πρώιμη και Μέση Εποχή του Χαλκού. Η παρουσία 8% As δίνει στο χαλκό ιδιαίτερη ευπλαστικότητα κατά τη θερμή ή ψυχρή σφυρηλάτηση χωρίς να υπάρχει περίπτωση θραύσης (Charles, 1967). Βασικό στοιχείο που προστίθεται στην εκκαμίνευση του αρσενικούχου χαλκού είναι οι σκωρίες spreiss, όπως αυτό αποδεικνύεται ήδη από την Πρώιμη Εποχή του Χαλκού στην περιοχή του Ιράν (Rehren et al, 2014). Η παραγωγή τους γινόταν από την εκκαμίνευση μεταλλευμάτων πλούσιων σε Fe και As. Η παραγωγή τοξικών αερίων κατά την εκκαμίνευση αρσενικούχων τηγμάτων (Tylecote, 1987) ήταν σαφώς ένας παράγοντας που επηρέαζε αρνητικά την υγεία των μεταλλουργών.

Κρατέρωμα (Bronze)

Το κρατέρωμα αποτελεί κράμα του χαλκού και του κασσίτερου, αν και ο όρος χρησιμοποιείται και για άλλα κράματα του χαλκού. Καλείται επίσης και μπρούντζος, ενώ πολλές φορές συγχέεται με τον ορείχαλκο. Η προσθήκη κασσιτέρου στο τήγμα χαλκού, οδηγεί στη δημιουργία σκληρότερου και ανθεκτικότερου κράματος (Riederer, 1987 από Βαβελίδης, 2009). Οι

περιεκτικότητες του μπρούντζου σε κασσίτερο είναι κατά μέσο όρο 10% (Βαβελίδης, 2009).

Το αρχαιότερο εύρημα κρατερώματος είναι μία σκωρία στην Ουγγαρία από την 5^η χιλιετία π.Χ. (Glumac and Todd, 1991), που πιθανότατα αποτελεί τυχαίο προϊόν. Τα πρώτα κρατερώματα εμφανίζονται την 4^η χιλιετία π.Χ. στα Susa (Cleuziou and Berthoud, 1982), με περιεκτικότητες σε κασσίτερο από 2,3 έως 8%. Στην Εγγύς Ανατολή το κρατέρωμα αποτελεί το 50% των κραμάτων που χρησιμοποιούνται από το 2000 π.Χ. (Eaton and McKerrell, 1976). Η μεγαλύτερη ποσότητα κασσίτερου προερχόταν κατά την υστερότερη αρχαιότητα από πηγές στα δυτικά (Σαρδηνία, Ιταλία, Ιβηρία, Βρετανία, Κορσική, Erzgebirge Τσεχοσλοβακίας), αφού οι πηγές του στην Αίγυπτο και το Αφγανιστάν ήταν περιορισμένες ή είχαν εξαντληθεί (Tylecote, 1987). Ωστόσο στις νότιες παρειές του όρους Ταύρος της Μ. Ασίας έχουν εντοπισθεί αξιόλογες πηγές κασσίτερου που έχουν αξιοποιηθεί ήδη από το τέλος της 4^{ης} π.Χ. χιλιετίας (Yener et al, 1989).

Ορείχαλκος (Brass)

Ο ορείχαλκος είναι κράμα χαλκού και ψευδαργύρου. Ανακαλύφθηκε από τους Ρωμαίους το 2^ο αιώνα π.Χ. και χρησιμοποιήθηκε κυρίως για την κατασκευή πολεμικών υλικών (Zhou, 2012). Ωστόσο τα παλαιότερα ευρήματα από ορείχαλκο που βρέθηκαν στην Εγγύς και Μέση Ανατολή χρονολογούνται από την Εποχή του Χαλκού μέχρι την Πρώιμη Εποχή του Σιδήρου και προέρχονται στο παραγόμενο μεταλλικό τήγμα τυχαία από την εκκαμίνευση μεταλλευμάτων πλούσιων σε ψευδάργυρο (Zhou, 2012).

3.3 Κασσίτερος

Ο κασσίτερος, αν και δεν χρησιμοποιήθηκε από τον άνθρωπο ως ξεχωριστό μέταλλο, εντούτοις αποτέλεσε το ένα από τα δύο συστατικά μέταλλα του κρατερώματος (bronze), του βασικού κράματος της Εποχής του Χαλκού. Βασική πηγή του στην αρχαιότητα ήταν το ορυκτό κασσιτερίτης (SnO_2), που εντοπίζεται σε προσχωματικά κοιτάσματα στις κοίτες ποταμών. Επίσης και ο στανίτης αναφέρεται ως πιθανή πηγή κασσίτερου στην αρχαιότητα (Treister, 1996).

Σύμφωνα με το Healy (1978) σημαντικά κοιτάσματα κασσιτερίτη στην Ελλάδα δεν υπάρχουν, αν και υπάρχουν αναφορές για την αρχαία Κίρρα (επίνειο Δελφών) και άλλες μικρές εμφανίσεις. Εκτός Ελλάδας, μικρής κλίμακας εμφανίσεις ορυκτών του κασσίτερου εντοπίζονται στις περιοχές του όρους Ζάγκρος στο Ιράν (Knauth, 1974), στη Συρία και στην Αίγυπτο. Ο Στράβων αναφέρει τις Κασσιτερίδες νήσους στη Βρετανία ως σημαντική πηγή κασσίτερου. Η απόληψή του γινόταν κυρίως σε προσχωματικές θέσεις (Tylecote, 1962).

3.4 Μόλυβδος-Άργυρος

3.4.1 Γενικά

Ο μόλυβδος και ο άργυρος, όσον αφορά στην αρχαία μεταλλευτική και μεταλλουργία, μελετώνται συνήθως μαζί, διότι το μεγαλύτερο ποσοστό του αρχαίου αργύρου προερχόταν από κοιτάσματα μολύβδου (Tylecote, 1962). Ο άργυρος συναντάται ως αυτοφυής σε μικρό ποσοστό. Στα ελληνικά ονομάζεται και ασημί από τον «άσημο άργυρο» της αρχαίας Αθήνας (άργυρος χωρίς σήμανση, που δεν έχει γίνει νόμισμα) (Κονοφάγος, 1980). Ο μόλυβδος έχει πολύ χαμηλό σημείο τήξης στους 327,5 °C. Το βασικό ορυκτό του μολύβδου είναι ο γαληνίτης (PbS).

3.4.2 Ο Μόλυβδος και ο Άργυρος στην αρχαιότητα

Τα πρώτα αντικείμενα από άργυρο χρονολογούνται μεταξύ της 4^{ης} και 3^{ης} χιλιετίας π.Χ. και εμφανίζονται στη Συρία και στην Τουρκία ταυτόχρονα με τα πρώτα τέχνηρα από μόλυβδο (Pernicka et al, 1998) μαζί με τα πρώτα ίχνη εκμετάλλευσης κοιτασμάτων Pb-Ag.

Ωστόσο, στον ελληνικό χώρο σε αρχαιολογικές ανασκαφές βρέθηκαν αντικείμενα από άργυρο, όπως κοσμήματα από το σπήλαιο του Ευριπίδη, στον όρμο Περιστέρια Σαλαμίνας (Δημακοπούλου, 1998), στο σπήλαιο Αλεπότρυπα στο Δυρό Λακωνίας (Ζάχος, 1996; Muhly, 2002) από τα μέσα της 5^{ης} χιλιετίας π.Χ. και στο σπήλαιο Αμνισού στο Ηράκλειο Κρήτης (Μαρινάτος, 1930) χωρίς όμως να γνωρίζουμε τις ακριβείς πηγές προέλευσης. Κεραμική της Τελικής Νεολιθικής περιόδου από τον «Άγιο Σώστη» και τον «Πλατύ Γιαλό» της Σίφνου (Pernicka et al, 1985) και το «Χερόμυλο» της Αντιπάρου μας δείχνουν ότι η μεταλλουργία του αργύρου ήταν ήδη γνωστή αυτήν την περίοδο.

Το πιο σημαντικό και μνημειώδες κέντρο εκμετάλλευσης και μεταλλουργίας του αργυρούχου μολύβδου στην αρχαιότητα θεωρείται το Λαύριο στην Αττική (Κονοφάγος, 1980; Τσάιμου, 1997; Κακαβογιάννης, 2005). Τα βασικά ορυκτά που εξορύσσονται προέρχονται από τη πρωτογενή θειούχα μεταλλοφορία, με κύριο ορυκτό το γαληνίτη (PbS) και από την οξειδωμένη θειούχα μεταλλοφορία με κύριο ορυκτό τον κερουσίτη (PbCO₃). Το μετάλλευμα καθαριζόταν και εκκαμινευόταν από όπου προέκυπτε μεταλλικός Pb πλούσιος σε Ag. Στη συνέχεια με τη διαδικασία της κυπέλλωσης παραγόταν ο Ag. Στην περιοχή των Μεσογείων κοντά στο Λαύριο ευρήματα λιθαργύρου αποδεικνύουν τη χρήση της κυπέλλωσης ήδη από την Τελική Νεολιθική (Κακανογιάννη, 2004). Στο Λαύριο ο άργυρος αποτελούσε το 80% της αξίας παραγωγής και ο μόλυβδος το 20% (Κονοφάγος, 1980). Το μεγαλύτερο μέρος του αργύρου γινόταν νομίσματα (Εικ. 3.4.2.1) και ο υπόλοιπος σκεύη και κοσμήματα. Ο μόλυβδος παραγόταν από το λιθάργυρο της κυπέλλωσης και προωθούνταν στο εμπόριο.



Εικόνα 3.4.2.1 Το ασημένιο αθηναϊκό τετράδραχμο. Στη μία όψη η Αθηνά και στην άλλη η αθηναϊκή γλαύκα. 5^{ος} αιώνας π.Χ. (Νομισματικό Μουσείο Αθηνών, Κονοφάγος, 1980).

Στη Βόρεια Ελλάδα η Θάσος, η Σκαπτή Ύλη και η ΒΑ Χαλκιδική κατέχουν εξέχουσα θέση στην εκμετάλλευση αργύρου-μολύβδου από την προϊστορική εποχή μέχρι και την Οθωμανική περίοδο (Vavelidis and Amstutz, 1983; Wagner et al, 1986; Βαβελίδης, 2009; Nerantzis, 2009a,b).

3.5 Σίδηρος

3.5.1 Γενικά

Τα αρχαιότερα αντικείμενα από μεταλλικό σίδηρο έχουν βρεθεί στην Ανατολία, στις περιοχές Tilmen Höyük και Alaca Höyük που χρονολογούνται την 3^η χιλιετία π.Χ. (Khakhutaishvili, 2009). Στις αρχές της 2^{ης} χιλιετίας π.Χ. σε Ασσυριακά κείμενα ο σίδηρος τιμάται ακριβότερα από τον άργυρο. Στον ελληνικό χώρο το πρώτο αντικείμενο από σίδηρο προέρχεται από το «Μαυροσπηλιό» της Κνωσού το 1800-1700 π.Χ. (Photos, 1987) και έχει πιθανότητα μετεωριτική προέλευση. Ο σίδηρος και η χρήση του σηματοδοτούν μία νέα Εποχή, αυτή του Σιδήρου που θα εκτοπίσει την παλαιότερη Εποχή του Χαλκού.

Αποκτά το προσωνύμιο, το «δημοκρατικό μέταλλο» και όχι άδικα (Knauth et al, 1974). Η πληθώρα των κοιτασμάτων σιδήρου και η ευκολία εύρεσής τους σε κάθε περιοχή της αρχαιότητας οδηγεί στην αντικατάσταση του χαλκού από το σίδηρο και στις έντονες κοινωνικές αλλαγές, μιας και η μεταλλευτική του και η μεταλλουργία του δεν είναι πλέον αποκλειστικό προνόμιο. Με αυτό το μέταλλο επίσης θα κατασκευαστούν τα όπλα που θα καθαιρέσουν τους τυράννους των ελληνικών πόλεων και θα εγκαθιδρύσουν το νέο πολίτευμα, τη δημοκρατία.

Τα κοιτάσματα σιδήρου έχουν ποικιλία σιδηρούχων ορυκτών, ευρύ γενετικό υπόβαθρο και είναι ευρέως διαδεδομένα στην επιφάνεια της γης (Tylecote, 1987). Στην αρχαιότητα τα βασικά απολήψιμα ορυκτά φαίνονται στον Πίνακα 3.5.2.1. Η ανάτηξη μεταλλουργικών σκωριών από παλαιότερες μεταλλουργικές φάσεις, αποτελεί μία επιπλέον βασική πηγή σιδήρου (Κουκούλη-Χρυσανθάκη, 1990).

3.5.2 Ο Σίδηρος στην αρχαιότητα

Οι αρχαιότερες εκμεταλλεύσεις σιδήρου στην Ελλάδα καταγράφονται πριν το 1000 π.Χ. στη Σύρο, στην Κύθνο, στην Κέα, στη Σέριφο, στη Σίφνο και στη Γυάρο (Healy, 1978). Οι πρώτες ενδείξεις μεταλλουργίας σιδήρου στην Ανατολική Μακεδονία εντοπίζεται στον οικισμό «Καστρί» στο Θεολόγο της Θάσου την Πρώιμη Εποχή του Σιδήρου (Παπαδόπουλος και Νεράντζης, 2012; Κουκούλη-Χρυσανθάκη, 1992). Στον ηπειρωτικό χώρο της αρχαίας Ελλάδας έχουμε εκμετάλλευση κοιτασμάτων σιδήρου πριν από τα μέσα του 6^{ου} αιώνα π.Χ. στη Βοιωτία, στη Λακωνία και στο Λαύριο (Healy, 1978).

Κατά την εκκαμίνευση δεν παράγεται σίδηρος ως τήγμα (~1500°C) μολονότι στην αρχαία κάμινο ήταν δυνατό να επιτευχθούν τόσο υψηλές θερμοκρασίες, αλλά το παργόμενο προϊόν θα ήταν χυτοσίδηρος (δηλ. θα περιείχε άνθρακα σε περιεκτικότητα ~4%) και ως εύθραυστο υλικό δεν ήταν δυνατό να σφυρηλατηθεί. Αυτό που λαμβάνεται είναι σταγονίδια στερεού σιδήρου σε σπογγώδες σύντηγμα, που σφυρηλατείται μετά την εκκαμίνευση από το σιδηρουργό εν θερμώ (Tylecote, 1987).

Πίνακας 3.5.2.1 Τα κυριότερα ορυκτά της μεταλλουργίας του σιδήρου
(στοιχεία από Tylecote, 1987; www.webmineral.com).

Τύπος Ορυκτού του Σιδήρου	Χημικός τύπος	Χρώμα	Περιεκτικότητα σε Fe
Αυτοφυής Σίδηρος	Fe	Τεφρόμαυρο	100%
Μαγνητίτης	Fe ₃ O ₄	Σιδηρόμαυρο	72%
Αιματίτης	Fe ₂ O ₃	Χαλυβδότεφρο	70%
Γκαιτίτης	FeO(OH)	Κίτρινο-Καστανό-Κόκκινο	63%
Λεπιδοκροκίτης	γ-FeO(OH)	Κίτρινο-Καστανό-Κόκκινο	63%
Σιδηρίτης	FeCO ₃	Κίτρινο-Καστανό-Κόκκινο	48%
Ιλμενίτης	FeTiO ₃	Καστανόμαυρο	37%

Μετεωριτικός Σίδηρος

Η πρώτη χρήση σιδήρου καταγράφεται σε θέσεις της Νεολιθικής Εποχής και πρόκειται για σίδηρο από πτώση σιδηρομετεωρίτη. Αυτό τεκμαίρεται από το υψηλό ποσοστό νικελίου (4-10%) που ανευρίσκεται στις χημικές αναλύσεις, καθώς και την ομοιόμορφη κατανομή του (Tylecote, 1962; 1987). Επίσης ισχυρές ενδείξεις είναι τα ιστολογικά χαρακτηριστικά και η υφή «Widmanstätten» των μετεωριτών, η οποία διατηρείται αν δεν σφυρηλατηθεί στους 1000°C (Tylecote, 1987).

Ο μαύρος σίδηρος, που θεωρούνταν από τους Χετταίους ως «το μέταλλο από τον ουρανό», προερχόταν από μετεωριτικό σίδηρο (Siegelova and Tsumoto, 2011). Αυτοί λοιπόν οι μετεωρίτες μετά την πτώση τους συλλέγονταν και αν δε γίνονταν αντικείμενο λατρείας, πιθανώς σφυρηλατούνταν για να γίνουν χρηστικά αντικείμενα. Βεβαία θα πρέπει να αποκλειστεί ο παραγόμενος σίδηρος από λατεριτικά κοιτάσματα (Κεντρική Ελλάδα, Πέλλα), διότι οι περιεκτικότητες σε Ni είναι περίπου ανάλογες με αυτές του μετεωριτικού σιδήρου (Tylecote, 1987). Επίσης, ακόμη και ο αυτοφυής σίδηρος είναι δυνατό να περιέχει σημαντικά ποσοστά Ni. Βέβαια σε ένα σύντηγμα μεταλλουργίας σιδήρου από σιδηρονικελιούχο μετάλλευμα ή από αυτοφυή σίδηρο η κατανομή Ni είναι ανομοιόμορφη και για αυτό η απόδοση τέτοιων πηγών είναι χαμηλή (Photos, 1989).

3.6 Άλλα βασικά μέταλλα της αρχαιότητας

Ανάμεσα στα βασικά μέταλλα της αρχαιότητας κατατάσσεται και ο υδράργυρος (Hg). Το βασικό ορυκτό από όπου εξάγεται στην αρχαιότητα είναι ο κινναβαρίτης (Healy, 1978) με χημικό τύπο HgS. Συναντάται το 1500 π.Χ. στη διακόσμηση τάφων στην Αίγυπτο, αλλά και ως ερυθρή χρωστική σε πρωτοκυκλαδικά ειδώλια. Από το 700 π.Χ. μέχρι και σήμερα εξάγεται αυτό το ορυκτό στην Ισπανία και συγκεκριμένα στο μεταλλείο Almaden (Healy, 1978). Στον ελληνικό χώρο, αν και εντοπίζονται εμφανίσεις του ορυκτού (Λαύριο-Καμάριζα), δεν υπάρχουν ενδείξεις εκμετάλλευσης. Οι ποσότητες κινναβαρίτη που έχουν βρεθεί στην αρχαία Αθήνα πιθανώς προέρχονται από τα μεταλλεία του Ικονίου (Healy, 1978).

Ο ψευδάργυρος (Zn) εντοπίζεται σε κοιτάσματα με αρχαία εκμετάλλευση, αλλά χωρίς να είναι αυτό το μέταλλο που εξαγόταν. Ο ψευδάργυρος ήταν σχετικά δύσκολο να εξαχθεί από το μετάλλευμα, διότι τήκεται στους 419,5°C και εξατμίζεται στους 907°C, οπότε στη μεταλλουργική κάμινο των 1000°C εξατμιζόταν ο παραγόμενος μεταλλικός ψευδάργυρος (Zhou, 2012). Μόνο από το 2^ο αιώνα π.Χ. θα χρησιμοποιηθεί από τους Ρωμαίους στην παραγωγή ορείχαλκου. Ο Στράβωνας¹⁰ περιγράφει την καύση μεταλλεύματος ψευδαργύρου, που όταν καίγεται είναι σαν σίδηρος και καμινεύεται είναι σαν ψεύτικος άργυρος (ψευδάργυρος). Στην αρχαία Κίνα ο ψευδάργυρος συναντάται στον πολιτισμό Yangshao (4700-4000 π.Χ.) σε τήγματα από εκκαμίνευση μεταλλεύματος πλούσιο σε αυτό το μέταλλο (Zhou, 2012).

Στην Ελλάδα ο ψευδάργυρος συναντάται στο αρχαίο Λαύριο, στη Θάσο και σε άλλες αρχαίες μεταλλευτικές περιοχές, αλλά χωρίς να έχει τύχει εκμετάλλευσης κατά την αρχαιότητα. Στη Θάσο ειδικά μόνο από τον 20^ο αιώνα

¹⁰ Στράβων, Γεωγραφικά, 13, I.56

και μετά θα πραγματοποιηθεί εκμετάλλευση των πλούσιων μεταλλευμάτων σε ψευδάργυρο (καλαμίνες) μέχρι και το 1929 (Βαβελίδης, 2009).

Το αρσενικό (As) χρησιμοποιείται στην αρχαιότητα, όχι ως ξεχωριστό μέταλλο, αλλά ως συστατικό του αρσеноπυρίτη, της ερυθράς και της κίτρινης σανδαράχης και του λολιγνίτη, το τελευταίο μάλιστα επειδή δεν περιέχει θείο στο μόριό του (ανεπιθύμητο από τους αρχαίους χαλκείς) εχρησιμοποιείτο για την κραμάτωση του χαλκού προς παραγωγή κράματος αρσενικούχου χαλκού κατά την 3^η π.Χ. χιλιετία (Dimopoulou-Rethemiotaki et al, 2007)

Το αντιμόνιο (Sb) επίσης ήταν γνωστό και συγκεκριμένα η εμπορία του ορυκτού αντιμονίτη (Sb_2S_3) από την Ανατολική Αφρική προς την Ινδία τον 1^ο αιώνα μ.Χ.¹¹. Σύμφωνα με τον Forbes (από Healy, 1978) στον ελληνικό χώρο εντοπίζονται κοιτάσματα στη Χίο και στη Μυτιλήνη, τα οποία μπορεί να έτυχαν εκμετάλλευσης στην αρχαιότητα.

3.7 Αρχαία μεταλλευτική δραστηριότητα

Η εντατική αναζήτηση των μετάλλων από τον άνθρωπο ξεκινά από την ανακάλυψη των πλεονεκτημάτων που έχουν σε σχέση με τα προηγούμενα υλικά που χρησιμοποιεί, όπως το ξύλο, τα οστά και ο λίθος,. Βέβαια αξίζει να αναφερθεί ότι τα πρώτα μεταλλικά αντικείμενα δεν υπερείχαν απαραίτητα των αντικειμένων από ξύλο, οστό, πυριτόλιθο ή κεραμικό, για αυτό και συνέχισαν να χρησιμοποιούνται από κοινού για χιλιάδες χρόνια παράλληλα με τα μέταλλα (Roberts et al, 2008).

Ο άνθρωπος αρχίζει να αναζητά και να χρησιμοποιεί τα μέταλλα προοδευτικά και κατά το μεταίχμιο Μεσολιθικής-Νεολιθικής εποχής θα παρατηρήσει ότι με τη θέρμανση πάνω από 1000°C μπορούν να αλλάξουν μορφή και να τη διατηρήσουν όταν ψυχθούν. Έτσι εισάγεται η χύτευση το 5000 π.Χ. και χίλια χρόνια αργότερα η εκκαμίνευση (Radivojevic et al, 2010). Η αναζήτηση και ο εντοπισμός των μετάλλων λοιπόν αποτελεί το πρώτο στάδιο της μεταλλευτικής δραστηριότητας.

3.7.1 Απόληψη προσχωματικών αποθέσεων

Τα προσχωματικά κοιτάσματα συναντώνται σε παλαιοκοίτες ή κοίτες χειμάρρων και ποταμών, όπου τα επιθυμητά ορυκτά λόγω του μεγάλου ειδικού βάρους και της ανθεκτικότητας στην αποσάθρωση αποτίθενται στα κλαστικά ιζήματα των ποταμών ή των χειμάρρων. Οι Young and Craw (1999) ταξινομούν τα προσχωματικά κοιτάσματα χρυσού στα αρχικά προσχωματικά που βρίσκονται

¹¹ Διονύσιος Περιηγητής, Περιήγηση της Οικουμένης.

κοντά σε πρωτογενή κοιτάσματα χρυσού (<10-20 km) και στα προσχωματικά κοιτάσματα αξονικών ποταμών που δημιουργούνται στις κοίτες κύριων κλάδων ποταμών που κυριαρχούνται από κροκάλες.

Τα πρώτα κοιτάσματα χρυσού που εκμεταλλεύτηκε ο άνθρωπος ήταν σε αυτοφυή μορφή από τα ιζήματα των ποταμών (Βαβελίδης, 2007; 2009). Η βασική μέθοδος απόληψης χρυσού που εφαρμόστηκε στην αρχαιότητα βασίζεται σε απλό βαρυτομετρικό διαχωρισμό μέσα σε νερό. Ο χρυσός ως βαρύτερο ορυκτό καθιζάνει και εγκλωβίζεται στο βάθος ή σε μικροεμπόδια ενός ξύλινου ρείθρου από όπου και συλλέγεται. Το ξύλινο ρείθρο όπου κυλούσε νερό γέμιζε με υλικό από το ποτάμι ή από παλαιοκοίτη και στα μικροεμπόδια του ρείθρου συγκρατούνταν οι κόκκοι του χρυσού. Αυτή η μέθοδος έκπλυσης είναι γνωστή ως μέθοδος του «σκαφιδίου» (Βαβελίδης, 2007). Ο Agricola υποστηρίζει ότι ο σωστός μεταλλευτής πρέπει πρώτα να πλύνει τις άμμους των πηγών που είναι κοντά στη μεταλλοφορία, μετά τις άμμους των χειμάρρων στα κατάντη τους και έπειτα τις αποθέσεις ενός μεγαλύτερου εγγύς ποταμού (Hoover and Hoover, 1950).

Επίσης, με τη μέθοδο των «δεράτων» ο χρυσός εγκλωβίζεται καθώς κινείται στο ποτάμι μέσα στις τρίχες ζωικών δερμάτων, τα οποία στη συνέχεια είτε τινάζονται για να πέσει ο χρυσός είτε καίγονται για να συλλεχθούν οι συγκολλημένοι σβόλοι χρυσού στις στάχτες των δεράτων. Από αυτή τη μέθοδο προκύπτει και ο μύθος του χρυσόμαλλου δέρατος¹².

Μετά την απόληψη του προσχωματικού χρυσού ακολουθούσε ο εξευγενισμός του, διότι ως φυσικό κράμα περιείχε κυρίως άργυρο και χαλκό. Το φυσικό μίγμα χρυσού και αργύρου ονομάζεται ήλεκτρον, όταν η περιεκτικότητα σε άργυρο υπερβαίνει το 25% (Βαβελίδης, 2009). Αντίστοιχα ονομάζεται χαλκούχος χρυσός (auricupride), όταν η περιεκτικότητά του σε χαλκό υπερβαίνει το 25% (Βαβελίδης, 2009).

Σε άμμους ποταμών εμφανίζεται και ο προσχωματικός κασσίτερος όπου υπάρχουν ενδείξεις εκμετάλλευσης. Ο Agricola αναφέρει ότι οι άμμοι των ποταμών ξεπλένονται προκειμένου να συλλεχθούν οι «μαύρες πέτρες», δηλαδή ο κασσιτερίτης (Hoover and Hoover, 1950). Επιπρόσθετα, είναι δυνατό σε αυτές τις άμμους να συλλέγονται και πολύτιμοι λίθοι. Επίσης, σε άμμους, συνήθως παράκτιες, συγκεντρώνονται ορυκτά του σιδήρου, όπως μαγνητίτης, που αποτελούν την πρώτη ύλη για την παραγωγή σιδήρου. Τέτοιες περιπτώσεις καταγράφονται στη Θάσο (Tylecote, 1987).

Τέλος υπάρχουν περιπτώσεις κατά τους ρωμαϊκούς χρόνους, όπου ολόκληρα ποτάμια εκτρέπονται προς παλαιότερες προσχώσεις ή περιοχές με φλέβες χρυσού προκειμένου να αποπλυθεί το επιφανειακό στρώμα και να συλλεχθεί ο βαρύτερος χρυσός (Lewis and Jones, 1970). Ο Tylecote (1987)

¹² Στράβων, Γεωγραφικά, XI, 2.19

υποστηρίζει ότι η έκπλυση στα ποτάμια και στις προσχώσεις αποτελούσε την κύρια μέθοδο απόληψης χρυσού μέχρι και τους ρωμαϊκούς χρόνους. Εντούτοις αναφέρεται και από περιηγητές του 18ου και 19ου αιώνα στη Βόρεια Ελλάδα στους ποταμούς Αλιάκμονα και Έβρο.

3.7.2 Μέθοδοι εξόρυξης

Τα πρώτα βήματα της μεταλλευτικής πιθανώς χαρακτηρίζονται από τη συλλογή των αυτοφυών μετάλλων από προσχωματικές αποθέσεις (Knauth et al, 1974). Ο άνθρωπος όμως αναζητώντας την πηγή αυτών των χρήσιμων μετάλλων και πιθανότατα ακολουθώντας προς τα ανάντη τα προσχωματικά κοιτάσματα ανακάλυπτε θέσεις επιφανειακής μεταλλοφορίας. Οι θέσεις αυτές περιείχαν μεταλλοφόρες φλέβες (τεκτονικές ή στρωματογραφικές ασυνέχειες), διασπορές μεταλλεύματος σε μία εκτεταμένη μάζα πετρώματος ή φακούς μεταλλοφορίας. Μετά τον εντοπισμό της μεταλλοφορίας ξεκινά η διαδικασία απόσπασής της από τα πετρώματα ξενιστές, δηλαδή η εξόρυξη. Είναι φυσικό και επόμενο οι πρώτες προσπάθειες να προσανατολίστηκαν στην εξόρυξη του επιφανειακού μεταλλεύματος. Η εξάντλησή του οδήγησε στην έναρξη της υπόγειας εκμετάλλευσης. Βέβαια οι προϊστορικοί πληθυσμοί ήταν ήδη εξοικειωμένοι με τις τεχνικές εξόρυξης, κυρίως επιφανειακής, στις θέσεις με χρήσιμες χρωστικές ουσίες, όπως η ώχρα και σε περιοχές εντοπισμού πρώτης ύλης για τα λίθινα εργαλεία (πυριτόλιθοι).

Η αναγνώριση ιχνών εκμετάλλευσης αποτελεί δύσκολη ερευνητική διαδικασία. Όσο παλαιότερα είναι τα ίχνη, τόσο δυσκολότερα αναγνωρίζονται εξαιτίας της αποσάθρωσης (ειδικά στις επιφανειακές εκμεταλλεύσεις). Στον Πίνακα 3.7.2.1 δίνονται οι πιο βασικές ενδείξεις για την ύπαρξη μεταλλευτικής δραστηριότητας σε μία περιοχή σύμφωνα με τον Craddock (1995).

Επίσης δύσκολος είναι ο εντοπισμός του επιθυμητού μετάλλου της αρχαίας εκμετάλλευσης μόνο από τη μελέτη της μεταλλευτικής περιοχής. Ιδιαίτερα δύσκολος είναι και ο υπολογισμός της περιεκτικότητας του επιθυμητού μετάλλου στο εξορυσσόμενο υλικό. Η διαχρονικότητα της εκμετάλλευσης αποτελεί μία παράμετρο βασική για τη μελέτη των τεχνικών εξόρυξης. Συνήθως κάθε νεότερη εκμετάλλευση σβήνει σε μεγάλο βαθμό τα ίχνη της παλαιότερης.

Πίνακας 3.7.2.1 Βασικοί δείκτες μεταλλευτικής (τροποποιημένο από Craddock, 1995).

Μεταλλευτική Τεχνική	Αποδείξεις	Χρονολογικό εύρος	Παραδείγματα
Κρούσεις με λίθινα σφυριά	Εύρεση λίθινων εργαλείων στα μεταλλεία. Διάχυτα ίχνη κρούσεων στα τοιχώματα του μεταλλείου	Χαλκολιθική Εποχή – Τέλος Εποχής Χαλκού	Rudna Glava, Σερβία (Johanovic, 1980) Timna, Ισραήλ (Conrad and Rothenberg, 1980)
Χρήση φωτιάς	Λεία τοιχώματα με συνεχείς και καμπυλωτές επιφάνειες, συχνά επικαλυμμένες με αιθάλη, στάχτη, κάρβουνο και καμένο πέτρωμα	Χαλκολιθική Εποχή μέχρι Σύγχρονη Εποχή	Mt Gabriel, Ιρλανδία (O'Brien, 1980) Zawar, Ινδία (Willies, 1987)
Μεταλλικά εργαλεία	Μακριές λεπτές εκβαθύνσεις. Συχνά παράλληλες. Σφηνοειδή ίχνη κασμά	Υστερη Εποχή Χαλκού μέχρι πρόσφατες εποχές	Timna, Ισραήλ (Conrad and Rothenberg, 1980) Rio Tinto
Ανατινάξεις	Υπολείμματα οπών διάτρησης για την τοποθέτηση των εκρηκτικών. Έντονα κατακερματισμένα τοιχώματα	Τέλη 17 ^{ου} αιώνα μέχρι σήμερα	Σύγχρονα Μεταλλεία

3.7.2.a Επιφανειακή Εξόρυξη

Η επιφανειακή εξόρυξη περιλαμβάνει την απόσπαση του μεταλλεύματος από το εδαφικό κάλυμμα, μέχρι βάθους μερικών μέτρων. Ειδικά οι παλαιότερες εξορύξεις χαρακτηρίζονται από το μικρό βάθος τους (<10 m), όπου διακόπτονται από ρήγματα ή παρουσία νερού, προβλήματα αστάθειας ή από προβλήματα εξαερισμού (Craddock, 1995). Με την επιφανειακή εξόρυξη πραγματοποιούνταν εκμετάλλευση των πρωτογενών ή εξαλλοιωμένων πρωτογενών κοιτασμάτων. Υπάρχει μάλιστα μία αντιπροσωπευτική εικόνα αρχαίας επιφανειακής εξόρυξης σε πλακίδιο του 5^{ου} αι. π.Χ. που βρέθηκε στο Πεντασκούφι Κορίνθου (Εικ. 3.7.2.a.1).

Στην ανατολική Αίγυπτο κατά την περίοδο των προδυναστικών χρόνων (περίπου 3500 π.Χ.) αποδεικνύεται εξόρυξη χρυσού από χαλαζιακές φλέβες στη μάζα των γρανοδιοριτικών περιθωρίων Νεοπροτεροζωικών γρανιτών (Klemm, 2001). Στις χαλαζιακές φλέβες παρατηρείται η παρουσία δευτερογενών ορυκτών του χαλκού, κυρίως μαλαχίτη. Το μετάλλευμα εξορυσσόταν με κρούσεις του πετρώματος με μεγάλους κρουστήρες δημιουργώντας χαρακτηριστικές ομαλές

πλευρές στο σημείο της εξόρυξης. Οι κρουστήρες που έχουν βρεθεί ζύγιζαν 6-10 kg και πιθανότατα συγκρατούνταν με τα δύο χέρια. Η εκμετάλλευση αν και ξεκινούσε επιφανειακά, σταδιακά οδηγούνταν στην υπόγεια προσπέλαση (Εικ. 3.7.2.a.2).



Εικόνα 3.7.2.a.1 Εικόνα από επιφανειακή εξόρυξη της αρχαιότητας. Πλακίδιο του 5^{ου} αιώνα π.Χ. (Μουσείο Βερολίνου από Κονοφάγο, 1980).



Εικόνα 3.7.2.a.2 Όρυγμα των πρώιμων δυναστικών χρόνων στην περιοχή Abu Mureiwa, Ανατολική Αίγυπτος (Klemm, 2001).

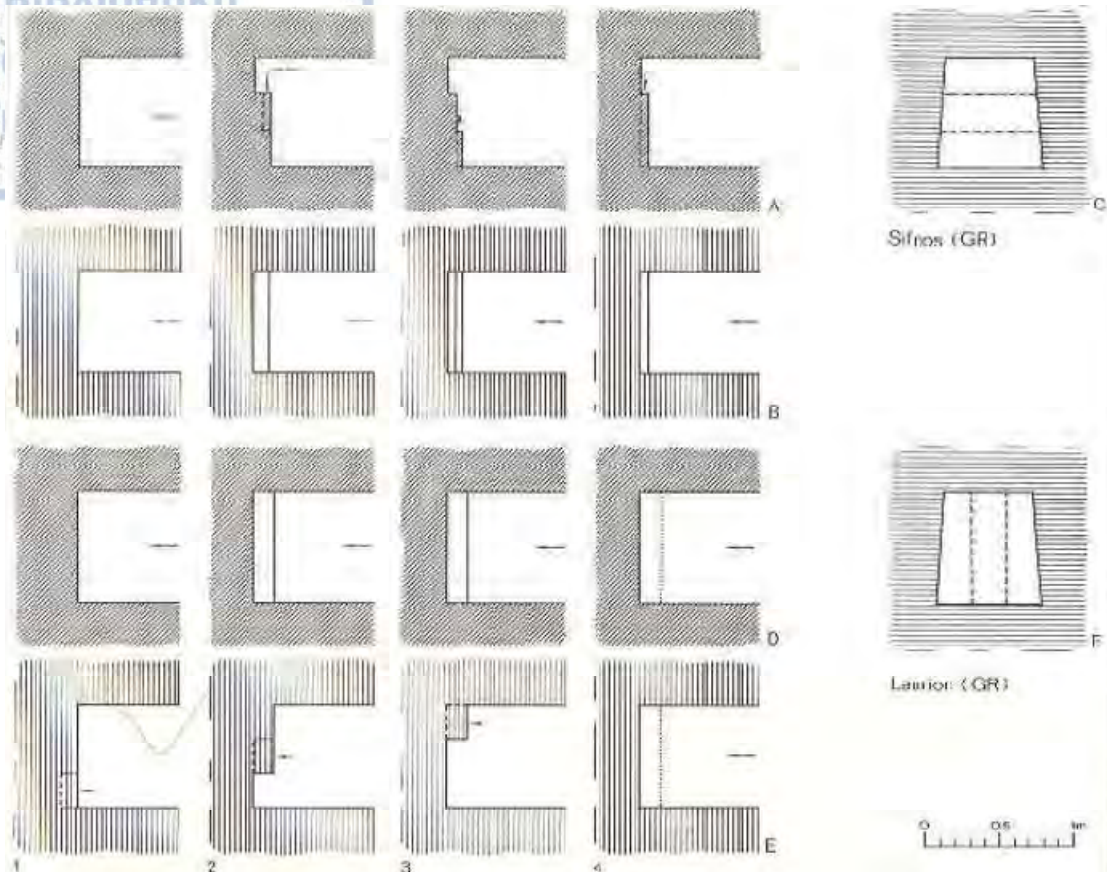
3.7.2.b Υπόγεια Εξόρυξη

Η εξάντληση του επιφανειακού τμήματος ενός μεταλλοφόρου σώματος οδηγούσε στην έναρξη διεργασιών για την υπόγεια εξόρυξή του. Η εξόρυξη θα συνεχιζόταν κατά τη διεύθυνση της μεταλλοφορίας, με την κατασκευή στοών και φρεάτων.

Η υπόγεια εκμετάλλευση οδηγούνταν από τη διεύθυνση της μεταλλοφορίας κατά μήκος των ασυνεχειών. Σε περιοχές ιδιαίτερα μεγάλου εμποτισμού με μέταλλευμα διανοίγονταν μεγάλοι θάλαμοι. Η διάνοιξη γινόταν είτε κατά το οριζόντιο επίπεδο είτε κατακόρυφα. Οι οριζόντιες στοές ακολουθούσαν το μέταλλευμα πολλές φορές για εκατοντάδες μέτρα, όπως καταγράφεται στις στοές του Λαυρίου (Κονοφάγος, 1980). Πολλές φορές είχαν μικρή ή μεγάλη κλίση ανάλογα με την κλίση της μεταλλοφορίας. Η διατομή εξαρτάται από την εποχή, αλλά και από τον τρόπο της εκμετάλλευσης (Κονοφάγος, 1980; Wagner, and Weisgerber, 1985; Βαβελίδης, 2009). Στο αρχαίο Λαύριο οι στοές είχαν ύψος 60-100 cm και πλάτος 60-90 cm, με ορθογώνιο σχήμα και ύψος μεγαλύτερο του πλάτους ή και τραπέζιο (Κονοφάγος, 1980). Ο μεταλλωρύχος δούλευε γονατιστός ή μισοξαπλωμένος.

Υπολογίζεται ότι σε μία ώρα για το πέτρωμα του Λαυρίου (μάρμαρο-σχιστόλιθος) ο εργάτης αφαιρούσε 8.000 cm^3 πετρώματος, δηλαδή $5,76 \text{ m}^3$ το μήνα (Κονοφάγος, 1980). Άρα με την παραδοχή ότι σε κάθε μέτωπο οι εργάτες είχαν άμεσο αντικαταστάτη, για μέση διατομή $0,6 \text{ m}^2$ η ταχύτητα εξόρυξης υπολογίζεται περίπου σε 10 m προσπέλασης το μήνα, που είναι αξιόλογη για την αρχαία περίοδο. Το μικρό μέγεθος των στοών συντελούσε στη μεγάλη ταχύτητα προώθησης της εκμετάλλευσης, αλλά και στην αποφυγή χρήσης υποστυλωμάτων. Από τη στιγμή που το μέταλλευμα καταλάμβανε μεγάλο χώρο οι στοές διευρύνονταν. Αυτή η διεύρυνση έθετε σε κίνδυνο τη στατικότητα του θαλάμου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνταν τα υποστυλώματα, οι μεσοκρινείς κίονες. Τα υποστυλώματα μπορεί να ήταν το ίδιο το μέταλλευμα ανεξόρυκτο, ξερολιθιές από υλικό στείρο της εκμετάλλευσης και σπανιότερα ξύλα. Τα ξύλινα υποστυλώματα ήταν οικονομικά ασύμφορα και για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν κυρίως από το Μεσαίωνα και μετά (Τσάιμου, 1997).

Για τη διάνοιξη μιας στοάς σε μάρμαρο διανοιγόταν αρχικά μία αύλακα βάθους 5 cm και πλάτους 4 cm. Η αύλακα αυτή ήταν είτε οριζόντια είτε κατακόρυφη (Εικ. 3.7.2.b.1) (Wagner and Weisgerber, 1985). Στη συνέχεια ο εργάτης χτυπούσε από πάνω προς τα κάτω ή από αριστερά προς τα δεξιά με το σφυρί και το καλέμι κοντά στο χείλος της αύλακας με σκοπό τη διαπλάτυνσή της (Κονοφάγος, 1980). Έτσι κλιμακωτά και προοδευτικά προχωρούσε η εκμετάλλευση (Εικ. 3.7.2.b.2).



Εικόνα 3.7.2.b.1 Οι δύο διαφορετικοί τρόποι κατά την οριζόντια προσπέλαση υπόγειας εξόρυξης. A-C διάνοιξη οριζοντίων αυλάκων όπως παρατηρείται σε αρχαίες στοές της Σίφνου και D-E διάνοιξη κατακόρυφων αυλάκων που παρατηρείται στο Λαύριο (Wagner and Weisgerber, 1985).



Εικόνα 3.7.2.b.2 Δημιουργία οριζοντίων αυλάκων κατά την οριζόντια προσπέλαση από αρχαία στοά στη Θάσο (Wagner and Weisgerber, 1988).

Ο Διόδωρος ο Σικελιώτης¹³ τον 1^ο αιώνα π.Χ. παραθέτει αναλυτικά την περιγραφή του Αγαθαρχίδη του Κνίδιου για τη διαδικασία εξόρυξης χρυσού στα σύνορα Αιγύπτου, Αιθιοπίας και Αραβίας. Οι μεταλλωρύχοι είναι κυρίως αιχμάλωτοι πολέμου και καταδικασμένοι για εγκλήματα μαζί με τις οικογένειές τους. Στο εσωτερικό των μεταλλείων δουλεύουν κυρίως παιδιά και άνδρες μέχρι 30 χρονών. Ανάβουν φωτιές για το θρυμματισμό των μαρμάρων που περιέχουν χρυσοφόρες φλέβες. Η εκμετάλλευση ακολουθούσε τη μεταλλοφόρο φλέβα. Οι μεταλλωρύχοι δουλεύουν ακατάπαυστα μέρα και νύχτα, αλυσοδεμένοι και φρουρούμενοι από άνδρες που δεν μιλούν την ίδια γλώσσα με αυτούς για να μη διαβάλλονται και υπάρξει πιθανότητα απόδρασης.

Ο Πλίνιος¹⁴ αναφέρει ότι για τη διάνοιξη των στοών χρησιμοποιούνταν φωτιές για να θερμανθεί το πέτρωμα και ξύδι που ριχνόταν για να διαρραγεί από την απότομη ψύξη. Το μειονέκτημά της ήταν ότι οι στοές γέμιζαν αποπνικτικά με επικίνδυνα αέρια. Οι συνθήκες ήταν δύσκολες και επικίνδυνες για τους εργαζόμενους στο εσωτερικό τους, που πολλές φορές δεν έβλεπαν το φως της ημέρας για μήνες. Η χρήση φωτιάς και νερού ή ξιδιού για την εκμετάλλευση σε σκληρό βράχο επιβεβαιώνεται μέχρι και το 16^ο αιώνα από τον Agricola (Hoover and Hoover, 1950).

Εκτός όμως από τις οριζόντιες, υπήρχαν και οι κατακόρυφες στοές ή φρέατα. Οι κατακόρυφες στοές εκμετάλλευσης κατά τον Κονοφάγο (1980) είχαν τρεις βασικούς σκοπούς για τους Έλληνες και τους Ρωμαίους:

- Τον αερισμό των γαλαριών (φρέατα αερισμού)
- Για τον εντοπισμό του μεταλλεύματος και την περιχάραξή του (ερευνητικά φρέατα)
- Για τη μεταφορά του μεταλλεύματος στην επιφάνεια (εξαγωγικά φρέατα).

Στο αρχαίο Λαύριο το βάθος των φρεάτων ποικίλει και φθάνει μέχρι και 119 m. Η μέση διατομή τους είχε εμβαδό 2 m², έτσι ώστε να επιτρέπει τουλάχιστον σε τρεις εργάτες να δουλεύουν συγχρόνως κατά τη διάνοιξή τους. Καταγράφεται επίσης και η περίπτωση των δίδυμων φρεάτων, χωρίς να είναι μέχρι σήμερα ξεκάθαρη η ακριβή τους χρήση.

3.7.3 Εργαλεία και μεταφορές

Ένα σημαντικό στοιχείο της εξόρυξης των μεταλλευμάτων είναι τα εργαλεία που χρησιμοποιούνταν.

¹³ Διόδωρος Σικελιώτης, *Ιστορική Βιβλιοθήκη*, III, 12-14.

¹⁴ Πλίνιος, *Φυσική Ιστορία*, 33.21

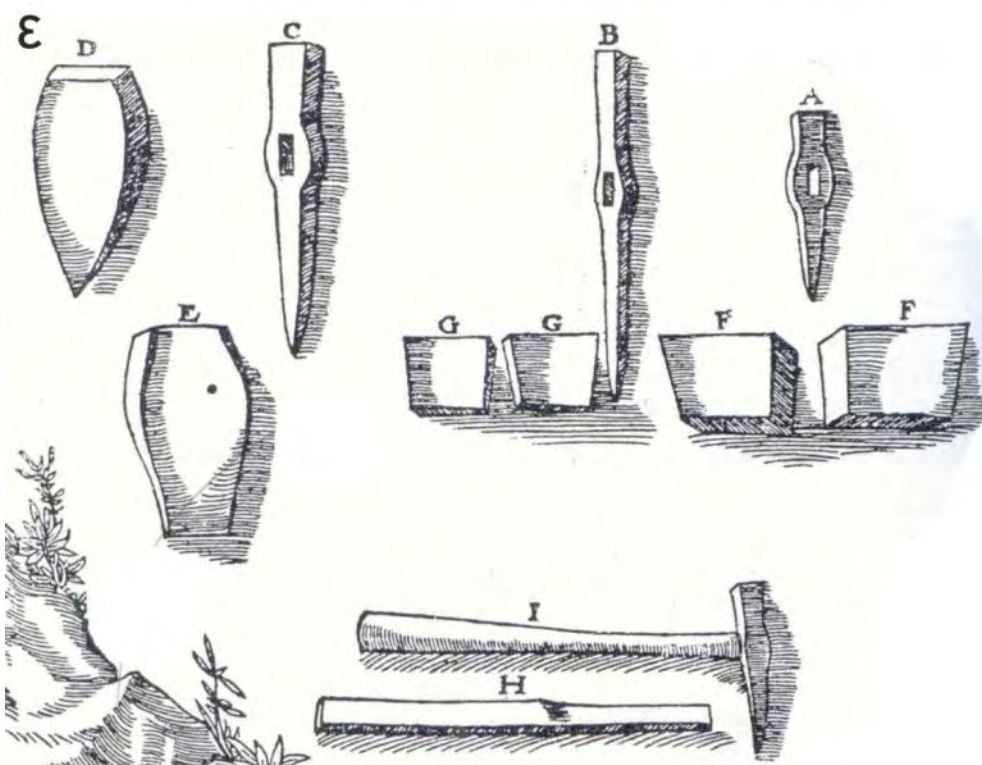
Τα πρώτα εξορυκτικά εργαλεία ήταν φυσικά υλικά από πέτρα, ξύλο και οστά. Οστρίνα και λίθινα εργαλεία εξόρυξης που χρονολογούνται το 18.300 π.Χ. έχουν βρεθεί στα ορυχεία ώχρας της Αν. Παλαιολιθικής εποχής στην περιοχή Τζίνες Θάσου (Koukouli-Chrysanthaki et al, 1988; Koukouli-Chrysanthaki and Weisgerber, 1993; 1999).

Στη Σίφνο έχουν βρεθεί μεγάλες λατύπες σε αρχαίες στοές (Εικ. 3.7.3.1), που πιθανότατα χρησιμοποιήθηκαν ως εξορυκτικά εργαλεία (Wagner and Weisgerber, 1985). Επίσης, γινόταν μία πρώτη επεξεργασία του μεταλλεύματος στο εσωτερικό του μεταλλείου με μικρότερους κοπάνους και μεγαλύτερους άκμωνες (Εικ. 3.7.3.1) (Wagner and Weisgerber, 1985).



Εικόνα 3.7.3.1 Αριστερά: Λατύπα με ίχνη χρήσης από αρχαίο μεταλλείο της Σίφνου της 3ης χιλιετίας π.Χ. Δεξιά: Λατύπα και άκμωνας για το λιάνισμα του μεταλλεύματος (Wagner and Weisgerber, 1985).

Στο αρχαίο Λαύριο όπου έχουμε σημαντικά ευρήματα εργαλείων, διαπιστώνουμε ότι τα βασικότερα ήταν το σφυρί (τύκος) και το βελόνι ή καλέμι (ξοῖς) και ήταν σιδερένια (Κονοφάγος, 1980). Το σφυρί του ορύκτη ήταν συνήθως από τη μία μεριά μυτερό και από την άλλη επίπεδο (Εικ. 3.7.3.2α-β). Όταν οι ορύκτες έφθαναν στο μαλακό μέταλλευμα, χρησιμοποιούσαν τον «κασμά», όπως φαίνεται και στην πλάκα του Πεντασκούφι (Εικ. 3.7.2.a.1) Για την μετακίνηση σωρών μεταλλεύματος ή για την όρυξη μαλακού μεταλλεύματος χρησιμοποιούνταν η «τσάπα» (Εικ. 3.7.3γ) με μέγεθος μικρότερο από ότι η σημερινή (Κονοφάγος, 1980). Επίσης γινόταν χρήση ξύλινων φτυαριών (Εικ. 3.7.3.δ), αλλά και σιδερένιων σφηνών και πλακετών (Εικ. 3.7.3.2ε).



Εικόνα 3.7.3.2 α) Ρωμαϊκά μεταλλευτικά σφυριά, καλέμια και τσάπα (barryyeoman.com/2010/09/the-mines-that-built-empires/ φωτογρ. Aquilino Delgado). β) Σφυριά από το αρχαίο Λαύριο (Κονοφάγος, 1980). γ) Τσάπα από το αρχαίο Λαύριο (Κονοφάγος, 1980). δ) Φτυάρι από το αρχαίο Λαύριο (Κονοφάγος, 1980). ε) Α-Δ: μεταλλευτικά σφυριά, Ε: σφήνα, Γ:σιδερένια τεμάχη, F: σιδερένια πλακέτα, Ι-Η: στειλιάρια (Agricola, Hoover and Hoover, 1950).

Βασικό μειονέκτημα της υπόγειας εκμετάλλευσης ήταν η δυσκολία μεταφοράς του μεταλλεύματος στην επιφάνεια. Αυτή γινόταν, όπως αναφέρει και ο Πλίνιος¹⁵ σε κοφίνια και από εργάτη σε εργάτη. Μονάχα ο τελευταίος έβλεπε το φως της ημέρας. Ελάχιστα στοιχεία διαθέτουμε για την ανέλκυσή του από τα φρέατα. Στη Σίφνο άνοιγμα παραστάτη στην είσοδο αρχαίου μεταλλείου αποτελεί πιθανή απόδειξη ύπαρξης τροχαλίας (Wagner and Weisgerber, 1985). Ανάμεσα στα σημαντικά αρχαιολογικά ευρήματα στα πλούσια σε χαλκό μεταλλεία της Chuquicamata των αρχαίων Incas, εντοπίστηκε ένας μουμιοποιημένος μεταλλευτής με εργαλεία και καλάθια μεταφοράς που περιείχαν το εξορυγμένο μέταλλευμα (Εικ. 3.7.3.3). Μας δίνει μία αντιπροσωπευτική εικόνα του μεταλλευτή, όχι μόνο για την περιοχή της Νότιας Αμερικής, αλλά και του Παλαιού Κόσμου. Η ηλικία του προσδιορίστηκε στα 1400±40 μ.Χ, ενώ το υλικό από τα εργαλεία δείχνει ένα ευρύ χρονολογικό φάσμα από το 840 μ.Χ. έως το 1650 μ.Χ. (Craddock et al, 2003).



Εικόνα 3.7.3.3 Αριστερά: Μεταλλευτής χαλκού που έχει μουμιοποιηθεί από τη Chuquicamata Χιλής. Δίπλα του καλάθια με μέταλλευμα και μεταλλευτικά εργαλεία (Bird, 1979). Δεξιά: Μεταλλευτικά σφυριά από ξύλο και πέτρα (γρανοδιορίτη) από τη Chuquicamata Χιλής (Craddock et al, 2003).

Για τη μεταφορά του μεταλλεύματος από το μεταλλείο προς τη θέση μεταλλουργίας δεν έχουμε πολλά στοιχεία. Από ιστορικές πηγές του 14^{ου} αιώνα αυτή γινόταν μέσα σε σάκους από δέρμα χοίρου (Mongiatti et al, 2009).

3.7.4 Φωτισμός και αερισμός στην υπόγεια εκμετάλλευση

Τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα της υπόγειας εκμετάλλευσης πέραν της δυσκολίας μεταφοράς του εξορυχθέντος υλικού, ήταν η έλλειψη φωτός και ο κακός αερισμός. Αρχικά στις υπόγειες εξορύξεις χρησιμοποιήθηκαν οι δάδες, ενώ προοδευτικά αντικαταστάθηκαν από τα λυχνάρια λαδιού (Εικ. 3.7.4.1). Ο φωτισμός πρέπει να ήταν προσωπικός. Στις προϊστορικές στοές της Σίφνου έχουν

¹⁵ Πλίνιος, *Φυσική Ιστορία*, 33.21.

βρεθεί πολυάριθμα ίχνη ξυλάνθρακα από τις δάδες που χρησιμοποιούνταν (Wagner and Weisgerber, 1985).

Οι ορύκτες πολλές φορές τοποθετούσαν τα λυχνάρια σε ειδικά για αυτό κατασκευασμένες εσοχές (λυχνοστάτες). Εκτός, από τα κοιλώματα, πολλές φορές κατασκεύαζαν θέσεις τοποθέτησης λύχνων από πηλό (Βαβελίδης, 2007). Ο Διόδωρος ο Σικελιώτης ¹⁶ αναφέρει ότι στην αρχαία Αίγυπτο οι λύχνοι προσαρμόζονταν στο μέτωπο του κάθε ορύκτη.



Εικόνα 3.7.4.1 Λύχνος ορύκτη από το αρχαίο Λαύριο (Κονοφάγος, 1980).

Ο αέρας στις αντίξοες συνθήκες της υπόγειας εκμετάλλευσης ήταν ιδιαίτερα υποβαθμισμένος. Τα υψηλά ποσοστά CO₂, CO, Pb και Rn επιδείνωναν την κατάσταση των εργατών. Από τις κρούσεις των μεταλλικών εργαλείων με τα σουλφίδια, τα αρσενίδια ή άλλα επικίνδυνα στοιχεία για τον άνθρωπο δημιουργούνταν αποπνικτική ατμόσφαιρα στο εσωτερικό των μεταλλείων.

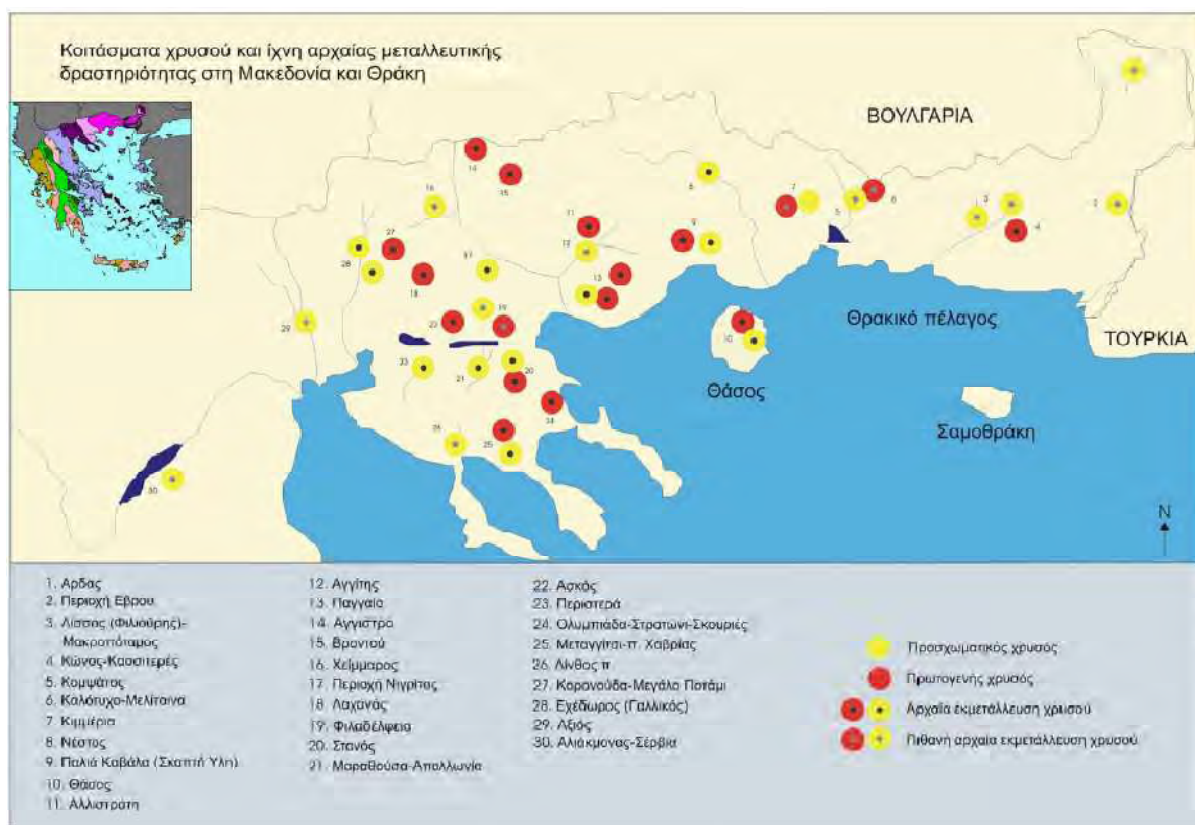
Βασική αντιμετώπιση του κακού αερισμού στα μεταλλεία ήταν η δημιουργία κατακόρυφων φρεάτων (Κονοφάγος, 1980). Επιπλέον η δημιουργία ικανού ρεύματος για την ανανέωση του αέρα προκαλούνταν και από φωτιές στο εσωτερικό των υπόγειων μεταλλείων. Αυτό συνδεόταν με την κατασκευή διδύμων φρεάτων, ειδικά στο αρχαίο Λαύριο όπου η φωτιά στον πυθμένα του δευτερευόντος φρεάτος δημιουργούσε ρεύμα αέρος (Κονοφάγος, 1980).

¹⁶ Διόδωρος Σικελιώτης, Ιστορική Βιβλιοθήκη, III, 12.

3.7.5 Μεταλλευτικά κέντρα της αρχαιότητας

Πριν γίνει εκτενής αναφορά στην ιστορία της μεταλλευτικής περιοχής του Παγγαίου αξίζει να αναφερθούν αδρομερώς οι γνωστές μεταλλευτικές περιοχές της ελληνικής αρχαιότητας (Πίν. 3.7.5.1). Στο πλαίσιο του παρόντος πονήματος πραγματοποιήθηκαν επισκέψεις στις περισσότερες αναφερόμενες θέσεις, όπου παρατηρήθηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε εκμετάλλευσης.

Στην ηπειρωτική Ελλάδα και ειδικά στο χώρο της Κεντρικής και Ανατολικής Μακεδονίας εμφανίζονται τα πρώτα αντικείμενα από χρυσό σε Νεολιθικές εγκαταστάσεις της 5ης χιλιετίας π.Χ. (McGeehan and Liritzis, 1996), τα οποία προέρχονται πιθανότατα από απόληψη προσχωματικού χρυσού. Τέτοιες κοντινές περιοχές, αν υποθέσουμε ότι ο χρυσός δεν έχει εισαχθεί από απομακρυσμένες κοινωνίες στο πλαίσιο του ανταλλακτικού εμπορίου, με προσχωματικό χρυσό είναι το Παγγαίο, η Σκαπτή Ύλη (Παλαιά Καβάλα), ο ποταμός Στρυμών, η ΒΑ Χαλκιδική και ο Εχέδωρος (Γαλλικός) (Βαβελίδης, 2007; 2009; Παπάγγελος, 2009). Στους Βαβελίδης (2007), Vavelidis and Andreou (2008) και Βαβελίδης (2009) παρουσιάζεται ένας εκτενής χάρτης των περιοχών με αρχαία εκμετάλλευση χρυσού στη Μακεδονία και στη Θράκη (Εικ. 3.7.5.1).



Εικόνα 3.7.5.1 Χάρτης των κοιτασμάτων χρυσού και των ιχνών αρχαίας μεταλλευτικής δραστηριότητας στη Μακεδονία και στη Θράκη (Βαβελίδης, 2007; Vavelidis and Andreou, 2008, Βαβελίδης, 2009).

Στους Σιταγρούς της Δράμας έχουμε κάποια από τα πρωιμότερα χάλκινα αντικείμενα στις αρχές της 5^{ης} χιλιετίας π.Χ. (Renfrew and Slater, 2003), χωρίς να επιβεβαιώνεται αν ο χαλκός προέρχεται από εκκαμίνευση. Στην περιοχή του Προμαχώνα-Τορολνίκα εμφανίζονται ίχνη μεταλλουργίας, που χρονολογούνται στο πρώτο μισό της 5^{ης} χιλιετίας π.Χ. (Koukouli-Chrysanthaki and Basiakos, 2002). Από την Πρώιμη Εποχή του Χαλκού η μεταλλευτική δραστηριότητα του χαλκού αλλά και του χρυσού στο χώρο της Μακεδονίας εντοπίζεται σε επιτόπιες παραγωγές μεταλλικών αντικειμένων (Μαυροειδή κ.ά., 2006; Vavelidis and Andreou, 2008).

Η εξόρυξη και γενικά η εκμετάλλευση του χρυσού, του αργύρου και άλλων βασικών μετάλλων της αρχαιότητας καταγράφεται σε αρκετές περιοχές του ελληνικού χώρου από την Πρώιμη Εποχή του Χαλκού, την Εποχή του Σιδήρου μέχρι και τους Ρωμαϊκούς, Βυζαντινούς και Οθωμανικούς χρόνους. Αυτές είναι οι εξής:

Λαύριο

Το πιο γνωστό αρχαίο μεταλλευτικό κέντρο του ελληνικού χώρου θεωρείται το Λαύριο. Η εκμετάλλευση του ορυκτού πλούτου της Λαυρεωτικής μπορεί να θεωρηθεί ως μία από τις μεγαλύτερες και συνάμα τις πιο αποδοτικές οικονομικές επιχειρήσεις των αρχαίων Αθηναίων (Κακαβογιάννης, 2005). Η εκμετάλλευση απέβλεπε στην εξαγωγή του «αργυρίτη», του αργυρούχου δηλαδή μολύβδου. Ο άργυρος αποτελούσε το 80% της αξίας της παραγωγής και ο μολύβδος το 20% (Κονοφάγος, 1980).

Η πρώτη σαφής μαρτυρία για εκτεταμένη εξόρυξη μεταλλεύματος προέρχεται από την Πρώιμη Εποχή του Χαλκού ή Πρωτοελλαδική (3^η χιλιετία π.Χ.). Εντοπίζεται στη μεταλλευτική «στοά αρ. 3» στους νοτιοδυτικούς πρόποδες του μεγάλου Βελατουριού στο Θορικό, αμέσως δυτικά από το Θέατρο, η οποία χρονολογείται στην 3^η χιλιετία (Αποστολοπούλου-Κακαβογιάννη, 2000). Η διαδικασία της κυπέλλωσης και κατ' επέκταση η παραγωγή αργύρου επιβεβαιώνεται ήδη από τον 14^ο αιώνα στο Μυκηναϊκό οικισμό του Θορικού (Κονοφάγος, 1980).

Σημείο σταθμός στη μεταλλευτική ιστορία του Λαυρίου είναι η ανακάλυψη της λεγόμενης «τρίτης επαφής» του σχιστόλιθου με τα μάρμαρα στην περιοχή της Μαρώνειας¹⁷. Η ανακάλυψη έγινε περίπου το 495 π.Χ. Στις «Πέρσες» του Αισχύλου ο χορός αναφέρει για τους Αθηναίους: «Έχουν μία φλέβα αργύρου στα σπλάχνα της Γης τους που είναι θησαυρός»¹⁸. Ο Κονοφάγος (1980) υπολογίζει ότι η μέγιστη ετήσια παραγωγή αργύρου στο Λαύριο έφθανε τους 20 τόνους τον 5^ο

¹⁷ Αριστοτέλης, Αθ. Πολ. 22.7

¹⁸ Αισχύλος, Πέρσες, 241

αιώνα π.Χ. Κατά τη διάρκεια του Πελοποννησιακού πολέμου ένα από τα μέτρα που λαμβάνουν οι Σπαρτιάτες εναντίον των Αθηναίων είναι η εισβολή στο Λαύριο το 413 π.Χ. με αποτέλεσμα τη διαφυγή 20.000 δούλων από τα μεταλλεία και τις μεταλλουργικές εγκαταστάσεις.

Η εκμετάλλευση του αργυρούχου μολύβδου συνεχίστηκε στο Λαύριο μέχρι και τη Ρωμαϊκή εποχή, ενώ τα μεταλλεία ξαναλειτούργησαν προς τα τέλη του 19^{ου} αιώνα για να κλείσουν οριστικά το 1977 (Εικ. 3.7.5.2).



Εικόνα 3.7.5.2 Σύγχρονο μεταλλείο από την περιοχή του Λαυρίου. Στη διευρυμένη αίθουσα που διακρίνεται, είναι ορατές οι αρχαίες στοές ορθογώνιας διατομής.

Το Λαύριο βέβαια αναφέρεται και ως σημαντική πηγή χαλκού, εκτός από την Κύπρο κατά την Εποχή του Χαλκού για την ηπειρωτική Ελλάδα, τα νησιά του Αιγαίου και την Κρήτη (Treister, 1996).

Θάσος

Ο Ηρόδοτος¹⁹ αναφέρει ότι ένας Φοίνικας, ο Θάσος, ανακάλυψε τα μεταλλεία χρυσού και αργύρου στο νησί, το οποίο πήρε το όνομά του. Αυτά βρίσκονται μεταξύ των περιοχών Αίνυρα και Κοίνυρα (Εικ. 3.7.5.3), απέναντι από τη Σαμοθράκη. Συγκεκριμένα, ο Ηρόδοτος αναφέρει ότι ο ίδιος είδε αυτά τα μεταλλεία. Αναφέρει χαρακτηριστικά ότι «είναι σε ένα ψηλό βουνό που του έβγαλαν τα σπλάχνα αναζητώντας χρυσάφι». Οι μεταλλοφορίες χρυσού της Θάσου εντοπίζονται στο βορειοανατολικό και ανατολικό της τμήμα με περιεκτικότητες σε χρυσό μέχρι και 24 ppm, ενώ οι μεταλλοφορίες Pb-Zn στο δυτικό της τμήμα (Vavelidis and Amstutz, 1983; Vavelidis, 1984), όπου καταγράφονται και υψηλές περιεκτικότητες σε άργυρο.



Εικόνα 3.7.5.3 Άποψη από το εσωτερικό μεταλλείου στη θέση «Κλισίδι» στα Κίνυρα Θάσου. Διακρίνεται ο χώρος εξόρυξης χρυσού και προκαταρκτικού καθαρισμού (εμπλουτισμού) του μεταλλεύματος (Wagner and Weisgerber, 1988).

Η Θάσος αποτελεί ένα μεγάλο μεταλλευτικό κέντρο της αρχαιότητας. Οι Θάσιοι είχαν μεγάλες προσόδους (λιγότερα από 80 τάλαντα ετησίως²⁰) από τα μεταλλεία του νησιού τους²¹. Η εκμετάλλευση μολύβδου στη Θάσο άρχισε

¹⁹ Ηρόδοτος, *Ιστορίες*, 6.47

²⁰ Το 1 τάλαντο υπολογίζεται σε 26,2 kg περίπου σε αντίστοιχο του αργύρου (Βαβελίδης κ.ά., 1996).

²¹ Ηρόδοτος, *Ιστορίες* 6.46

περίπου το 1200π.Χ., ενώ του αργύρου το 1000 με 800 π.Χ. σύμφωνα με έρευνες των Pernicka et al (1980), Wagner et al (1981), Vavelidis (1984) και Vavelidis et al (1988). Η εκμετάλλευση του μολύβδου και του αργύρου θα συνεχιστεί μέχρι τους Βυζαντινούς χρόνους (Wagner and Weisgerber, 1988). Ο συνολικός όγκος σκουριών από τις αρχαίες εκκαμινεύσεις υπολογίζεται σε 50.000 τόνους (Wagner and Weisgerber, 1988).

Ο άργυρος εμφανίζεται στις μεταλλοφορίες Pb-Zn που πληρώνουν καρστικά έγκοιλα (Vavelidis, 1984). Τα ορυκτά που εξορύσσονταν είναι ο κερουσίτης και ο γαληνίτης, τα οποία ήταν πλούσια σε άργυρο. Επίσης, ο σίδηρος παράγεται στη Θάσο από τον 9^ο αιώνα π.Χ. από τα πλούσια σιδηρομεταλλεύματα του νησιού (Photos et al, 1986).

Στη Θάσο εντοπίζονται επίσης χαλκούχες μεταλλοφορίες, οι οποίες έτυχαν εκμετάλλευσης από την Πρώιμη Εποχή του Χαλκού (Nerantzis and Papadopoulos, 2013; Nerantzis et al, 2016). Επιπλέον, η αρχή παραγωγής σιδήρου στη Θάσο ίσως να αποδειχθεί ότι τοποθετείται στον 11^ο αιώνα π.Χ. με βάση νεότερες έρευνες που δεν έχουν δημοσιευθεί.

Σκαπτή Ύλη

Πλήθος εργασιών και μελετών ασχολήθηκαν με τον εντοπισμό της ακριβούς θέσης της «Σκαπτής Ύλης», περιοχής της Μακεδονίας γνωστή για τα αρχαία μεταλλεία χρυσού και αργύρου. Παλαιότερα υπήρχε σύγχυση των περιοχών της Σκαπτής Ύλης και του Παγγαίου από νεότερους μελετητές. Σύμφωνα με έρευνα του Λαζαρίδη (1971) αυτή τοποθετείται μεταξύ Στρυμόνα και Νέστου, ενώ αργότερα οι Photos et al (1989), η Κουκούλη-Χρυσανθάκη (1990) και οι Βαβελίδης κ.ά. (1996) την εντοπίζουν στην ευρύτερη περιοχή της Παλιάς Καβάλας. Η Σκαπτή Ύλη έδινε σημαντικές προσόδους στους Θάσιους που έφθαναν συνολικά στα 80 τάλαντα. Μαζί με τις προσόδους από τα μεταλλεία του νησιού της Θάσου είχαν κάθε χρόνο συνολικά έσοδα περίπου 200 τάλαντα, με μέγιστο τα 300. Σύμφωνα με τους Βαβελίδης κ.ά. (1996) ο χρυσός εντοπίζεται σε τρεις διαφορετικούς τύπους μεταλλοφορίας. Σε σιδηρομαγγανιούχα μεταλλεύματα μέσα σε ανθρακικά πετρώματα με περιεκτικότητες μέχρι και 26 ppm, σε σιδηρομαγγανιούχα μεταλλεύματα πλούσια σε Pb, Zn και Ag και σε χαλαζιακά σώματα πλούσια σε σιδηροπυρίτη και αρσеноπυρίτη (Βαβελίδης κ.ά., 1996). Ειδικά στην περιοχή των Κρηνίδων ο χρυσός εντοπίζεται σε οξειδωμένες μεταλλοφορίες Pb-Zn με περιεκτικότητες από 2 έως 180 ppm (Vavelidis et al, 1997a). Ο Διόδωρος ο Σικελιώτης²² αναφέρει ότι ο Φίλιππος κατέλαβε τις Κρηνίδες, τις μετονόμασε σε Φιλίππους το 356 π.Χ. και έτσι απέκτησε τον έλεγχο των χρυσωρυχείων της Σκαπτής Ύλης, αλλά και του Παγγαίου.

²² Διόδωρος Σικελιώτης, Ιστορική Βιβλιοθήκη, 16.8.7-8

Γύρω από την Παλαιά Καβάλα, σε μία επιφάνεια περίπου 100 km², εντοπίζονται πάνω από 150 εμφανίσεις μεταλλεύματος, τα οποία έτυχαν εκμετάλλευσης κατά την αρχαιότητα, τη Ρωμαϊκή και Οθωμανική εποχή και τον 20^ο αιώνα (Vavelidis et al, 1996), κυρίως για το χρυσό και τον άργυρο (Εικ. 3.7.5.4).



Εικόνα 3.7.5.4 Άποψη από το εσωτερικό μεταλλείου στην Παλαιά Καβάλα. Διακρίνεται ο στύλος ασφαλείας αποτελούμενος από ανεξόρυκτο σιδηρομαγνησιούχο μετάλλευμα.

Βορειοανατολική Χαλκιδική

Η βορειοανατολική Χαλκιδική αναφέρεται επίσης ως μεγάλο μεταλλευτικό κέντρο της αρχαιότητας με ίχνη αρχαίας μεταλλευτικής δραστηριότητας που εκτείνονται σε μία έκταση πάνω από 150 km² (Vavelidis et al, 1983; Wagner et al, 1986; Βαβελίδης, 2010). Τα χωριά της ΒΑ Χαλκιδικής ονομάζονταν Σιδηροκαύσια, ενώ από το 1705 παίρνουν το όνομα Μαντεμοχώρια αποκτώντας παράλληλα το δικαίωμα εκμετάλλευσης των μεταλλείων αργύρου. Η Παπασταματάκη (1975) αναφέρεται σε πάνω από 100 φρέατα και αρχαίες στοές στο όρος Τούμπα Καραγιάννη στην Ολυμπιάδα.

Η κύρια μεταλλουργική δραστηριότητα στη ΒΑ Χαλκιδική είναι συγκεντρωμένη στις περιοχές Μπαζδέκ Λάκκος, Κηπουρίστρας Λάκκος, Τρίστας Λάκκος, Πιάβιτσα, Κολομπούκι και Σκουριές που βρίσκονται σε άμεση γειτονία με τα σημαντικότερα κοιτάσματα-μεταλλεία της περιοχής. Με εξαίρεση την περιοχή Σκουριών, όπου έχουμε εκμετάλλευση χαλκού, όλες οι άλλες αποσκοπούσαν κυρίως στην εκμετάλλευση αργύρου και μολύβδου (Vavelidis et al, 1983; Βαβελίδης, 2010).

Μελέτη των μεταλλουργικών σκωριών στην περιοχή της Κηπουρίστρας έδειξε την εκμετάλλευση των κοιτασμάτων Pb-Zn της περιοχής για την

παραγωγή μολύβδου και αργύρου κατά τους πρώιμους Οθωμανικούς χρόνους (1431-1656 μ.Χ.), ενώ δεν αποκλείεται παλαιότερη φάση εκμετάλλευσης (Βαβελίδης και Μέλφος, 2012).

Αγκίστρο-Ορβήλος

Στην περιοχή των ορέων Αγκίστρου και Ορβήλου Σερρών, κοντά στα ελληνοβουλγαρικά σύνορα, εντοπίζεται μία από τις μεγαλύτερες μεταλλευτικές περιοχές του ελληνικού ηπειρωτικού χώρου. Η εκμετάλλευση στην περιοχή του Αγκίστρου ήταν προσανατολισμένη στην εξαγωγή του οξειδωμένου σιδηρούχου μεταλλεύματος (Chiotis et al, 1996) με κύριο ορυκτό το λειμωνίτη στις ασυνέχειες των μαρμάρων της περιοχής. Πάνω από 30 μεταλλεία έχουν καταγραφεί (Εικ. 3.7.5.4), ενώ μεταλλουργικές σκωρίες εντοπίζονται σε αρκετές θέσεις. Επιπλέον, υπάρχουν ενδείξεις για εκμετάλλευση ευγενών μετάλλων (Nerantzis, 2009a).



Εικόνα 3.7.5.4 Αρχαία μεταλλευτική στοά από την περιοχή του Ορβήλου.

Φθιώτιδα

Οι εμφανίσεις χαλκούχου μεταλλοφορίας στη νότια Όθρυ και γενικά στη Φθιώτιδα παρουσιάζουν ίχνη εκμετάλλευσης ιδιαίτερα στην περιοχή της Πελασγίας. Έρευνες των Fiedler (1840), Παπασταματάκη (1990), Παπαδημητρίου

(1988) και Tizzoni (2008) δείχνουν η Φθιώτιδα αποτέλεσε ένα σημαντικό μεταλλευτικό κέντρο στην αρχαιότητα, κυρίως για την παραγωγή χαλκού. Η κύρια εκμετάλλευση με οχτώ μεταλλευτικές στοές (Εικ. 3.7.5.5) και μεταλλουργία με όγκο σκωριών περίπου 150.000 m³ εμφανίζεται γύρω από το Κάστρο της Πελασγίας. Χρονολογείται τον 3^ο αιώνα π.Χ. και υπάρχουν ενδείξεις συνέχισής της μέχρι και τα Βυζαντινά χρόνια (Παπασταματάκη, 1990). Επιμέρους θέσεις με λόφους χαλκούχων σκωριών εντοπίζονται στο Λιμογάρδι, στη Μελιτέα, στο Μακρολιβάδι και στο Νεοχώρι.



Εικόνα 3.7.5.5 Αποψη από αρχαίο μεταλλείο στην περιοχή Κάστρο Πελασγίας. Η Παπασταματάκη (1990) χρονολογεί τα μεταλλεία της περιοχής στον 3^ο αιώνα π.Χ.

Νησιά Αιγαίου

Σε πολλά νησιά του Αιγαίου παρατηρείται εκμετάλλευση χαλκούχων μεταλλοφοριών κατά την αρχαιότητα, όπως στην Ανάφη, στη Σέριφο, στην Κέα, στη Σίφνο, στη Σκύρο, αλλά και σιδηρομεταλλεύματος, όπως στην Άνδρο, στην Αντίπαρο, στην Κέα, στην Κύθνο, στη Σέριφο και στη Σίφνο (Μπελαβίλας και Παπαστεφανάκη, 2009).

Ειδικά στη Σίφνο ενδεδειγμένη έρευνα των Wagner et al (1985) κατέδειξε τρεις διαφορετικές περιόδους εκμετάλλευσης. Η πρώτη τοποθετείται στο πρώτο μισό της τρίτης χιλιετίας π.Χ. και εκμεταλλεύεται τις μεταλλοφορίες μολύβδου-αργύρου. Η δεύτερη τοποθετείται τον 6-5^ο αιώνα π.Χ. και προσανατολίζεται στις μεταλλοφορίες μολύβδου-αργύρου-χρυσού. Ειδικά στη στοά του Αγίου Σώστη τεκμηριώνεται η κατακόρυφη διάνοιξη στοάς και η χρήση τροχαλίας. Ο Vavelidis (1997) υποστηρίζει την πιθανή υδροθερμική προέλευση των χαλαζιακών φλεβών του νησιού που είναι πλούσιες σε χρυσό και έτυχαν εκμετάλλευσης κατά την αρχαιότητα, θέση που τεκμηριώθηκε από το 1981 με τον εντοπισμό αρχαίων στοών για εξόρυξη χρυσού στη νοτιοανατολική Σίφνο (Pernicka et al, 1982)

Ο Ηρόδοτος αναφέρει ότι η Σίφνος είναι το πλουσιότερο νησί, γιατί είχε μεταλλεία χρυσού και αργύρου. Μάλιστα το ένα δέκατο της παραγωγής τους το έδιναν στους Δελφούς, όπου υπάρχει και ο ανάλογος Θησαυρός.

«τὰ δὲ τῶν Σιφνίων πρήγματα ἤκμαζε τοῦτον τὸν χρόνον, καὶ νησιωτῶν μάλιστα ἐπλούτεον, ἅτε ἐόντων αὐτοῖσι ἐν τῇ νήσῳ χρυσέων καὶ ἀργυρέων μετάλλων, οὕτω ὥστε ἀπὸ τῆς δεκάτης τῶν γινομένων αὐτόθεν χρημάτων θησαυρὸς ἐν Δελφοῖσι ἀνάκειται ὅμοια τοῖσι πλουσιωτάτοισι.»

Ηρόδοτος, Ιστορίες, 3.57

Επίσης, η παρατιθέμενη πληροφορία του Ηροδότου και του Πανσανία για καταστροφή των μεταλλείων από εισροή θαλασσινού νερού δεν τεκμηριώνεται με τα μέχρι σήμερα δεδομένα (Wagner et al, 1985). Πιθανώς να υπάρχουν εισόδοι στοών κοντά στην ακτογραμμή κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Το 19^ο και τον 20^ο αιώνα τα πλούσια σιδηρομεταλλεύματα του νησιού θα τύχουν ληστρικής εκμετάλλευσης, η οποία θα καταστρέψει αρχαιότερες μεταλλευτικές φάσεις (Wagner and Weisgerber, 1985).

Πέντε μεταλλουργικές θέσεις χαλκού στην Κύθνο και τρεις στη νήσο Σέριφο την Πρώιμη Εποχή του Χαλκού, μαρτυρούν την ιδιαίτερη ανάπτυξη των τεχνικών σε αυτές τις περιοχές κατά την τρίτη χιλιετία π.Χ. (Georgakopoulou, 2005; Georgakopoulou et al, 2011; Philaniotou et al, 2011)

Θέσεις μεταλλουργίας του χαλκού καταγράφονται και στην Κέα (Παπασταματάκη, 1998; Pelton et al, 2014), με εκμετάλλευση θειούχων σουλφιδίων (χαλκοσύνη, σιδηροπυρίτη, γαληνίτη και μερικώς σφαλερίτη) προερχόμενα πιθανώς από το Λαύριο, τη Νότια Εύβοια ή κάποιο άλλο νησί των Κυκλάδων (Pelton et al, 2014). Τέλος, η ανάλυση αντικειμένων από το Δασκαλειό-Κάβο της Κέρου κατέδειξε τη χρήση δύο σημαντικών τεχνολογιών μεταλλουργίας του καθαρού και του αρσενικούχου χαλκού αντίστοιχα από την Πρώιμη Εποχή του Χαλκού (Georgakopoulou, 2005).

Στη θέση Χρυσοκάμινο της Κρήτης επίσης καταγράφεται μία σημαντική μεταλλουργική θέση χαλκού ήδη από την Τελική Νεολιθική έως την Πρώιμη Εποχή του Χαλκού (Betancourt, 2006). Η μελέτη των μεταλλουργικών υπολειμμάτων, όπως σκωρίες ενός τόνου, δείχνουν αναγωγή μεταλλευμάτων οξειδίων του χαλκού για την παραγωγή χαλκού (Catapotis and Bassiakos, 2007).

Άλλες μεταλλευτικές περιοχές

Πολλές άλλες περιοχές είτε αναφέρονται στην αρχαία ελληνική γραμματεία ως μεταλλοφόρες είτε σύγχρονες αρχαιολογικές έρευνες αποκαλύπτουν αρχαία μεταλλευτική δραστηριότητα.

Στην τοποθεσία "Μαλ-Τεπέ" (Κτίσματα) στη Μαρώνεια του Νομού Ροδόπης εντοπίζεται μεταλλοφορία πορφυριτικού τύπου Cu-Mo (Μέλφος, 1995), ενώ κατακόρυφο μεταλλευτικό φρέαρ αποκαλύφθηκε κατά τη διάνοιξη σύγχρονου δρόμου. Η μεταλλευτική αυτή στοά προσανατολιζόταν στην απόληψη του οξειδωμένου μεταλλεύματος και χρονολογείται από αρχαιολογικά επιφανειακά ευρήματα στο 2^ο αιώνα π.Χ. (Παπασταματάκη κ.ά., 2001).

Στην περιοχή της Αλιστράτης οι Vavelidis et al (1995) εντόπισαν και μελέτησαν ένα αρχαίο μεταλλείο χρυσού του 5-4^{ου} αι. π.Χ. με ίχνη από μετέπειτα χρήση κατά τους Βυζαντινούς χρόνους. Ο χρυσός εντοπίζεται σε πληρώσεις με λειμωνίτη των διακλάσεων και των λατυποπαγών των μαρμάρων.

Ο Ηρόδοτος αναφέρει για την ύπαρξη αρχαίων μεταλλείων στο όρος Δύσωρο της Μακεδονίας. Πιθανότατα πρόκειται για το όρος Κρούσια του Νομού Κιλκίς, όπου έρευνες έχουν δείξει περιεκτικότητες σε χρυσό από 0,3 έως 13 g/t (Mack, 1983). Η περιοχή των Κρουσίων αποτελεί την πηγή του προσχωματικού χρυσού του Εχέδωρου (Γαλλικού) ποταμού (Mack, 1983). Πηγές προσχωματικού χρυσού αναφέρει επίσης ο Πλίνιος, όπως στον Έβρο της Θράκης²³.

Τέλος, η Μήλος αναφέρεται ως διαθέτουσα αρκετά μεταλλεία²⁴. Στο βορειοδυτικό τμήμα του νησιού υπάρχει μεταλλοφορία βαρύτη και αργυρούχου γαληνίτη, στην οποία εντοπίζονται αρχαίες στοές (Μπελαβίλας και Παπαστεφανάκη, 2009) και φρέατα (Εικ. 7.3.5.6).



Εικόνα 3.7.5.6 Μεταλλευτικό φρέαρ από το βορειοδυτικό τμήμα της Μήλου (θέση Βάνι).

²³ Πλίνιος, *Φυσική Ιστορία*, 33.21

²⁴ Ψευδο-Αριστοτέλης, *Περί θαυμασίων ακουσμάτων*

Πίνακας 3.7.5.1 Οι κύριες μεταλλευτικές περιοχές της Κεντρικής και Βόρειας Ελλάδας συμπεριλαμβανομένων των Κυκλάδων και του Λαυρίου.

Μεταλλευτική Περιοχή	Περίοδοι Εκμετάλλευσης	Μέταλλα	Βασική Βιβλιογραφία
Λαύριο	Νεολιθική-Ρωμαϊκή Εποχή	Ag, Pb, Cu	Κονοφάγος, 1980 Κακαβογιάννης, 2005
Θάσος	1000 π.Χ.-Βυζαντινή Εποχή	Ag, Pb, Au, Cu, Fe	Pernicka et al, 1980 Wagner et al, 1981 Vavelidis and Amstutz, 1983 Vavelidis, 1984 Photos et al, 1986 Wagner and Weisgerber, 1988 Vavelidis et al, 1988
Σκαπτή Ύλη (Παλαιά Καβάλα)	Αρχαϊκή -Οθωμανική Εποχή	Ag, Au	Photos et al, 1989 Κουκούλη-Χρυσανθάκη, 1990 Βαβελίδης κ.ά., 1996 Vavelidis et al, 1996 Vavelidis et al, 1997a, b
Παγγαίο	Ελληνιστική-Οθωμανική Εποχή	Au, Ag, Cu, Pb, Fe	Αναφέρεται στο παρόν
Αλιστράτη	Κλασική, Βυζαντινή Εποχή	Au	Vavelidis et al, 1995
ΒΑ Χαλκιδική	Αρχαϊκή-Οθωμανική Εποχή	Au, Ag, Pb	Wagner et al, 1986 Βαβελίδης και Μέλφος, 2012
Αγκιστρο	Ύστερη Ρωμαϊκή, Βυζαντινή-Οθωμανική Εποχή	Fe, Au, Ag	Chiotis et al, 1996 Nerantzis, 2009a
Μαρώνεια	Ελληνιστική	Fe, Cu	Μέλφος, 1995 Παπασταματάκη κ.ά., 2001
Κίρκη (Αλεξ/πολη)	-	-	Gentner et al, 1980 Stos-Gale and Gale, 1982
Δύσωρο (Κρούσια Κιλκίς)	Αρχαϊκή-Κλασική	Au	Davies, 1932 Mack, 1983
Εχέδωρος (Γαλλικός Ποταμός)	Κλασική-Σύγχρονη Εποχή	Προσχ. Au	Βαβελίδης, 2007; 2009
Περίστερα	Βυζαντινή	Προσχ. Au	Θεοχαρίδου, 1985 Vavelidis, 1988
Αξιός-Αλιάκμονας	-	Προσχ. Au	Davies, 1932 Βαβελίδης, 2009
Νιγρίτα-Χείμαρρος	-	Προσχ. Au	Davies, 1932 Βαβελίδης, 2009
Έβρος, Αρδας	-	Προσχ. Au	Πλίνιος Vavelidis et al, 1990

Φθιώτιδα	3 ^{ος} αιώνα π.Χ. μέχρι και Βυζαντινή Εποχή	Cu	Παπασταματάκη, 1990
Κέα	Τελική Νεολιθική Εποχή-Πρώιμη Ελληνιστική	Cu	Παπασταματάκη, 1998 Pelton et al, 2014
Κύθνος	Πρώιμη Εποχή Χαλκού	Cu, Fe	Μπελαβίλας και Παπαστεφανάκη 2009
Μήλος	Κλασική Εποχή	Pb-Ag	Ψευδο-Αριστοτέλης, Περί θαυμασίων ακουσμάτων
Σίφνος	Πρώιμη Εποχή Χαλκού, Αρχαϊκή- Κλασική	Au, Ag	Wagner and Weisgerber, 1985 Vavelidis, 1997
Σέριφος	Πρώιμη Εποχή Χαλκού	Pb-Ag, Cu, Fe	Μπελαβίλας και Παπαστεφανάκη, 2009

3.8 Αρχαίες μεταλλουργικές μέθοδοι

Τα μέταλλα είχαν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με παλαιότερα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν από τον άνθρωπο, όπως το ξύλο, τα οστά ή ο λίθος (Roberts et al, 2008) με κυριότερα την ευπλαστότητά τους όταν θερμαίνονται και τη διατήρηση των αιχμηρών τους άκρων. Η χρήση της θέρμανσης των μετάλλων οδηγεί στο πρώιμο στάδιο μεταλλουργίας.

Η ιδιότητα της ευτηκτότητας των μετάλλων γέννησε τη χύτευση και την παραγωγή οποιουδήποτε σχήματος με το κατάλληλο εκμαγείο (Knauth et al, 1974). Σε αυτό το επίπεδο οι μέθοδοι της μεταλλουργικής τέχνης θα έπρεπε να τελειοποιήσουν τέσσερις σημαντικούς παράγοντες: 1) την ποιότητα του μεταλλεύματος, 2) τα καύσιμα για την αναγκαία πηγή θερμότητας, τη φωτιά, 3) το εμφυσούμενο ρεύμα αέρος και 4) τα απαραίτητα εργαλεία, τη μεταλλουργική κάμινο και τα χωνευτήρια (Forbes, 1964).

3.8.1 Καθαρισμός μεταλλεύματος (εμπλουτισμός)

Ο καθαρισμός του μεταλλεύματος από τα μη χρήσιμα συστατικά, το στείρο υλικό κατά τους μεταλλευτές (Μιχαηλίδης κ.ά., 2003), συνηθίζεται να ονομάζεται «εμπλουτισμός» μεταλλεύματος, διότι εν-πλουτίζεται στο προς εκμετάλλευση μέταλλο. Ο όρος «εν – πλουτισμός» όμως αποτελεί μία απλή μετάφραση των σύγχρονων Ελλήνων μεταλλειολόγων του αγγλικού όρου «enrichment», που όμως στην ελληνική γλώσσα παραπέμπει σε προσθήκη υλικού παρά στο διαχωρισμό. Ένας πιο αντιπροσωπευτικός όρος για την ελληνική είναι ο «καθαρισμός», όπως προτείνεται και από τον Κακαβογιάννη (2005). Στο παρόν πόνημα θα γίνεται χρήση του όρου «καθαρισμός» μεταλλεύματος.

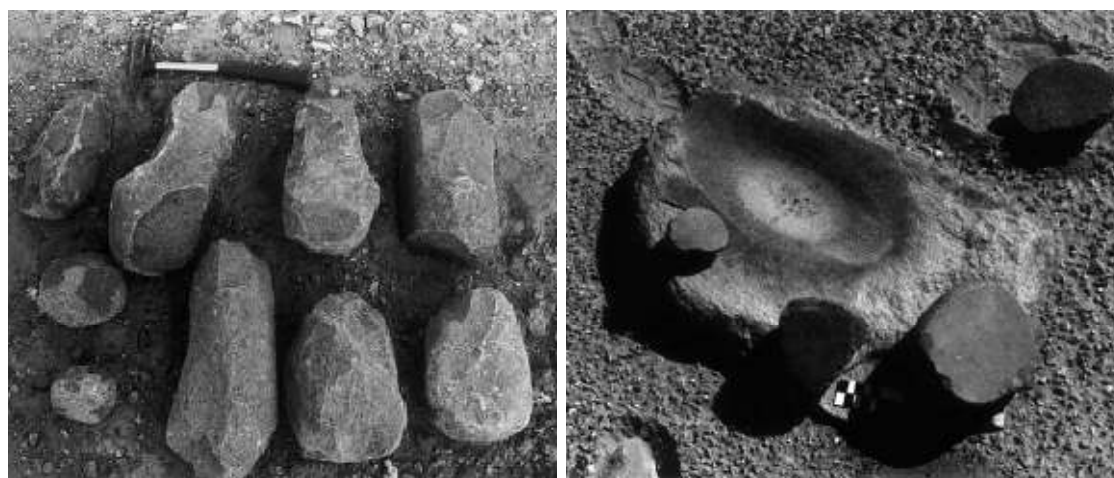
Ο πρώτος καθαρισμός του μεταλλεύματος πραγματοποιείται από τους μεταλλευτές στο χώρο του μεταλλείου (Κακαβογιάννης, 2005). Από το βάρος των

θραυσμένων τμημάτων του μεταλλεύματος είναι εύκολο να υπολογιστεί η περιεκτικότητά του στο χρήσιμο μέταλλο. Ένας πρώτος καθαρισμός γινόταν στο χώρο του μεταλλείου είτε ήταν επιφανειακό είτε ήταν υπόγειο. Έτσι, σχηματίζονταν οι λεγόμενες εσωτερικές και εξωτερικές «εκβολάδες», στο εσωτερικό των υπόγειων μεταλλείων και στην επιφάνειά τους αντίστοιχα (Κονοφάγος, 1980). Οι εσωτερικές εκβολάδες χρησιμοποιούνταν για την πλήρωση παλαιότερων εκμεταλλεύσεων ή για την υποστύλωση ευρέων διανοίξεων (Κακαβογιάννης, 2005).

Το μετάλλευμα αφού εξορυσσόταν και τύγχανε ενός αρχικού καθαρισμού μεταφερόταν στις θέσεις μεταλλουργίας για τον κύριο καθαρισμό του και τη μετέπειτα εκκαμίνευση.

Ανάλογα με τη μεταλλουργική μέθοδο το υλικό θραυόταν με κόπανους και ύστερα τριβόταν σε τριβεία μέχρι την επιθυμητή κοκκομετρία (Κονοφάγος, 1980; Κακαβογιάννης, 2005). Στη Σίφνο σε προϊστορικές μεταλλευτικές στοές έχει βρεθεί αριθμός λίθινων κοπάνων και ακμώνων (Wagner and Weisgerber, 1985). Στη συνέχεια το θραυσμένο μετάλλευμα πλενόταν, έτσι ώστε το νερό να παρασύρει το ελαφρότερο στείρο υλικό, ενώ το βαρύτερο υπόλειμμα που περιείχε μεταλλικά ορυκτά να παραμείνει για το επόμενο στάδιο της μεταλλουργίας, την εκκαμίνευση.

Ένα πρώιμο παράδειγμα καθαρισμού του μεταλλεύματος από το στείρο υλικό του περιγράφεται από τον Klemm (2001) στην ανατολική Αίγυπτο κατά την περίοδο των προδυναστικών χρόνων (περίπου 3500 π.Χ.). Παρά το γεγονός ότι δεν έχουν βρεθεί σαφή ίχνη διαχωρισμού του χρυσοφόρου μεταλλεύματος από το χαλαζία, πιθανολογείται ότι γινόταν με υδρομεταλλουργικές μεθόδους (Klemm, 2001). Το μετάλλευμα κονιοποιούνταν με τη βοήθεια κρουστήρων και στη συνέχεια με τριβή σε ανδρικής σύστασης μυλόπετρες-τριβεία (Εικ. 3.8.1.1).



Εικόνα 3.8.1.1 Αριστερά: Κρουστήρες από γρανοδιορίτη. Μήκος σφυριού 30 cm. Δεξιά: Μυλόπετρες-τριβεία για την κονιοποίηση του μεταλλεύματος, Wadi Allaqi (Νοτιανατολική Αίγυπτος, Klemm, 2001).

Ο διαχωρισμός του χρυσού από τον κονιοποιημένο χαλαζία γινόταν με τη χρήση ξύλινων ρείθρων (σκαφίδια) ή με την πιο πρόσφατη χρήση δέρατος προβάτων. Ο μύθος του χρυσόμαλλου δέρατος πιθανώς να είχε αιγυπτιακή προέλευση. Το δέρας στη συνέχεια καιγόταν και παρήγαγε σβώλους χρυσού.

Μνημείο μεταλλουργικής ευφυΐας αποτελούν οι εγκαταστάσεις καθαρισμού του μεταλλεύματος στο αρχαίο Λαύριο. Αυτές περιελάμβαναν εγκαταστάσεις για τη θραύση και λειοτριβήση του μεταλλευματος, ενώ ο κύριος καθαρισμός πραγματοποιούνταν σε πλυντήριο με βαρυτομετρικό διαχωρισμό (Κονοφάγος, 1980; Τσάιμου, 1997; Κακαβογιάννης, 2005). Τα τριβεία που χρησιμοποιούνταν ήταν ο κωνικός ή ο επίπεδος μύλος (Εικ. 3.8.1.2). Το υλικό κατασκευής τους ήταν τραχείτης (Κονοφάγος, 1980), αλλά χωρίς να είναι σαφής η προέλευσή του. Πιθανές πηγές του τραχείτη είναι η Μήλος ή Κυρήνεια (Κακαβογιάννης, 2005).



Εικόνα 3.8.1.2 Μύλοι κονιοποίησης μεταλλεύματος από το αρχαιολογικό Μουσείο Λαυρίου. Επίπεδος (αριστερά) και κωνικός (δεξιά) μύλος.

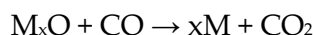
Το βασικό μειονέκτημα της περιοχής του Λαυρίου, τα χαμηλά ποσοστά βροχοπτώσεων και η έλλειψη νερού για τον καθαρισμό του μεταλλεύματος, αντιμετωπίστηκε από τους Αθηναίους με ένα ιδιαίτερα αποτελεσματικό πλυντήριο με κυκλική κίνηση νερού (Εικ. 3.8.1.3). Το πλυντήριο αυτό ήταν επίπεδο όπου το νερό κινούνταν με μικρή κλίση (2%) και το νερό στη συνέχεια ανακυκλώνονταν για επανάχρηση. Το νερό συλλεγόταν από τη βροχή και αποθηκευόταν σε υδατοστεγείς δεξαμενές (Κονοφάγος, 1980).



Εικόνα 3.8.1.3 Επίπεδο πλυντήριο από το αρχαίο Λαύριο στην περιοχή «Μεγάλα Πεύκα».

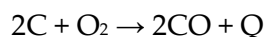
3.8.2 Διαδικασία εκκαμίνευσης

Το πιο ουσιαστικό στάδιο στη μεταλλουργική διαδικασία κρίνεται η εκκαμίνευση του μεταλλεύματος. Σε αυτή τα οξειδία του επιθυμητού μετάλλου ανάγονται σε αυτό (Tylecote, 1962; Bachman, 1982; Tylecote, 1987), σύμφωνα με την αντίδραση:



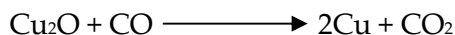
όπου $M = Cu, Pb, Zn$ ή άλλο μέταλλο.

Η ισορροπία αυτής της αντίδρασης εξαρτάται από τις μερικές πιέσεις των CO και CO_2 . Όσο πιο υψηλή είναι η αναλογία P_{CO}/P_{CO_2} , τόσο πιο αναγωγικές είναι οι συνθήκες εκκαμίνευσης. Άρα βασικό στοιχείο είναι ο έλεγχος του CO , που παράγεται από την καύση των οργανικών υλικών και κυρίως του ξύλου σύμφωνα με την εξώθερμη αντίδραση:



Τα κύρια συστατικά της εκκαμίνευσης ήταν το μετάλλευμα, το πιθανό συλλίπασμα και η καύσιμη ύλη (Tylecote et al, 1977). Στόχος της εκκαμίνευσης είναι ο αποχωρισμός της παραγόμενης υγρής σκωρίας από τις μεταλλικές φάσεις, εξαιτίας των διαφορετικών πυκνοτήτων. Οι πυκνές μεταλλικές φάσεις κατακάθονται, ενώ η σκωρία επιπλέει. Η εκκαμίνευση αποτελεί μία σύνθετη χημική διαδικασία, σταθμό στην ιστορία των ανθρώπινων πολιτισμών. Πραγματοποιείται σε ένα συγκεκριμένο και περιορισμένο χώρο, στο χωνευτήριο ή στη μεταλλουργική κάμινο (Tylecote, 1987). Η εκκαμίνευση σε κάμινο συνήθως πραγματοποιούνταν σε κοιλότητα στο έδαφος ή περιορισμένο χώρο, τις περισσότερες φορές χτισμένο με πέτρες. Σε πολλές περιπτώσεις έχουμε παράλληλη χρήση του χωνευτηριού στο εσωτερικό της καμίνου.

Πριν τη λειτουργία των μεταλλουργικών καμίνων στην αρχαιότητα, είναι ευρεία η διάδοση των καμίνων για την όπτηση των κεραμικών σε έντονα οξειδωτικές συνθήκες και θερμοκρασίες που φθάνουν τους $1000^\circ C$. Οι θερμοκρασίες αυτές επιτυχαίνονταν με τη βοήθεια φυσερών (Tylecote, 1987). Σε τέτοιες συνθήκες κάποια αντικείμενα τα οποία εμπεριείχαν ορυκτά του χαλκού (όπως π.χ. κυπρίτη) στο αργιλικό τους υλικό, θα παρουσίαζαν τήξη και αναγωγή σε χαλκό σύμφωνα με την απλή αντίδραση:



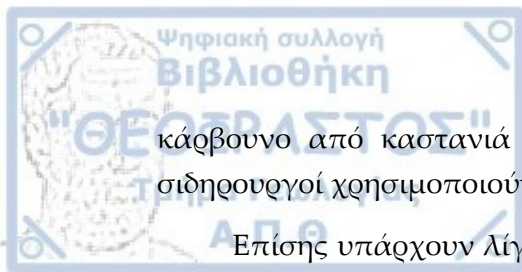
Αυτή είναι μία πιθανή εικασία για τα πρώτα τυχαία βήματα μεταλλουργίας, αλλά δεν μπορεί να αποδειχθεί, μιας και τα υπολείμματα σε χαλκό θα ήταν λίγα μέσα στις στάχτες και θα συλλέγονταν άμεσα. Αυτή όμως είναι και η πρωταρχική μεταλλουργική διαδικασία με τη χρήση χωνευτηριού (Tylecote, 1987).

Η βασική καύσιμη ύλη στη πυρομεταλλουργική διαδικασία είναι το ξυλοκάrbouno (Εικ. 3.8.2.1), προερχόμενο από την αναερόβια καύση των ξύλων. Η απαιτούμενη ποσότητα ήταν αρκετά μεγάλη και τεράστιος όγκος ξυλείας έπρεπε να είναι διαθέσιμος για την πραγματοποίηση της εκκαμίνευσης. Η ποιότητα και η ποσότητα της ξυλείας ήταν κρίσιμοι παράγοντες επίτευξης της εκκαμίνευσης. Είναι παραδεκτό εμπειρικά ότι η αναλογία $\frac{1}{4}$ είναι η πιο συνήθης για την παραγωγή κάrbounου από ξύλα. Έτσι για παράδειγμα, 100 kg ξυλείας μπορούν να παραγάγουν 25 kg κάrbounου λόγω εξαερώσεων και κυρίως διαφυγής νερού υπό μορφή υδρατμών. Επίσης η αναλογία κάrbounου/επιθυμητού μετάλλου ήταν περίπου 40/1 (Tylecote et al, 1977). Έτσι για περίπου 1 kg μεταλλικού χαλκού απαιτούνται 40 kg ξυλοκάrbounου.



Εικόνα 3.8.2.1 Παραγωγή ξυλοκάrbounου από τα Χανιά Κρήτης (πηγή: <http://ganifantis.blogspot.gr/>)

Ο αποδοτικότερος τρόπος ξύλευσης γινόταν με εκμετάλλευση των αναγεννημένων πρέμνων (προσωπική επικοινωνία με Rehren Th.). Τα πιο συνήθη δένδρα προς εκμετάλλευση είναι ο πρίνος, η οξιά, το πεύκο (*Pinus brutia*), η σημύδα ακόμη και η ακακία (Timna, Ισραήλ) και γενικά οποιοδήποτε είδος συμπαγούς και ποιοτικής ξυλείας είναι διαθέσιμη. Το παραγόμενο ξυλοκάrbouno θα πρέπει να έχει περίπου 10 cm διάμετρο. Ο Θεόφραστος στο έργο του «Περί Φυτών» (Forbes, 1964) μας πληροφορεί ότι ο πρίνος είναι τα φυτά από το οποίο παράγεται κάrbouno για την πρώτη εκκαμίνευση του αργύρου. Το χειρότερο ξύλο που χρησιμοποιείται είναι η δρυς, επειδή παράγει μεγάλη ποσότητα στάχτης. Στη μεταλλουργία του σιδήρου αναφέρει ότι χρησιμοποιείται



κάρβουνο από καστανιά και στη μεταλλουργία του αργύρου από πεύκο. Η σιδηρουργία χρησιμοποιούν κάρβουνο από έλατο.

Επίσης υπάρχουν λίγες αναφορές για χρήση λιγνίτη, αλλά καμία απόδειξη για χρήση τύρφης, αν και αναφέρεται από τον Πλίνιο και τον Τάκιτο (Forbes, 1964).

Συλλίπασμα

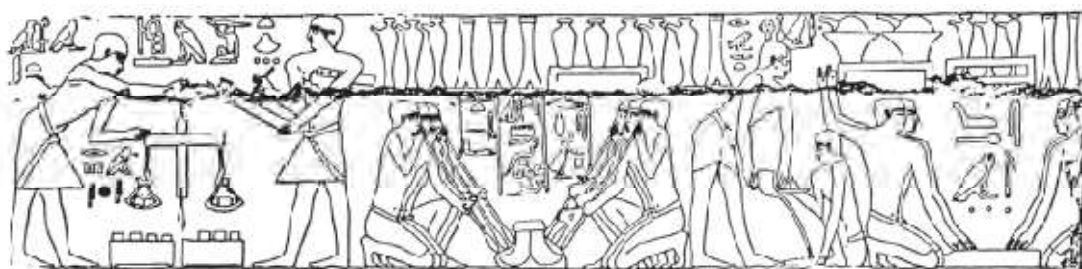
Η συλλίπανση λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της εκκαμίνευσης για τη βελτίωση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών με την προσθήκη υλικού (συλλιπάσματος) προκειμένου να βελτιωθεί η αναγωγική διαδικασία (Tylecote et al, 1977). Η σκωρία θα έπρεπε να έχει την ικανή ποσότητα σε φαυαλίτη (Fe_2SiO_4), έτσι ώστε να έχει χαμηλό σημείο τήξης και χαμηλό ιξώδες και να επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός του μετάλλου από τη σκωρία. Αν το μέταλλο είχε υψηλές περιεκτικότητες σε πυριτικό υλικό, τότε προστίθεντο σιδηρούχο συλλίπασμα (οξειδία του σιδήρου ή σιδηρομαγγανιούχα οξειδία). Αυτό μπορεί να είχε τη μορφή του γκαιτίτη, του αιματίτη ή άλλου οξειδίου του Fe και του Mn. Σε εκκαμίνευση μεταλλεύματος με υψηλό περιεχόμενο οξειδίων του Fe, τότε προστίθεντο πυριτικό συλλίπασμα, με τη μορφή χαλαζία ή άλλου πυριτικού ορυκτού (Tylecote et al, 1977). Η πυριτική άμμος αποτελούσε την ιδανική λύση για αυτό.

Ως συλλιπάσματα χρησιμοποιούνται και οξειδία του Ca ή του Mg, αντί των οξειδίων του Fe (Tylecote, 1987). Τέλος είναι δυνατό το ίδιο το μέταλλο να περιείχε ορυκτά που βοηθούσαν στην ταπείνωση του σημείου τήξης και είχαν το ρόλο της αυτολίπανσης (self-fluxing).

Χρήση χωνευτηριού

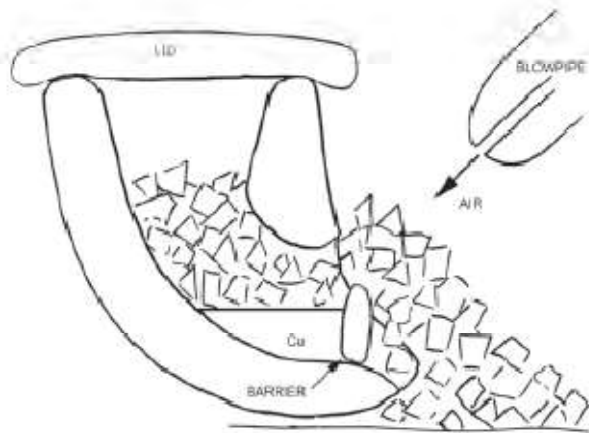
Το χωνευτήριο αποτελεί πυρίμαχο κεραμικό ή λίθινο δοχείο χοανοειδούς σχήματος, στο οποίο αρχικά ο άνθρωπος έλειωνε τα χρήσιμα μέταλλα, όπως το χρυσό και το χαλκό. Χρησιμοποιούνταν όμως και για την αναγωγή του μεταλλεύματος στα μεταλλικά προϊόντα, δηλαδή για την εκκαμίνευση. Δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι ποια ήταν η πρώτη χρήση του χωνευτηριού, η τήξη ή η εκκαμίνευση. Το χωνευτήριο έφερε λαβή και πολλές φορές ήταν εξαρτημένο με βάση με οπές (Davey and Edwards, 2007), όπου προσαρμόζονταν τα φουσερά (Εικ. 3.8.2.2).

Ένα αξιόλογο εύρημα από την Τούμπα της Θεσσαλονίκης αποτελεί λίθινο χωνευτήρι για την τήξη χρυσού της Ύστερης Εποχής Χαλκού με ίχνη καύσης (Vavelidis and Andreou, 2008). Το χωνευτήρι αποτελεί επίσης το βασικό αντικείμενο για τη χύτευση του χαλκού σε μήτρες. Μέσα στο αργιλικό χωνευτήρι τοποθετούνταν το μέταλλευμα ενώ το κάρβουνο, τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά (Davey and Edwards, 2007) (Εικ. 3.8.2.3). Ο Zwicker et al (1985) περιγράφει την εκκαμίνευση σουλφιδίων για την παραγωγή χαλκού στο Κίτιο της Κύπρου με τη χρήση χωνευτηριών την Εποχή του Χαλκού (Εικ. 3.8.2.4). Πιθανόν σε αυτά τα χωνευτήρια προστίθετο και μάζα ορυκτών του αρσενικού για την παραγωγή κράματος αρσενικούχου χαλκού (Tylecote, 1987).

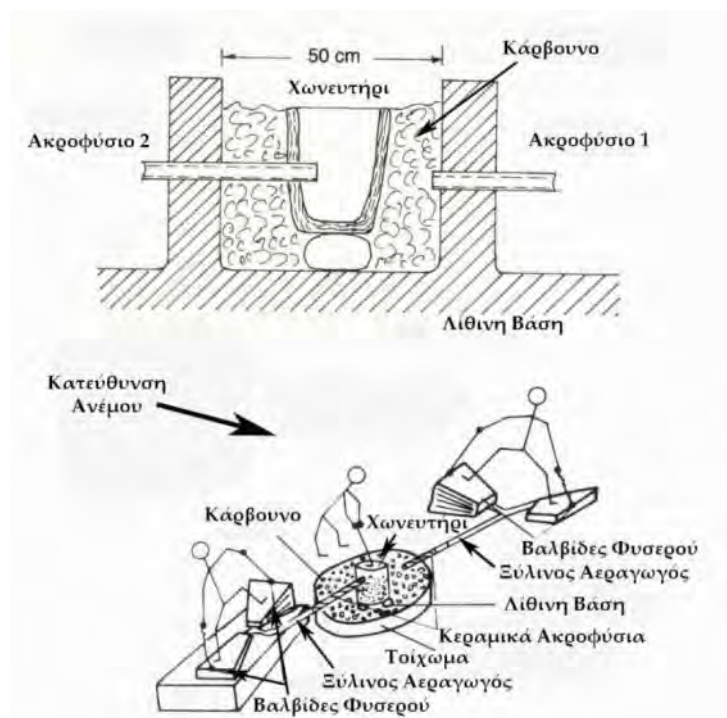


Εικόνα 3.8.2.2 Πάνω: Σχέδιο από τον τύμβο της Mereruka, Saqqara. Διακρίνεται η ζύγιση, η τήξη, η χύτευση και η σφυρηλάτηση του χαλκού. Κάτω: Διακρίνεται αριστερά το χωνευτήρι κατά την τήξη του μετάλλου και δεξιά κατά τη χύτευση (Davey and Edwards, 2007).

Για την αύξηση της θερμοκρασίας της αναγωγικής διαδικασίας γινόταν χρήση φυσερών τα οποία βυθίζονταν μέσα στα κάρβουνα. Για την αποφυγή της καύσης των ξύλινων φυσερών, στο άκρο τους υπήρχε τυλιγμένο δέρμα ή πηλίνα πυρίμαχα ακροφύσια. Καθώς η διαδικασία προχωρά και το μέταλλο ανάγεται, δημιουργείται μία διφασική ημίμευστη μάζα. Στο πάνω μέρος της βρίσκεται η σκωρία και στο βάθος υπάρχει το "λιωμένο" μέταλλο.



Εικόνα 3.8.2.3 Αιγυπτιακό χωνευτήριο και τομή κατά τη διαδικασία εκκαμίνευσης (Davey and Edwards, 2007).



Εικόνα 3.8.2.4. Εκκαμίνευση σε χωνευτήριο σουλφιδίων του χαλκού (Zwicker and Goudzarloo, 1979).

Μεταλλουργικές κάμινοι

Σύμφωνα με τον Tylecote (1987) στην εκκαμίνευση με τη χρήση χωνευτηριού οι συνθήκες δεν είναι ελεγχόμενες γιατί το κάρβουνο, το μέταλλευμα και το συλλίπασμα πρέπει να τοποθετηθούν από την αρχή και σε συγκεκριμένη αναλογία για την επιτυχία της αντίδρασης. Έτσι, για κάθε εκκαμίνευση πρέπει να υπολογίζονται συγκεκριμένες ποσότητες σε κάρβουνο,

μετάλλευμα και συλλίπασμα. Αυτό αποτελεί το κύριο μειονέκτημα της χρήσης χωνευτηριού στην εκκαμίνευση.

Αν όμως με μία κατασκευή μπορούμε να αφαιρούμε την παραγόμενη σκωρία και το παραγόμενο μέταλλο, τότε μπορούμε να προσθέτουμε κάρβουνο, μετάλλευμα και συλλίπασμα και η διαδικασία να είναι συνεχής (Tylecote, 1987). Αυτή είναι και η ουσία της λειτουργίας της μεταλλουργικής καμίνου, η οποία αντικατέστησε τη χρήση χωνευτηριού.

Το χτίσιμο της καμίνου γινόταν με πυρίμαχο υλικό, συνηθέστερα πέτρες της περιοχής, ενώ η εσωτερική επιφάνεια καλυπτόταν με αργιλικό επίχρισμα (Tylecote, 1987). Προβλεπόταν μία οπή από όπου θα εξερχόταν η μεταλλουργική σκωρία ρέοντας και μία χαμηλότερη οπή για την εξαγωγή του μεταλλικού τήγματος (Εικ. 3.8.2.5-6). Στην εκκαμίνευση του χαλκού, μόνο η οπή για την εξαγωγή της σκωρίας ήταν δυνατή και αυτή στους προϊστορικούς χρόνους, διότι με το άνοιγμα της τάπας της καμίνου έχουμε πήξη των υλικών και φραγμό του τήγματος (Tylecote, 1987).

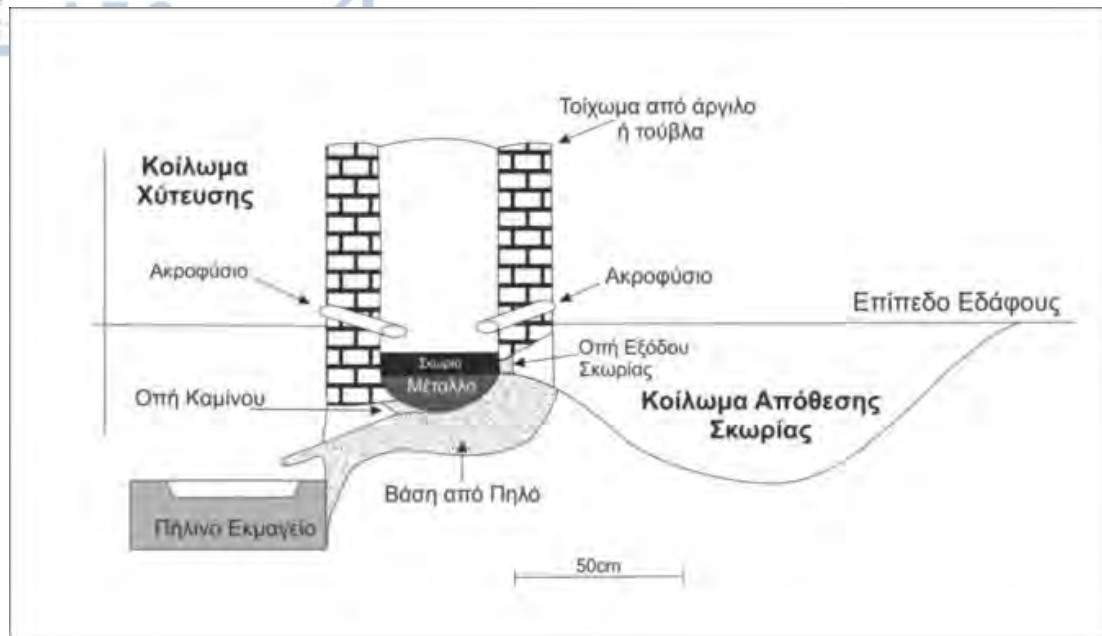


Εικόνα 3.8.2.5 Μεταλλουργική καμίνος χαλκού από το Χρυσοκάμινο στην Κρήτη (τροπ. από Betancourt, 2006).

Ένα προστάδιο της εκκαμίνευσης ήταν η φρύξη σε θερμοκρασίες από 500-800°C (Tylecote, 1987). Αυτή χρησιμοποιούνταν σε περιπτώσεις σουλφιδίων ή σουλφάτων για την αναγωγή τους σε οξείδια. Ποσότητες του εξορυγμένου μεταλλεύματος καίγονταν ανάμεσα σε ξύλα, έτσι ώστε να αναχθούν σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση (Tylecote, 1987):



Η φρύξη των σουλφιδίων άγγιζε το πολύ τους 850°C και διαρκούσε από 5 έως 24 ώρες (Tylecote et al, 1977).



Εικόνα 3.8.2.6 Εκκαμίνευση χαλκού με κοιλώματα για τη σκωρία και το μέταλλο (Τροποποιημένο από Tylecote, 1976).

3.8.3 Στοιχεία Μεταλλουργικής Καμίνου

Φυσερά (bellows)

Τα φυσερά αποτελούν ασκούς από οργανικό υλικό με τους οποίους εμφυσούνταν αέρας στην κάμινο. Στο χώρο της Ευρώπης δεν έχουν βρεθεί σε αρχαιολογικές ανασκαφές φυσερά για μεταλλουργικούς σκοπούς. Αντιθέτως στην Εγγύς Ανατολή έχουν βρεθεί αρκετά (Davey, 1979), όπως και στην Αίγυπτο και το Σουδάν. Τα οργανικά τους υλικά (ξύλο, δέρμα) αποσυντίθενται και δεν αφήνουν επαρκή στοιχεία προς επιβεβαίωση. Οι μόνες ενδείξεις που έχουμε είναι εικόνες σε αγγεία από τον 5^ο αιώνα π.Χ. και έπειτα. Ο αγωγός που μετέφερε τον εμφυσούμενο αέρα από το φυσερό στην κάμινο ονομάζεται φυσητήρας (blowpipe-tuyère).

Ακροφύσια (nozzles)

Τα ακροφύσια αποτελούν τα άκρα του φυσερού που εισχωρούν στην κοιλότητα της εκκαμίνευσης. Κατασκευάζονται από ψημένη ή στεγνωμένη στον ήλιο άργιλο και παρουσιάζουν διάφορα μεγέθη και σχήματα. Πριν τη χρήση των φυσερών, πιθανότατα γινόταν χρήση των φυσητήρων-αυλών, όπως αναπαριστώνται σε Αιγυπτιακό τάφο (Tylecote, 1981), κυρίως στη μεταλλουργία του χρυσού.

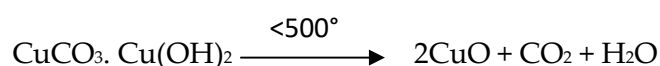
Επένδυση καμίνου (furnace lining)

Το εσωτερικό της μεταλλουργικής καμίνου επενδυόταν κυρίως με αργιλικό υλικό για να αποφευχθούν οι διαρροές των τεμαχών της καμίνου από τη θερμική διαστολή. Συνήθως η άργιλος αυτή συναντάται στα αρχαιολογικά υπολείμματα υαλοποιημένη εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών στο εσωτερικό της καμίνου (Tylecote, 1987). Το συνολικό πάχος της δεν ξεπερνά τα 2-3 cm. Η επένδυση της καμίνου συχνά συγχέεται με το αργιλικό υλικό των χωνευτηρίων.

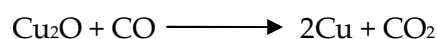
3.8.4 Εκκαμίνευση Χαλκού

Η μεταλλουργία του χαλκού στην Ευρώπη ξεκίνησε ήδη από την πέμπτη χιλιετία π.Χ., όπως δείχνουν οι πρόσφατες έρευνες στο Belovode της ανατολικής Σερβίας (Radivojević, 2010), αλλά και παλαιότερες στη Rudna Glava και στο Ai Bunar της Βουλγαρίας (Chernykh, 1978; Johanović, 1971). Σήμερα αυτό που μπορούμε να μελετήσουμε και να εξάγουμε συμπεράσματα σχετικά με τις μεταλλουργικές μεθόδους είναι τα υπολείμματα της μεταλλουργίας, όπως οι σκωρίες, τα ευρήματα κεραμικής και τα στρώματα στάχτης.

Το είδος του μεταλλεύματος όριζε τα βήματα που θα ακολουθούνταν προκειμένου το τελικό παραγόμενο προϊόν της μεταλλουργικής διαδικασίας να είναι ο μεταλλικός χαλκός. Σε περίπτωση που το βασικό μέταλλευμα ήταν ο μαλαχίτης και ο αζουρίτης, που είναι ανθρακικά ορυκτά, θα έπρεπε σε πρώτη φάση να μετατραπούν σε οξειδία (Bachmann, 1982). Αυτό επιτυχαινόταν σε ανοιχτή φωτιά με τη διαδικασία της φρύξης (roasting).



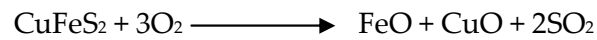
Στη συνέχεια το παραγόμενο οξείδιο του χαλκού (CuO) θα έπρεπε να αναχθεί εκ νέου είτε σε χωνευτήριο είτε σε μεταλλουργική κάμινο σύμφωνα με τις παρακάτω αντιδράσεις (Bachmann, 1982):



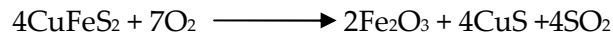
Η αναγωγή των οξειδίων του χαλκού παράγει κατά μεγάλο ποσοστό σφαιρίδια χαλκού με μικρό ποσοστό σε S (σε περίπτωση που περιέχεται στο τήγμα). Το μέταλλευμα ήταν επίσης πιθανό να αποτελείται από σουλφίδια του χαλκού. Η διαδικασία περιελάμβανε επίσης φρύξη του μεταλλεύματος σε

ανοιχτή φωτιά (roasting), όπως παρατίθεται στις παρακάτω αντιδράσεις κατά Bachmann (1982):

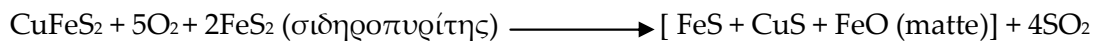
Τέλεια Φρύξη:



Ατελής Φρύξη:

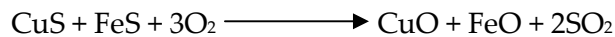


Κατά τη φρύξη συνήθως παραγόταν ένα τεχνητό σύντηγμα μετάλλων, το οποίο ονομάζεται matte:

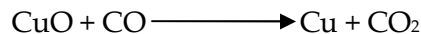


Η φρύξη απέβλεπε στην αποφυγή δημιουργίας matte κατά την κύρια εκκαμίνευση των οξειδίων του χαλκού. Το matte δημιουργούνταν από υπολειμματικά σουλφίδια ως στρώση κάτω από τη σκωρία. Πιθανότατα αυτή η στρώση επανατροφοδοτούνταν στην επόμενη εκκαμίνευση, μετά από νέα φρύξη, διότι ήταν πλούσια σε χαλκό και ευγενή μέταλλα (Bachmann, 1982).

Φρύξη του matte:



Αναγωγή:



Πρέπει να επισημανθεί, ωστόσο, ότι στην Ελληνική Χερσόνησο και στα νησιά του Αιγαίου ενδείξεις για φρύξη πυριτών δεν υφίστανται, και η παραγωγή του χαλκού βασιζόταν σε αναγωγή οξειδίων ή αντίστοιχων ανθρακικών ενώσεων (π.χ. μαλαχίτη, αζουρίτη).

3.8.5 Εκκαμίνευση Αργυρούχου Μολύβδου

Η παραγωγή μεταλλικού μολύβδου είναι πολύ εύκολη αφού ο μολύβδος έχει χαμηλό σημείο τήξης (327,5°C). Με απλή αναγωγή των οξειδίων του (π.χ. λιθάργυρο) παράγεται μεταλλικός μολύβδος. Ο άργυρος συνήθως εντοπίζεται σε ορυκτά του μολύβδου, όπως ο γαληνίτης και ο κερουσίτης. Το αντιπροσωπευτικότερο παράδειγμα της εκκαμίνευσης αργυρούχου μολύβδου είναι το αρχαίο Λαύριο. Σύμφωνα με τον Κονοφάγο (1980) η διαδικασία παραγωγής γινόταν ως εξής:

Το καθαρισμένο μετάλλευμα επειδή ήταν πολύ λεπτόκοκκο πλινθοποιούνταν, δηλαδή γινόταν σε μορφή πλίνθου. Με αυτόν τον τρόπο επιτρεπόταν να περνάει ο αέρας διαμέσου των πλίνθων. Οι πλίνθοι μαζί με ξυλοκάrbουνο τροφοδοτούνταν στην κάμινο σε αναλογία 5:1 αντίστοιχα. Συγχρόνως με τη βοήθεια φυσερών διοχετευόταν αέρας στην κάμινο. Η θερμοκρασία ανερχόταν περίπου στους 1000°C. Ο παραγόμενος άνθρακας ανήγαγε τα οξειδία του μολύβδου και έτσι ελευθερωνόταν μεταλλικός μολύβδος που έρρεε από μία μικρή οπή στο κάτω μέρος της καμίνου.

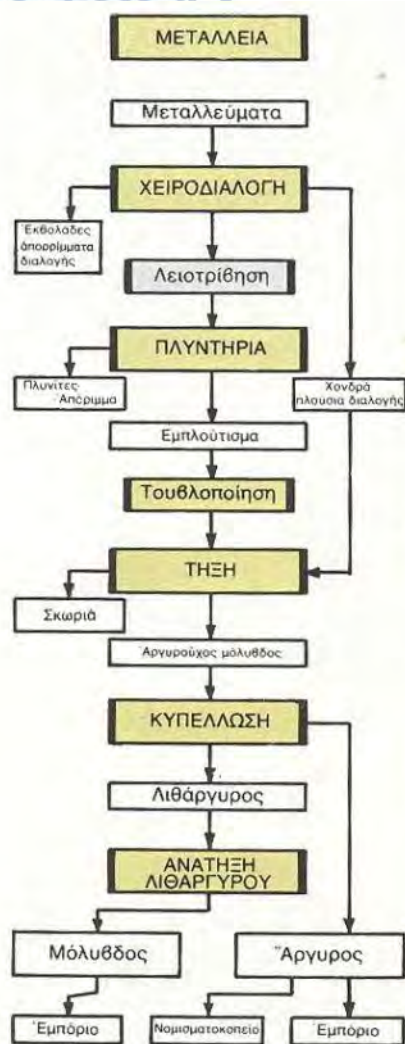
Όλα τα άλλα υλικά έβγαιναν επίσης λιωμένα ως σκωρία που επέπλεε πάνω στο μολύβδο. Ο μολύβδος δρούσε ως συλλέκτης του αργύρου, για αυτό καλείται αργυρούχος μολύβδος. Σε περιπτώσεις όπου κατά την εκκαμίνευση το μετάλλευμα δεν περιείχε αρκετό μολύβδο (dry silver ores), ο μολύβδος προστίθεντο σκόπιμα για να απορροφήσει τα ευγενή μέταλλα και κυρίως τον άργυρο (Craddock, 2000).

Κυπέλλωση

Η κυπέλλωση είναι η διαδικασία διαχωρισμού των ευγενών μετάλλων από ένα μεταλλικό τήγμα που περιέχει ένα βασικό μέταλλο, συνήθως Pb (Tylecote, 1962). Το βασικό μέταλλο σε οξειδωτικές συνθήκες και θερμοκρασία περίπου 1100°C λειώνει σχηματίζοντας οξειδία (Ramage and Craddock, 2000). Τα ευγενή μέταλλα επειδή δεν αντιδρούν με το οξυγόνο παραμένουν στο κάτω μέρος ενός κυπέλλου (κουπέλας) που χρησιμοποιείται για τη διαδικασία. Το κύπελλο συνήθως περιέχει στάχτη οστών, διότι ο απατίτης των οστών δεν αντιδρά με τα παραγόμενα οξειδία, αλλά τα απορροφά μηχανικά.

Η διαδικασία της κυπέλλωσης χρησιμοποιήθηκε κυρίως στο διαχωρισμό του αργύρου από το μολύβδο (Κονοφάγος, 1980), ο οποίος οξειδωνόταν σε λιθάργυρο (PbO), ενώ ο άργυρος έμενε στον πάτο της κουπέλας που τοποθετούνταν μέσα στην κάμινο.

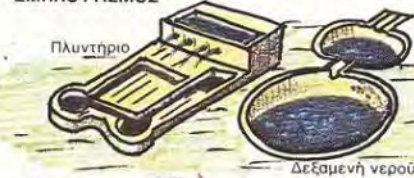
Ο λιθάργυρος ως δευτερεύον υλικό από τη διαδικασία της κυπέλλωσης αποτελούσε την πρώτη ύλη για το μεταλλικό μολύβδο (Κονοφάγος, 1980). Μέσα σε κάμινο αναγόταν από το CO σε Pb (Εικ. 3.8.5.1).



ΕΞΟΡΥΞΗ



ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ



ΤΗΞΗ



ΚΥΠΕΛΛΩΣΗ



ΑΝΑΤΗΞΗ ΤΩΝ ΛΙΘΑΡΓΥΡΩΝ



Εικόνα 3.8.5.1 Η αλυσίδα παραγωγής αργύρου και μολύβδου στο αρχαίο Λαύριο (Κονοφάγος, 1980).

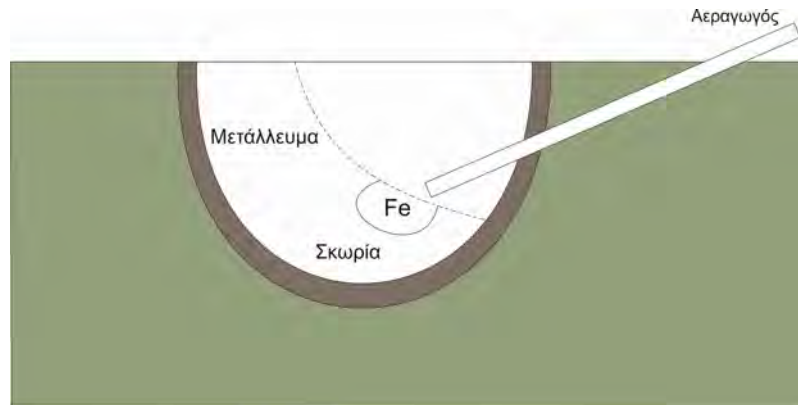
3.8.6 Εκκαμίνευση Σιδήρου

Η βασική διαφορά στην εκκαμίνευση σιδήρου στην αρχαιότητα σε σχέση με τα άλλα μέταλλα είναι το ότι παρέμενε σε ημίρευστη κατάσταση λόγω του υψηλού σημείου τήξης (Tylecote, 1987). Από την εκκαμίνευση παραγόταν ένα σπογγώδες σύντηγμα με σκωρία που περιείχε το σίδηρο. Οι συνθήκες της εκκαμίνευσης θα έπρεπε να είναι πιο ισχυρά αναγωγικές σε σχέση με αυτές στην εκκαμίνευση χαλκού για να αναχθούν τα μεταλλικά ορυκτά του σιδήρου σε μεταλλικό σίδηρο. Έπειτα αυτός ο στερεός σίδηρος θα έπρεπε να σφυρηλατηθεί για να εξαχθεί η υπολειμματική σκωρία από το σύντηγμα.

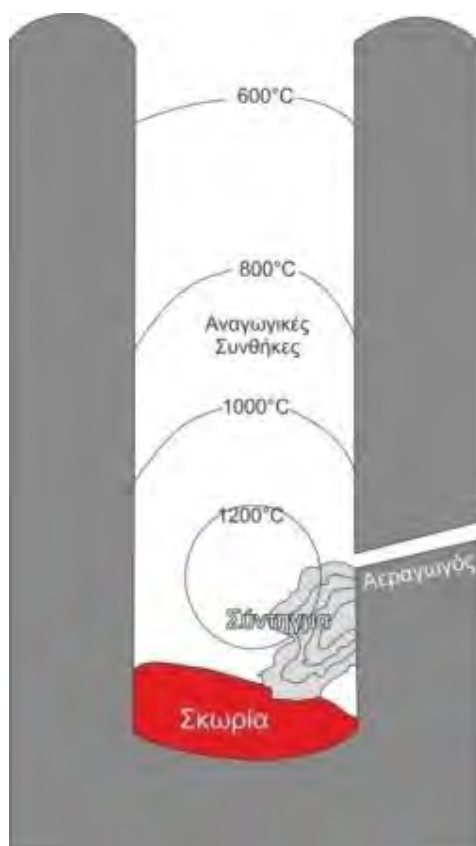
Σύμφωνα με τον Tylecote (1987) στην αρχαιότητα χρησιμοποιήθηκαν κυρίως δύο βασικοί τύποι καμίνων σιδήρου, η φωλεόσχημος και η φρεατοειδής.

Η φωλεόσχημη κάμιнос (Εικ. 3.8.6.1) θεωρείται ως πρωιμότερη μορφή καμίνου σιδηρουργίας. Το μετάλλευμα μαζί με το ξυλοκάρβουνο τοποθετούνταν

μέσα σε ένα λάκκο. Ο λάκκος συνήθως ήταν επενδυμένος με αργιλικό υλικό. Μέσω ενός αεραγωγού διοχετεύονταν αέρας στη φωλεόσχημη κάμmino, ο οποίος αντιδρούσε με το ξυλοκάρβουνο και παρήγαγε CO. Το μέταλλευμα κατά αυτόν τον τρόπο δεχόταν ένα συνεχές ρεύμα από CO το οποίο το ανήγαγε προοδευτικά σε μεταλλικό σίδηρο.



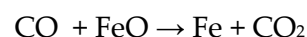
Εικόνα 3.8.6.1 Αναπαράσταση της φωλεόσχημης καμίνου. Τροποποιημένο από Tylecote (1987).



Εικόνα 3.8.6.2 Αναπαράσταση της φρεατοειδούς καμίνου. Τροποποιημένο από Tylecote, 1987.

Η φρεατοειδής καμίνος (Εικ. 3.8.6.2) αποτελούνταν από ένα λίθινο συνήθως κατακόρυφο κτίσμα πάνω από ένα λάκκο. Κατά κύριο λόγο το κτίσμα ήταν κατασκευασμένο από λίθους με εσωτερική επένδυση και ήταν κυλινδρικό. Η τροφοδοσία σε μέταλλευμα και ξυλοκάρβουνο γινόταν από την οροφή του κτιστού μέρους της καμίνου. Τέτοια είδη μεταλλουργικής καμίνου έχουν εντοπιστεί στη Θάσο (Παπαδόπουλος και Νεράτζης, 2012).

Αρχικά στα ανώτερα στρώματα της φρεατοειδούς καμίνου το νερό διέφευγε και οι ανθρακικές ενώσεις του σιδήρου (π.χ. FeCO_3) αποδομούνται (500°C). Στα κατώτερα στρώματα οι αναγωγικές συνθήκες που φθάνουν τους 750°C αρχικά ανάγουν τα οξείδια με υψηλό αριθμό οξείδωσης. Το CO χρειάζεται να είναι αρκετό για αυτές τις αντιδράσεις.



Το τελικό αποτέλεσμα ήταν μεταλλικός σίδηρος σε ένα σπογγώδες σύντηγμα που δημιουργούνταν στο σημείο εισαγωγής του αέρα από το φυσηρό. Η σκωρία στερεοποιούνταν είτε στο κοίλο εσωτερικό της καμίνου είτε εξωτερικά όταν ελευθερωνόταν από μικρή οπή. Για τη λήψη του σιδήρου θα έπρεπε να ανοιχθεί η κάμινος ή και να εξαχθεί το ακροφύσιο. Η διαδικασία αυτή απόληψης του σιδήρου οδήγησε στη δημιουργία πολλών παραλλαγών (Εικ. 3.8.6.3) της φωλεόσχημης και φρεατοειδούς καμίνου (Pleiner, 2000).



Εικόνα 3.8.6.3 Διάφοροι τύποι καμίνων μεταλλουργίας του σιδήρου (Pleiner, 2000).

3.8.7 Απόληψη χρυσού με πυρομεταλλουργική μέθοδο

Η απόληψη χρυσού από το μετάλλευμα συνδέεται με τη διαδικασία εκκαμίνευσης του αργύρου. Αυτά τα δύο μεταλλικά στοιχεία απορροφούνται από το μεταλλικό μόλυβδο κι έτσι λαμβάνονται κατόπιν με τη διαδικασία της οξειδωσης του μολύβδου σε λιθάργυρο και μέσω της κυπέλλωσης. Για την απόληψη των ευγενών μετάλλων, υπάρχουν ενδείξεις χρήσης του αντιμονίου αντί του μολύβδου (Mongiatti et al, 2009).

3.8.8 Πυρομεταλλουργικές μέθοδοι για τον εξευγενισμό του χρυσού

Μέχρι σήμερα δεν γνωρίζουμε επακριβώς ποιες μέθοδοι εφαρμόζονταν στα προϊστορικά χρόνια, αλλά και μέχρι τον 6^ο αιώνα π.Χ. για τον καθαρισμό του χρυσού. Βέβαια η καθαρότητα του χρυσού ήταν κάτι που δεν ενδιέφερε τους αρχαίους λαούς της προϊστορίας, παρά μόνο η εξωτερική εμφάνιση του χρυσού (Ramage and Craddock, 2000). Η ανάγκη για εξευγενισμό αυτού του μετάλλου προέκυψε με την εδραίωση της χρήσης νομισμάτων από τον 6^ο αιώνα π.Χ.

Οι μέθοδοι εξευγενισμού του χρυσού στοχεύουν κυρίως στην απομάκρυνση του αργύρου. Είναι γνωστές από γραπτά του Μεσαίωνα και της Αναγέννησης, αλλά κατά πάσα πιθανότητα ελάχιστα διαφέρουν από αυτές της αρχαιότητας (Ramage and Craddock, 2000).

Κυπέλλωση στον εξευγενισμό του χρυσού

Η βασική διαδικασία για τον αποχωρισμό του χρυσού από τα βαρέα μέταλλα των μεταλλευμάτων ήταν η κυπέλλωση. Με την κυπέλλωση διαχωριζόταν ο χρυσός από το μόλυβδο και το χαλκό. Το υπόλειμμα της κυπέλλωσης ήταν ο χρυσός που περιείχε σημαντικές κατά περίπτωση ποσότητες αργύρου. Στη συνέχεια ακολουθούσε ο διαχωρισμός (εξευγενισμός) του χρυσού από τον άργυρο. Ο διαχωρισμός αυτός των δύο πολύτιμων μετάλλων δεν εφαρμόστηκε πριν από τα μέσα της πρώτης χιλιετίας π.Χ. στις Σάρδεις (Ramage and Craddock, 2000).

Πλινθοποίηση

Μόλις τον 2^ο αιώνα π.Χ. ο Αγαθαρχίδης²⁵ αναφέρει ότι το καθαρισμένο από νερό μέταλλευμα χρυσού τοποθετούνταν σε πήλινα δοχεία (Εικ. 3.8.8.1), μαζί με ορισμένη ποσότητα μολύβδου, με αλάτι και λίγο κασσίτερο. Από πάνω ρίχνονταν κρίθινα πίτουρα και τα δοχεία σφραγίζονταν με πηλό και τοποθετούνταν στην κάμινο. Έτσι εκκαμινευόταν το υλικό για πέντε μέρες (Εικ. 3.8.8.2) και με το τέλος της διαδικασίας λαμβάνόταν καθαρός χρυσός. Σύμφωνα με τους Ramage and Craddock (2000) αποτελεί την πρώτη γραπτή αναφορά καθαρισμού του χρυσού, η οποία αποδεικνύεται ότι χρησιμοποιούνταν στις Σάρδεις ήδη από τον 6^ο αιώνα π.Χ. Ο βασικός στόχος αυτής της μεθόδου ήταν να μετατρέψει το μεταλλικό άργυρο σε άλατα του αργύρου και να απομείνει ο καθαρός χρυσός.

²⁵ Διόδωρος Σικελιώτης, Ιστορική Βιβλιοθήκη 3.14



Εικόνα 3.8.8.1 Αγγείο πλινθοποίησης
(Ramage and Craddock, 2000).



Εικόνα 3.8.8.2 Κατεστραμμένη κάμινος εξευγενισμού χρυσού
στις Σάρδεις (Ramage and Craddock, 2000).

Αμαλγαματοποίηση

Ο Βιτρούβιος και ο Πλίνιος περιγράφουν τη χρήση του υδράργυρου για τον εξευγενισμό του χρυσού. Ο υδράργυρος σχηματίζει σύμπλοκα με το χρυσό και έτσι ο χρυσός αποχωρίζεται από τα άλλα μέταλλα, δημιουργώντας αμάλαμα (ένωση χρυσού-υδραργύρου). Στη συνέχεια για να διαχωριστεί ο χρυσός από τον υδράργυρο, το αμάλαμα συμπιεζόταν μέσα σε δέρματα ζώων (διύλιση). Η παλαιότερη όμως αναφορά για αμαλγαματοποίηση με υδράργυρο για την εξαγωγή χρυσού από μετάλλευμα είναι του al-Hamdani από την Υεμένη τον 10^ο αιώνα μ.Χ. (Craddock, 2000). Είναι πιθανό όμως στην αρχαιότητα να γινόταν αμαλγαματοποίηση με τη χρήση μολύβδου αντί για υδράργυρο (Aitchison, 1960; Ramage and Craddock, 2000).

Συγκραμάτωση (agglomerate)

Κατά τη συγκραμάτωση ο χρυσός τήκεται στους 1063°C, όπου οι ψηφίδες που προκύπτουν μετά τη θραύση και το πλύσιμο του μεταλλεύματος συνενώνονται (Ramage and Craddock, 2000). Η συγκραμάτωση είχε καλύτερα αποτελέσματα με την προσθήκη μεταλλικού Pb ή Sb ή σε μορφή ενώσεων (οξειδίων). Λάμβανε χώρα συνήθως στο εσωτερικό του χωνευτηριού.

3.9 Μεταλλουργικές Σκωρίες

Ως σκωρία ονομάζουμε το στερεό υλικό που προκύπτει από την πήξη ενός λιωμένου πυριτικού υλικού ή μίγματος πυριτικών υλικών, που εμπεριέχει οξείδια, φωσφορικές ενώσεις, βορικά άλατα, σουλφίδια, ανθρακικά ορυκτά ή καθαρά μέταλλα (Bachmann, 1982). Πολλά από τα υλικά που εμπεριέχει ίσως να μην έφθασαν το σημείο τήξης τους και παραμένουν άτηκτα μέσα στη μάζα της σκωρίας. Αποτελούν σημαντικά στοιχεία και αποδείξεις κάθε αρχαίας μεταλλουργικής διαδικασίας.

Σύμφωνα με τον Bachman (1982) οι σκωρίες διακρίνονται σε:

- Φυσικές: Δημιουργούνται στη φύση από την κρυστάλλωση του μάγματος ή σε τηκτίτες
- Οικιακές ή σκωρίες από καταστροφικό γεγονός: Δημιουργούνται είτε κατά την καταστροφή κτηρίων από φωτιά από την τήξη του αργιλικού υλικού των τούβλων είτε στο εσωτερικό των οικιακών φούρνων ή άλλων οικιακών εγκαταστάσεων με φωτιά.
- Βιομηχανικές: Δημιουργούνται στο εσωτερικό κεραμικών καμίνων, ασβεστοκαμίνων,
- Μεταλλουργικές: Οι μεταλλουργικές σκωρίες ή έλκυσμα αποτελούν το τήγμα που παράγεται σε πυρομεταλλουργική κάμινο.

Ειδικά οι μεταλλουργικές σκωρίες διακρίνονται επιμέρους σε:

- ✓ Μεταλλικές εκκαμίνευσης χαλκού, μολύβδου, κασσίτερου κτλ.
- ✓ Μεταλλικές που προκύπτουν από τον καθαρισμό του μετάλλου, ανάμειξη κτλ.
- ✓ Παραγωγής σιδήρου
- ✓ Επεξεργασίας σιδήρου

Με βάση τη μορφολογία τους οι μεταλλουργικές σκωρίες μπορούν να διακριθούν σε συμπαγείς, ημισυμπαγείς, σκωριώδεις και υαλώδεις (Bachmann, 1982; Nerantzis, 2009a). Επίσης, οι σκωρίες διακρίνονται σε αυτές που δημιουργούνται στο εσωτερικό χωνευτηριού (crucible slags), στο εσωτερικό της μεταλλουργικής καμίνου (furnace slags) και στις σκωρίες έκχυσης από την κάμινο (tapped slags). Οι σκωρίες έκχυσης παρουσιάζουν χαρακτηριστικές μορφές ροής εξαιτίας του τρόπου δημιουργίας τους. Επίσης, οι σκωρίες μπορούν να κατανεμηθούν με βάση την οξείδωση της επιφάνειάς τους, την ετερογένειά τους, το ειδικό τους βάρος, ακόμη και από τα εγκλείσματα που περιέχουν. Βασικό κριτήριο ταξινόμησής του είναι η ορυκτολογική τους σύσταση.

3.9.1 Ορυκτά Μεταλλουργικών Σκωριών

Οι σκωρίες είναι κυρίως πυριτικά συντήγματα. Τα πιο κοινά ορυκτά των μεταλλουργικών σκωριών σύμφωνα με τον Bachmann (1982) είναι τα εξής:

Πυριτικά Ορυκτά

Χαλαζίας: Ο χαλαζίας και ιδιαίτερα το πολύμορφο του χριστοβαλίτης συναντώνται σε σκωρίες με υψηλό ποσοστό SiO_2 με τη σύγχρονη παρουσία του φαυαλίτη και πυρόξενου.

Φαυαλίτης: Αποτελεί μία από τις πιο κοινές ορυκτές φάσεις που συναντώνται στις μεταλλουργικές σκωρίες. Έχει χημικό τύπο FeSiO_4 και αποτελεί το μόνο πραγματικό συστατικό του δυαδικού συστήματος FeO-SiO_2 . Σε σκωρίες πλούσιες σε SiO_2 με υψηλές περιεκτικότητες σε MgO ή/και CaO είναι δυνατό να σχηματιστούν πυρόξενοι πλούσιοι σε Fe, όπως ο υπερσθενής $(\text{Fe,Mg})_2\text{Si}_2\text{O}_6$ ή ο εδενβεργίτης $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$.

Βιλλεμίτης: Έχει χημικό τύπο Zn_2SiO_4 και συναντάται σε σκωρίες μολύβδου όπου χρησιμοποιείται μετάλλευμα με υψηλές περιεκτικότητες σε ZnO . Κρυσταλλώνεται πριν από το φαυαλίτη, χωρίς εγκλείσματα και με αρκετό ποσοστό πολλές φορές σε FeO .

Μοντισελίτης: Έχει χημικό τύπο $(\text{Fe, Mg, Mn}) \text{CaSiO}_4$. Παρατηρείται σε σκωρίες μολύβδου με χαμηλό ποσοστό σε SiO_2 και υψηλό σε CaO .

Κιρσταϊνίτης: Έχει χημικό τύπο CaFeSiO_4 και ανήκει στην ομάδα του ολιβίνη. Αν και συναντάται σπάνια στη φύση, είναι συχνός στις σκωρίες με αρκετό Ca και Fe.

Πυρόξενος: Έχουν χημικό τύπο $(\text{Fe, Mn, Mg}) \text{CaSi}_2\text{O}_6$ και είναι αρκετά συχνοί σε σκωρίες μετάλλων. Οι αλκαλικοί πυρόξενοι δεν συναντώνται, διότι απαιτείται το Al_2O_3 το οποίο είναι πολύ λίγο στις σκωρίες.

Υαλώδης μάζα: Δημιουργείται από την απότομη πήξη του τήγματος. Συνήθως έχει σύσταση ανάλογη του ανορθίτη.

Οξειδία

Βουσίτης: το πιο κοινό σιδηρούχο οξείδιο (FeO) σε σκωρίες υψικαμίνων, αλλά και χαλκού ή μολύβδου. Είναι δυνατό σε αναγωγικές συνθήκες να περιέχει Mn, Mg, Ca, Ti, Fe, Cr, Al ή Si.

Μαγνητίτης: Ο Μαγνητίτης συναντάται σε σκωρίες με υψηλό ποσοστό σε FeO . Παρατηρείται στο πυριτικό υλικό ως κόκκος, σκελετόμορφος ή ιδιόμορφος κρύσταλλος.



Σπινέλιος: Οι σπινέλιοι σχηματίζουν στις σκωρίες μεικτούς κρυστάλλους για αυτό και παρατηρείται ζώνωση στη μάζα τους συνήθως διαφορετικής σύστασης.

Σουλφίδια

Οι μεταλλουργικές σκωρίες περιέχουν σουλφίδια στις περιπτώσεις που στην εκκαμίνευση χρησιμοποιείται μετάλλευμα σουλφιδίων.

Σουλφίδια του χαλκού: Τα πιο κοινά σουλφίδια του χαλκού σε σκωρίες είναι ο κοβελλίνης, ο χαλκοσίνης, ο βορνίτης, ο χαλκοπυρίτης και ο κουβανίτης.

Σουλφίδια του σιδήρου: Συναντώνται σε σκωρίες του μολύβδου ή πιο σπάνια του χαλκού, κυρίως ο μαγνητοπυρίτης.

Σουλφίδια του μολύβδου: Συναντώνται σχετικά σπάνια και μόνο σε περιπτώσεις με υψηλό ποσοστό PbO στο εσωτερικό του τήγματος.

Σουλφίδια του ψευδαργύρου: Δημιουργούνται μόνο σε σκωρίες με υψηλό ποσοστό Zn και S. Έχουν παρατηρηθεί σε πολύ μικρό ποσοστό σε σκωρίες του Λαυρίου.

Αντιμονίδια και Αρσενίδια

Προκύπτουν από μετάλλευμα με υψηλές περιεκτικότητες ορυκτών του Sb ή του As. Αποτελούν παράγοντες που δυσχεραίνουν την εκκαμίνευση.

Μέταλλα

Μεταλλικός μόλυβδος (Pb): Ο μόλυβδος συναντάται αρκετά συχνά στις σκωρίες. Προέρχεται από την αναγωγή κυρίως των οξειδίων του.

Μεταλλικός χαλκός (Cu): Συναντάται στις περισσότερες εκκαμινεύσεις χαλκού ως σφαιρίδια, σταγόνες ή κοκκία από ένα έως μερικά χιλιοστά διάμετρο.

Μεταλλικός σίδηρος (Fe): Ο μεταλλικός σίδηρος συναντάται κυρίως σε καμίνους παραγωγής σιδήρου ως σπογγώδεις μάζες ή κονδύλους.

Δευτερογενή Ορυκτά Σκωριών

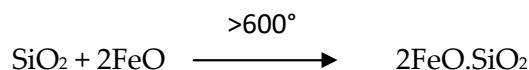
Η οξείδωση των σκωριών παράγει μία σειρά από δευτερογενή ορυκτά. Κυρίως τα σουλφίδια μετατρέπονται σε σουλφοάλατα. Οι περισσότερες αρχαίες σκωρίες χαλκού χαρακτηρίζονται από τις πράσινες εξωτερικές αποχρώσεις τους εξαιτίας των χλωριδίων, των σουλφοαλάτων και των ανθρακικών ενώσεων που

παράγονται δευτερογενώς. Τέλος, οι σκωρίες που περιέχουν οξειδία του σιδήρου αποκτούν εξωτερικά χαρακτηριστικές αποχρώσεις του καστανού χρώματος.

3.9.2 Σκωρίες των μετάλλων της αρχαιότητας

Σκωρίες Χαλκού

Η μεταλλουργική σκωρία κατά την εκκαμίνευση οξειδίων του Cu παράγεται με την ακόλουθη διαδικασία:



Οι μη σιδηρούχες σκωρίες περιέχουν κυρίως φαυαλίτη και λιγότερο πυρόξενους. Συνήθως η περιεκτικότητα σε Cu είναι χαμηλότερη του 1% (Tylecote, 1987). Μέσα στη μάζα τους είναι έντονη η παρουσία φαυαλίτη και οξειδίων του σιδήρου, κυρίως βουσιτίτη ή μαγνητίτη.

Η εκκαμίνευση σουλφιδίων του χαλκού παράγει μία μεγάλη ποικιλία προϊόντων, όπως σκωρίες, σκωρίες με matte, υπολείμματα μεταλλεύματος και πιθανώς σκωρίες spreiss. Ομοιάζουν με τις σκωρίες Pb-Ag. Ο Cu παρουσιάζεται υπό μορφή σταγονιδίων, οξειδίων ή ακόμη και σουλφιδίων. Πολλές φορές δημιουργείται χαλκοπυρίτης, νεοδιγενίτης ή και κυπρίτης.

Σκωρίες Μολύβδου-Αργύρου

Ο Fe στις μεταλλουργικές σκωρίες μολύβδου-αργύρου σχηματίζει πυριτικά ορυκτά όπως φαυαλίτη, μοντισελίτη, εδενβεργίτη και μελίλιθος, που μπορεί να περιέχουν Zn που υπήρχε στο μέταλλευμα και δεν εξατμίστηκε κατά την εκκαμίνευση. Επίσης σχηματίζει οξειδία (βουσιτίτη, μαγνητίτη). Ο Zn μπορεί να δημιουργήσει σφαλερίτη και βουρτσιτίτη ή να περιληφθεί σε σπινέλιους.

Σκωρίες Σιδήρου

Οι σκωρίες του σιδήρου μπορούν να διακριθούν σε αυτές που προκύπτουν κατά τη διάρκεια της εκκαμίνευσης και σε αυτές που προκύπτουν κατά τη σφυρηλάτηση του συντήγματος. Είναι οι πιο συχνές σκωρίες σε αρχαιολογικούς χώρους.

Η σκωρία του σιδήρου εξέρχεται από τη μεταλλουργική κάμινο μόλις η θερμοκρασία φθάσει και ξεπεράσει τους 1150°C, το οποίο είναι απαραίτητο για να αναχθούν τα οξειδία του σιδήρου σε μεταλλικό σίδηρο. Ο παραγόμενος σίδηρος είναι σε στερεά μορφή μέσα σε ένα σπογγώδες σύντηγμα. Το σύντηγμα

σφυρηλατείται όσο η σκωρία είναι σε υγρή ή στερεή μορφή προκειμένου να απομείνει μόνο ο μεταλλικός σίδηρος.

Σκωρίες Speiss

Οι σκωρίες speiss διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, στις σιδηρούχες και σε αυτές των βασικών μετάλλων. Οι σκωρίες speiss αποτελούν μεταλλικά κράματα σιδήρου ή χαλκού με αρσενικό και/ή αντιμόνιο. Για να δημιουργηθεί speiss θα πρέπει κατά την εκκαμίνευση χαλκού, μολύβδου-αργύρου να υπάρχει αρκετή ποσότητα σε αρσενικό ή/και αντιμόνιο. Μικρές ποσότητες αυτών των στοιχείων θα απορροφηθούν από το matte (Bachmann, 1982). Έχουν μεγάλο ειδικό βάρος και κατακάθονται κάτω από τη σκωρία στο εσωτερικό της καμίνου (Εικ. 3.9.2.1).



Εικόνα 3.9.2.1 Διαστρωμάτωση στο εσωτερικό της μεταλλουργικής καμίνου με τα ειδικά βάρη των επιμέρους στρωμάτων σε παρένθεση (Τροποποιημένο από Tylecote et al, 1997).

3.9.3 Παράμετροι μελέτης των μεταλλουργικών σκωριών

Ρυθμός κρυστάλλωσης

Ο ρυθμός κρυστάλλωσης των μεταλλουργικών σκωριών αποτελεί ένα δείκτη για τη θέση δημιουργίας των σκωριών σε σχέση με τη μεταλλουργική κάμινο. Ένα από τα πιο βασικά εργαλεία στη μελέτη του ρυθμού κρυστάλλωσης



των μεταλλουργικών σκωριών είναι η μορφή των κρυστάλλων του ολιβίνης (Εικ. 3.9.3.1), όπως αυτή περιγράφεται από κρυστάλλωση σε συνθήκες εργαστηρίου (Donaldson, 1976). Στο παρόν πόνημα τα ορυκτά των ισόμορφων παραμείξεων του ολιβίνης που μελετώνται είναι ο φαυαλίτης (Fe_2SiO_4), ο μοντισελλίτης (CaMgSiO_4) και ο κιρσταϊνίτης (CaFeSiO_4). Αν και τα σχήματα των

Εικόνα 3. 9.3.1 Κρύσταλλοι ολιβίνης ανάλογα με το ρυθμό ψύξης (Donaldson, 1976).

κρυστάλλων αυτών των ορυκτών του ολιβίνη είναι πάρα πολλά, είναι δυνατό στις δύο διαστάσεις της λεπτής τομής να κατανεμηθούν σε 10 τύπους σχημάτων (Donaldson, 1976). Αυτά είναι τα παρακάτω:

1. Πολύεδρα Ολιβίνη (Polyedral Olivine)

Οι κρύσταλλοι έχουν καλά σχηματισμένες έδρες με ίση περίπου διάμετρο ή είναι πινακοειδείς. Η ταχύτητα κρυστάλλωσης ($0,5^{\circ}\text{C/h}$) είναι αρκετά μικρή ώστε να διαμορφωθούν όλες οι έδρες του κρυστάλλου.

2. Κοκκώδης Ολιβίνης (Granular Olivine)

Οι περισσότεροι κρύσταλλοι είναι κοκκώδεις με ίση περίπου διάμετρο. Επίσης έχουν όμοια περιεχόμενα αποστρογγυλεμένα ναλώδη εγκλείσματα.

3. Σκαφοειδής Ολιβίνης (Hopper Olivine)

Οι κρύσταλλοι έχουν περίπου ίσες διαμέτρους και παρουσιάζουν ποικιλία στην τελειότητα του σχήματός τους. Πολλοί κρύσταλλοι έχουν το χαρακτηριστικό σχήμα, με τμήματα του κρυστάλλου να «λείπουν». Η ποσότητα των τμημάτων που «λείπουν» από τη μάζα τους συνδέεται με την ταχύτητα κρυστάλλωσης. Αν λείπουν μόνο μερικά τμήματα από το εξωτερικό τους περίβλημα η ταχύτητα κρυστάλλωσης κυμαίνεται από $2,5-10^{\circ}\text{C/h}$. Αν ξεκινούν να λείπουν τμήματα και από τον πυρήνα τους η ταχύτητα βρίσκεται μεταξύ $7-20^{\circ}\text{C/h}$, ενώ αν λείπει όλος ο πυρήνας η ταχύτητα είναι $15-30^{\circ}\text{C/h}$. Ο τελευταίος αυτός τύπος είναι ένα επίπεδο πριν από το σχηματισμό σκελετόμορφου ολιβίνη.

4. Αλυσιδωτός Ολιβίνης (Chain Olivine)

Αποτελείται από σκελετόμορφους επιμηκυμένους κρυστάλλους. Μοιάζουν με τα πολύεδρα ολιβίνη, αλλά με τον πυρήνα τους να λείπει και χωρίς να έχουν διαχωριστεί σε μεμονωμένους κρυστάλλους πολυέδρων. Αναπτύσσονται σε τυχαία ή παράλληλη διάταξη. Οι κρύσταλλοι έχουν σχήμα του γράμματος Η. Η ταχύτητα κρυστάλλωσης κυμαίνεται σε $40-50^{\circ}\text{C/h}$. Πολλές φορές διατάσσονται παράλληλα, έτσι ώστε οι κρύσταλλοι σχήματος Η να συνδέονται μεταξύ τους με μικρές «γλώσσες». Αυτή είναι μία κρυσταλλική δομή που δείχνει σχετικά ταχεία κρυστάλλωση της τάξης των 80°C/h .

5. Δικτυωτός Ολιβίνης (Lattice Olivine)

Αυτή η μορφή κυριαρχείται από λεπτόκοκκο δενδριτικό ολιβίνη ή δικτυωτό. Η ταχύτητα κρυστάλλωσης είναι περίπου 300°C/h .

6. Πεπλατυσμένος Ολιβίνης (Plate Olivine)

Αυτή η μορφή αποτελείται από δύο ή περισσότερους πεπλατυσμένους κρυστάλλους ολιβίνη.

7. Διακλαδιζόμενος Ολιβίνης (Branching Olivine)

Αυτός ο τύπος περιέχει τρεις ξεχωριστές μορφές ολιβίνη. Η μία αποτελείται από κεκλιμένους κρυστάλλους κατά 30° ή λιγότερο κατά την κατεύθυνση ανάπτυξης, η άλλη από κεκλιμένους κρυστάλλους κατά 60° προς το c άξονα και η τελευταία παρουσιάζει παράλληλη ανάπτυξη κρυστάλλων που μοιάζουν σαν ράβδοι.

8. Ακτινωτός Ολιβίνης (Radiate Olivine)

Ο ακτινωτός ολιβίνης σχηματίζει σφαιρικά συσσωματώματα με διάμετρο μέχρι και 0,5mm και συναντάται στα άκρα των βασαλτικών μαξιλαροειδών λαβών.

9. Ολιβίνης μορφής φτερού (Feather Olivine)

Αυτή η μορφή του ολιβίνης παρουσιάζει σχήματα κρυστάλλων που μοιάζουν σε φτερό. Δημιουργούνται σε συνθήκες πολύ απότομη ψύξης 1450°C/h .

10. Ολιβίνης με σχήμα ουράς χελιδονιού (Swallow-Tail Olivine)

Σε αυτή τη μορφή του ολιβίνης από έναν κρύσταλλο με σχηματισμένες έδρες δημιουργούνται 4 ξεχωριστές ίνες, δίνοντας έτσι ένα σχήμα που ομοιάζει με ουρά χελιδονιού.

Οι ρυθμοί ψύξης των παραπάνω κατηγοριών των κρυστάλλων του ολιβίνης προκύπτουν στατιστικά από παρατηρήσεις σε βασάλτες, περιδοτίτες, υποθαλάσσιες λάβες, σεληνιακούς βασάλτες, υλικό μετεωριτών, βασικές και υπερβασικές διεισδύσεις και από την ταχύτατη κρυστάλλωση σκελετικών και δενδριτικών ολιβινών σε πλουτωνίτες (Donaldson, 1976). Οι Ettler et al (2009) υποστηρίζουν ότι ο ρυθμός κρυστάλλωσης των σκωριών είναι σαφώς ταχύτερος από αυτές που προτείνει ο Donaldson (1976). Για παράδειγμα οι σκαφοειδείς κρύσταλλοι και τα πολύεδρα ολιβίνη δημιουργούνται σε ρυθμούς 100°C/h , όταν η σκωρία εξέρχεται από την οπή της καμίνου. Αντίθετα ο Donaldson (1976) προτείνει ρυθμό ψύξης για τη δημιουργία τέλεια κρυσταλλωμένων σκαφοειδών κρυστάλλων περίπου 5°C/h , που ουσιαστικά αυτό απαιτεί 10 ώρες για να ψυχθεί η σκωρία, σύμφωνα με τη βαθμίδα που αναφέρει ο Bachmann (1982). Επίσης, είναι δυνατή η ύπαρξη δύο διαφορετικών γενεών κρυστάλλων που ανταποκρίνονται σε διαφορετικούς ρυθμούς ψύξης ανάλογα με τη θέση ως προς την εξωτερική επιφάνεια της σκωρίας.

Γενικά η ψύξη των μεταλλουργικών σκωριών είναι ένα σύνθετο πρόβλημα που εξαρτάται και από τη χημική σύσταση του τήγματος και ο ρυθμός της αποτελεί μία σχετική παράμετρο υποβοηθητική για το χαρακτηρισμό της εκκαμίνευσής.

Το ιξώδες αποτελεί μία φυσική παράμετρο πολύ χρήσιμη στην κατανομή των μεταλλουργικών σκωριών. Ορίζεται ως η αντίσταση που παρουσιάζει κάποιο ρευστό στη ροή εξαιτίας των εσωτερικών τριβών των μορίων του από δυνάμεις συνοχής. Τα οξείδια CaO , MgO , FeO , MnO καθώς και τα αλκαλικά οξείδια τείνουν να μειώνουν το ιξώδες των σκωριών αυξάνοντας έτσι την ευκολία ροής τους, σε αντίθεση με τα SiO_2 και Al_2O_3 , που τείνουν να το αυξάνουν (Bachmann, 1982). Έτσι, ο συντελεστής ιξώδους των σκωριών μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο που προτείνεται από το Bachmann (1982):

$$\text{Συντελεστής Ιξώδους (v.i.)} = \text{CaO} + \text{MgO} + \text{FeO} + \text{MnO} + \text{Alk}_2\text{O} / \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$$

Ο υπολογισμός του ιξώδους δίνεται και από τον τύπο των Giordano et al (2006), που εκφράζεται ως ο λογάριθμος του ιξώδους με μονάδες Pa s:

$$\log_{10}\eta = b_1 + (b_2 \cdot b_3) / (b_3 + \text{SM}) + b_4$$

όπου b_1 , b_2 , b_3 , b_4 είναι παράμετροι που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του μοντέλου, SM ο τροποποιητής της δομής (Structure Modifier) που υπολογίζεται ως άθροισμα των mol% ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{FeO} \cdot 0.5$). Αντίστοιχα οι συντελεστές b_1 , b_2 , b_3 , b_4 υπολογίζονται σύμφωνα με τους Giordano et al (2006) από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$b_1 = \frac{[-33.5556 + 0.0351623 \cdot T]}{[1 - 0.0022362 \cdot T - 0.00000166697 \cdot T^2]}$$

$$b_2 = \frac{[-93.6494 + 0.2317411 \cdot T]}{[1 - 0.0054597 \cdot T + 0.00001361072 \cdot T^2]}$$

$$b_3 = \frac{[45.575455 - 0.0780935 \cdot T]}{[1 - 0.0036108 \cdot T - 0.00000002170 \cdot T^2]}$$

$$b_4 = -0.00001292391 \cdot \left(\frac{\text{AE}}{\text{SM}} \right) \cdot T^2 + 0.03577545 \cdot \left(\frac{\text{AE}}{\text{SM}} \right) \cdot T - 24.3366274 \cdot \left(\frac{\text{AE}}{\text{SM}} \right)$$

Όπου $\text{AE} = \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3$.

Ο συντελεστής ιξώδους των σκωριών (v.i.) κυμαίνεται γενικώς μεταξύ 0,5-1,0 περίπου. Όσο πιο χαμηλός είναι τόσο πιο υψηλό είναι το ιξώδες της σκωρίας, άρα και μικρή η ευκολία ροής της. Βέβαια, σημαντικός παράγοντας είναι και η θερμοκρασία. Αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μείωση του ιξώδους, καθώς οι δεσμοί μεταξύ των ατόμων χαλαρώνουν. Βέβαια, οι αρχαίοι μεταλλουργοί δεν

μπορούσαν να πετύχουν στη μεταλλουργική κάμινο θερμοκρασίες άνω των 1300-1400°C. Για να μειώσουν λοιπόν το ιξώδες, στις συγκεκριμένες αναγωγικές συνθήκες, προσέθεταν το ανάλογο υλικό, το επονομαζόμενο συλλίπασμα. Βασικός στόχος ήταν να παραχθεί ο φαύαλίτης από το τήγμα, ο οποίος έχει χαμηλό σημείο τήξης (1200°C σε αντίθεση με άλλα μέλη των ολιβινών, όπως ο φορστερίτης, 1900°C) και θα εξέρεε από την κάμινο, μεταφέροντας τα ανεπιθύμητα οξειδία. Σε περιπτώσεις μεταλλεύματος με υψηλό FeO ως συλλίπασμα προστίθεται το SiO₂, κατά κόρον χαλαζίας. Αν το μετάλλευμα ήταν πλούσιο σε SiO₂, τότε έπρεπε να προστεθεί FeO, υπό μορφή ορυκτών του σιδήρου, όπως γκαϊτίτης, σιδηρίτης κ.α. Βέβαια, πολλές φορές στο μετάλλευμα λειτουργούσε η λεγόμενη αυτολίπανση (self-fluxing), όπου το μετάλλευμα περιείχε τις ιδανικές αναλογίες για την παραγωγή του φαύαλίτη.

Χημικές παράμετροι σκωριών

Η χημική ανάλυση δειγμάτων σκωριών είναι δυνατό να προσδώσει σημαντικές πληροφορίες για το μετάλλευμα, τις συνθήκες εκκαμίνευσης, αλλά και για τη χρήση επιπρόσθετων υλικών, όπως μολύβδου για την απορρόφηση των ευγενών μετάλλων.

Οι παράγοντες F, G και S είναι αρκετά χρήσιμοι για το χαρακτηρισμό του χημισμού του τήγματος (Charlton, 2007). Ο παράγοντας F υπολογίζεται από το πηλίκο της περιεκτικότητας του οξειδίου του πυριτίου προς αυτήν του οξειδίου του αργιλίου.

$$F = \text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$$

Ο παράγοντας F συντελεί στην αναγνώριση διαφορετικών μεταλλευμάτων κατά την εκκαμίνευση. Επίσης επηρεάζεται από το υλικό επένδυσης της καμίνου.

Ο παράγοντας G υπολογίζεται από τον τύπο:

$$G = (\text{CaO} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O} + \text{MgO}) / (\text{FeO} + \text{MnO} + \text{BaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{PbO})$$

Υπολογίζει το ποσοστό υάλου στη σκωρία θέτοντας τα οξειδία της καύσιμης ύλης στον αριθμητή και τα οξειδία του μεταλλεύματος στον παρονομαστή.

Ο παράγοντας S ανταποκρίνεται στην ιδανική δημιουργία φαύαλιτικής σκωρίας, την περιεκτικότητα του οξειδίου του πυριτίου με τη μοριακή αναλογία FeO / SiO₂ στο φαύαλίτη και διαιρώντας τα οξειδία που είναι δυνατό να εισέλθουν στο κρυσταλλικό του πλέγμα:

$$S = 2,39 \times \text{SiO}_2 / (\text{FeO} + \text{MnO} + \text{MgO} + \text{CaO})$$

Όταν ο παράγοντας S ισούται με 1 τότε έχουμε καθαρά φαυλιτική σκωρία. Μεγαλύτερος του 1 η σκωρία είναι υαλώδης, ενώ μικρότερος του 1 το τήγμα εμπλουτίζεται κυρίως σε βουσίτη. Οι αναγωγικές συνθήκες συνδέονται με αυτό το δείκτη (Anguilano, 2010).

3.9.4 Μεταλλουργικά κέντρα της αρχαιότητας

Σε πολλές περιοχές του ελληνικού χώρου εντοπίζονται υπολείμματα αρχαίας μεταλλουργικής δραστηριότητας. Στις θέσεις αυτές τα υπολείμματα μπορεί να περιορίζονται είτε σε μερικές δεκάδες τεμάχια μεταλλουργικών σκωριών που προέρχονται από δοκιμαστική εκκαμίνευση για έλεγχο της περιεκτικότητας του μεταλλεύματος είτε να αποτελούν μεγάλα μεταλλουργικά κέντρα με αρκετούς τόνους σκωριών, καμίνους, πλυντήρια μεταλλεύματος και άλλα σημαντικά στοιχεία μεταλλουργίας.

Από τη δεκαετία του 1970 πολλές προσπάθειες πραγματοποιήθηκαν από γεωεπιστήμονες (Παπασταματάκη, 1975; Μπασιάκος, 1993) για την καταγραφή, την ενδελεχή περιγραφή τους και τη δημιουργία αναλυτικών καταλόγων των θέσεων μεταλλουργίας της αρχαιότητας. Παρακάτω παρατίθεται ένας αναλυτικός πίνακας (Πίν. 3.9.4.1) με μεταλλουργικά κέντρα και θέσεις μεταλλουργίας της αρχαιότητας στη Βόρεια Ελλάδα, όπως προκύπτει βιβλιογραφικά. Η ελλιπής μελέτη κάποιων θέσεων καθιστά δύσκολο το συσχετισμό τους με συγκεκριμένη μεταλλευτική περιοχή της αρχαιότητας.

Πίνακας 3.9.4.1 Περιοχές εύρεσης μεταλλουργικών υπολειμμάτων στη Βόρεια Ελλάδα.

Περιοχή	Μεταλλουργία	Ευρήματα	Χρονική Περίοδος	Πηγή
Εχίνος, Θέρμες, Κιμμέρια (Ξάνθη)	-	Σκωρίες, εγκαταστάσεις καμινείας, ακροφύσια	-	Παπασταματάκη, 1975 Σταυροπόδης, 1983 Wagner and Weisgerber 1988
Θάσος	Fe, Cu	Σκωρίες	-	Photos et al, 1986 Nerantzis and Papadopoulos, 2013 Nerantzis et al, 2016
Σκωρίδια, Αερμόλα, Παδιά, Σκρες (Θάσος)	Pb-Ag	Σκωρίες, υπολείμματα καμίνων	Ελληνιστική-Βυζαντινή	Wagner and Weisgerber, 1988
Μακρυχώρι (Καβάλα)	Fe, Ag-Au	Σκωρίες, υπολείμματα καμίνου, speiss	Οθωμανική	Παπασταματάκη, 1975 Nerantzis, 2009a
Παλ. Καβάλα, Άνω Λεύκη (Καβάλα)	Ag, Au	Σκωρίες, speiss	Αρχαϊκή-Οθωμανική	Παπασταματάκη, 1975 Photos et al, 1989

Φίλιπποι (Καβάλα)	-	Σκωρίες	-	Gentner et al, 1980
Δωμάτια, Αγ. Παρασκευή, Ελευθερούπολη, Σιδηροχώρι (Καβάλα)	Fe	Σκωρίες	-	Παπασταματάκη, 1975 Σταυροπόδης, 1983
Λόφος Σίνα (Παγγαίο)	Cu, Au, Ag	Σκωρίες, τριπτήρες	-	Αναφέρονται στο παρόν
Παλαιοχώρι (Παγγαίο)	Cu, Au, Ag	Σκωρίες	-	Αναφέρονται στο παρόν
Νικήσιανη (Παγγαίο)	Cu, Au, Ag	Σκωρίες, , υπολείμματα καμίνου, speiss, τριπτήρες	-	Αναφέρονται στο παρόν
Αυλή (Παγγαίο)	Cu, Au, Ag	Σκωρίες, speiss	-	Αναφέρονται στο παρόν
Βαλτούδα	Cu, Au, Ag	Σκωρίες, speiss, κάμινοι, τριπτήρες	Ρωμαϊκή	Αναφέρονται στο παρόν
Μουσθένη (Παγγαίο)	Cu, Au, Ag	Σκωρίες, τριπτήρες	-	Αναφέρονται στο παρόν
Αβγό (Παγγαίο)	Cu, Au, Ag	Σκωρίες	Ρωμαϊκή	Αναφέρονται στο παρόν
Μεσορόπη (Παγγαίο)	Cu, Au, Ag	Σκωρίες, speiss, υπολείμματα καμίνου	-	Παπασταματάκη, 1975 Αναφέρονται στο παρόν
Μονή Ανάληψης (Παγγαίο)	Cu, Au, Ag	Σκωρίες, speiss	-	Παπασταματάκη, 1975 Αναφέρονται στο παρόν
Οφρύνιο (Παγγαίο)	Ag	Σκωρίες	-	Αναφέρονται στο παρόν
Ολυμπιάδα, Στρατώνι, Μεγ. Παναγιά, Μεταγκίτσι (ΒΑ Χαλκιδική)	Au-Ag, Cu	Σκωρίες	Ύστερη Βυζαντινή	Παπασταματάκη, 1975 Wagner et al, 1986 Βαβελίδης, 2010 Βαβελίδης και Μέλφος, 2012
Όλυνθος (Χαλκιδική)	Fe	Σκωρίες	-	Davies, 1932
Βροντού, Κατάφυτο, Καταπότι (Δράμα)	Fe	Σκωρίες, ακροφύσια, υπολείμματα καμίνου	Ύστερη Βυζαντινή	Παπασταματάκη, 1975 Σταυροπόδης, 1983 Nerantzis, 2009a
Βαθύτοπος (Δράμα)	Fe	Σκωρίες, υπολείμματα καμίνου, νερόμυλος	Ύστερη Βυζαντινή	Nerantzis, 2009a

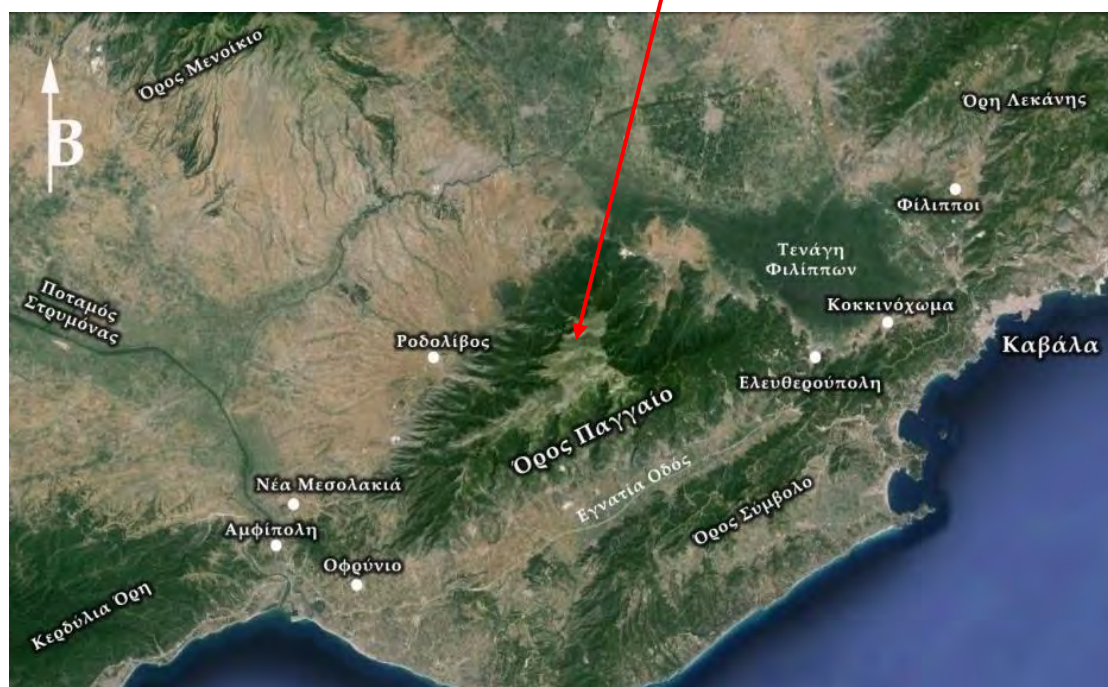


Καλλιθέα (Δράμα)	Fe	Σκωρίες	Οθωμανική-	Nerantzis, 2009a
Λευκόγεια (Δράμα)	Fe	Σκωρίες	Υστερη Βυζαντινή	Nerantzis, 2009a
Εξοχή (Δράμα)	Fe	Σκωρίες	Υστερη Βυζαντινή	Παπασταματάκη, 1975 Nerantzis, 2009a
Πανόραμα (Δράμα)	Cu	Σκωρίες	Υστερη Βυζαντινή	Nerantzis, 2009a
Μαγνησία (Δράμα)	Fe	Σκωρίες	Οθωμανική	Nerantzis, 2009a
Γραμμένη (Δράμα)	Mn	Σκωρίες	-	Παπασταματάκη, 1975
Άνω Βροντού (Σέρρες)	Fe	Σκωρίες, ακροφύσια, νερόμυλος	Υστερη Βυζαντινή- Οθωμανική	Nerantzis, 2009a
Ορεινή (Σέρρες)	Fe, Cu	Σκωρίες, εκμαγεία	Πρώιμη Βυζαντινή	Nerantzis, 2009a
Φαιά Πέτρα (Σέρρες)	Fe	Σκωρίες	Οθωμανική	Nerantzis, 2009a
Άγκιστρο, Μύλοι - Άγιος Κων/νος (Σέρρες)	Fe, Au, Ag	Σκωρίες, speiss, ακροφύσια, υπολείμματα καμίνου	Υστ. Ρωμαϊκή Βυζ.- Οθωμαν.	Chiotis et al, 1996 Nerantzis, 2009a
Ποντοκερασιά, Βάθη, Μεταλλικό (Κιλκίς)	-	Σκωρίες	-	Παπασταματάκη, 1975
Γιαννιτσά	Cu	Σκωρίες	-	Bassiakos, 1988 Μπασσιάκος, 1993
Άγιος Γερμανός, Μικρ. Πρέσπα (Φλώρινα)	Fe	Σκωρίες	-	Bassiakos, 1988 Μπασσιάκος, 1993
Περιβόλι (Γρεβενά)	-	Σκωρίες	-	Παπασταματάκη, 1975
Ρητίνη (Πιερία)	-	Σκωρίες	-	Παπασταματάκη, 1975
Φωτεινά (Πιερία)	-	Σκωρίες	-	Παπασταματάκη, 1975
Μελιβόια (Λάρισα)	-	Σκωρίες	-	Παπασταματάκη, 1975

4. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

4.1 Γεωγραφική τοποθέτηση

Η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει το όρος Παγγαίο από την Ελευθερούπολη στα ανατολικά μέχρι το Οφρύνιο και τη Νέα Μεσολακιά στα δυτικά (Εικ. 4.1.1). Στην περιοχή μελέτης περιλήφθηκε και το βορειοανατολικό τμήμα του όρους Συμβόλου λόγω της σπουδαιότητας της μεταλλευτικής περιοχής του Κοκκινοχώματος. Το όρος Παγγαίο βρίσκεται στην Ανατολική Μακεδονία και αποτελεί διακριτό ορεινό όγκο. Περιστοιχίζεται από τους ορεινούς όγκους του Μενιοκίου και του Φαλακρού στα βόρεια, τα όρη της Λεκάνης στα ανατολικά, το όρος Σύμβολο στα νότια και νοτιοανατολικά και τα όρη Κερδύλια στα δυτικά (Εικ. 4.1.2). Έχει μέγιστο άξονα με μήκος 33 km διεύθυνσης ΑΒΑ-ΔΝΔ, ενώ ο μικρότερος άξονας διεύθυνσης ΒΒΔ-ΝΝΑ έχει μήκος περίπου 14 km.



Εικόνα 4.1.1 Γεωγραφική τοποθέτηση του όρους Παγγαίου. Υπόβαθρο: Google Earth



Εικόνα 4.1.2 Τρισδιάστατη απεικόνιση της περιοχής του όρους Παγγαίου.

Το όρος Παγγαίο γειτνιάζει στα βορειοανατολικά με τα τενάγη των Φιλίππων, τα οποία πλέον καλλιεργούνται εντατικά. Νοτίως του Παγγαίου βρίσκεται η κοιλάδα των Πιερέων από όπου διέρχεται η σημερινή Εγνατία Οδός. Στο δυτικό τμήμα του βουνού κυριαρχεί ο ποταμός Στρυμόνας και η εκατέρωθεν του πεδιάδα. Ο Στρυμόνας διέρχεται από τη Νέα Μεσολακιά, τη Νέα Αμφίπολη και τα Νέα Κερδύλλια και εκβάλλει δυτικά της παραλίας Οφρυνίου (περιοχή Τούζλα).

Η κορυφή του όρους, το Μάτι, έχει υψόμετρο 1956 m (A.S.L.), με δεύτερη σε ύψος την κορυφή Αβγό (1835 m, A.S.L.)²⁶. Βόρεια της κορυφής Αβγό υπάρχει ορειβατικό καταφύγιο και χιονοδρομικό κέντρο που δεν λειτουργεί πλέον. Το Παγγαίο απλώνεται σε έκταση 340.000 στρεμμάτων με σημαντικά δασικά οικοσυστήματα. Η χλωρίδα του στα χαμηλά υόμετρα χαρακτηρίζεται από πρίνους (*Quercus Coccifer*), Γάυρους (*Carpinus*), Φράξους (*Fraxinus*), Κέδρο (*Juniperus*), Φιλύρες (*Tilia*) και πολλά άλλα, ενώ στις υψηλότερες περιοχές υφίσταται η ζώνη της Καστανιάς με Καστανιές (*Castanea sativa*), Δρυς (*Quercus*), Φουντουκιές (*Corylus*) και Οξιές (*Fagus*) και η ζώνη των ψυχρόβιων κωνοφόρων με την Ελάτη (*Abies borissi regis*), την Οξια, (*Fagus*), τον Ίταμο (*Taxus Bacata*) και τη Σημύδα (*Betula pendula*) (Παπαδόπουλος, 2000). Η πανίδα είναι επίσης πλούσια με σπάνια είδη πουλιών, ερπετών και θηλαστικών. Η μάζα του Παγγαίου χαρακτηρίζεται από έντονη ορεινή μορφολογία με βαθιές χαράδρες και χειμάρρους που δημιουργούν φαράγγια με απότομα πρανή.

Στην ορεινή μάζα δεν υφίσταται κάποιος οικισμός. Τα χωριά του Παγγαίου τοποθετούνται περιμετρικά της μάζας του. Ανήκει διοικητικά στην Περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας-Θράκης και στους Δήμους Παγγαίου με έδρα την Ελευθερούπολη και της Αμφίπολης με έδρα το Ροδολίβος.

²⁶ Ο γεωλογικός χάρτης κλίμακας 1:50.000 (Kromberg and Shnenck, 1974) έχει από λάθος ανάποδα τοποθετημένες τις κορυφές Αβγό και Μάτι.

4.2 Ιστορικά στοιχεία της μεταλλευτικής περιοχής Παγγαίου

Στην ευρύτερη περιοχή του Παγγαίου δεν έχει καταγραφεί μέχρι σήμερα σημαντική προϊστορική μεταλλευτική ή μεταλλουργική δραστηριότητα. Αντίθετα, 50 km νοτιοανατολικά του Παγγαίου, στη νήσο Θάσο, στην περιοχή Τζίνες έχουν βρεθεί και μελετηθεί Παλαιολιθικά ορυχεία ώχρας με οστέινα και λίθινα εργαλεία εξόρυξης (Koukouli-Chrysanthaki et al, 1988; Koukouli-Chrysanthaki and Weisgerber, 1999). Εξόρυξη ώχρας καταγράφεται και στο μεταλλείο μολύβδου-αργύρου στην περιοχή Ελιά Θάσου με πιθανή προϊστορική εκμετάλλευση (Βαβελίδης κ.ά., 2001).

Οι πρώτοι μόνιμοι κάτοικοι εμφανίζονται στη Μακεδονία κατά την Αρχαιότερη Νεολιθική Εποχή (6.500 π.Χ.), οι οποίοι από κυνηγοί και τροφo-συλλέκτες εξελίσσονται σε παραγωγούς τροφής με μόνιμες καλλιέργειες και εκτροφή οικόσιτων ζώων. Στο γεωγραφικό χώρο της Ανατολικής Μακεδονίας η πρωιμότερη φάση σταθερών εγκαταστάσεων εντοπίζεται στους Σιταγρούς Ι και στα αρχαιότερα στρώματα των Λιμεναριών στη Θάσο, καλύπτοντας χρονικά το τελευταίο μέρος της Μέση Νεολιθικής, από τα μέσα της 6^{ης} χιλ. μέχρι το 5300 π.Χ. (Elster and Renfrew, 2003; Papadopoulos, 2008). Η Τελική Νεολιθική συναντάται στους οικισμούς των Σιταγρών (Σιταγροί Ι) και στο Ντικιλί Τας (Ντικιλί Τας Ι) από το 5400 έως το 4700 π.Χ. (Papadopoulos, 2008).

Κατά την Πρώιμη Εποχή του Χαλκού (3200-2000 π.Χ.) καταγράφεται η ανθρώπινη παρουσία στο σπήλαιο «Αρκουδότρυπα» Γαληψού στο δυτικό τμήμα του Παγγαίου όρους (Σύρος, 2004).

Το όρος Παγγαίο ονομάζεται από τον Όμηρο (8^{ος} αιώνας π.Χ.) στην Ιλιάδα ως «Νυσήιο», όπου ο Λυκούργος κυνήγησε τις παραμάνες του Διονύσου²⁷.

Οὐδὲ γὰρ οὐδὲ Δρύαντος υἱὸς κρατερὸς Λυκόοργος
δὴν ἦν, ὅς ῥα θεοῖσιν ἐπουρανίοισιν ἔριζεν·
ὅς ποτε μαινομένοιο Διωνύσοιο τιθήνας
σεύε κατ' ἠγάθεον **Νυσήϊον**·

Επίσης, στην Κ' ραψωδία γίνεται αναφορά στο μυθικό Θράκα βασιλιά της περιοχής Ρήσο, ο οποίος περιγράφεται ως κάτοχος όπλων και άρματος από χρυσό και ασήμι²⁸.

ἐν δέ σφιν **Ῥήσος** βασιλεὺς παῖς Ἡϊονῆος.
τοῦ δὴ καλλίστους ἵππους ἶδον ἠδὲ μεγίστους·
λευκότεροι χιόνος, θείειν δ' ἀνέμοισιν ὁμοιοί·
ἄρμα δέ οἱ **χρυσῶ** τε καὶ **ἀργύρῳ** εὖ ἥσκηται·
τεύχεα δὲ **χρύσεια** πελώρια θαῦμα ἰδέσθαι...

Άρα, διαπιστώνεται ότι το Παγγαίο, ήδη από την εποχή του Ομήρου, αποκτά τον τίτλο της χρυσοφόρου περιοχής.

²⁷ Ομήρον Ιλιάδα, Ζ130-133

²⁸ Ομήρον Ιλιάδα, Κ435-439

Από τον 9^ο και 8^ο αι. π.Χ. οι Φοίνικες αρχίζουν να διαθέτουν τα προϊόντα της Ανατολής και εμφανίζονται στον ελληνικό χώρο (Wilcken, 1976). Ο ιστορικός Στράβων (64 π.Χ.-21 μ.Χ.), αλλά και φιλόσοφοι όπως ο Κλήμης ο Αλεξανδρεύς (150-213 μ.Χ.) και ο Πλίνιος (23-79 μ.Χ.), αναφέρουν ότι ο Φοίνικας Κάδμος ανακάλυψε τη μεταλλοφορία του χρυσού στο Παγγαίο.

ὥς ὁ μὲν Ταντάλου πλοῦτος καὶ τῶν Πελοπιδῶν ἀπὸ τῶν περὶ Φρυγίαν καὶ Σίπυλον μετάλλων ἐγένετο· ὁ δὲ Κάδμου [ἐκ τῶν] περὶ Θράικην καὶ τὸ Παγγαῖον ὄρος·

Στράβωνος, Γεωγραφικά, XIV, 5, 28

Κάδμος γὰρ ὁ Φοῖνιξ λιθοτομίαν ἐξεῦρεν καὶ μέταλλα χρυσοῦ τὰ περὶ τὸ Παγγαῖον.

Κλήμης, Στρωματεῖς I.16.75.8

«... auri metalla et flaturam Cadmus Phoenix ad **Pangaeum** montem (invenit) ...»

Plinius Naturalis Historia 7.56.197

Αυτές οι αναφορές, που κινούνται μεταξύ μύθου και ιστορικής πραγματικότητας, ίσως να συνδέονται με μεταφορά τεχνογνωσίας στο Παγγαίο από τους Φοίνικες. Ο μύθος εμφανίζει τους Φοίνικες ως τους πρώτους οικιστές του νησιού που βρίσκεται απέναντι από το Παγγαίο και τις θρακικές ακτές, της Θάσου²⁹ και ως πρώτους μεταλλευτές των χρυσωρυχείων του νησιού. Ηγέτης τους ο Θάσος, γιος του Φοίνικα ή του Αγήνορα ή του Ποσειδώνα. Ανάμεσα στον 8^ο και 6^ο αι. π.Χ. καταγράφεται μεταλλευτική και μεταλλουργική δραστηριότητα αποδιδόμενη στους Φοίνικες και σε άλλες περιοχές της Μεσογείου και ιδιαίτερα στο γεωγραφικό χώρο της Ισπανίας (Renzi et al, 2009; Anguilano, 2012). Παρόλα αυτά δεν έχει αποδειχθεί η παρουσία Φοινίκων στη Βόρεια Ελλάδα με αρχαιολογικά ευρήματα και δεδομένα.

Το 680 π.Χ. Πάριοι άποικοι, με αρχηγό τον Τελεσικλή, ιδρύουν τη Θάσο (Ραντοπούλου, 2008). Ταυτόχρονα με την εγκατάσταση στο νησί ξεκινά στα μέσα του 7^{ου} αιώνα π.Χ. η κατάκτηση της απέναντι θρακικής ακτής (Θασιακή περσεία), όπου οι Θάσιοι εκδιώκουν τα θρακικά φύλα προς στην ενδοχώρα και ιδρύουν μια σειρά από αποικίες (Γαληψός, Απολλωνία, Οισύμη, Νεάπολις, Στρώμη) και μικρότερα πολίσματα (Αντισάρα, Ακόντισμα, Πίστυρος) (Κουκούλη-Χρυσανθάκη, 1990). Η Θάσος αποκτά με αυτόν τον τρόπο μία ευρεία περιοχή με πλούσια ξυλεία και μεταλλεύματα.

Στο Παγγαίο καταφεύγει ο Πεισίστρατος, μετά από τη δεύτερη εκδίωξή του από την Αθήνα το 555 π.Χ., όπου ασχολείται με τα μεταλλεία χρυσού και αργύρου. Ο Montgomery (1984) υποστηρίζει ότι ο Πεισίστρατος δεν εγκαταστάθηκε στην περιοχή του Στρυμόνα για να την αποικίσει, αλλά κυρίως για τη συλλογή πλούτου για την επιστροφή του στην Αθήνα, μιας και η κύρια

²⁹ Ηρόδοτος, Ιστορίες, 2.44

πηγή αργύρου ήταν εκείνη την εποχή τα Θρακικά μεταλλεία και όχι το Λαύριο. Πιθανολογείται ότι νοικιάζει μεταλλεία από τους Θράκες ιδιοκτήτες με μία αμοιβαία επωφελή εμπορική συμφωνία (Treister, 1996). Οργανώνει λοιπόν την τρίτη επάνοδό του στην Αθήνα με μισθοφόρους που πληρώνονται με χρήματα από την Αττική και την περιοχή του Στρυμόνα, δηλαδή τις προσόδους των μεταλλείων του Λαυρίου και του Παγγαίου.

Πειθομένων δὲ τῶν Ἀθηναίων, οὕτω δὴ Πεισίστρατος τὸ τρίτον σχὼν Ἀθήνας ἐρρίζωσε τὴν τυραννίδα ἐπικουροῖσι τε πολλοῖσι καὶ χρημάτων συνόδοισι, τῶν μὲν αὐτόθεν τῶν δὲ ἀπὸ Στρυμόνος ποταμοῦ συνιόντων...

Ηροδότου Ιστορίες, 1. 64

Και πρῶτον μὲν συνώκησε πει τον Θερμαῖον κόλπον ἐκεῖθεν δε παρήλθεν εἰς τους περί Παγγαίων τόπους, ὅθεν χρηματισάμενος και στρατιώτας μισθωσάμενος, ελθὼν εἰς Ερέτρειαν ...»

Αριστοτέλης, Αθηναίων Πολιτεία, 15.2

Η πληρωμή αυτή με χρυσό και άργυρο των μισθοφόρων στρατιωτών είναι σχετικά κοινή τον 6^ο αιώνα π.Χ. Αξίζει να αναφερθεί ότι στις αρχές του ίδιου αιώνα η ανάγκη πληρωμής των μισθοφόρων του βασιλιά της Λυδίας Αλυάττη για να αντιμετωπίσει τους Μήδους οδηγεί στην ανακάλυψη ενός εύχρηστου μέσου πληρωμής, του νομίσματος (Ramage and Craddock, 2000).

Τη μεταλλευτική περιοχή του Παγγαίου ξεκινούν να εποφθαλμιούν εκτός από τους Θάσιους, οι ανεπτυγμένες οικονομίες της εποχής, οι Πέρσες και οι Αθηναίοι και από το 470 π.Χ. οι Μακεδόνες βασιλείς (Treister, 1996).

Οι Πέρσες περνούν το Βόσπορο και με στρατηγό το Μεγάβαζο κατακτούν τη Θράκη και το Μακεδονικό βασίλειο το 512-511 π.Χ. (Olbrycht, 2010). Από το 510 έως το 479 π.Χ. η περιοχή του Παγγαίου παραμένει υπό Περσική κατοχή. Ο Δαρείος μάλιστα δωρίζει στον Ιστιαίο ως ανταμοιβή για τις υπηρεσίες του στην περσική εκστρατεία, τη Μύρκινο, βορειοδυτικά του Παγγαίου, πόλη Ηδωνική και γειτνιάζουσα με τα μεταλλεία του Παγγαίου και με περιοχές πλούσιες σε ξυλεία για τη ναυπήγηση πλοίων (Treister, 1996).

Στις αρχές του 5^{ου} αιώνα π.Χ. στο θρόνο της Μακεδονίας ο Αλέξανδρος Α' (γιος του Αμύντα Α') οργανώνει και επεκτείνει το κράτος του εκδιώκοντας τους Παίονες από την κάτω κοιλάδα του Αξιού (Sprawski, 2010), τους Ηδωνούς από τη Μυγδονία και τους Πίερες από τον Όλυμπο. Τα φύλα αυτά εγκαθίστανται στην περιοχή γύρω από το Στρυμόνα. Ειδικά οι Πίερες εγκαθίστανται στην κοιλάδα νοτίως του Παγγαίου, που λαμβάνει και το όνομά τους (κοιλάδα Πιερέων), όταν εκδιώκονται από τον Αλέξανδρο Α' σύμφωνα με τον Θουκυδίδη.

«πρῶτοι ἐκτῆσαντο καὶ ἐβασίλευσαν ἀναστήσαντες μάχη ἐκ μὲν Πιερίας Πίερας, οἳ ὕστερον ὑπὸ τὸ Πάγγαιον πέραν Στρυμόνος ᾤκησαν Φάγρητα καὶ ἄλλα χωρία (καὶ ἔτι καὶ νῦν Πιερικὸς κόλπος καλεῖται ἢ ὑπὸ τῷ Παγγαίῳ πρὸς θάλασσαν γῆ).

Θουκυδίδης, Ιστοριών, 2.99

Δεν είναι δυνατόν να οριοθετήσουμε με ακρίβεια τα όρια του Παγγαίου σε αυτές τις πρώιμες περιόδους. Μελετώντας τα γραφόμενα συγγραφέων και περιηγητών τίθεται το ερώτημα αν με το όνομα αυτό αναφέρεται σε μία περιοχή που περιλαμβάνει μόνο το σημερινό όγκο του βουνού ή και τους παρακείμενους ορεινούς όγκους του Συμβόλου και της Λεκάνης ή ακόμη αν πρόκειται για το σημερινό Μενοίκιο ή Φαλακρό. Πάντως η περιγραφή του Ηροδότου (485 - 421/415 π.Χ), στο έβδομο βιβλίο του³⁰ της πορείας του Ξέρξη που περνά από τα φρούρια των Πιερέων, αφήνοντας στο δεξί του χέρι το Παγγαίο, όρος απέργων (κατεργαστών), μέγα και ψηλό, με μεταλλεία χρυσού και αργύρου είναι σχετικά ακριβής για την οριοθέτηση του σημερινού ορεινού όγκου με το όνομα Παγγαίο. Τα μεταλλεύματά του, αναφέρει, τα εκμεταλλεύονται οι Πίερες, οι Οδόμαντοι και κυρίως οι Σάτρες, ορεσίβια φυλή πολεμιστών.

Παραμειψάμενος δὲ ὁ Ξέρξης τὴν εἰρημένην, δευτέρα τούτων παραμείβετο τείχεα τὰ Πιέρων, τῶν ἐνὶ Φάγρης ἐστὶ οὖνομα καὶ ἐτέρῳ Πέργαμος. ταύτη μὲν δὴ παρ' αὐτὰ τὰ τείχεα τὴν ὁδὸν ἐποιέετο, ἐκ δεξιῆς χειρὸς τὸ **Πάγγαιον** ὄρος ἀπέργων, ἐὼν μέγα τε καὶ ὑψηλόν, ἐν τῷ **χρυσέᾳ** τε καὶ **ἀργύρεᾳ** ἐνὶ μέταλλα, τὰ νέμονται Πιέρές τε καὶ Οδόμαντοι καὶ μάλιστα Σάτραι.

Οι Ορρέσκιοι μάλιστα, γνωστοί ως Σάτρες, πιθανόν κόβουν νομίσματα (στατήρες και ημιστατήρες) μόλις ξεκίνησε το εμπόριο μεταλλευμάτων αργύρου (Hammond and Griffith, 1995).

Το 480 π.Χ. λοιπόν ο Ξέρξης διέρχεται από την περιοχή μεταξύ Στρυμόνα και Νέστου, όπου οι κάτοικοί του είναι οι Ηδωνοί στα πεδινά και οι Σάτρες στα ορεινά³¹. Οι Παίονες κατοικούσαν στη Φυλλίδα περιοχή βόρεια από το Παγγαίο, από τον Αγγίτη μέχρι το Στρυμόνα.

Την άνοιξη του 475 π.Χ. οι Αθηναίοι κάνουν αισθητή την παρουσία τους στην προσπάθεια ελέγχου της περιοχής του Στρυμόνα και του Παγγαίου. Καταλαμβάνουν το περσικό φρούριο της Ηιόνας³² με αρχηγό τον Κίμωνα γιου του Μιλτιάδη. Ο Ηρόδοτος αναφέρει ότι κατά τη διάρκεια της πολιορκίας, ο κυβερνήτης της, ο Βόγης, έσφαξε τους εναπομείναντες, πέταξε από το τείχος το χρυσό όλης της πόλης στο Στρυμόνα και έκαψε την πόλη.

«μετὰ δὲ ταῦτα τὸν χρυσὸν ἅπαντα τὸν ἐκ τοῦ ἄστεος καὶ τὸν ἄργυρον ἔσπειρε ἀπὸ τοῦ τείχεος ἐς τὸν Στρυμόνα»

Ηροδότου Πολύμνια, 107

Αυτή η επιχείρηση είναι πολύ σημαντική, γιατί για πρώτη φορά οι Αθηναίοι εμφανίζονται ως ηγεμόνες της Αθηναϊκής Συμμαχίας σε μία περιοχή σημαντική για την ξυλεία και τα μέταλλά της. Οι Αθηναίοι εγκαθιστούν αποίκους στην Ηιόνα που έγινε «εμπόριό» τους και βάση των επιχειρήσεών τους για διείσδυση στο εσωτερικό της πλούσιας περιοχής (Λαζαρίδης, 1972). Για αυτήν τη νίκη

³⁰ Ηρόδοτος, Ιστορίες, 7. 112

³¹ Ηρόδοτος, Ιστορίες, 7.110-111

³² Θουκυδίδης, Ιστοριών, 1.98; Πλούταρχος, Κίμων 7

στήθηκαν στην Αγορά των Αθηνών λίθινες στήλες που εξυμνούσαν τους αρχηγούς της. Αυτή η πράξη απεικονίζει τη σπουδαιότητα της πλουτοπαραγωγικής αυτής περιοχής, αφού κάτι τέτοιο δεν είχε γίνει ούτε για τις μεγάλες νίκες στα «Μηδικά». Σε αυτήν περιοχή ανταγωνίστριες των Αθηνών ήταν πλέον η Θάσος, οι Μακεδόνες και οι θρακικές φυλές. Οι Θράκες φαίνεται ότι συνεχίζουν απρόσκοπτα να εκμεταλλεύονται τα μεταλλεία του Παγγαίου (Hammond and Griffith, 1995), ιδιαίτερα στις απρόσιτες ορεινές περιοχές.

Το 465 π.Χ. οι Θάσιοι αποστατούν από την Αθηναϊκή συμμαχία βλέποντας τις επεκτατικές διαθέσεις των Αθηναίων στην περιοχή τους. Οι Αθηναίοι απαντούν με την αποστολή ισχυρών δυνάμεων με επικεφαλής τον Κίμωνα. Ενώ η Θάσος καταλαμβάνεται μετά από πολιορκία δύο χρόνων, οι Αθηναίοι γνωρίζουν τρομερή ήττα από τα θρακικά φύλα στην ενδοχώρα και κατασφάζονται στο Δραβήσκο. Είχαν προλάβει όμως να καταλάβουν το πόλισμα Εννέα Οδοί, τη μετέπειτα Αμφίπολη³³.

Το 437 π.Χ. οι Αθηναίοι επιστρέφουν στην περιοχή του Δυτικού Παγγαίου και ιδρύουν την Αμφίπολη (Treister, 1996) δίνοντας το στίγμα του επεκτατισμού τους στο βασιλιά της Μακεδονίας Περδίκκα Β'. Ο έλεγχος της Αμφίπολης από τους Αθηναίους ήταν εξ αρχής επισφαλής, αφού στην πόλη εγκαταστάθηκαν και πληθυσμοί από τις γειτονικές πόλεις. Έτσι, κατά τον Πελοποννησιακό Πόλεμο, το 424 π.Χ., ο Σπαρτιάτης στρατηγός Βρασίδας έρχεται σε συνεννόηση με αυτούς του πληθυσμούς και καταλαμβάνει την πόλη. Ο Αθηναίος στρατηγός και γνωστός ιστορικός Θουκυδίδης καλείται από τη Θάσο να προλάβει την κατάληψη της Αμφίπολης, αλλά το μόνο που καταφέρνει είναι να διασώσει το επίνειό της στο Στρυμονικό κόλπο την Ηιόνα. Για το λόγο αυτό καταδικάζεται σε εξορία από την Αθήνα. Αξίζει να αναφερθεί ότι ο Θουκυδίδης είχε συμφέροντα στη περιοχή του Παγγαίου, αφού διέθετε δικαιώματα εκμετάλλευσης επί των μεταλλείων.

Εν τούτω δε ο Βρασίδας δειδώς και την από της Θάσου των νέων βοήθειαν και πυνθανόμενος τον Θουκυδίδην κτήσιν τε έχειν των χρυσείων μετάλλων εργασίας εν τη περί ταύτα Θράκη και απ' αυτού δύνασθαι εν τοις πρώτοις των ηπειρωτών...

Θουκυδίδης, Ιστοριών 4.105

Η εκστρατεία του αθηναίου στρατηγού Κλέωνος στην περιοχή για την ανακατάληψη της Αμφίπολης δεν είχε θετικό αποτέλεσμα (Λαζαρίδης, 1972). Με την ειρήνη του Νικία το 421 π.Χ. οι Σπαρτιάτες ήταν υποχρεωμένοι να αποδώσουν ξανά την Αμφίπολη στους Αθηναίους³⁴. Αυτό δεν θα γίνει ποτέ μιας και οι κάτοικοι της Αμφίπολης προτιμούν τη Σπαρτιατική επικυριαρχία. Οι Αθηναίοι στο τέλος του καλοκαιριού του 414 π.Χ., με στρατηγό τον Ευετίωνα, μαζί με τον Περδίκκα και Θράκες θα προσπαθήσουν ανεπιτυχώς να ανακαταλάβουν την Αμφίπολη. Επίσης δύο άλλες προσπάθειες των Αθηναίων

³³ Θουκυδίδης, Ιστοριών, 4.102

³⁴ Θουκυδίδης, Ιστοριών 5.18

κατά τα έτη 374 π.Χ. και 370 π.Χ. με στρατηγούς το Σίμμικο και τον Πρωτόμαχο δεν στέφονται με επιτυχία (Λαζαρίδης, 1972).

Το 382 π.Χ. στις πλουτοπαραγωγικές πηγές του Κοινού των Χαλκιδέων περιλαμβάνεται και ο χρυσός του Παγγαίου που τον αξιοποιούν σε συνεργασία με τα Θρακικά φύλα, όπως αναφέρει Κλειγένης ο Ακάνθιος στο λόγο του προς τους Σπαρτιάτες.

τούτων γε μὴν ἀκολουθούντων καὶ τὰ ἐν τῷ Παγγαίῳ χρύσεια χεῖρα ἂν αὐτοῖς ἤδη ὀρέγοι.

Ξενοφάντος, Ελληνικά, V.2.17

Οι Αθηναίοι στέλνουν τον Τιμόθεο διαδοχικά 363 π.Χ. και το 360-359 π.Χ. για να ανακαταλάβει την Αμφίπολη και να διεκδικήσουν τα εκεί δικαιώματά τους, αλλά χωρίς αποτέλεσμα (Λαζαρίδης, 1972).

Ο Φίλιππος αποσύρει τη Μακεδονική φρουρά το 359 π.Χ. από την Αμφίπολη σε ένδειξη καλής θέλησης προς τους Αθηναίους. Αντιλαμβανόμενος την κομβική θέση της πόλεως σε σχέση με τα μεταλλεία του Παγγαίου και τις ξυλευτικές περιοχές την καταλαμβάνει το 357 π.Χ. και εγκαθιστά Μακεδονική φρουρά³⁵.

Το 356 π.Χ. καταλαμβάνει την αποικία που είχαν ιδρύσει οι Θάσιοι το 360 π.Χ. στη θρακική ενδοχώρα τις Κρηνίδες, μετά από πρόσκληση των ίδιων των αποίκων, που επιθυμούσαν να αντιμετωπίσουν τα θρακικά φύλα³⁶. Η πόλη αυτή που θα τη μετονομάσει σε Φιλίππους, θα αποτελέσει κομβικό σημείο στην εκμετάλλευση τόσο των μεταλλείων της Σκαπτής Ύλης, όσο και του Παγγαίου. Η πόλη των Φιλίππων θα κόβει δικό της νόμισμα με δικό της χρυσό πιθανόν μέχρι το τέλος της βασιλείας του Φιλίππου και με δικό της άργυρο πιθανόν μέχρι το 346 π.Χ. (Hammond and Griffith, 1995). Δεν υπάρχει μαρτυρία ότι το νομισματοκοπείο των Φιλίππων χρησιμοποιήθηκε για τις εκδόσεις του ίδιου του Φιλίππου, εκτός από ορείχαλκο (Hammond and Griffith, 1995). Πλέον ο Φίλιππος είναι κύριος του Παγγαίου, των μεταλλείων του και της ξυλείας του. Στην Αμφίπολη ρέει άφθονο ασήμι και χρυσός και καθίσταται το δεύτερο κυριότερο νομισματοκοπείο του Φιλίππου (Hammond and Griffith, 1995). Ο Treister (1996) υποστηρίζει ότι η περίοδος μέχρι την έλευση του Φιλίππου χαρακτηρίζεται από την εξόρυξη κυρίως του αργύρου της ευρύτερης περιοχής του Παγγαίου.

Πολύ γρήγορα όμως ο χρυσός της περιοχής θα εξαντληθεί, κάτι που θα οδηγήσει στην οργάνωση της εκστρατείας εναντίον του περσικού βασιλείου και στην υλοποίησή της από το Μ. Αλέξανδρο (Τουράτσογλου, 1992).

Η ευρύτερη περιοχή του Παγγαίου θα παραμείνει στην κατοχή του Μακεδονικού Βασιλείου μέχρι την είσοδο των Ρωμαίων στη Μακεδονία. Μετά τη συντριβή του τελευταίου Μακεδόνα βασιλιά, Περσέα στην Πύδνα το 168 π.Χ.

³⁵ Διόδωρος Σικελιώτης, Ιστορική Βιβλιοθήκη 16.8

³⁶ Διόδωρος Σικελιώτης Ιστορική Βιβλιοθήκη 16.8,

(Ellis and Walbank, 1992), το βασίλειο της Μακεδονίας διαμοιράζεται σε τέσσερις μερίδες (επαρχίες) με σημαντικότερη αυτήν με διοικητικό κέντρο την Αμφίπολη (Λαζαρίδης, 1972). Η μερίδα της Αμφίπολης περιελάμβανε τις περιοχές μεταξύ Στρυμόνα και Νέστου, καθώς και περιοχές ανατολικά του Νέστου και δυτικά του Στρυμόνα (Βισαλτία). Οι Ρωμαίοι θα σταματήσουν τη λειτουργία όλων των μεταλλείων των Μακεδόνων μέχρι το 158 π.Χ.³⁷, στο πλαίσιο της πολιτικής τους για οικονομική εξασθένιση της Μακεδονίας και αποφυγή στάσεων. Ωστόσο η συγκλητική επιτροπή θα επιτρέψει τη λειτουργία και εκμετάλλευση των μεταλλείων σιδήρου και χαλκού, καθορίζοντας το ύψος του τέλους που όφειλαν να πληρώνουν στους Ρωμαίους στο ήμισυ εκείνου που πλήρωναν στο Μακεδόνα Βασιλέα³⁸.

Η Αμφίπολη αναδεικνύεται ως σημαντικό οικονομικό κέντρο της εποχής και το τοπικό νομισματοκοπείο της περιοχής κόβει χάλκινα νομίσματα εσωτερικής κυκλοφορίας μέχρι τον 3^ο αιώνα μ.Χ. (Λαζαρίδης, 1972).

Στους πρωτοβυζαντινούς χρόνους τα μεταλλεία της Αιγύπτου, της Μικράς Ασίας και της Σερβίας είναι αρκετά προσοδοφόρα, έτσι ώστε αυτά της Βόρειας Ελλάδας παρακμάζουν ή αποτελούν δευτερογενείς πηγές σιδήρου, αργύρου και χρυσού (Vryonis, 1962). Βέβαια, ο Παύλος Σιλεντιάριος μας πληροφορεί ότι το Λαύριο και το Παγγαίο ξαναλειτούργησαν για να προμηθεύσουν με άργυρο την κατασκευή του ναού της Αγίας Σοφίας (6^{ος} αιώνας μ.Χ.).

«Ενθάδε Παγγαίοιοι ράχισ και Σουνίας άκρη άργυρέας ωίξαν όλας φλέβας³⁹»

Κατά τους Βυζαντινούς χρόνους (9^ο – 10^ο αιώνα) το Παγγαίο ανήκει στο Θέμα Στρυμόνος, που περιλαμβάνει την περιοχή μεταξύ των ποταμών Στρυμόνα και Νέστου. Την ίδια περίοδο θα ιδρυθεί στις ανατολικές όχθες του Στρυμόνα, στη θέση της αρχαίας Ηιόνας, η Χρυσούπολη (Εικ. 4.2.1) . Το όνομά της πιθανώς να σχετίζεται με την εξαγωγή χρυσού από το Παγγαίο και την εμπορεία του.

Η περιοχή περνάει στα χέρια αρκετών κατακτητών, όπως Φράγκων, Βουλγάρων και Σέρβων, ενώ ανακαταλαμβάνεται από το Μανουήλ Παλαιολόγο το 1371 (Καραγιαννόπουλος κ.ά., 1992). Η περιοχή του Παγγαίου καταλαμβάνεται οριστικά από τους Οθωμανούς στα τέλη του 14ου αιώνα. Συγκεκριμένα, το 1383 καταλαμβάνουν τις Σέρρες και το 1391 οι Οθωμανοί είναι πλέον κυρίαρχοι της Χριστούπολης (Καβάλας). Ολοκληρώνουν την κατάκτηση των περισσότερων Μακεδονικών πόλεων, με την τελική κυριαρχία τους στη Θεσσαλονίκη το 1430 (Καραγιαννόπουλος κ.ά., 1992). Η περιοχή της Καβάλας ή το ναχιγιέ του μεταλλείου της Καβάλας, όπως είναι γνωστή από τα τουρκικά έγγραφα του δεύτερου μισού του 15^{ου} αιώνα, περιλαμβάνει το nefs της Καβάλας

³⁷ Cassiodorus, *Chronicle on Livy* 47.

³⁸ Ιστορία του Ελληνικού Έθνους, τ. Ε', Εκδοτική Αθηνών, 1972, σ.127.

³⁹ Παύλος Σιλεντιάριος, *Εκφρασις Αγίας Σοφίας*.

και έντεκα χωριά. Ένα μεγάλο μέρος των φόρων που καταβάλλεται στους Οθωμανούς προέρχεται από τα μεταλλεία αργύρου (Στεφανίδου, 2007). Τα έσοδα του διαχειριστή-μισθωτή προέρχονται από τη δεκάτη (öşr) πάνω στο παραγόμενο μετάλλευμα και στον άργυρο της κυπέλλωσης.

Τα παραγόμενα μέταλλα το 16^ο αιώνα είναι ο άργυρος, ο μόλυβδος και σε μικρές ποσότητες ο χρυσός, ενώ το 17^ο ο σίδηρος (Anhegger, 1943). Από το 16^ο αιώνα το Παγγαίο εμφανίζεται με την ονομασία «Καστανιά» (Belon, 1553), με πολλά μεταλλεία και νομισματοκοπείο (Στεφανίδου, 2007).

Από τα τέλη του 17^{ου} αιώνα το βασικό παραγόμενο μέταλλο είναι ο σίδηρος. Επίσης, στο Πράβι (Ελευθερούπολη) θα λειτουργήσει χυτήριο βλημάτων κανονιών, αφού τα άλλα δύο χυτήρια, που ήδη λειτουργούν σε άλλες περιοχές δεν μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες του κράτους (Στεφανίδου, 2007). Το ίδιο αναφέρει και ο Βακαλόπουλος (1992) για την Πράβιστα (Ελευθερούπολη) και τα σιδερένια βλήματα που κατασκευάζονται και φθάνουν στη Θεσσαλονίκη με τελικό προορισμό το ναύσταθμο της Κωνσταντινούπολης.

Μετά τους Βαλκανικούς πολέμους και κυρίως μετά το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, η περιοχή του Παγγαίου ανήκει πλέον στο Ελληνικό κράτος.

Εποχή Χαλκού



Εποχή Σιδήρου

Αρχαϊκά χρόνια



Ρωμαϊκοί χρόνοι (Σημειώνεται η Εγνατία οδός με τεφρή γραμμή)

Βυζαντινοί χρόνοι



Εικ. 4.2.1 Χάρτες με τις σημαντικές θέσεις κατοίκησης στην ευρύτερη περιοχή του Παγγαίου όρους από τη Νεολιθική Εποχή μέχρι τους Βυζαντινούς Χρόνους (στοιχεία από Λαζαρίδη, 1972; Γραμμένο, 1997, Σακελλαρίου, 1992, αρχείο ΙΗ' Εφορείας Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων, Εφορία Παλαιοανθρωπολογίας-Σπηλαιολογίας Β. Ελλάδας και Αρχαιολογικό Μουσείο Αμφίπολης).

5. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΥ ΠΑΓΓΑΙΟΥ

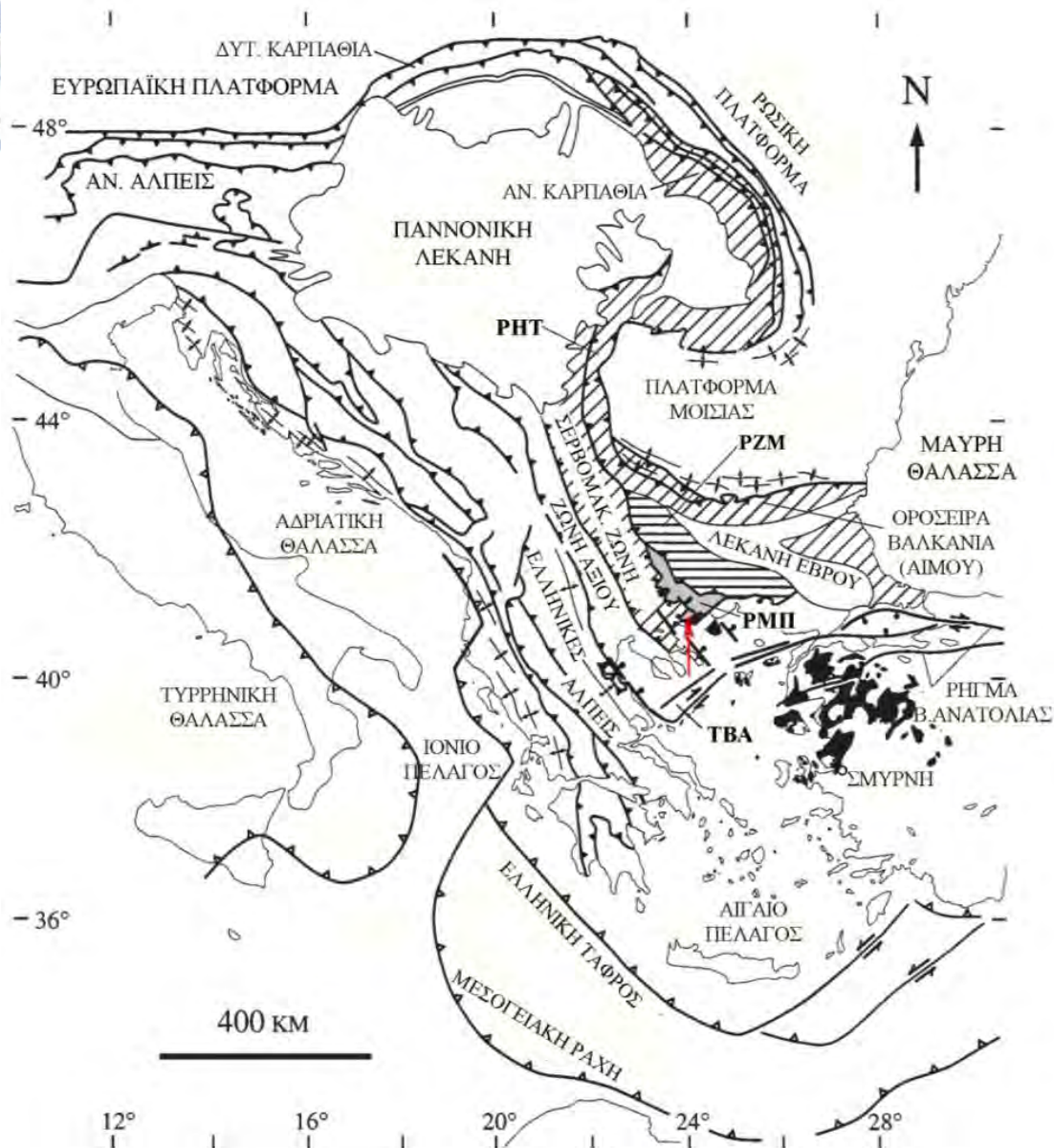
5.1 Γενικά

Η περιοχή του όρους Παγγαίου ανήκει γεωτεκτονικά στην ομώνυμη Ενότητα Παγγαίου της «μάζας της Ροδόπης», που περιλαμβάνει επίσης την περιοχή του Φαλακρού, της Λεκάνης, το Μενοίκιο, καθώς και τη νήσο Θάσο στην ελληνική επικράτεια (Μουντράκης, 2010).

Η μάζα της Ροδόπης αποτελείται από πετρώματα που έχουν υποστεί μέσου έως υψηλού βαθμού μεταμόρφωση και έχουν δημιουργήσει αλληπάλληλα τεκτονικά καλύμματα εξαιτίας συμπιεστικών γεγονότων προ-Αλπικής και Αλπικής ηλικίας και αποκαλύπτονται λόγω ενός εφελκυστικού πεδίου με Τριτογενή ηλικία (Kilias et al, 2013). Οι επωθήσεις που έχουν Αλπική ηλικία συνδέονται με τη σύγκρουση προς τα νοτιοδυτικά κατά το Κάτω-Άνω Κρητιδικό του ηπειρωτικού τεμάχους της Μοϊσίας (Ευρασία) και του ηπειρωτικού τεμάχους της Αδριατικο-Απουλίας που αποκολλήθηκε από την Αφρική (Burg et al, 1996; Zagorchev, 1998; Bonev et al, 2006; Georgiev et al, 2010; Jahn-Awe et al, 2010;).

Η ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου αποτελεί ένα μεγάλο πεδίο εφελκυσμού που έχει οδηγήσει στη δημιουργία μεγάλων λεκανών και δομών κατάρρευσης ορογενούς (Εικ. 5.1.1. Η τεκτονική αποκάλυψη ενός μεγάλου τμήματος στο νοτιοδυτικό τμήμα της μάζας της Ροδόπης έχει συνδεθεί τις τελευταίες δεκαετίες με το εφελκυστικό καθεστώς του Αιγαίου (Dinter and Royden, 1993; Sokoutis et al, 1993; Gautier and Brun, 1994; Dinter, 1998; Wawrenitz and Krohe, 1998; Gautier et al, 1999; Kilias et al, 1999; Burchfiel et al, 2000; Krohe and Mposkos, 2002; Burchfiel et al, 2003; Brun and Sokoutis, 2007; Burchfiel et al, 2008; Georgiev et al, 2010). Επίσης, το εφελκυστικό πεδίο δυνάμεων έχει οδηγήσει σε έκταση των γεωτεκτονικών δομών της μάζας της Ροδόπης μέχρι και 120 km, όπως φαίνεται στο νότιο τμήμα του Ροδοπικού Μεταμορφικού Συμπλέγματος από την περιοχή του Νέστου μέχρι τη γραμμή του Στρυμόνα (Brun and Sokoutis, 2007). Ο φλοιός του Αιγαίου πελάγους έχει εκταθεί σε τέτοιο σημείο που έχει το μισό πάχος από τον αντίστοιχο φλοιό της ηπειρωτικής Τουρκίας και Ελλάδας (Makris, 1976; McKenzie, 1978). Στην περιοχή της Βόρειας Ελλάδας σύμφωνα με τους Mercier et al (1989) δημιουργούνται χαρακτηριστικά οπισθοτοξικής τάφρου πάνω από τη ζώνη υποβύθισης, με επόμενη τη δημιουργία μεγάλων τεκτονικών τάφρων και κεράτων, εκτεταμένων ζωνών διάτμησης και μεγάλων ρηγμάτων μικρής κλίσης-αποκόλλησης (detachment faults).

Ωστόσο υπάρχουν αρκετές διχογνωμίες σχετικά με τη χωρική και χρονική εξέλιξη του εφελκυστικού καθεστώτος στη μάζα της Ροδόπης. Οι Dinter and Royden (1993) και ο Dinter (1998) υποστηρίζουν ότι το ρήγμα αποκόλλησης του Στρυμόνα έχει αποκαλύψει το Ροδοπικό Μεταμορφικό Σύμπλεγμα (ΡΜΣ), το οποίο βρίσκεται υποκείμενο των ιζημάτων της Λεκάνης του Στρυμόνα. Η



Εικόνα 5.1.1 Γεωτεκτονικό σχήμα της Νοτιοανατολικής Ευρώπης και της Βορειοανατολικής Μεσογείου. Σημειώνεται η περιοχή του όρους Παγγαίου στο ΡΜΠ: Ροδοπικός Πυρήνας Μεταμόρφωσης (core complex), ΡΗΤ: Ροδοπικό Ηπειρωτικό Τέμαχος, ΡΖΜ: Ροδοπική Ζώνη Μεταμόρφωσης (ΡΜΠ και οριζόντια γραμμοσκίαση). Με μαύρο στο ΡΜΠ οι γρανοδιοριτικοί πλουτωνίτες του Κάτω Μειοκαίνου, με μαύρο εκτός ΡΜΠ ανδεσίτες του Κάτω Μειοκαίνου, ΤΒΑ: Τάφος Βορείου Αιγαίου. (Τροποποιημένο από Dinter, 1998).

ρηξιγενής ζώνη είναι ενεργή από το Μ. Μειόκαινο μέχρι το Κ. Πλειόκαινο, όπως διαφαίνεται από την ηλικία των ιζημάτων της λεκάνης του Στρυμόνα. Από την άλλη, οι Brun and Sokoutis (2007) σημειώνουν την έναρξη της αποκάλυψης του Ροδοπικού Συμπλέγματος από το μέσο Ηώκαινο με τη ρηξιγενή ζώνη των Κερδυλίων να ελέγχει την αποκάλυψη του ορογενούς από το Μ. Ηώκαινο μέχρι το Κ. Ολιγόκαινο.

Μέσα στον πυρήνα του μεταμόρφωσης συμπλέγματος της Ροδόπης (Εικ. 5.1.1) καταγράφεται α) το τέλος της σύγκλισης του Αλπικού ορογενούς β) μία

πρώιμη μετα-αλπική έκταση του ορογενούς στο μέσο φλοιό και γ) αποκάλυψη του πυρήνα του συμπλέγματος της Ροδόπης (Dinter, 1998). Αυτή είναι η γενική γεωτεκτονική εικόνα στην περιοχή της μάζας της Ροδόπης, όπως εξελίσσεται από το τέλος του Αλπικού ορογενούς μέχρι το Ολόκαινο. Στην περιοχή της Ροδόπης παρατηρείται η βόρεια οπισθοτοξική λεκάνη του Αιγαίου.

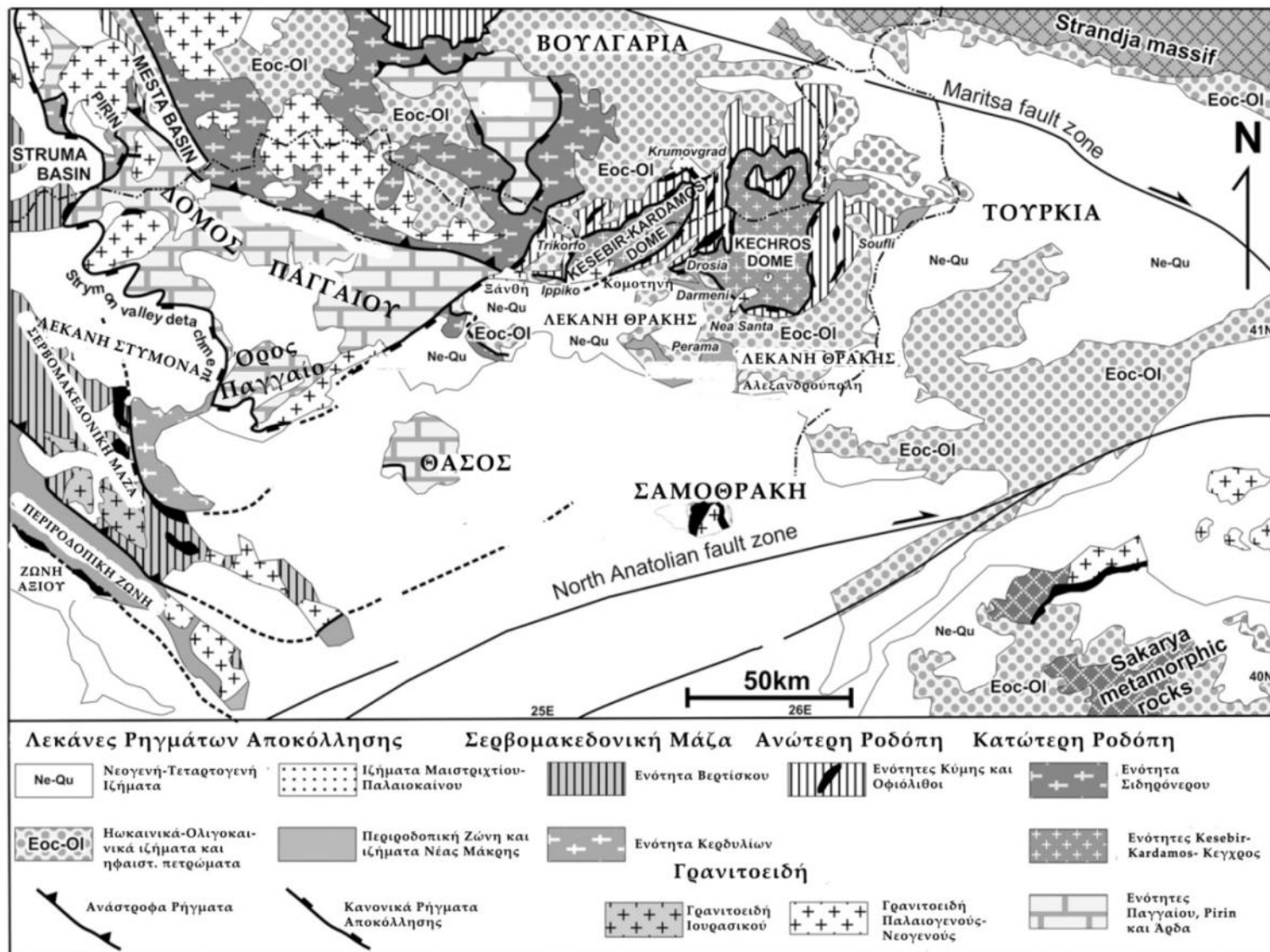
5.2 Μάζα της Ροδόπης

Η γεωτεκτονική ενότητα της «μάζας της Ροδόπης» περιλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της Θράκης, την Ανατολική Μακεδονία, τη Θάσο καθώς και τμήμα της Νότιας Βουλγαρίας. Στα δυτικά το φυσικό της όριο ορίζεται πιθανών από το ρου του ποταμού Στρυμόνα, όπου εφιππεύεται από τη Σερβομακεδονική μάζα με εκτεταμένες ζώνες μυλωνιτίωσης και τεκτονικών λατυποπαγών. Στο ανατολικό της όριο στην περιοχή του ποταμού Έβρου, η Περιοδοπική Ζώνη εφιππεύει τα πετρώματα της Ροδόπης. Η Περιοδοπική Ζώνη αποτελεί την παλιά περιφερειακή αύλακα, όπου υποβυθιζόταν η ωκεάνια περιοχή της Ζώνης Αξιού κάτω από την Ευρωπαϊκή ηπειρωτική πλάκα, το περιθώριο της οποίας αποτελούσαν οι μάζες της Ροδόπης και της Σερβομακεδονικής (Μουντράκης, 2010).

Ο χαρακτήρας της μάζας της Ροδόπης είναι καθαρά ηπειρωτικός. Η ηλικία της παλαιότερα θεωρούνταν Προκαμβρική και οι υποδιαίρέσεις της γίνονταν με βάση τις λιθοστρωματογραφικές διαφορές των περιοχών της (Zagorčev, 1974; Zidarov et al, 1974; Ivanov et al, 1984; Kozhoukharov, 1984, 1988; Chatzipanagis, 1990; Marinova, 1991; Zagorčev, 1994). Ωστόσο σύμφωνα με τα προτεινόμενα γεωδυναμικά μοντέλα η μάζα της Ροδόπης θεωρείται γενικά ότι έλαβε μέρος στο αλπικό ορογενές ως συμμεταμορφική συγκέντρωση επωθημένων καλυμμάτων και πλέον χαρακτηρίζεται από εφελκυστικό καθεστώς και την κατάρρευση του ορογενούς (Ivanov, 1988, 1989; Dinter and Royden, 1993; Sokoutis et al, 1993; Gautier and Brun, 1994; Dinter, 1998; Ricou et al., 1998; Wawrenitz and Krohe, 1998; Gautier et al, 1999; Kiliass et al, 1999; Krohe and Mposkos, 2002; Sarov and Gerdjikov, 2002; Brun and Sokoutis, 2007; Georgiev et al, 2010; Burg, 2012).

Η μάζα της Ροδόπης στη ΒΑ Ελλάδα χωρίζεται σε δύο τεκτονικές ενότητες (Εικ. 5.2.1), την κατώτερη τεκτονική ενότητα του Παγγαίου και την ανώτερη ενότητα του Σιδηρόνερου (Papanikolaou and Panagopoulos, 1981; Zachos and Dimadis, 1983; Kiliass and Mountrakis, 1990; Mposkos and Liati, 1993; Kiliass et al, 2013).

Η ενότητα του Σιδηρόνερου (Sidironero-Mesta Unit) εφιππεύει την ενότητα Παγγαίου κατά μήκος μιας μεγάλης τεκτονικής γραμμής με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ (ρήγμα Νέστου). Οι λιθολογικές φάσεις της ενότητας Σιδηρόνερου παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία. Αποτελούνται από ορθογενείς με



Εικόνα 5.2.1 Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της Ροδόπης. (Τροποποιημένο από Kiliyas et al, 2013 τροποπ. από Kiliyas et al, 1999; Turgut and Eseller, 2000; Krohe and Mposkos, 2002; Bonev et al, 2006; Brun and Sokoutis, 2007)

μαγματικό πρωτόλιθο ηλικίας 164-134 εκ. χρ. (Turpaud, 2006; von Quadt et al, 2008), διμαρμαρυγιακούς παραγνεύσιους, σχιστόλιθους, αμφιβολίτες, ενστρώσεις μαρμάρων, μιγματίτες και έντονες ζώνες μυλωνιτίωσης. Χαρακτηριστική είναι η τεκτονική τοποθέτηση υπερβασικών σωμάτων, καθώς και η υπολειμματική εμφάνιση εκλογιτικών σωμάτων (Φαλαλάκης, 2004).

Η ενότητα Παγγαίου (Pangaeon-Pirin Unit) συγκροτείται από έναν κατώτερο ορίζοντα με ορθογνεύσιους, σχιστολίθους και αμφιβολίτες. Στη συνέχεια υπέρκειται ένας μεσαίος ορίζοντας με εναλλαγές σχιστολίθων και μαρμάρων. Ανώτερο σχηματισμό αποτελεί ένας ορίζοντας από μαζώδη ανακρυσταλλωμένα μάρμαρα με φαινόμενο πάχος από 200 m στο όρος Μενοίκιο έως και περισσότερο από 5000 m στο όρος Φαλακρό και στα όρη Λεκάνης (Φαλαλάκης, 2004).

Οι δύο ενότητες παρουσιάζουν διαφορετικό βαθμό μεταμόρφωσης, με μέσο-άνω αμφιβολιτική στην ενότητα Σιδηρόνερου και μέση πρασινοσχιστολιθική στην ενότητα Παγγαίου (Papanikolaou and Panagopoulos 1981, Mposkos 1989).

Οι Kiliass et al (2013) σύμφωνα με τη σύνθεση και τη γεωτεκτονική τοποθέτηση των ενοτήτων της Μάζας της Ροδόπης διακρίνουν μία ανώτερη και μία κατώτερη Ροδοπική πλάκα (Εικ. 5.2.1). Στην ανώτερη πλάκα (Ανώτερη Ροδόπη) περιέχονται η ενότητα Κύμης και η κατώτερη πλάκα της Ροδόπης περικλείει την ενότητα του Σιδηρόνερου, του Κάρδαμου-Kesebir και του Κέγχρου. Στο δυτικότερο τμήμα της η ενότητα του Σιδηρόνερου επιπνέει την κατώτερη ενότητα του Παγγαίου.

5.3 Γεωτεκτονική εξέλιξη

Το Ροδοπικό Ηπειρωτικό Τέμαχος (PHT, Εικ. 5.1.1) περιλαμβάνει τις περιοχές μεταξύ της Ζώνης Αξιού και του τμήματος των Αλπικών Αλύσεων ορέων στα Καρπαθο-Βαλκανικά όρη (Burchfiel, 1980). Αντίθετα, η γεωτεκτονική ζώνη της Μάζας της Ροδόπης περιλαμβάνει μόνο τους ορεινούς όγκους το Ροδοπικού Ηπειρωτικού Τεμάχους μεταξύ των ποταμών Στρυμόνα στα νοτιοδυτικά και Έβρου (Maritsa) στα βορειοανατολικά (Εικ. 5.1.1).

Το Ηπειρωτικό Τέμαχος της Ροδόπης αποτελεί ένα από τα επιμέρους ηπειρωτικά τεμάχη της Παγγαίας που αποκολλήθηκαν κατά την έναρξη του Μεσοζωικού και προσκολλήθηκαν στην Ευρασία στο πλαίσιο της Αλπικής Ορογένεσης (Burchfiel, 1980). Αποτελείται από τη Σερβομακεδονική μάζα, τη μάζα της Ροδόπης και τα επωθητικά καλύμματα που δημιούργησαν την οροσειρά του Αίμου. Κατά την Αλπική ορογένεση σύμφωνα με τον Dinter (1998) η περιοχή των Βαλκανίων ορέων επωθήθηκε στην πλατφόρμα της Μοισίας, ενώ

η Σερβομακεδονική αποτέλεσε το νοτιοδυτικό άκρο κάτω από το οποίο υποβυθίστηκε η Ζώνη Αξιού. Ακολούθησε η σύγκλιση της Ροδόπης και της Απουλίας πλάκας που περιλαμβάνει τι περιοχές της Ιταλίας, Κροατίας, Βοσνίας, Αλβανίας και Δ. Ελλάδας.

Η Σερβομακεδονική Ζώνη και η Μάζα της Ροδόπης επηρεάστηκαν από την Αλπική Ορογένεση με τη δημιουργία επωθητικών φαινομένων, ζωνών διάτμησης και γενικότερης πάχυνσης του ηπειρωτικού φλοιού.

Ο Dinter (1998) παρουσιάζει την ενότητα Παγγαίου να αποκαλύπτεται ως τεκτονικό παράθυρο μετά την επώθηση μιας ευρείας γνευσιωμένης σειράς (Σερβομακεδονικής και Δυτικής Θράκης). Στα νοτιοδυτικά όρια του παραθύρου η αποκάλυψη της υποκείμενης ανθρακικής σειράς των μαρμάρων Παγγαίου-Φαλακρού ελέγχεται από το ρήγμα αποκόλλησης του Στρυμόνα. Στο κάτω τέμαχος του ρήγματος αποκόλλησης υφίστανται οι μεταμορφωμένες γνευσιακές σειρές της Σερβομακεδονικής μάζας (ενότητες Βερτίσκου και Κερδυλίων). Στο βορειοανατολικό τμήμα του παραθύρου εντοπίζεται το ρήγμα αποκόλλησης του Νέστου, που αποτελεί και το τεκτονικό όριο των ενοτήτων Παγγαίου και Σιδηρόνερου.

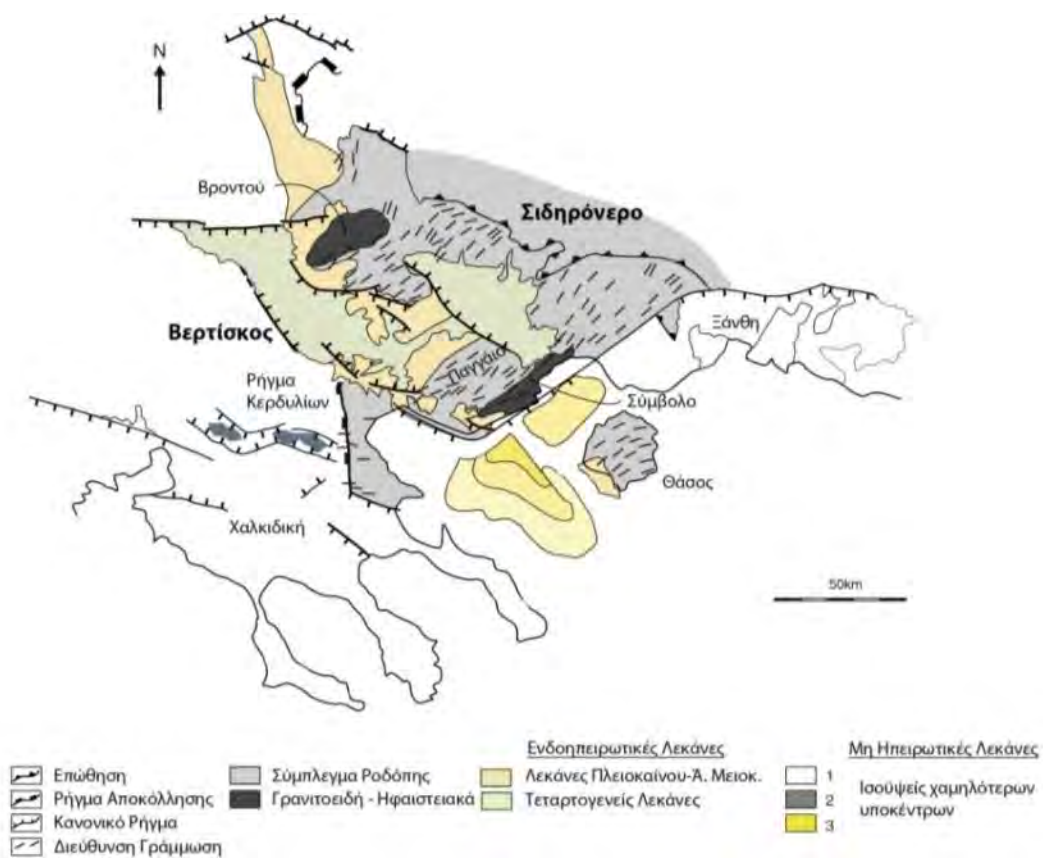
5.4 Τεκτονική

Τα τεκτο-ορογενετικά γεγονότα που διαμόρφωσαν την περιοχή της μάζας της Ροδόπης περιγράφονται από τους Brun and Sokoutis (2007) με την έναρξη της σύγκλισης στο νότιο τμήμα της Ροδόπης το αργότερο μέχρι και πριν από 42 εκ. χρόνια σύμφωνα με τη νεότερη ηλικία της εμφάνισης πετρωμάτων μεταμόρφωσης Υψηλής Πίεσης-Χαμηλής Θερμοκρασίας (HP), που καταγράφεται στο ανώτερο τμήμα της επώθησης (Liatì, 2005). Κατά το Μέσο Ηώκαινο σημειώνεται η έναρξη του εφελκυσμού του Συμπλέγματος της Ροδόπης.

Από το Μέσο Ηώκαινο έως το Μέσο Ολιγόκαινο σύμφωνα με τους Brun and Sokoutis (2007) ξεκινά η αποκάλυψη σημαντικών τμημάτων του Συμπλέγματος της Ροδόπης. Αυτά περιλαμβάνουν μάρμαρα και γνευσίους στην περιοχή της Λεκάνης και του Φαλακρού και μιγματιτών, γνευσίων και σειρών μαρμάρων στην περιοχή των Κερδυλίων.

Από το Ολιγόκαινο έως το Άνω Μειόκαινο τοποθετούνται συγκινηματικά οι πλουτωνικοί όγκοι της Βροντούς και της Καβάλας. Την ίδια περίοδο αποκαλύπτονται οι σειρές πετρωμάτων του Μενοικίου, του Παγγαίου και της Θάσου.

Από το Τορτόνιο μέχρι και σήμερα κανονικά ρήγματα ορίζουν και διαμορφώνουν τις ιζηματογενείς λεκάνες του Ορφανού-Στρυμόνα, των Σερρών, του Πρίνου και της Δράμας (Εικ. 5.4.1).



Εικόνα 5.4.1. Οι βασικές τεκτονικές γραμμές και λεκάνες στην ευρύτερη περιοχή της Ενότητας Παγγαίου. Το ρήγμα αποκόλλησης δυτικά της ενότητας Παγγαίου τοποθετείται στην περιοχή των Κερδυλίων. Τροποποιημένο από Brun and Sokoutis (2007).

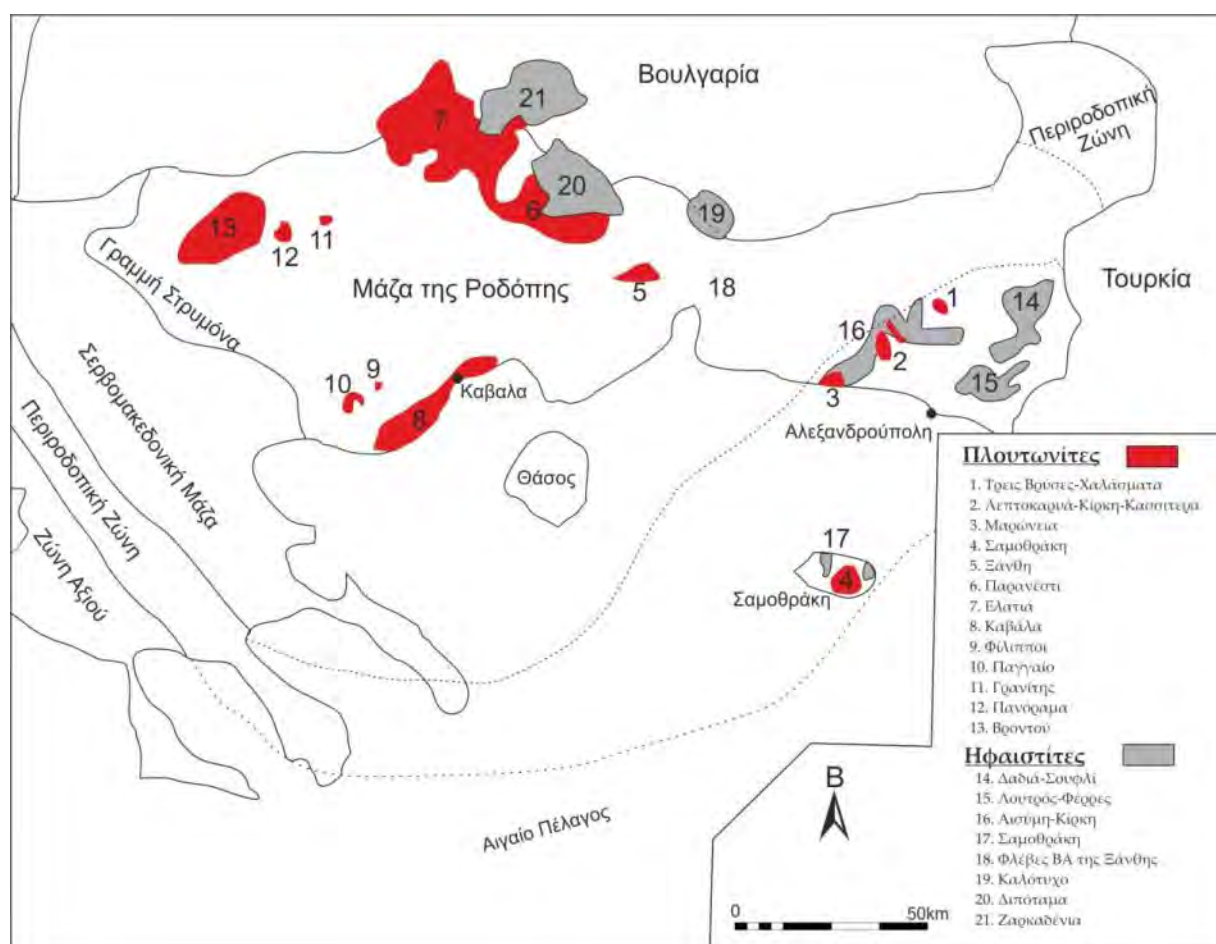
5.5 Μαγματισμός στη μάζα της Ροδόπης

Τα μαγματικά πετρώματα και κυρίως οι γρανίτες στη μάζα της Ροδόπης συνδέονται άμεσα με τη γεωτεκτονική εξέλιξη αυτής της ζώνης (Christofidis, 1996). Στη μάζα της Ροδόπης εμφανίζονται πολλά όξινα πλουτωνικά και ηφαιστειακά πετρώματα (Εικ. 5.5.1). Αυτός ο μαγματισμός είναι ασβεσταλκαλικού χαρακτήρα (Christofidis et al, 1998) και οφείλεται στο εφελκυστικό καθεστώς και στη λέπτυνση του φλοιού του βόρειου τμήματος του ελληνικού ορογενούς (Jones, 1992).

Τα πλουτωνικά σώματα έχουν ηλικία Ηωκαινική-Μειοκαινική και είναι κυρίως γρανίτες, γρανοδιορίτες, μονζονίτες, χαλαζιακοί μονζονίτες και διορίτες (Πίν. 5.5.1). Οι κυριότεροι όγκοι πλουτωνιτών είναι της Ξάνθης, του

Παρανεστίου, του Πανοράματος, της Ελατίας, της Βροντού, της Σκαλωτής, της Καβάλας και του Παγγαίου.

Οι ηφαιστίτες είναι κυρίως γυάλινοι, ανδεσίτες, δακίτες, τα υποηφαιστειακά αποτελούνται από δολερίτες και έχουν ανάλογη ηλικία με τους πλουτωνίτες. Παρουσιάζονται στην περιοχή βόρεια της Ξάνθης στα ελληνοβουλγαρικά σύνορα. Στον παρακάτω πίνακα (Πίν. 5.5.1) παρουσιάζονται επιγραμματικά τα κύρια πλουτωνικά πετρώματα στο χώρο της Ελληνικής Ροδόπης.



Εικόνα 5.5.1 Τα κυριότερα πλουτωνικά και ηφαιστειακά σώματα στην περιοχή της Αν. Μακεδονίας-Θράκης. Περιλαμβάνει πλουτωνίτες και ηφαιστίτες της Μάζας της Ροδόπης και της Ανατολικής Περιοδοτικής Ζώνης. Τροποποιημένο από Christofidis et al (1998).

Πίνακας 5.5.1 Τα πλουτωνικά σώματα στη Μάζα της Ροδόπης.

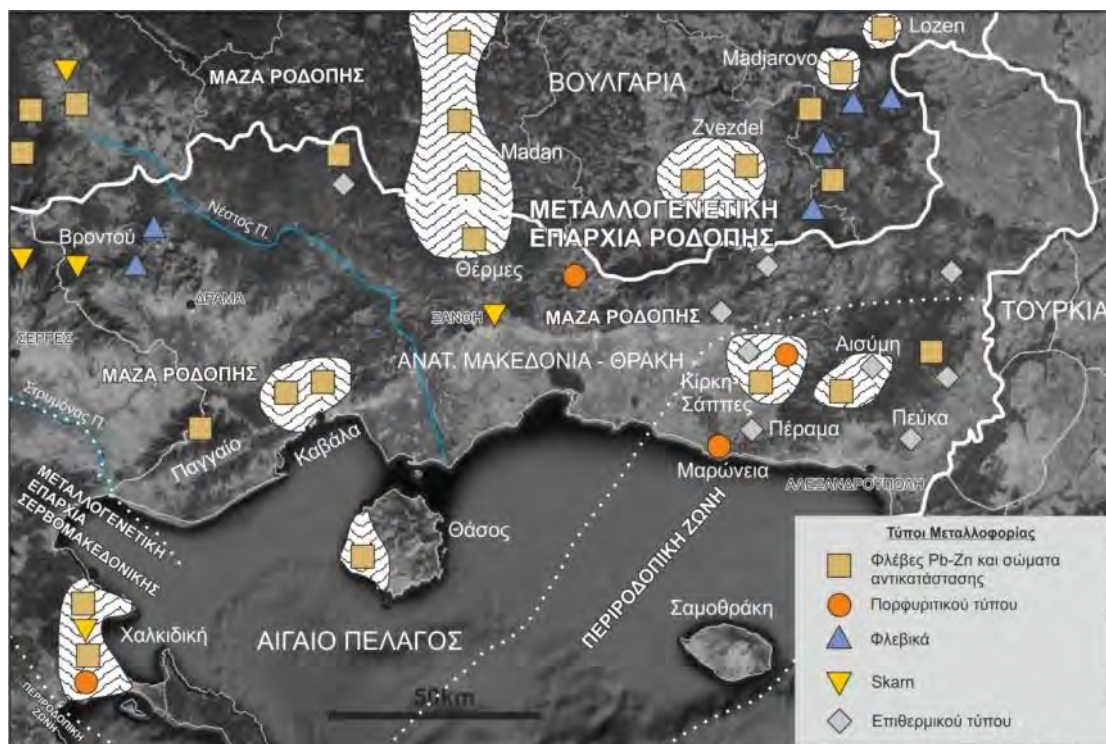
Περιοχή	Τύπος	Ηλικία (εκ.χρόνια)	Μέθοδος	Βιβλ. Αναφορά
Παγγαίο	Γρανодиορίτης	13-15	K-Ar	Meyer, 1968
Καβάλα	Γρανодиορίτης	21-22	K-Ar	Dinter et al, 1995
Βροντού	Μονζονίτης- Γρανодиορίτης	29-30	K-Ar	Theodorikas, 1982; Kolokotroni and Dixon, 1991
Ελατιά- Σκαλωτή	Γρανодиορίτης- Γρανίτης	34-47	Rb-Sr	Κοτοπούλη, 1981; Σολδάτος, 1985; Christofides et al, 1998
Ξάνθη	Γρανодиορίτης- Γρανίτης- Μονζονίτης	26.3±1.0 με 28.8±0,7	Rb-Sr, K- Ar	Christofides, 1977; 1989; 1996 Κυριακόπουλος, 1987
Πανόραμα	Γρανодиορίτης	27-28	K-Ar	Meyer, 1968
Γρανίτης	Γρανодиορίτης	27-28	K-Ar	Meyer, 1968
Φίλιπποι	Μονζογρανίτης	28	K-Ar	Eleftheriades et al, 1995

5.6 Τύποι μεταλλοφορίας στην ελληνική Ροδόπη

Στην ελληνική Ροδόπη εντοπίζεται ένας μεγάλος αριθμός μεταλλοφόρων εμφανίσεων. Οι μεταλλοφορίες αυτές καλύπτουν γεωγραφικά το χώρο της Ανατολικής Μακεδονίας-Δυτικής Θράκης από την Αλεξανδρούπολη μέχρι τις Σέρρες (Εικ. 5.6.1). Πρόκειται για μεταλλοφορίες τύπου Cu-Fe-Skarn, αντικατάστασης ανθρακικών πετρωμάτων Pb-Zn, πολυμεταλλικές χαλαζιακές φλέβες, επιθερμικού Au-Ag-Cu και πορφυριτικού Cu-Mo (Ζάχος και Μαράτος, 1965; Nesbitt et al, 1988; Melfos et al, 2002), οι οποίες επεκτείνονται και στο τμήμα της Περιοδοπικής Ζώνης στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης (Εικ. 5.6.1).

Οι εμφανίσεις αυτές συνδέονται γενετικά με τη διείσδυση μάγματος γρανιτικής-γρανодиοριτικής σύστασης, ενώ χωρικά ελέγχονται από τις διευθύνσεις ρηγμάτων τοπικού χαρακτήρα (Melfos et al, 2002). Τα κοιτάσματα χαρακτηρίζονται από την παρουσία Pb, Zn, Sb, Bi, Cu και Mo και από

χαμηλότερης οικονομικής σημασίας συγκεντρώσεις σε Fe και Sn. Επίσης, περιέχουν σε μικρότερο βαθμό Au, Ag, U, W, Hg και As (Melfos et al, 2002; Melfos and Voudouris 2011). Τα πιο σημαντικά κοιτάσματα στην περιοχή της Ανατολικής Μακεδονίας-Θράκης χαρακτηρίζονται από φλέβες και σώματα αντικατάστασης Pb-Zn κυρίως σε μάγμαρα. Ωστόσο σε πολλές περιοχές η διείσδυση του μάγματος έχει δημιουργήσει μεταλλοφορίες τύπου skarn.



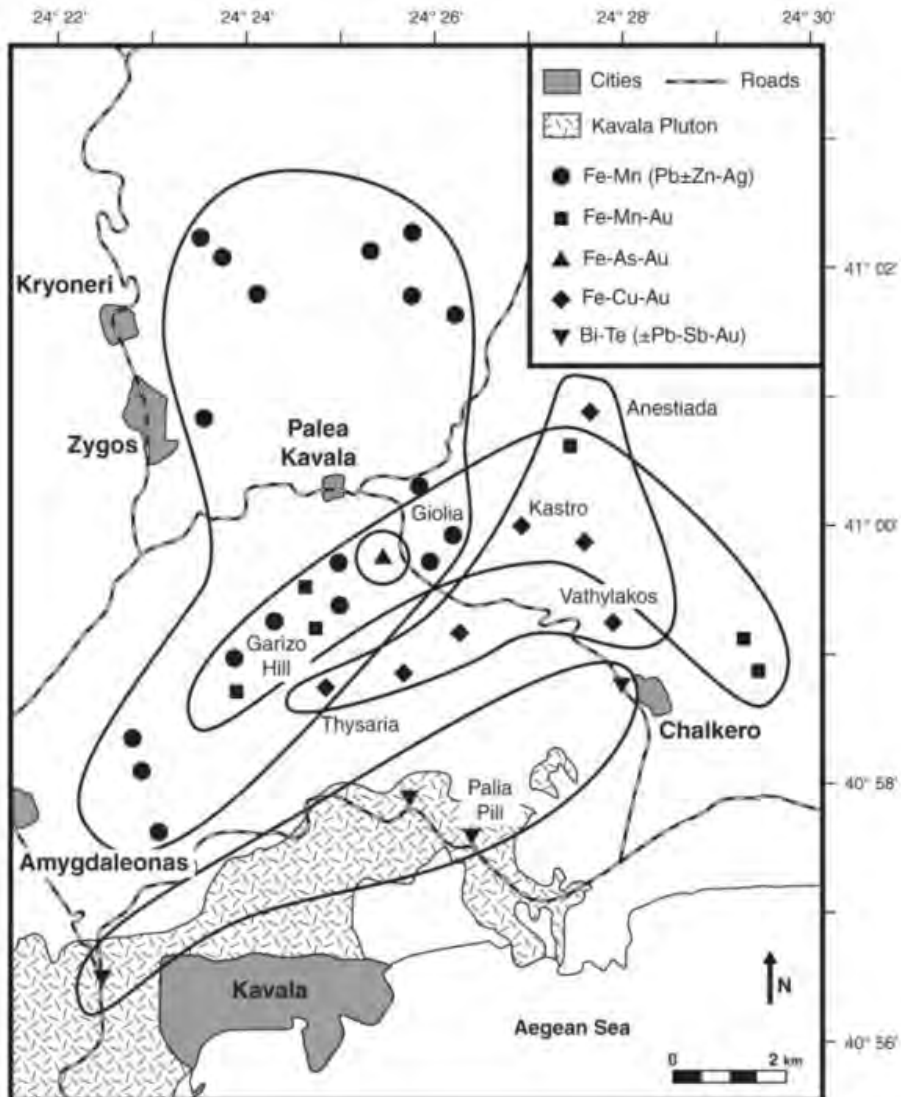
Εικόνα 5.6.1 Τύποι μεταλλοφορίας στη Μάζα της Ροδόπης και σε μέρος της Σερβομακεδονικής Μάζας και της Περιοδοπικής Ζώνης στη Νότια Βαλκανική χερσόνησο. (Τροποποιημένο από Melfos et al, 2002).

Οι μεταλλοφόρες αυτές εμφανίσεις περιγράφονται παρακάτω, από δυτικά προς τα ανατολικά:

Στην περιοχή της Βροντούς εμφανίζεται μεταλλοφορία τύπου skarn και αναπτύσσεται στην επαφή του πλουτωνίτη με τους μεταμορφωμένους σχηματισμούς (Χατζηκύρκου κ.ά., 1993). Η παραγένεση της μεταλλοφορίας skarn χαρακτηρίζεται από την παρουσία γρανάτη, επίδοτου, αμφιβόλων, πυροξένου, αστρίων και βολλαστονίτη, καθώς και των μεταλλικών ορυκτών μαγνητίτη, σιδηροπυρίτη, χαλκοπυρίτη, μολυβδαινίτη και μαγνητοπυρίτη. Στην ίδια περιοχή εντοπίζεται μεταλλοφορία φλεβικού τύπου. Το πάχος των μεταλλοφόρων φλεβών φθάνει μέχρι και τα 20 cm, ενώ στη μάζα της εμφανίζεται πρωτογενής Au (Χατζηκύρκου κ.ά., 1993).

Στην περιοχή του Κάτω Νευροκοπίου υδροθερμικές φλέβες γενετικά συνδεδεμένες με τον Ολιγοκαινικό μαγματισμό έχουν εξαλλοιωθεί δημιουργώντας κοιτάσματα που παρουσιάζουν υψηλές περιεκτικότητες σε Mn (Nimfopoulos and Pattrick, 1991). Το κοιτάσμα εντοπίζεται μέσα σε παλαιοζωικά μάρμαρα που επωθούνται σε μία σειρά γνευσίων, μαρμαρυγιακών σχιστολίθων, αμφιβολιτών και μαρμάρων (Zachos and Dimadis, 1983). Η μαγγανιούχος μεταλλοφορία εντοπίζεται σε έκταση περίπου 170 km² κοντά στα ελληνοβουλγαρικά σύνορα, με την κύρια εκμετάλλευσή τους να τοποθετείται στο 25^ο km Δράμας-Νευροκοπίου και στο Μαύρο Ξύλο (Ζάχος και Μαράτος, 1965; Sofianska et al, 2008) και χαρακτηρίζεται από την παρουσία οξειδίων του Mn προερχόμενα από την οξείδωση φλεβών ροδοχρωσίτη και σουλφιδίων (Nimfopoulos and Pattrick, 1991; Michailidis et al, 1995).

Στην περιοχή του Παγγαίου όρους εντοπίζεται μεταλλοφορία Pb-Zn σε τεκτονισμένους και καρστικοποιημένους ορίζοντες μαρμάρων της Ενότητας Παγγαίου ως προϊόν υδροθερμικής αντικατάστασης. Κατά θέσεις συναντώνται υπολειμματικά σουλφίδια στη μεταλλοφορία με ανθρακικά ορυκτά και σουλφάτα των Pb, Zn. Ακολουθούν τις τεκτονικές επιφάνειες και κενά, καθώς και τη σχιστότητα εμφανίζοντας στρωματώδη μορφή (Baker et al, 1990). Στην περιοχή Ασημότρυπες Παγγαίου παρατηρείται μεταλλοφορία Au στις ασυνέχειες των μαρμάρων με σώματα αντικατάστασης ελεγχόμενα από τη σχιστότητα των μαρμάρων και χαλαζιακές φλέβες τα οποία περιγράφονται από τους Eliopoulos and Kiliass (2011), οι οποίοι ορίζουν ένα νέο είδος μεσοθερμικού κοιτάσματος, σε ανθρακικά πετρώματα, με υπομικροσκοπικό χρυσό. Η μεταλλοφορία αυτή μελετήθηκε από τον Eliopoulos (2000) με κύρια ορυκτά τον αρσενοπυρίτη, το σιδηροπυρίτη και το χρυσό. Ο χρυσός εντοπίζεται κυρίως στον αρσενοπυρίτη και λιγότερο στον αρσενικούχο σιδηροπυρίτη και ως αυτοφυής στην ζώνη οξείδωσης. Στην περιοχή της Παλαιάς Καβάλας εμφανίζεται μεταλλοφορία φλεβικού τύπου που χαρακτηρίζεται από την παρουσία των μεταλλικών στοιχείων Fe, Mn, As, Pb, Zn, Cu και Ag (Fornadel et al, 2011). Οι Χατζηπαναγής και Δημήτρουλα (1996) διακρίνουν τις μεταλλοφόρες εμφανίσεις της περιοχής σε συμπαγείς σιδηρομαγγανιούχες σε ανθρακικά πετρώματα, πλήρως οξειδωμένες (Gossans) και σε φλεβικού τύπου σιδηροχαλκούχες μεταλλοφορίες με χαλαζία και χρυσό. Ειδικά οι ζώνες Gossan παρουσιάζουν ευρεία έκταση (Spathi et al, 1982; Economou et al, 1989) με κυμαινόμενες περιεκτικότητες σε Pb, Zn, Cu, As, Ag και Au (Arvanitidis et al, 1989). Μέσα στα όρια αυτή της μεταλλογενετικής περιοχής εντοπίζονται μεταλλοφορίες Bi-Te-Pb-Sb±Au που συνδέονται γενετικά με διείσδυση πλουτωνίτη (Εικ. 5.6.2). Σε αυτήν την περιοχή υφίσταται ένας Ι-τύπου πλουτωνίτης (ασβεσταλκαλικός γρανοδιορίτης Καβάλας-Συμβόλου), με ηλικία 21-22 εκ. χρόνια (Christofides, 1996), ο οποίος διεισδύει σε μάρμαρα και γνευσίους της ενότητας Παγγαίου.



Εικόνα 5.6.2 Ζώνες μεταλλοφορίας στην περιοχή της Παλαιάς Καβάλας. Η μεταλλοφορία Bi-Te ($\pm$ Pb-Sb-Au) εντοπίζεται πλησίον του plutωνίτη της Καβάλας (Fornadel et al, 2011 τροποποιημένο από Vavelidis et al, 1997b).

Στα μάρμαρα αυτά σχηματίζονται μεταλλοφορίες Fe-Mn-Au, Fe-Mn ($\text{Pb}\pm\text{Zn}\pm\text{Ag}$), ενώ στους γνευσίους, μέσα στη μάζα του γρανίτη και κατά μήκος της επαφής γνευσίων-μαρμάρων Fe-As-Au, Fe-Cu-Au, Bi-Te-Au (Vavelidis et al, 1997b; Fornadel et al, 2011). Η μεταλλοφορία Bi-Te $\pm$ Pb $\pm$ Sb $\pm$ Au εντοπίζεται σε φλέβες κοντά ή μέσα στη μάζα του plutωνίτη, ενώ εξωτερικά του συναντώνται Fe-Mn-Au, Fe-Cu-Au και Fe-As-Au (Fornadel et al, 2011).

Στην περιοχή της Θάσου εντοπίζεται μεταλλοφορία Pb-Zn κυρίως στο δυτικό της τμήμα, η οποία έτυχε εκμετάλλευσης κατά την αρχαιότητα (Vavelidis, 1984). Η μεταλλοφορία Pb-Zn εντοπίζεται σε στρωματομορφα μεταλλοφόρα στρώματα, καρστικές πληρώσεις και φλεβοειδή σώματα (Vavelidis, 1988). Επίσης, μεταλλοφορία Cu με Bi-Te-Au εντοπίζεται στην περιοχή Παναγιά στη Δυτική

Θάσο, όπου χαλαζιακές φλέβες υδροθερμικής προέλευσης τέμνουν τη σχιστότητα των μεταμορφωμένων πετρωμάτων (Vavelidis et al, 1995).

Στην περιοχή Φαρασινού Δράμας εντοπίζεται μεταλλοφορία Pb-Zn φλεβικού τύπου μέσα στη μάζα των μαρμάρων (Ζάχος και Μαράτος, 1965; Nesbitt et al, 1988).

Στις Θέρμες Ροδόπης εντοπίζεται μεταλλοφορία Pb-Zn-Cu σε διακλάσεις που τέμνουν τα μάρμαρα και τους αμφιβολίτες (Nesbitt et al, 1988) και παρουσιάζει ομοιότητες με τη μεταλλοφορία στην περιοχή Madan της Βουλγαρίας (Arvanitidis et al, 1987; Manev et al, 1989).

Στην περιοχή Κιμμέρια Ξάνθης η μεταλλοφορία είναι τύπου skarn με γρανάτη και διοψίδιο και μεταλλικά ορυκτά μαγνητίτη, σιδηροπυρίτη, μαγνητοπυρίτη, σεελίτη, γαληνίτη, χαλκοπυρίτη, μολυβδαινίτη και ίχνη χρυσού (Michailidis et al, 1989; Vavelidis et al, 1990).

Στην Περιοδοπική Ζώνη της Θράκης δυτικά από τη Μάζα της Ροδόπης εντοπίζονται οι μεταλλοφόρες περιοχές της Μαρώνιας (Μέλφος, 1995), της Κίρκης, των Σαππών, της Αισύμης, όπως επίσης στα Πεύκα και στο Πέραμα (Voudouris et al, 2005; 2011; Voudouris, 2014; Repstock et al, 2015).

Στη Μαρώνια η μεταλλοφορία είναι τύπου πορφυριτικού Cu-Mo και συνδέεται με τον Τριτογενή πορφυριτικό μικρογρανίτη (Μέλφος, 1995; Melfos et al, 2002).

Στις περιοχές Σάππων, Πεύκων και Περάματος τα κοιτάσματα είναι πολυμεταλλικά επιθερμικού τύπου με χαμηλές έως υψηλές περιεκτικότητες σουλφιδίων και παρουσία χρυσού (Voudouris et al, 2005; 2011; Voudouris, 2014; Repstock et al, 2015). Στην περιοχή της Αισύμης η μεταλλοφορία είναι φλεβικού τύπου Pb-Zn, κατά θέσεις στρωματέγκλειστη (Nesbitt et al, 1988).

Στην Περιοδοπική Ζώνη της Θράκης στο Μικρό Δέρειο και στο Έλβα έχουν εντοπιστεί μικρής οικονομικής σημασίας στρωματέγκλειστες μεταλλοφορίες σουλφιδίων Fe-Cu του Μεσοζωικού (Μέλφος, 1995).

6. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ

Στο πλαίσιο εκπόνησης της παρούσας διατριβής αρχικά αναζητήθηκαν βιβλιογραφικές αναφορές για τη μεταλλευτική και τη μεταλλουργική δραστηριότητα στο Παγγαίο όρος τόσο σε αρχαία κείμενα, όσο και σε νεότερες δημοσιεύσεις. Πληροφορίες αποκτήθηκαν επίσης μέσα από ένα πρότυπο σύστημα συνεντεύξεων τοπικών πληροφορητών για την αναζήτηση επιφανειακών θέσεων εξόρυξης και στοών και θέσεων με μεταλλουργικές σκωρίες. Οι πληροφορητές αναζητήθηκαν σε όλα τα χωριά περιμετρικά του όρους, από το Οφρύνιο μέχρι το Κοκκινόχωμα και από την Κορμίστα μέχρι τη Μουσθένη. Στοιχεία για την ύπαρξη μεταλλείων αντλήθηκαν από τις δορυφορικές εικόνες Landsat 7 ETM+, της Google Earth και τις ορθοφωτογραφίες της Κτηματολόγιο Α.Ε.

6.1 Έρευνα Υπαίθρου

Η έρευνα υπαίθρου έλαβε χώρα από τον Αύγουστο 2009 μέχρι και το Σεπτέμβριο 2012 και κυρίως τους μήνες Μάρτιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο κάθε χρόνου εστιασμένη στην αναζήτηση μεταλλείων και θέσεων με μεταλλουργικά υπολείμματα. Επιπλέον, καταγράφηκαν οι μεταλλοφόρες εμφανίσεις που εντοπίζονται στο όρος, η γενικότερη γεωλογική δομή της περιοχής και τα ιδιαίτερα τεκτονικά χαρακτηριστικά της. Η επιφανειακή έρευνα κάλυψε το μεγαλύτερο μέρος του όρους Παγγαίου και επικεντρώθηκε κυρίως στο κεντρικό και ανατολικό του τμήμα.

Στη συνέχεια χαρτογραφήθηκαν όλες οι θέσεις επιφανειακής και υπόγειας εκμετάλλευσης που εντοπίστηκαν, υπόγεια και επιφανειακά, καθώς και οι επιφανειακές θέσεις μεταλλουργίας. Η χαρτογράφηση των μεταλλείων περιελάμβανε ακριβή αποτύπωση σε χάρτη υπό κλίμακα από 1:100 έως 1:500 σε κάτοψη και επιμέρους τομές. Η τοπογραφική αποτύπωση πραγματοποιήθηκε με φορητό αποστασιόμετρο DISTO X310 της LEICA, μετροταινία και γεωλογική πυξίδα. Τα στοιχεία μεταφέρθηκαν στο λογισμικό VISUAL TOPO που χρησιμοποιείται στην τοπογράφιση υπόγειων χώρων και κυρίως σπηλαίων. Ο υπολογισμός του όγκου του εξορυγμένου υλικού και του συνολικού μήκους διαδρόμων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού CaveXO που περιλαμβάνεται στο πακέτο λογισμικού της Compass. Στην αποτύπωση περιελήφθησαν στοιχεία κοιτασματολογικά, πετρογραφικά και τεκτονικά. Επίσης, στοιχεία αρχαιολογικού ενδιαφέροντος αποτυπώθηκαν επακριβώς στους χάρτες.

Ειδικά στις στοές μελετήθηκαν τα ίχνη λάξευσης με τη λήψη θετικών εκμαγείων ρητίνης και σιλικόνης, οι τεχνικές εκμετάλλευσης, οι τρόποι απόθεσης των υπολειμμάτων της εξόρυξης, καθώς και άλλα σημαντικά για την έρευνα

στοιχεία. Η χαρτογράφηση των μεταλλουργικών θέσεων περιελάμβανε την αποτύπωση τους σε χάρτη κλίμακας από 1:1.000 έως 1:4.000 σε κάτοψη και τοποθέτηση των σημαντικών στοιχείων μεταλλουργίας, όπως σωροί σκωριών, υπολείμματα καμίνων κ.ά.

Ακολούθησε δειγματοληψία μεταλλεύματος από όλους τους χώρους εξόρυξης και μεταλλουργικών σκωριών, από τους χώρους εκκαμίνευσης. Ελήφθησαν περίπου 20 δείγματα από κάθε μεταλλευτική περιοχή και 20 από κάθε μεταλλουργική θέση.

6.2 Εργασίες Εργαστηρίου

Η εργαστηριακή έρευνα του μεταλλεύματος και των μεταλλουργικών σκωριών περιελάμβανε:

- i. μελέτη ορυκτολογικής σύστασης μακροσκοπικά και μικροσκοπικά (πολωτικό-μεταλλογραφικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο)
- ii. μελέτη ορυκτολογικής σύστασης με (XRD)
- iii. τη χημική ανάλυση (ICP-MS)
- iv. την ισοτοπική μελέτη

Από αντιπροσωπευτικά δείγματα κάθε θέσης δειγματοληψίας έγιναν λεπτές ή λεπτές-στιλπνές τομές στο εργαστήριο για τη μικροσκοπική τους παρατήρηση. Όλες οι τομές μελετήθηκαν σε μικροσκόπιο διερχόμενου φωτός τύπου Leitz Laborlux 11 POL S ενώ τα δείγματα σε στερεοσκόπιο τύπου ZEISS Axioskop 40 στον Τομέα Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας της Σχολής Θετικών Επιστημών του Α.Π.Θ.

Ο προσδιορισμός των ορυκτών φάσεων και της χημικής σύστασης επιλεγμένων δειγμάτων πραγματοποιήθηκαν στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης τύπου JEOL JSM-840A με αναλυτικό σύστημα EDS INCA/X-STREAM 250 / OXFORD ISIS 300 του εργαστηρίου σαρωτικής μικροσκοπίας της Σχολής Θετικών Επιστημών του Α.Π.Θ.

Ο προσδιορισμός των ορυκτών φάσεων του χρυσού, του αργύρου, των σουλφιδίων και του χλωρίτη έλαβε χώρα στο εργαστήριο του Ινστιτούτου Γεωλογικών Μελετών και Ερευνών (ΙΓΜΕ) στην Αθήνα με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) τύπου JEOL JSM-5600 με λογισμικό INCA.

Επίσης, σε επιλεγμένα δείγματα, μετά τη μικροσκοπική παρατήρηση, πραγματοποιήθηκε εξέταση με ακτίνες Χ για τον προσδιορισμό των ορυκτών φάσεων. Η ακτινογραφική εξέταση κόνεως από τα συλλεχθέντα δείγματα πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια περιθλασίμετρου ακτίνων Χ (XRD) τύπου

Phillips στον Τομέα Ορυκτολογίας, Πετρολογίας, Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ. Η ακτινοβολία που χρησιμοποιήθηκε για τις ακτίνες Χ ήταν CuKα με φίλτρο Ni, η ταχύτητα ανίχνευσης (scanning speed) 1° 2θ/min και ο ρυθμός των μετρήσεων (count rate) 103/sec. Η μελέτη με τις ακτίνες Χ έγινε για το εύρος 2θ μεταξύ 3° και 63° για κάθε δείγμα.

Σε δείγματα βάρους 30 g από κάθε περιοχή πραγματοποιήθηκε χημική ανάλυση με τη μέθοδο ICP/MS και τη μέθοδο ICP/ES στα εργαστήρια ACME του Καναδά. Επιπλέον δείγματα σκωριών αναλύθηκαν χημικά με τη μέθοδο XRF στο ΙΓΜΕ στην Αθήνα. Τέλος, με τη βοήθεια φορητού φασματομέτρου XRF στο Αρχαιολογικό Μουσείο του Βόλου πραγματοποιήθηκε ανάλυση της επιφάνειας τριβείου από τη μεταλλουργική θέση της Βαλτούδας. Το φορητό XRF διαθέτει φορητή λυχνία ακτίνων Χ, αερόψυκτη, μικρής ισχύος (50 Watt) με τάση λειτουργίας που μπορεί να είναι μέχρι και 50 kV. Το υλικό της ανόδου είναι Ρόδιο και το πάχος του παραθύρου της λυχνίας είναι 125 μm .

Για τον προσδιορισμό των ισοτόπων του μολύβδου στο μετάλλευμα και στις σκωρίες από τις θέσεις μεταλλουργίας πραγματοποιήθηκε ανάλυση με ICP-MS για τον προσδιορισμό των ισοτόπων Pb (Pb_{204} , Pb_{206} , Pb_{207} , Pb_{208}). Οι ισοτοπικές αναλύσεις έλαβαν χώρα στο εργαστήριο IsoAnalysis UG στο Βερολίνο σε δείγματα βάρους 30 g από κάθε περιοχή μεταλλευτικής και μεταλλουργικής δραστηριότητας. Στα κονιοποιημένα δείγματα (~200 mg) έγινε προσδιορισμός των ισοτόπων Pb με τη μέθοδο TIMS (K-factor method with NIST SRM 981). Η ακρίβεια προσδιορισμού των ισοτόπων του Pb ορίζεται με βάση τη μέθοδο σε λιγότερο από 0,13% και για τα τρία ισότοπα.

7. ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΠΑΓΓΑΙΟΥ ΟΡΟΥΣ

7.1 Λιθοστρωματογραφία Παγγαίου

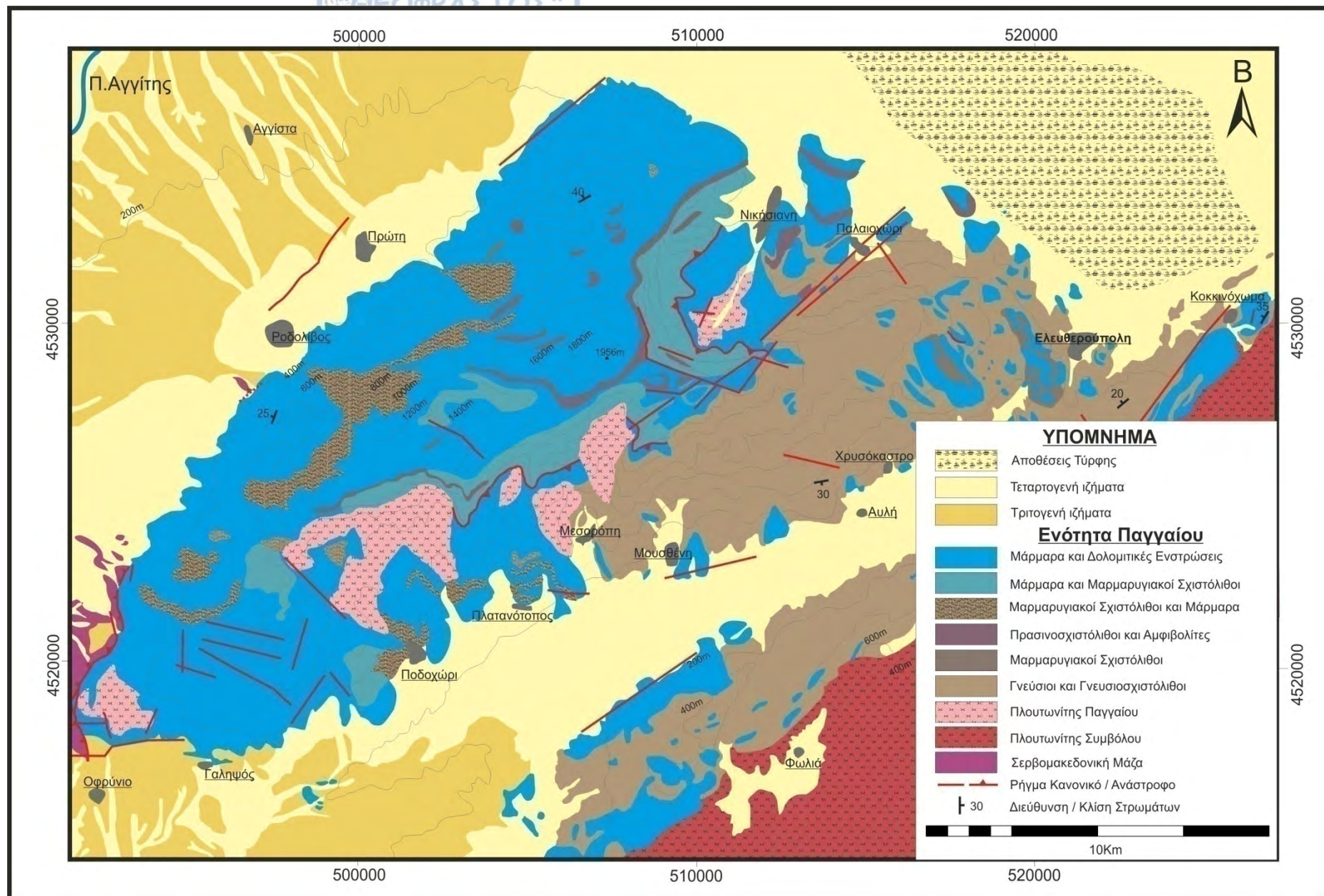
Η περιοχή του Παγγαίου όρους αποτελείται κυρίως από μεταμορφωμένα πετρώματα του υποβάθρου και από τα πλουτωνικά σώματα, καθώς και τα μεταλλικά ιζήματα που αποτίθενται από το Άνω Μειόκαινο και μετά (Kronberg, 1972; Kronberg and Schenck, 1974; Ξυδάς, 1978) (Εικ. 7.1.1 και 7.1.2).

Τα μεταμορφωμένα πετρώματα Παλαιοζωικής-Μεσοζωικής ηλικίας σύμφωνα με το Χατζηπαναγή (1991), μπορούν να χωριστούν σε τρεις μεγάλες λιθολογικές ενότητες (Εικ. 7.1.3) ανάλογες με αυτές τις περιοχής του Φαλακρού όρους, οι οποίες από τις παλαιότερες προς τις νεότερες είναι:

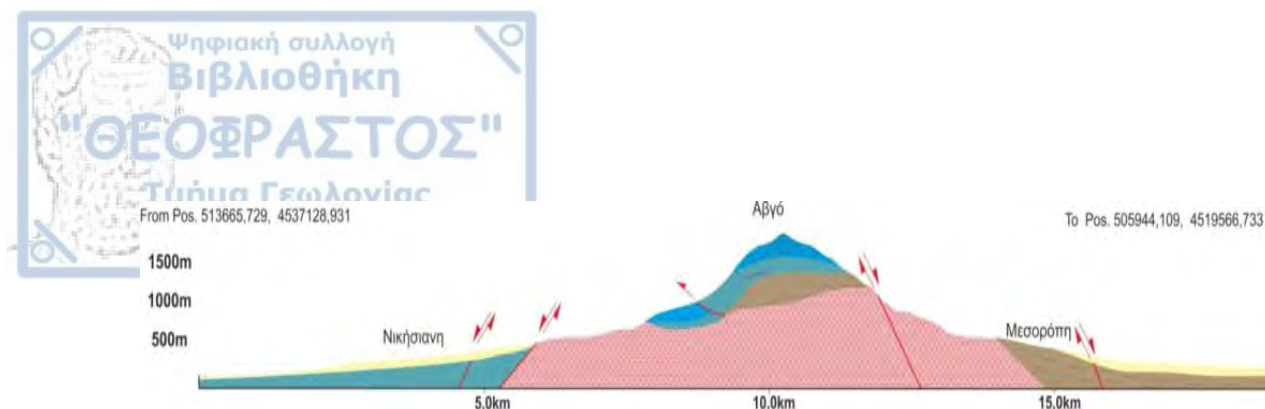
- i. Ενότητα των γνευσίων-σχιστολίθων του υποβάθρου με πάχος που υπερβαίνει τα 1000 m. Εμφανίζεται στο νοτιοανατολικό τμήμα του όρους και αποτελείται από οφθαλμογενέσιους, ορθογενέσιους, γνευσιοσχιστόλιθους.
- ii. Ενότητα λιθολογικών εναλλαγών με πάχος 600 m περίπου αποτελούμενη από ορίζοντες μαρμαρυγιακών σχιστολίθων, γνευσίους, αλβιτικούς γνευσίους, ταινιωτά μάρμαρα και αμφιβολίτες (Baker et al, 1993).
- iii. Ανώτερη ενότητα μαρμάρων με πάχος περίπου 500 m που εμφανίζεται στην περιοχή των κορυφών του όρους στο κεντρικό, καθώς και στο βορειο-βορειοδυτικό τμήμα του. Το κατώτερο τμήμα αυτής της ενότητας αποτελείται από ταινιωτά σιπολινικά μάρμαρα (Baker et al, 1993).

Ο πυρήνας αυτών των λιθολογικών ενοτήτων διακατέχεται από μεγάλη μάζα γρανιτοειδών, τα οποία αποκαλύπτονται στις περιοχές της Νικήσιανης, της Μεσορόπης, του Ποδοχωρίου και του Οφρυνίου (Εικ. 7.1.1).

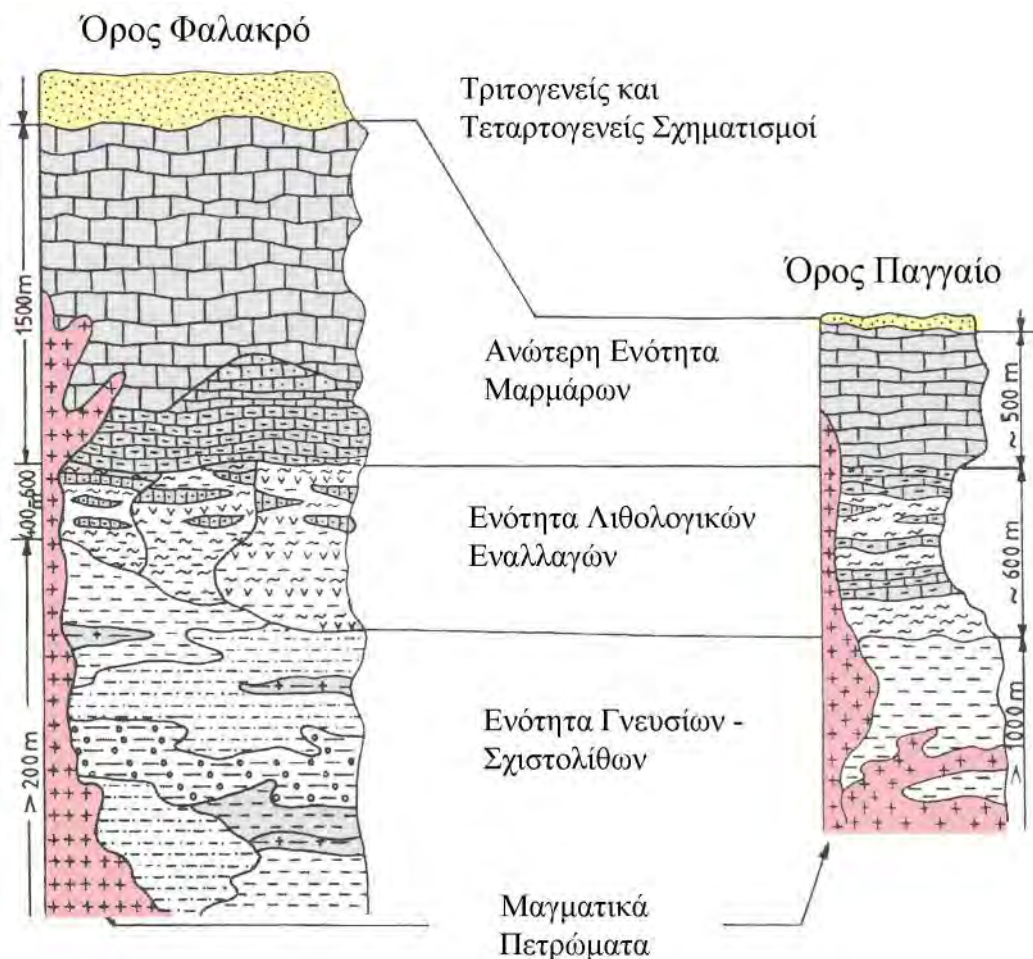
Νεότεροι μεταλλικοί σχηματισμοί αντιπροσωπευόμενοι από λιμνοχερσαία ιζήματα Α. Μειοκαίνου-Πλειστοκαίνου και χερσαίους του Ολοκαίνου πληρώνοντας τις λεκάνες που σχηματίζονται περιμετρικά του Παγγαίου (Kronberg, 1972; Kronberg and Schenck, 1974; Ξυδάς, 1978).



Εικόνα 7.1.1 Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής του όρους Παγγαίου. (από Kronberg, 1972; Kronberg and Schenck, 1974; Ξυδά, 1978 και παρατηρήσεις κατά το παρόν πόνημα).

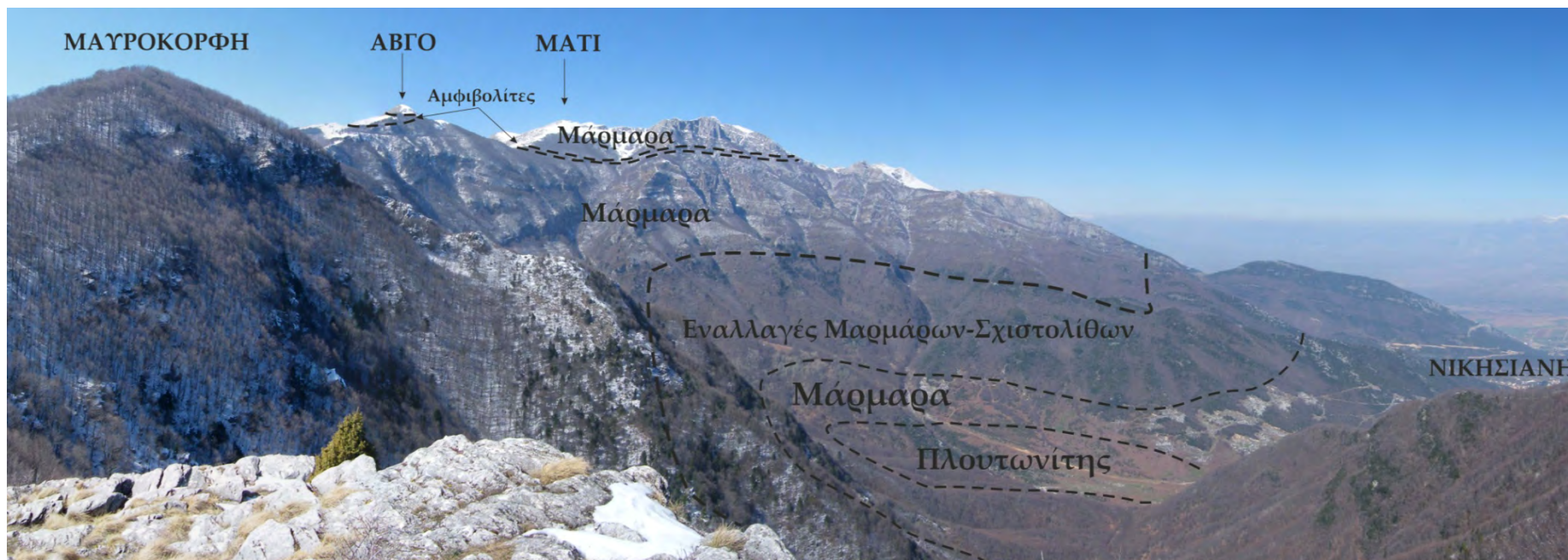


Εικόνα 7.1.2 Γεωλογική τομή του όρους Παγγαίου διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ. Η υπομνημάτιση των γεωλογικών σχηματισμών στο γεωλογικό χάρτη της προηγούμενης σελίδας. (Τροποπ. από Kronberg, 1972; Kronberg and Schenck, 1974; Ξυδά, 1978 και παρατηρήσεις κατά το παρόν πόνημα).



Εικόνα 7.1.3 Λιθοστρωματογραφικός συσχετισμός του Παγγαίου με το Φαλακρό όρος (Χατζηπαναγής, 1991).

Στο βορειανατολικό τμήμα του όρους παρουσιάζεται μία φυσική τομή των λιθολογικών εναλλαγών με κατακόρυφο ύψος παραπάνω από 1 km (Εικ. 7.1.4).



Εικόνα 7.1.4 Άποψη από τη βόρεια πλευρά του Παγγαίου όπου διακρίνονται οι βασικοί λιθολογικοί σχηματισμοί του όρους. Υπερκείμενα του πλουτωνίτη τοποθετείται μία σειρά μαρμάρων υποκείμενα της επωθημένης σειράς εναλλαγών μαρμάρων σχιστολίθων. Στην περιοχή των κορυφών Μάτι και Αβγό εντοπίζονται φακοί αμφιβολιτών.

7.1.1 Κατώτερη Ενότητα Γνευσίων Παγγαίου

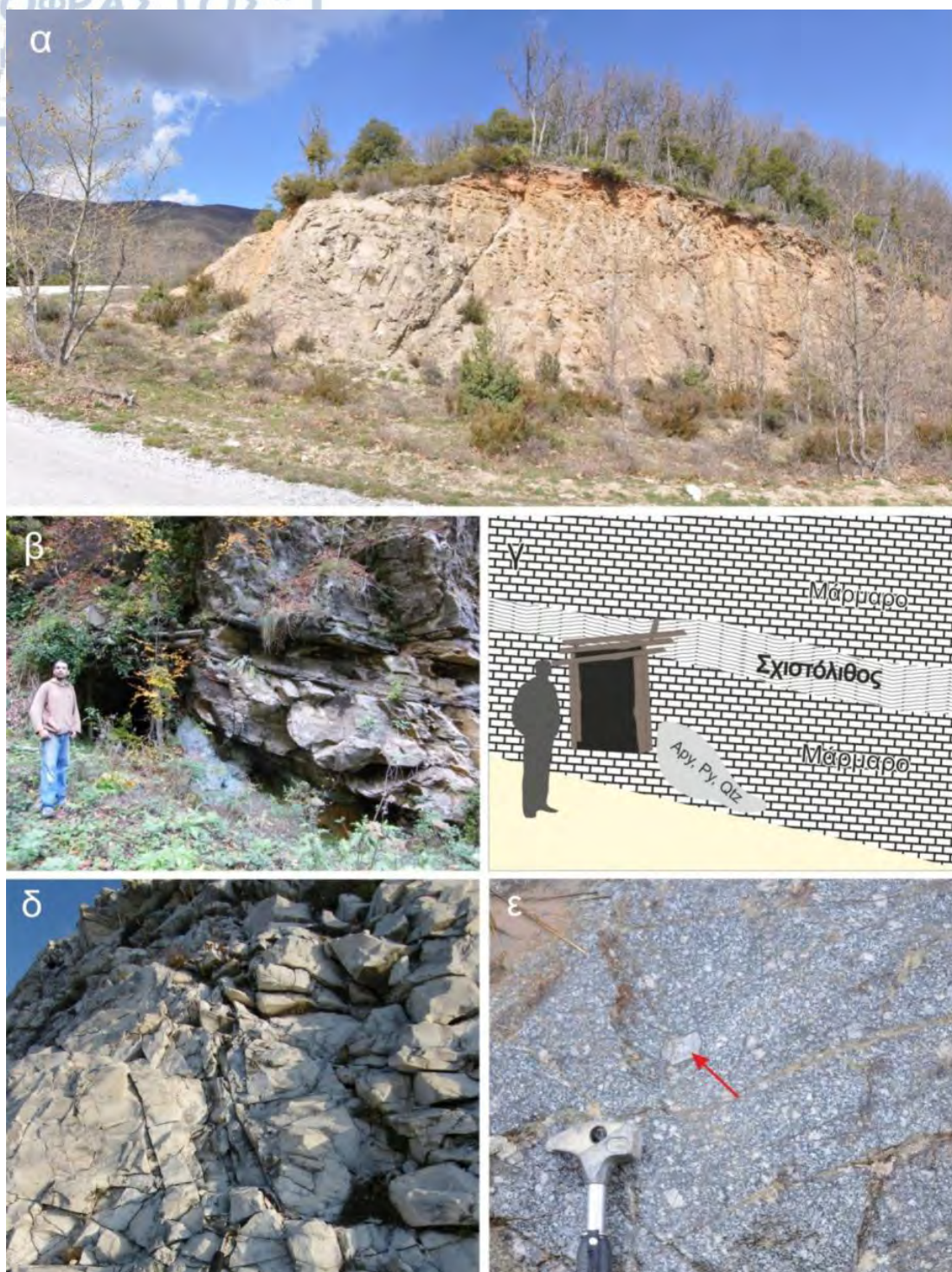
Η κατώτερη λιθοστρωματογραφική ενότητα στο Παγγαίο (Εικ. 7.1.5.α) καταλαμβάνει κυρίως το νοτιανατολικό τμήμα του όρους και αποτελείται σύμφωνα με τον Μproskos (1989) κυρίως από γνευσίους και γνευσιοσχιστόλιθους όρθο προέλευσης. Είναι λευκοκρατικοί παρουσία μοσχοβίτη, ενώ κατά θέσεις εμφανίζεται και βιοτίτης. Κοντά σε περιοχές των γρανοδιοριτικών εμφανίσεων παρουσιάζονται ως οφθαλμογενέσιοι (Kronberg and Schenck, 1974) με πορφυροβλάστες καλιούχων αστρίων ή χαλαζία, με μήκος έως και 15cm.

7.1.2 Ενότητα Λιθολογικών Εναλλαγών

Η ενότητα των λιθολογικών εναλλαγών εμφανίζεται υπερκείμενη της ενότητας των γνευσίων του Παγγαίου. Αποτελείται από σχιστολίθους, μαρμαρυγιακούς σχιστολίθους, μάρμαρα, πρασινοςχιστόλιθους, ακτινολιθικούς σχιστολίθους και αμφιβολίτες (Kronberg, and Schenck, 1974; Baker et al, 1993) (Εικ. 7.1.5.β-γ). Αυτή η μεταβατική ζώνη με πάχος περίπου 600 m υπόκειται της ενότητας των ανώτερων μαρμάρων του Παγγαίου όρους και παρουσιάζει τις περισσότερες μεταλλοφόρες εμφανίσεις.

7.1.3 Ανώτερα Μάρμαρα Παγγαίου

Αποτελεί την ανώτερη λιθοστρωματογραφική ενότητα του όρους Παγγαίου και φέρει σαφείς ομοιότητες με τις σειρές μαρμάρων του Φαλακρού και του Μενοικίου (Χαντζηπαναγής, 1991). Συνίσταται από μάρμαρα συμπαγή, μερικώς στρωμένα και κατά θέσεις ταινιωτά και δολομιτικά (Εικ. 7.1.5.δ). Τα μάρμαρα αυτά έχουν κυρίως λευκό χρώμα και παρουσιάζονται στις κορυφές του Παγγαίου, στο κεντρικό και δυτικό τμήμα του όρους (Kronberg and Schenck, 1974).



Εικόνα 7.1.5 α) Άποψη των γνευσίων της Κατώτερης Ενότητας Γνευσίων του Παγγαίου από την περιοχή της Αγίας Τριάδας. β) Εναλλαγές σχιστολίθων και μαρμάρων από την Ενότητα Λιθολογικών Εναλλαγών του Παγγαίου. Άποψη από την περιοχή Ασημότρυνες. γ) Σχηματική απεικόνιση της εικόνας 7.1.5.β. δ) Τα λευκά μάρμαρα της Ανώτερης Ενότητας Μαρμάρων του Παγγαίου. ε) Άποψη του γρανίτη από την περιοχή του Οφρυνίου. Σημειώνεται άστρος με μήκος 3 cm.

7.1.4 Πλουτωνίτης του Παγγαίου

Ο πυρήνας της μέγα-αντικλινικής δομής του Παγγαίου που έχει άξονα περίπου 25 km και διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ χαρακτηρίζεται από την παρουσία ενός πλουτωνίτη (Εικ. 7.1.1). Στην ευρύτερη περιοχή του Παγγαίου καταγράφονται 4 περιοχές όπου λόγω διάβρωσης εμφανίζεται ο υποκείμενος μαγματικός όγκος. Η μία βρίσκεται νοτιοδυτικά της Νικήσιανης, ενώ οι τρεις στο νότιο και νοτιοδυτικό τμήμα του όρους, τις περιοχές της Μεσορόπης, του Ποδοχωρίου και του Οφρυνίου. Σε ορισμένες περιοχές παρατηρείται μία λεπτή άλω θερμικής μεταμόρφωσης στα υπερκείμενα μάρμαρα, με παρουσία του επιδότου και επουσιωδώς του διοψίδιου (Eleftheriadis and Koroneos, 2003). Φαινόμενα από μεταμόρφωση επαφής παρουσιάζουν και οι υπερκείμενοι γνέυσιοι.

Σύμφωνα με τους Eleftheriadis et al (2001) τα γρανитоειδή του Παγγαίου είναι δυνατό να διακριθούν σε δύο τύπους: 1) έναν ετερόκοκκο, μέσο-αδρόκοκκο (μήκος κρυστάλλων 1-6 mm) πορφυροειδή τύπο και 2) έναν ισοκοκκώδη, λεπτό-μεσόκοκκο (μήκος κρυστάλλων 0,2-3 mm) μη πορφυροειδή τύπο (Eleftheriadis and Koroneos, 2003).

Στην περιοχή του Οφρυνίου εντοπίστηκε θέση, όπου οι άστριοι έχουν μήκος μέχρι και 3 cm (Εικ. 7.1.5.ε). Η μετάβαση από τον ένα τύπο στον άλλο δεν είναι διακριτή. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι απότομη, αλλά γενικά φαίνεται ότι ο μη πορφυροειδής τύπος διεισδύει στον πορφυριτικό. Στη μάζα του μη πορφυροειδούς τύπου στην περιοχή της Μεσολακιάς παρατηρούνται μικροί σκουρόχρωμοι θύλακες λεπτόκοκκου υλικού με κυκλικό έως ελλειψοειδές σχήμα (Eleftheriadis and Koroneos, 2003).

Τα γρανитоειδή σύμφωνα με το διάγραμμα R1-R2 ταξινόμησης (De La Roche et al, 1980) περιγράφονται ως τοναλίτες, γρανοδιορίτες και γρανίτες. Πρόκειται για ασβεσταλκαλικό υλικό και I-τύπου γρανίτες (Eleftheriadis and Koroneos, 2003). Η ηλικία του πορφυριτικού γρανитоειδούς σύμφωνα με τον Eleftheriadis (1999; 2001) τοποθετείται μεταξύ $21,2 \pm 0,5$ με $22,0 \pm 0,5$ Ma, στοιχείο που συμφωνεί με την ηλικία του πλουτωνίτη της Καβάλας (Dinter et al, 1995) και χρονολογούν τα νεότερα διεισδυτικά φαινόμενα.

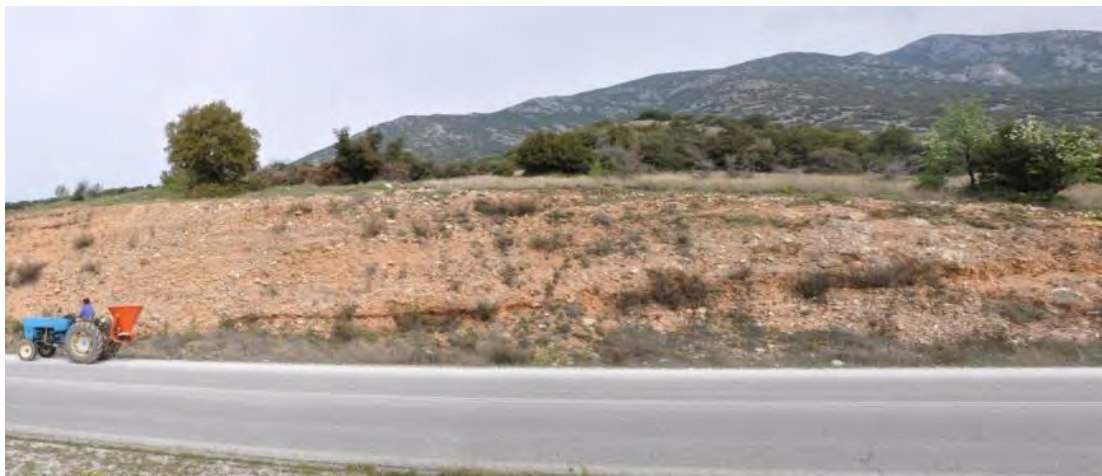
Η παρουσία γρανитоειδών θυλάκων μόνο στον πορφυριτικό τύπο δείχνει ότι οι δύο βασικοί τύποι των γρανитоειδών του Παγγαίου έχουν διαφορετική ηλικία διείσδυσης.

Οι πλουτωνίτες του Παγγαίου και της Καβάλας θεωρούνται συντεκτονικοί και ότι ανήκουν στο ίδιο τεκτονικό γεγονός (Meyer, 1968; Dinter, 1998; Eleftheriadis and Koroneos, 2003).

7.1.5 Τριτογενή και Τεταρτογενή ιζήματα

Το Παγγαίο χαρακτηρίζεται από την παρουσία τριτογενών και τεταρτογενών αποθέσεων περιμετρικά του ορεινού όγκου (Kronberg, 1972; Kronberg and Schenck, 1974; Ξυδάς, 1978).

Τα Τεταρτογενή ιζήματα αποτελούνται από πλευρικά κορήματα, ερυθροστρώματα και αλλουβιακά ριπίδια με υλικά από την αποσάθρωση των γρανιτών, των γνευσίων, των σχιστολίθων, των αμφιβολιτών και κυρίως των μαρμάρων (Εικ. 7.1.5.1). Η εξάπλωσή τους είναι μεγαλύτερη προς το ΒΑ τμήμα του όρους, όπου εντοπίζεται και το μεγαλύτερο αλλουβιακό ριπίδιο του Παγγαίου στην περιοχή της Νικήσιανης. Μεγάλη έκταση αυτών των ιζημάτων καλύπτεται από την τύρφη που δημιουργείται στα τενάγη των Φιλίππων.



Εικόνα 7.1.5.1 Αλλουβιακές αποθέσεις των μαρμάρων στο νοτιοδυτικό τμήμα του Παγγαίου (Κοκκινοχώρι). Άποψη προς Βορρά.

Οι αλλουβιακές αυτές αποθέσεις επικάθονται σε θαλάσσια ιζήματα του Πλειστοκαίνου, τα οποία εμφανίζονται στο νοτιοδυτικό τμήμα του Παγγαίου, στη δυτική απόληξη της κοιλάδας των Πιερέων. Σύμφωνα με τους Kromberg και Schenck (1974) αποτελούνται από ψαμμίτες, αργίλους, κροκαλοπαγή και ασβεστολιθικοί τόφφοι και η ηλικία τους προσδιορίζεται στο Κατώτερο-Μέσο Καλάβριο.

Ιζήματα του Τριτογενούς εμφανίζονται κυρίως στις ανατολικές, βορειοανατολικές υπώρειες του Παγγαίου. Αποτελούνται από λιμνοχερσαίες αποθέσεις με μάργες, κροκαλοπαγή, αργίλους και αμμοχάλικες και από θαλάσσιες αποθέσεις με ψαμμίτες, μάργες, ασβεστόλιθους και αποθέσεις γύψου (Ξυδάς, 1978). Τραβερτινοειδείς ασβεστόλιθοι και μάργες με θαλάσσια απολιθώματα εμφανίζονται στο νοτιοδυτικό τμήμα του Παγγαίου στην περιοχή του Ορφανίου (Ξυδάς, 1978).

7.2 Τεκτονική-Μεταμόρφωση

Το Παγγαίο αποτελεί ως ένα σύνθετο mega-αντίκλινο, με έντονα σημάδια της ρηξιγενούς τεκτονικής, αλλά και της πλαστικής παραμόρφωσης (πτυχογόνου τεκτονικής). Οι άξονες των πτυχών και οι τεκτονικές γραμμώσεις εμφανίζονται να κλίνουν προς βορειοανατολικά ή νοτιοδυτικά. Η βορειοανατολική κλίση είναι πιο συχνή (Dinter, 1998). Η διεύθυνση κλίσης κυμαίνεται από $B30^{\circ}$ - $60^{\circ}A$, με την πλειονότητα να συγκεντρώνεται από $B40^{\circ}$ - $50^{\circ}A$ (Meyer, 1968; Kokkinakis, 1980a). Αν και παλαιότερα θεωρούνταν αποτέλεσμα ενός ξεχωριστού τεκτονικού γεγονότος εξαιτίας της ομοιόμορφης διεύθυνσής τους (e.g., Meyer, 1968; Kronberg, 1969; Kokkinakis, 1980b), ο Dinter (1998) ομαδοποιεί τις τεκτονικές αυτές γραμμές σε τέσσερα διαφορετικά γεγονότα (Εικ. 7.2.1):

D1: Αλπική Σύγκλιση κατά το Κάτω Τριτογενές

Το γεγονός αυτό περιλαμβάνει σύμφωνα με τον Dinter (1998) σε συνθήκες σύγκλισης την επώθηση των γνευσίων της Σερβομακεδονικής μάζας και του Συμπλέγματος Δυτικής Θράκης (ενότητα Σιδηρόνερου) πάνω στις σειρές μαρμάρων του Φαλακρού (ενότητα Παγγαίου). Το σύμπλεγμα γνευσίων της Σερβομακεδονικής μάζας και του Συμπλέγματος Δυτικής Θράκης (ενότητα Σιδηρόνερου) παρουσιάζουν μεταμόρφωση υψηλής πίεσης-υψηλής θερμοκρασίας (HP-HT), ενώ η ενότητα Παγγαίου έχει υποστεί πρασινοσχιστολιθική μεταμόρφωση. Αυτό δείχνει ότι οι γνεύσιοι επωθήθηκαν πάνω στα μάρμαρα της ενότητας Παγγαίου. Ο εφελκυσμός του Νεογενούς οδήγησε σύμφωνα με τους Dinter and Royden (1993) τη Σερβομακεδονική μάζα να εμφανίζεται επωθημένη στα μάρμαρα του όρους Παγγαίου και οι γνεύσιοι του Σιδηρόνερου στις σειρές μαρμάρων του Φαλακρού (e.g. Zachos and Dimadis, 1983). Το γεγονός αυτό δημιούργησε ζώνες διάτμησης με αζιμούθιο $B40^{\circ}$ - $50^{\circ}A$, σχιστότητα κρυστάλλωσης (S1) κατά την πρασινοσχιστολιθική μεταμόρφωση και ισοκλινείς πτυχές.

D2: Εφελκυσμός Κάτω Μειοκαίνου

Σε αυτή τη φάση διείσδυσε ο πλουτωνίτης του Συμβόλου και αποκαλύφθηκε η λιθολογική ενότητα γνευσίων του Παγγαίου. Παράλληλα δημιουργήθηκαν έντονες ζώνες μυλωνιτώσεως στη μάζα του και εμφανίζονται υφές S-C πορφυροκλαστών (Dinter, 1998).

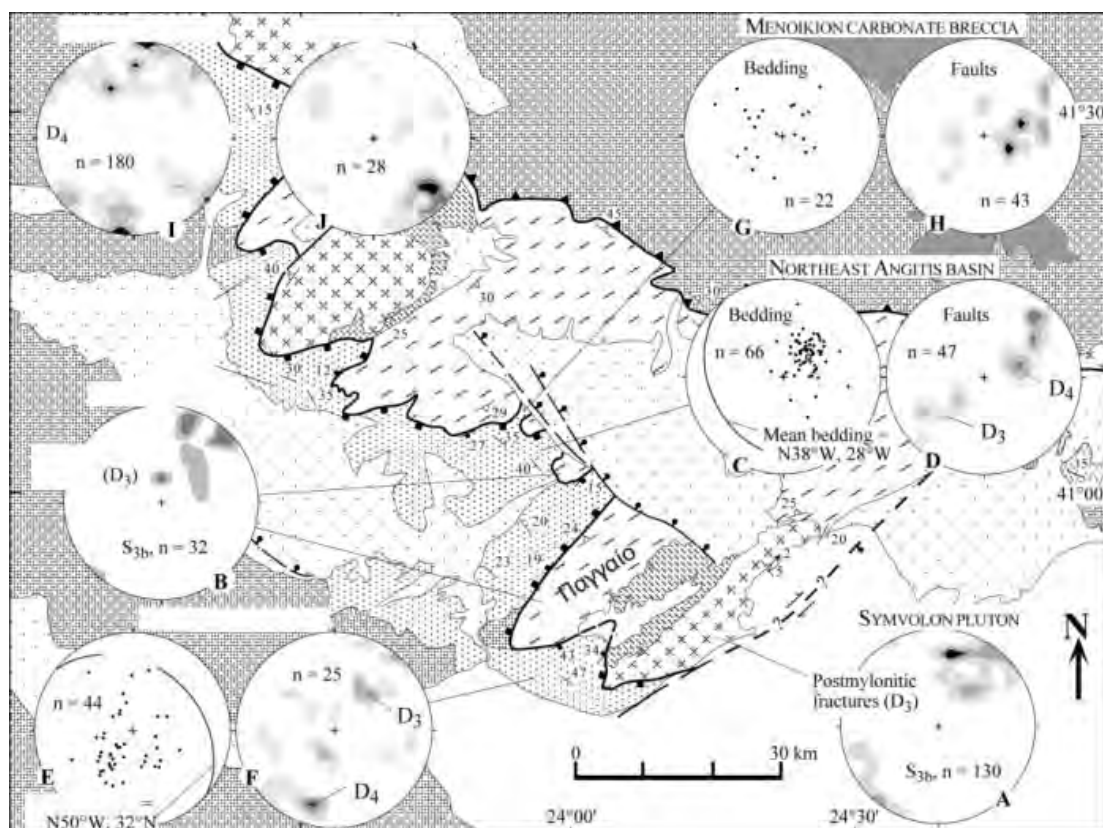
D3: Εφελκυσμός Μέσου Μειοκαίνου-Κάτω Πλειοκαίνου

Σύμφωνα με τον Dinter (1998) το ρήγμα αποκόλλησης του Στρυμόνα διακόπτει όλες τις τεκτονικές δομές των D1 και D2 φάσεων για πάνω από 100

km. Τα πετρώματα της Σερβομακεδονικής κινούνται προς τα νοτιοδυτικά, ενώ τα πετρώματα της μάζας της Ροδόπης αποκαλύπτονται προς τα βορειοανατολικά. Το σύμπλεγμα της Ροδόπης αυξάνει το πλάτος του από 40 km στο όρος Βροντού μέχρι και 80 km στη νότια ακτή του Συμβόλου. Στην περιοχή του Στρυμόνα οι μυλωνίτες αυτής της φάσης εξαφανίζονται τους μυλωνίτες των D1 και D2. Μεγάλα κανονικά ρήγματα με μεγάλες κλίσεις ακολουθούν τις φάσεις μυλωνιτίωσης προς την ενότητα Παγγαίου. Στο κάτω τέμαχος του ρήγματος αποκόλλησης του Στρυμόνα δημιουργούνται αντιθετικά και συνθετικά κανονικά ρήγματα. Το μεγαλύτερο από αυτά διακόπτει τη Σερβομακεδονική μάζα στην ενότητα Κερδυλίων και στην ενότητα Βερτίσκου. Το ρήγμα Καβάλας-Ξάνθης-Κομοτηνής πιθανότατα αποτελεί τη συνέχιση του ρήγματος του Στρυμόνα.

D4: Εφελκυσμός Κάτω Πλειοκαίνου-Τεταρτογενούς

Το ρήγμα του Στρυμόνα διακόπτεται από κανονικά ρήγματα βορειοδυτικής διεύθυνσης στα όρια των λεκανών του Στρυμόνα και της Δράμας (Dinter, 1998). Τα ρήγματα αυτά είναι ενεργά τοπικά. Τα ρήγματα αυτά ανυψώνουν το υπόβαθρο και ταπεινώνουν τις εσωτερικές λεκάνες. Στο νοτιοδυτικό τμήμα του όρους Παγγαίου και σε υψόμετρο 290 m εντοπίζεται μία θαλάσσια αναβαθμίδα Πλειοκαίνικης-Τεταρτογενούς ηλικίας, επισημαίνοντας έτσι τους υψηλούς ρυθμούς ανύψωσης της περιοχής.



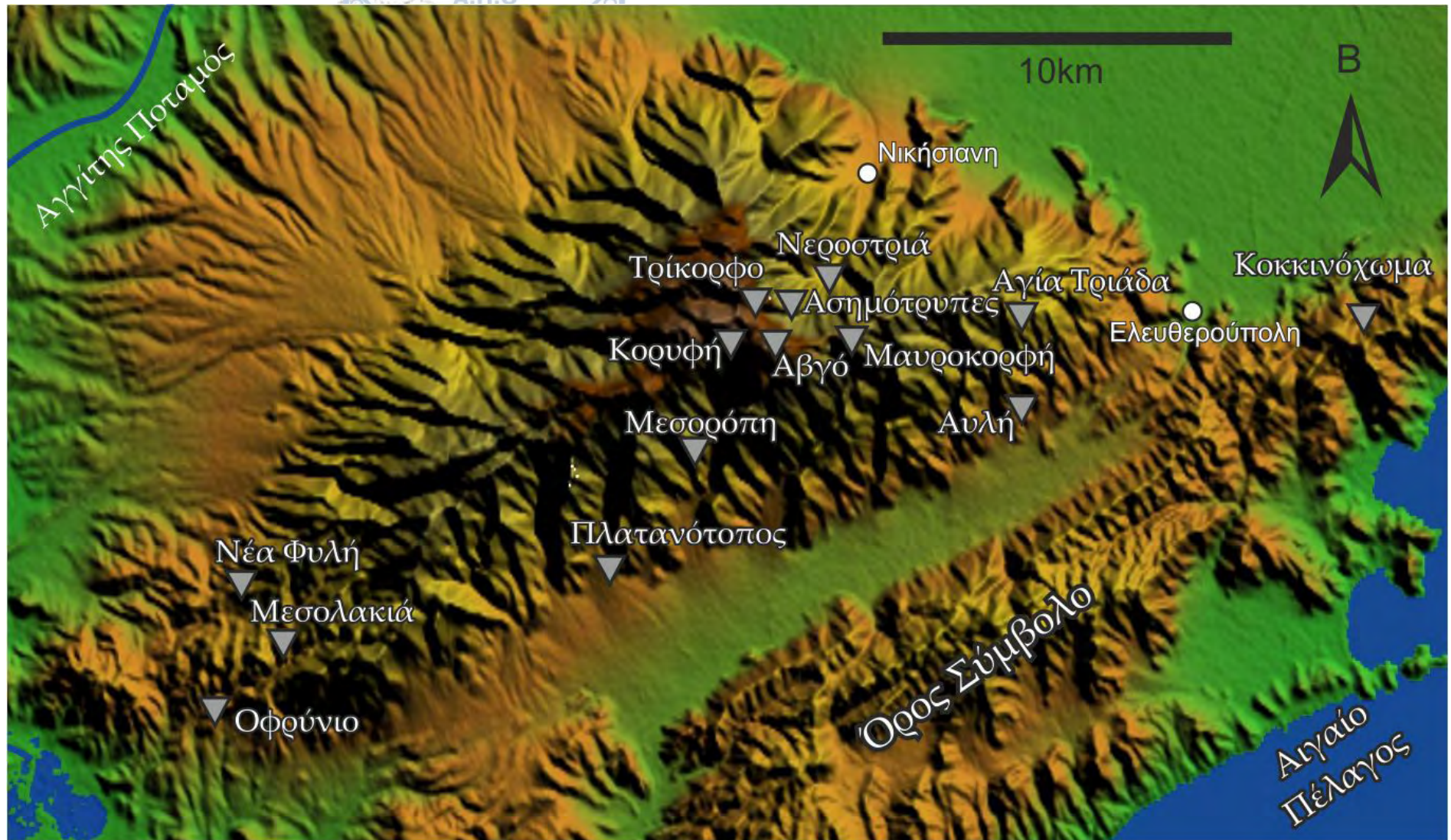
Εικόνα 7.2.1 Οι βασικές τεκτονικές γραμμές στην ευρύτερη περιοχή του Παγγαίου όρους. D1-D4 τα επιμέρους τεκτονικά γεγονότα σύμφωνα με το Dinter (1998).

7.3 Εμφανίσεις μεταλλεύματος στο όρος Παγγαίο – Σύγχρονη Μεταλλευτική Δραστηριότητα

Με βάση τις μέχρι σήμερα κοιτασματολογικές έρευνες την ευρύτερη περιοχή του όρους Παγγαίου οι εμφανίσεις μεταλλεύματος εντοπίζονται κυρίως στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα του όρους, όπως στην Αγία Τριάδα, νοτίως της Νικήσιανης (Νεροστριά, Ασημότρυπες), βορείως της Μεσορόπης (Τσαγκάκη Λάκκος), στις κορυφές Μάτι (υψηλότερη κορυφή του όρους), Αβγό, Τρίκορφο και Μαυροκορφή και στην ημιορεινή περιοχή της Αυλής-Χρυσοκάστρου και λιγότερο στο δυτικό (Εικ. 7.3.1). Οι μεταλλοφόρες εμφανίσεις στο δυτικό Παγγαίο εντοπίζονται από τη Νέα Φυλή μέχρι και το Οφρύνιο, καθώς και στην περιοχή του Πλατανότοπου. Επίσης, στο παρόν πόνημα μελετήθηκε και η μεταλλοφόρος εμφάνιση στη βορειοανατολική απόληξη του όρους Σύμβολο, στο Κοκκινόχωμα, λόγω γειτνίασης με το Παγγαίο.

Στη θέση Νεροστριά, νότια της Νικήσιανης, ο πλουτωνίτης του Παγγαίου εμφανίζεται με πληθώρα χαλαζιακών φλεβών και κοιτών μεταλλοφορίας με πάχος που κυμαίνεται από 30 mm έως 40 cm. Το κύριο ορυκτό της μεταλλοφορίας είναι ο σιδηροπυρίτης, που κατά θέσεις εμφανίζεται οξειδωμένος σε γκαιτίτη, ενώ συναντώνται και ορυκτά του Bi-Te. Οι φλέβες στη μάζα του πλουτωνίτη είναι φυλλώδεις με παράλληλη έως υποπαράλληλη διάταξη σχηματίζοντας μικρούς μεταλλοφόρους φακούς πάχους μέχρι και 30 cm. Η μεταλλοφορία αυτού του τύπου συναντάται και στα όρια επαφής του μαγματικού σώματος της Νικήσιανης με τα υπερκείμενα μάγμαρα. Στην περιοχή της Νεροστριάς υφίσταται σύγχρονη μεταλλευτική στοά διανοιγμένη στη μάζα του γρανίτη από την εταιρεία «Ηλιόπουλος» το 1968. Στο εσωτερικό της είναι εμφανής η φλεβική διάταξη της μεταλλοφορίας και οι φλέβες με παράλληλη έως υποπαράλληλη διάταξη και φακούς.

Ακριβώς 80 m βορειοδυτικά της σύγχρονης στοάς στη Νεροστριά, η εταιρεία «Ηλιόπουλος» ξεκίνησε την ίδια χρονιά διάνοιξη σύγχρονης στοάς, διευρύνοντας αρχαία στοά στην επαφή του γρανίτη με τα υπερκείμενα μάγμαρα (περιγράφεται παρακάτω στο κεφ. 8.7) αλλά χωρίς να την ολοκληρώσει (Εικ. 7.3.2).



Εικόνα 7.3.1 Οι περιοχές εμφάνισης μεταλλεύματος (τρίγωνα) στο όρος Παγγαίο και στη βορειοανατολική απόληξη του Συμβόλου.



Εικόνα 7.3.2. Άποψη από το δυτικό πρανές του σύγχρονου μεταλλείου στην περιοχή της Νεροστριάς Νικήσιανης. Η μεταλλοφορία εντοπίζεται μέσα στη μάζα του γρανίτη σε φυλλώδεις φλέβες με παράλληλη-υποπαράλληλη διάταξη και σε φακούς (φ).

Στο κεντρικό τμήμα του όρους, στην περιοχή Ασημότρυπες νοτίως της Νικήσιανης εντοπίζεται μεταλλοφορία παράλληλα στη σχιστότητα των μαρμάρων και των σχιστολίθων, καθώς και σε χαλαζιακές φλέβες την οποία όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 5.6 οι Eliopoulos and Kilias (2011) την περιγράφουν ως ένα νέο είδος μεσοθερμικής μεταλλοφορίας, σε ανθρακικά πετρώματα, με υπομικροσκοπικό χρυσό.

Στις Ασημότρυπες η μεταλλευτική εταιρεία «Ηλιόπουλος» διάνοιξε επίσης τρεις ερευνητικές στοές το 1977. Στο εσωτερικό των στοών εντοπίζεται μεταλλοφορία μεικτών θειούχων με χαλκοπυρίτη. Η τοποθέτηση της μεταλλοφορίας εξαρτάται από την τεκτονική και εμφανίζεται κατά θέσεις παραμορφωμένη. Στην περιοχή ανάντη των σύγχρονων στοών στις Ασημότρυπες, στο σημείο όπου έχουν διανοιχθεί οι αρχαίες στοές, η μεταλλοφορία εμφανίζεται οξειδωμένη (Εικ. 7.3.3). Τα μεταλλοφόρα σώματα σύμφωνα με τον Αρβανιτίδη (1988) αποτελούνται από φλέβες θειούχου μεταλλοφορίας (αρσеноπυρίτης, σιδηροπυρίτης), η οποία κατά θέσεις είναι οξειδωμένη ($\text{Fe} \pm \text{Mn}$) σε φλεβική και συνσχιστώδη ανάπτυξη.



Εικόνα 7.3.3 Αποψη της πρωτογενούς μεταλλοφορίας (αρσеноπυρίτης, σιδηροπυρίτης) σε επαφή με την οξειδωμένη (γκαιίτης) από την περιοχή Ασημότρυπες Παγγαίου.

Νοτιοανατολικά της περιοχής Ασημότρυπες στην περιοχή Μαυροκορφή (Καρα-γκιόλ), παρατηρείται επίσης θειούχος μεταλλοφορία και επιφανειακά επανθίσματα μαλαχίτη, αζουρίτη και οξειδίων Fe (Εικ. 7.3.4.α). Η μεταλλοφορία εμφανίζεται με κυρίαρχα ορυκτά το σιδηροπυρίτη, χαλκοπυρίτη, βισμούθινίτη και αρσеноπυρίτη (Ευαγγέλου, 1995), ενώ ο Κρικέλας (1973) αναφέρει και το γαληνίτη. Ο Au εντοπίζεται μέσα στο σιδηροπυρίτη σε κόκκους από μερικά έως 15 μm (Ευαγγέλου, 1995).

Στην περιοχή της κορυφής του Αβγού (Πιλάφ Τεπέ) παρατηρούνται επιφανειακά εμποτισμοί σιδηροξειδίων, καθώς και μαλαχίτη-αζουρίτη στα λευκά συμπαγή και έντονα τεκτονισμένα μάρμαρα. Στο εσωτερικό δύο σύγχρονων στοών που έχουν διανοιχθεί ανατολικά και δυτικά της κορυφής Αβγό αντίστοιχα παρατηρούνται φλέβες πληρωμένες με γκαϊίτη. Ο γκαϊίτης πληρώνει κυρίως τεκτονικές ασυνέχειες και λιγότερο κενά της σχιστότητας των λεπτοπλακωδών μαρμάρων. Επίσης, σε αγκεριτωμένες ζώνες του μαρμάρου παρουσιάζεται αδροκρυσταλλικός σιδηροπυρίτης σε διακλάσεις (Εικ. 7.3.4.β) (Αρβανιτίδης, 1988). Αυτές οι ζώνες εντοπίζονται νοτίως και δυτικά της ψηλότερης κορυφής του Παγγαίου (κορυφή Μάτι).

Μεταλλοφόρες φλέβες παρατηρούνται στη μάζα του γρανίτη στη Μεσορόπη, όπως και στα υπερκείμενα αγκεριτωμένα μάρμαρα (Εικ. 7.3.4.γ). Τα βασικά της ορυκτά που εντοπίστηκαν στο εξορυχθέν υλικό σύγχρονης στοάς είναι ο σιδηροπυρίτης και ο χαλκοπυρίτης (Baker et al, 1991), ενώ στα τοιχώματά της παρατηρούνται γκαϊίτης και μαλαχίτης.

Στις υπώρειες του Παγγαίου από την περιοχή του Πλατανότοπου μέχρι και την Αυλή εντοπίζεται οξειδωμένη μεταλλοφορία σε χαλαζιακές φλέβες μέσα στους γνευσίους και τους σχιστόλιθους (Εικ. 7.3.4.δ). Στην περιοχή της Αυλής-Χρυσοκάστρου οι φλέβες αυτές έχουν αξιόλογο πάχος, από 2 έως 15 cm. Η οξειδωμένη αυτή μεταλλοφορία παρουσιάζεται και στην περιοχή της Αγίας Τριάδας (Χορτοκόπι) με πληρώμενες διακλάσεις με γκαϊτίτη, αλλά και στη Μεσορόπη σε αγκεριτιωμένα μάρμαρα (Baker et al, 1991).

Στο δυτικό Παγγαίο από το Οφρύνιο μέχρι και βορειότερα στη Νέα Φυλή τα μάρμαρα παρουσιάζονται έντονα τεκτονισμένα και αγκεριτιωμένα-πυριτιωμένα (Εικ. 7.3.4.ε). Σε συμφωνία με τις τεκτονικές ασυνέχειες βρίσκεται και η καρστικοποίηση των μαρμάρων. Η μεταλλοφορία χαρακτηρίζεται από τους έντονους εμποτισμούς σιδηροξειδίων και από την παρουσία βαρύτη στη μάζα των μαρμάρων. Οι μεταλλοφόρες περιοχές εντοπίζονται ανατολικά του πλουτωνίτη του Οφρυνίου.

Σε παλαιότερες έρευνες στην περιοχή Οφρυνίου-Μεσολακιάς εντοπίζεται μεταλλοφορία Ba-Cu-Pb-Zn κατά μήκος επωθητικών επιφανειών. Στις επαφές του μαρμάρου με τον πλουτωνίτη δεν εντοπίζεται αξιόλογη μεταλλοφορία (Επιτρόπου, 1993). Σύμφωνα με τον Επιτρόπου (1993) οι γεωτρητικές έρευνες έδειξαν χαμηλές περιεκτικότητες σε Au που πάντως δεν συσχετίζεται με το βαθμό πυριτίωσης-αγκεριτίωσης, όπως επίσης μικρές περιεκτικότητες σε ιχνοστοιχεία Sb, Cu, Mo, V και Bi (Επιτρόπου, 1993).

Διακλάσεις πληρώμενες με γκαϊτίτη με υψηλές περιεκτικότητες σε Au παρατηρούνται στην περιοχή του Κοκκινοχωρίου στο ΝΔ Παγγαίο (Baker et al, 1991), αλλά και στην περιοχή ΝΑ του Παγγαίου στο Σύμβολο όρος κοντά στο χωριό Κοκκινόχωμα (Εικ. 7.3.4.ζ). Στην περιοχή του Κοκκινοχώματος η σιδηρούχος μεταλλοφορία εντοπίζεται στην επαφή των μαρμάρων με τους γνευσίους και τους σχιστολίθους (Baker et al, 1992). Οι φλέβες του γκαϊτίτη έχουν πάχος από 2 έως 20 cm.



Εικόνα 7.3.4 Φωτογραφίες με τη μεταλλοφορία στην περιοχή του Παγγαίου: α) Φλέβα μεταλλοφορίας με οξειδία Fe στην περιοχή της Μαυροκορφής. β) Κρύσταλλοι σιδηροπυρίτη με περιφερειακή αντικατάσταση από γκαϊτίτη από διάκλαση στα λευκά μάρμαρα της κορυφής του Παγγαίου. γ) Φλέβες γκαϊτίτη σε μάρμαρα στο εσωτερικό σύγχρονου μεταλλείου στην περιοχή της Μεσορόπης. δ) Χαλαζιακές φλέβες με γκαϊτίτη παράλληλα και υπό γωνία στην κύρια σχιστότητα των γνευσίων του υποβάθρου (περιοχή του Πλατανότοπου. ε) Άποψη των μαρμάρων της περιοχής του Οφρυνίου. Η μάζα τους εμφανίζεται έντονα καρστικοποιημένη με εμποτισμούς σιδηρούχου μεταλλοφορίας με βαρύτη. ζ) Μεταλλοφορία σε τεκτονική διάκλαση αποτελούμενη κυρίως από γκαϊτίτη στην περιοχή του Κοκκινόχωματος.

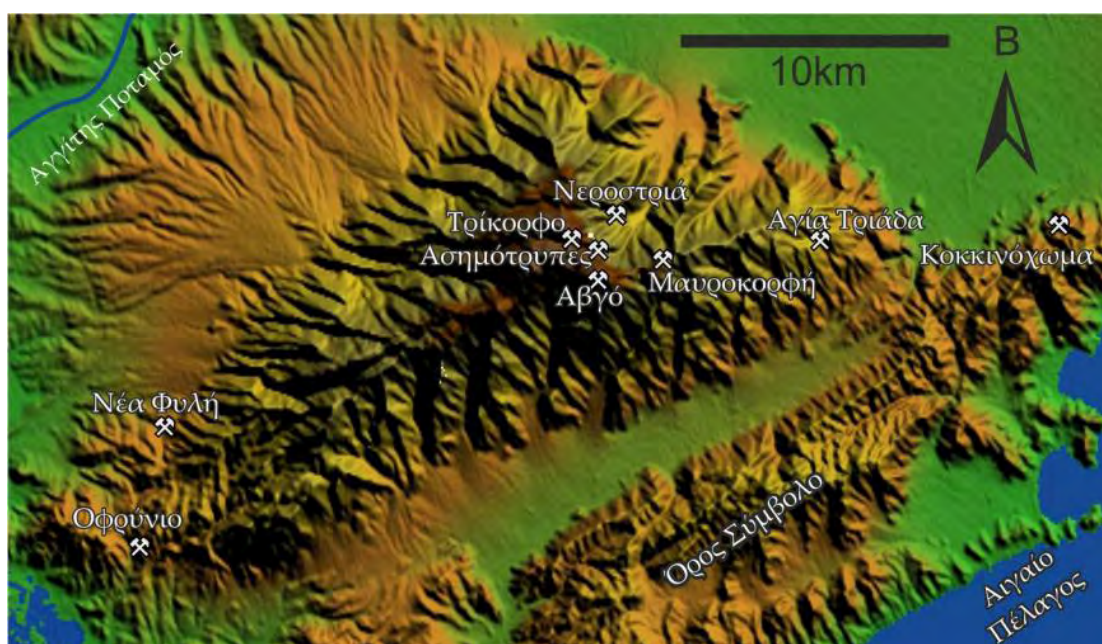
Προσχωματικός χρυσός εντοπίζεται στις υπώρειες του Παγγαίου στην περιοχή της Νικήσιανης, στο Κοκκινόχωμα, όπως και στα κατάντη του όρους Σύμβολο κοντά στο χωριό Κοκκινόχωμα (Baker et al, 1991, 1992) (Εικ. 7.3.5). Η παρουσία χρυσού στο ελλουβιακό μανδύα των μεταλλοφοριών και στις αλλουβιακές αποθέσεις επιβεβαιώνεται και στην περιοχή της Παλαιάς Καβάλας (Vavelidis et al, 1996; Χατζηπαναγής και Δημήτρουλα, 1996; Vavelidis et al, 1997a; 1997b).



Εικόνα 7.3.5 Σχηματική υπερυψωμένη τομή (σκαρίφημα) μεταξύ Παγγαίου και Συμβόλου, όπου σημειώνονται οι μεταλλοφορίες Au και οι πιθανές πρωσχοσιγενείς αποθέσεις τους σε Au (τροποπ. από Baker et al, 1992).

8. ΑΡΧΑΙΑ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΣΤΟ ΟΡΟΣ ΠΑΓΓΑΙΟ

Στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής στο όρος Παγγαίο καταγράφηκαν συνολικά 9 περιοχές με αρχαία υπόγεια και επιφανειακή μεταλλευτική δραστηριότητα. Οι περιοχές αυτές είναι η Αγία Τριάδα, η Μαυροκορφή, η Νεροστριά, οι Ασημότρυπες, το Τρίκορφο, το Αβγό, η Νέα Φυλή και το Οφρύνιο. Στην περιοχή της Μεσορόπης εντοπίστηκαν είσοδοι μεταλλευτικών στοών αλλά δεν κατέσται δυνατή η μελέτη τους λόγω κατάρρευσης των πρανών. Στην παρούσα έρευνα περιλαμβάνεται και η μεταλλευτική περιοχή νοτιοανατολικά του χωριού Κοκκινόχωμα, η οποία αν και γεωγραφικά αποτελεί μέρος του Συμβόλου όρους, εντάσσεται στις μεταλλευτικές περιοχές του Παγγαίου λόγω της άμεσης γειτνιάσής της (Εικ. 8.1).



Εικόνα 8.1 Γεωγραφική θέση των μεταλλευτικών περιοχών που μελετήθηκαν στην ευρύτερη περιοχή του Παγγαίου όρους.

Σε κάθε περιοχή πραγματοποιήθηκε γεωλογική χαρτογράφηση τόσο στην επιφάνεια όσο και στις υπόγειες στοές, και μελετήθηκε ο τύπος μεταλλοφορίας και ο τρόπος εκμετάλλευσής της. Οι περισσότερες μεταλλευτικές περιοχές εντοπίζονται στο κεντρικό-ανατολικό Παγγαίο, ενώ η μεταλλευτική δραστηριότητα ήταν πιο περιορισμένη στο δυτικό Παγγαίο. Στη συνέχεια περιγράφονται οι περιοχές μεταλλευτικής δραστηριότητας από την περιοχή του Κοκκινόχωματος στα ανατολικά μέχρι και την περιοχή της Νέας Φυλής και του Οφρυνίου στα δυτικά.

8.1 Μεταλλευτική Περιοχή Κοκκινοχώματος

8.1.1 Γεωγραφική Θέση

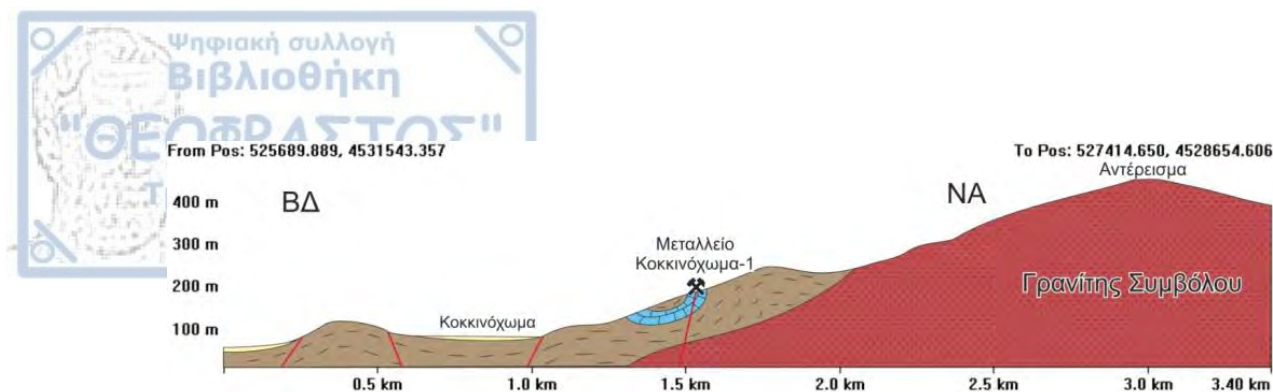
Στην περιοχή του Κοκκινοχώματος εντοπίστηκε μία υπόγεια στοά (Κοκκινόχωμα-1). Η στοά «Κοκκινόχωμα-1» βρίσκεται 1000 m νοτιοανατολικά του ομώνυμου χωριού σε λοφώδη περιοχή, με υψόμετρο 248 m (A.S.L.), βόρεια του λόφου «Αντέρεισμα» και 242 m νοτιοδυτικά του βράθρου «Περιστεριώνας» (Εικ. 8.1.1.1). Η προσέγγιση στην περιοχή της στοάς γίνεται αρχικά διαμέσου χωματόδρομου μέχρι το βράθρο του Περιστεριώνα και μετά από ευδιάκριτο μονοπάτι. Η βλάστηση είναι χαμηλή αποτελούμενη κυρίως από πρίνους.



Εικόνα 8.1.4.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση της περιοχής του Κοκκινοχώματος (υπόβαθρο: Basemap Ktimatologio).

8.1.2 Γεωλογία-Τεκτονική

Η περιοχή χαρακτηρίζεται από την παρουσία μαρμάρων, γνευσίων και γνευσιοσχιστολίθων της ενότητας Παγγαίου (εικ. 8.1.2.1). Σύμφωνα με την υπαίθρια παρατήρηση τα μάρμαρα εμφανίζονται λευκά έως τεφρά, μεσοστρωματώδη έως λεπτοστρωματώδη και στην περιοχή της στοάς τοποθετούνται ως παρεμβολές στα ανώτερα στρώματα των γνευσίων και των γνευσιοσχιστολίθων. Οι γνεύσιοι και τα μάρμαρα είναι ισχυρά πτυχωμένα δημιουργώντας κεκλιμένες πτυχές. Υπολογίζεται με βάση τη χαρτογράφηση της περιοχής, ότι ο υποκείμενος γρανίτης του Συμβόλου βρίσκεται σε βάθος περίπου 100 m (Εικ. 8.1.2.1).



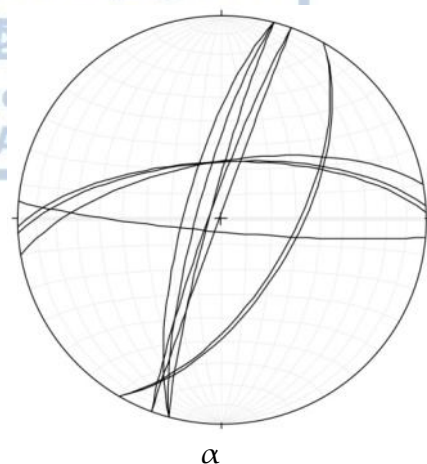
Εικόνα 8.1.2.1 Γεωλογική τομή στην περιοχή του Κοκκινόχωματος (τροποποιημένο από Kronberg and Schenck, 1974, υπόμνημα όπως στην Εικ. 7.1.1).

Στην περιοχή της στοάς κανονικό ρήγμα με παράταξη $20-200^\circ$ φέρνει σε κατακόρυφη επαφή τα μαρμαρα με τους γενεύσιους, ενώ σε αρκετές θέσεις παρατηρούνται τεκτονικά λατυποπαγή. Η διεύθυνση αυτής της τεκτονικής επαφής είναι ορατή και στο εσωτερικό της στοάς, αφού αυτή ακολουθεί η γενική διεύθυνση διάνοιξης, όπως φαίνεται και στα ροδοδιαγράμματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν (Σχ. 8.1.2.1). Οι περισσότερες διακλάσεις εξωτερικά της υπόγειας εκμετάλλευσης είναι πληρωμένες με οξειδία του Fe. Στην περιοχή της εισόδου υπάρχει περιορισμένος κώνος κορημάτων από τα υπολείμματα της εξόρυξης (Εικ. 8.1.2.2).

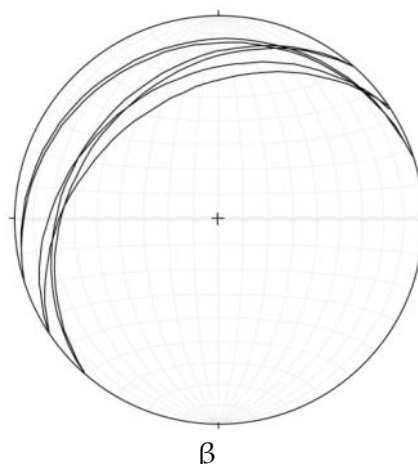


Εικόνα 8.1.2.2 Άποψη της εισόδου της στοάς (σημειώνεται με βέλος). Με διακεκομμένη γραμμή ορίζεται ο κώνος των υλικών της εξόρυξης. Στο βάθος αριστερά η Ελευθερούπολη και το όρος Παγγαίο.

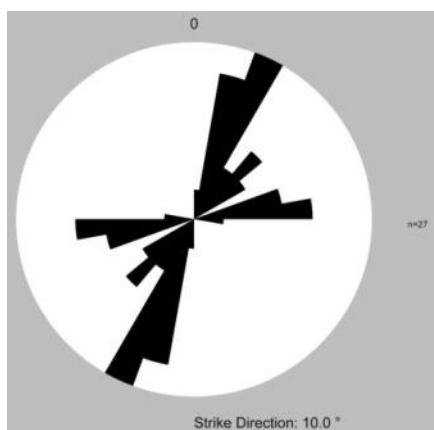
Η μεταλλοφορία, τόσο εξωτερικά όσο και εσωτερικά της στοάς, ακολουθεί τη διεύθυνση των τεκτονικών ασυνεχειών και της σχιστότητας των μαρμαρών. Ενώ η κύρια διεύθυνση των τεκτονικών ασυνεχειών είναι η BBA-NNΔ, μία δευτερεύουσα τεκτονική γραμμή έχει διεύθυνση ABA-ΔNΔ. Επίσης, οι επιφάνειες σχιστότητας των μαρμαρών παρουσιάζουν πλήρωση των μεταξύ τους κενών με μεταλλοφορία με διεύθυνση κλίσης από 310° έως 342° (Σχ. 8.1.2).



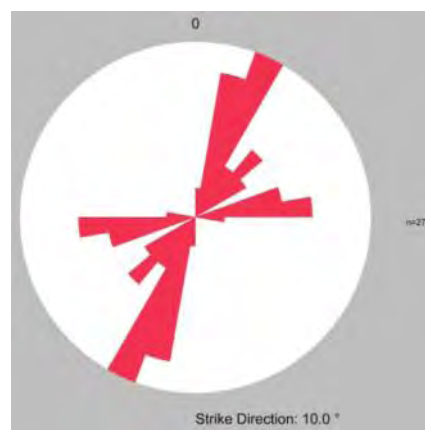
α



β



γ



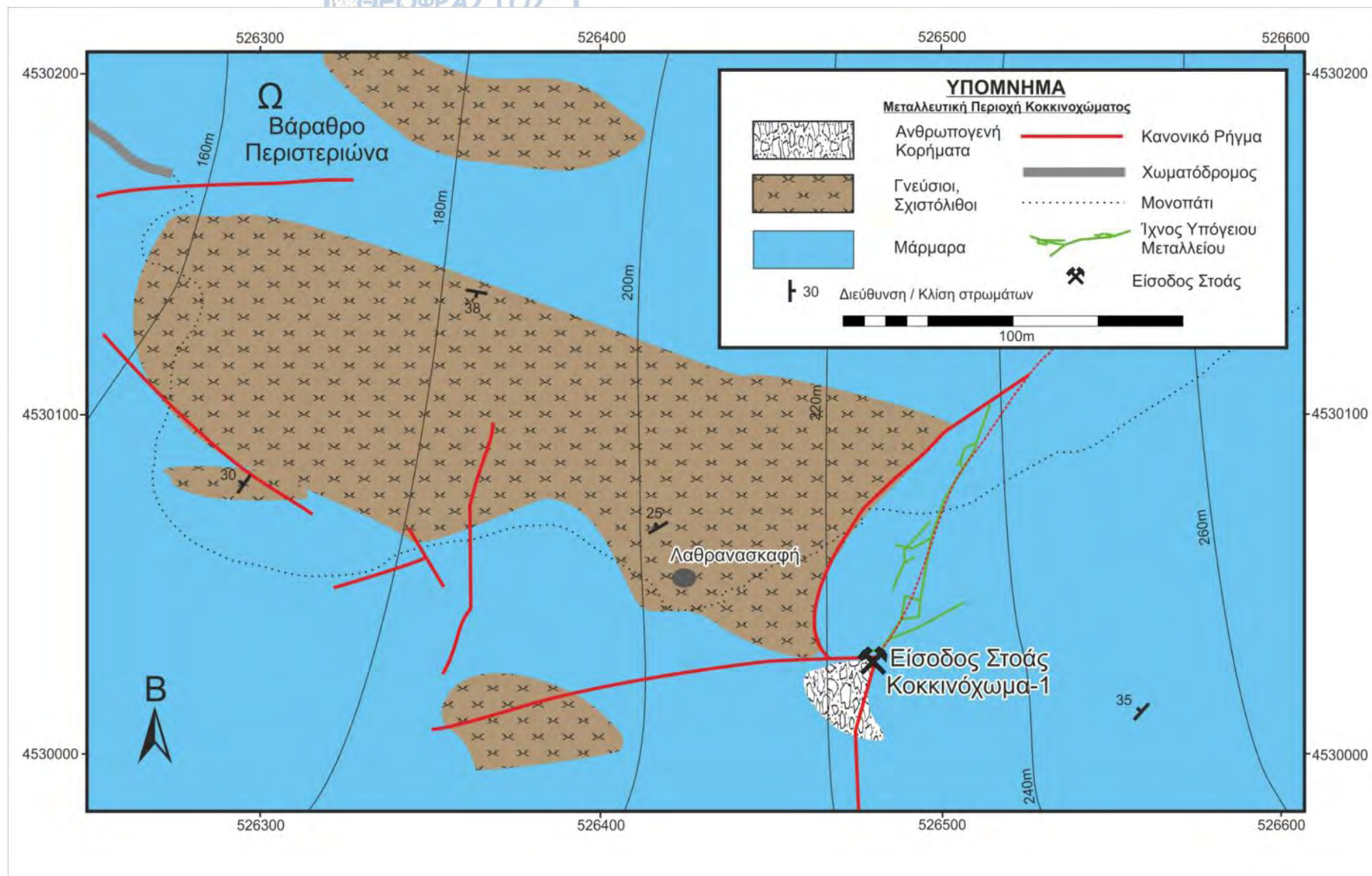
δ

Σχήμα 8.1.2.1 Στερεογραφικές προβολές (κάτω ημισφαίριο) και ροδοδιαγράμματα των ασυνεχειών από το εσωτερικό της στοάς «Κοκκινόχωμα-1». α. Προβολή των τεκτονικών ασυνεχειών και των μέγιστων πόλων. β. Προβολή των επιφανειών σχιστότητας. γ. Ροδοδιάγραμμα των ασυνεχειών της στοάς. δ. Ροδοδιάγραμμα ασυνεχειών που φιλοξενούν μεταλλοφορία.

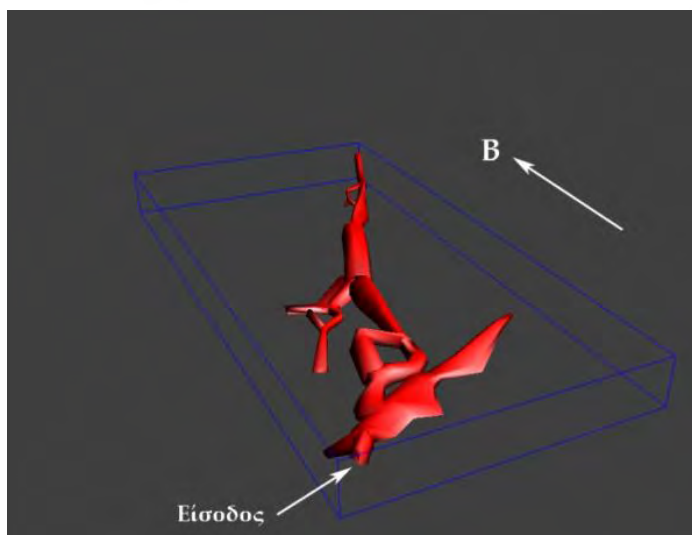
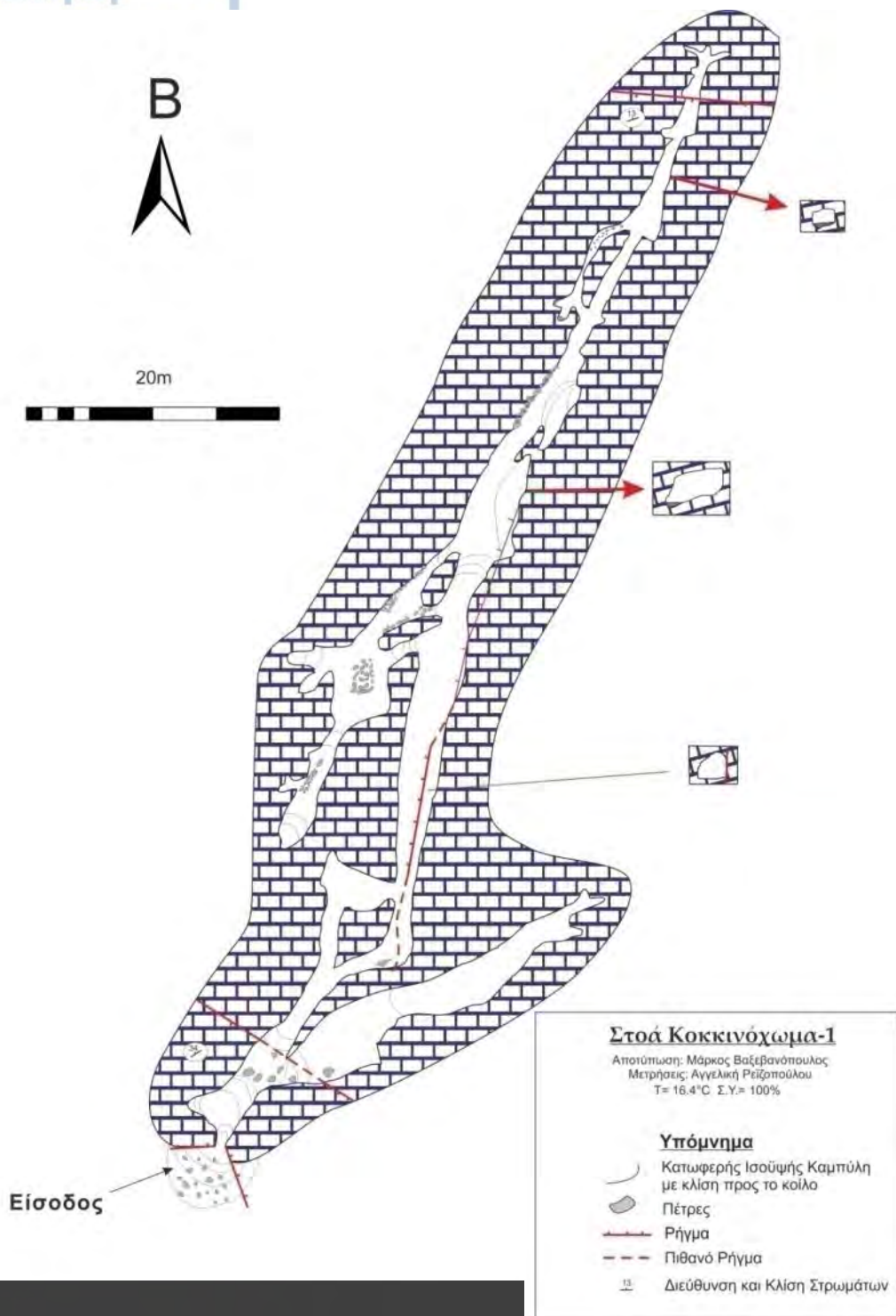
8.1.3 Περιγραφή Στοάς-Τεχνικές Εξόρυξης

Η στοά «Κοκκινόχωμα-1» έχει διανοιχθεί στα μάρμαρα της ενότητας Παγγαίου (Εικ. 8.1.3.1-3), τα οποία στην περιοχή των υπόγειων εργασιών εμφανίζονται έντονα κατακερματισμένα και καρστικοποιημένα. Η γενική διεύθυνση διάνοιξης (Εικ. 8.1.3.2) ακολουθεί την κύρια τεκτονική διεύθυνση (BBA-NNΔ).

Η είσοδος της στοάς «Κοκκινόχωμα-1» έχει μικρές διαστάσεις λόγω της πλήρωσής της με χαλαρά ιζήματα (1,0 m x 0,5 m / πλάτος x ύψος). Το συνολικό μήκος των διαδρόμων της στοάς είναι 206 m. Το μέσο ύψος των διαδρόμων είναι 1,5 m με ανώτερο 2,6 m και μικρότερο ύψος 0,6 m. Κατά τη διάνοιξη της στοάς παρατηρείται εμφάνιση φυσικών καρστικών εγκοίλων, τα οποία στο εσωτερικό τους φέρουν διακλάσεις με ίχνη οξειδωμένης μεταλλοφορίας. Στο δάπεδο των διαδρόμων συναντώνται εκβολάδες (υπολείμματα εξόρυξης) και τεμάχια μαρμάρου (Εικ. 8.1.3.3.β, γ, δ). Το υλικό των εκβολάδων και τεμάχια



Εικόνα 8.1.3.1 Γεωλογικός χάρτης (κάτοψη) της μεταλλευτικής περιοχής Κοκκινόχωματος.



Εικόνα 8.1.3.2 Κάτοψη με τομές και τρισδιάστατη απεικόνιση της στοάς «Κοκκινόχωμα-1».

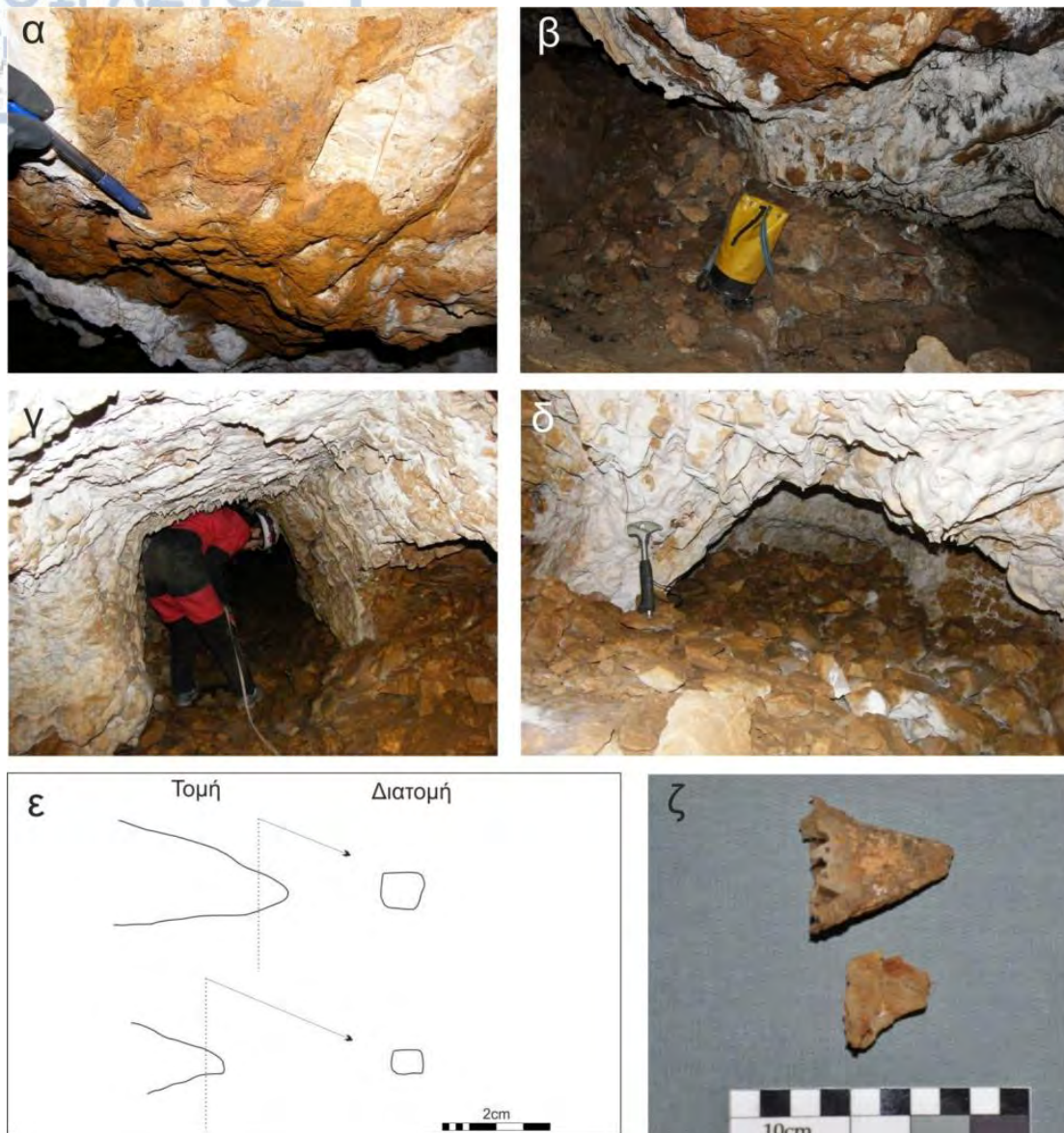
μαρμάρου χρησιμοποιήθηκαν για να πληρωθούν παλαιότερες φάσεις της υπόγειας μεταλλευτικής δραστηριότητας (Εικ. 8.1.3.3.γ). Επίσης, παρατηρούνται στύλοι και τοιχία υποστήριξης στους διευρυμένους θαλάμους της στοάς από τα υπολείμματα αυτά της εξόρυξης (Εικ. 8.1.3.3.δ). Το ύψος τους φθάνει το 1,6 m. Μεγάλο μέρος των τοιχωμάτων, αλλά και των ξερολιθιών έχει καλυφθεί με ασβεστιτική κρούστα (ρεόλιθο) με πάχος από 0,1 έως 1,5 cm. Το μεγαλύτερο μέρος των τεκτονικών διακλάσεων στο εσωτερικό του έχει πληρωθεί με μετάλλευμα, αποτελούμενο κυρίως από γκαιτίτη. Εντοπίζεται κατά μήκος των ρηγμάτων, των διακλάσεων, αλλά και στις επιφάνειες σχιστότητας του μαρμάρου.

Τα βασικά εργαλεία που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι το μεταλλευτικό σφυρί, ενώ για την εξόρυξη του μεταλλεύματος το σφυρί και το καλέμι, όπως έδειξε η μελέτη των εξαγόμενων εκμαγείων (Εικ. 8.1.3.3.α, ε, ζ). Η διατομή του χρησιμοποιούμενου σφυριού ήταν τετραγωνική. Ο συνολικός εξορυγμένος όγκος υλικού από τη στοά υπολογίζεται σε 527 m³. Λόγω του έντονου τεκτονικού κατακερματισμού των μαρμάρων η διάνοιξη δείχνει να πραγματοποιούνταν σχετικά με ευνοϊκότερες συνθήκες και ταχύτητα σε σχέση με άλλες στοές, όπου η βραχομάζα είναι συμπαγής. Η θερμοκρασία στο εσωτερικό της υπόγειας στοάς είναι 16,4°C καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου και η σχετική υγρασία είναι περίπου 100%.

8.1.4 Αρχαιολογικά Ευρήματα

Στο εσωτερικό της αρχαίας μεταλλευτικής στοάς δεν βρέθηκε επιφανειακά κεραμική ή κάποιο άλλο αρχαιολογικό εύρημα. Κατά θέσεις εντοπίζονται υπολείμματα καύσεων. Στα τοιχώματα και συγκεκριμένα στις θέσεις μεταλλοφορίας παρατηρούνται έντονα τα ίχνη από το μεταλλευτικό σφυρί και το καλέμι.

Στην περιοχή 80 m δυτικά της εισόδου της στοάς υπάρχει λαθρονασκαφή, όπου στα ανεσκαμμένα στρώματα παρατηρούνται σημάδια έντονης καύσης, με κεραμική και διάσπαρτα τεμάχια μεταλλεύματος. Η κεραμική είναι Ρωμαϊκών χρόνων και συναντάται και στο μονοπάτι προς την αρχαία στοά. Στην ευρύτερη περιοχή του χωριού Κοκκινόχωμα έχουν βρεθεί λείψανα κτηρίων και κεραμική ελληνιστικής, ρωμαϊκής και βυζαντινής εποχής (πληροφορίες από αρχείο ΙΗ'ΕΠΚΑ).



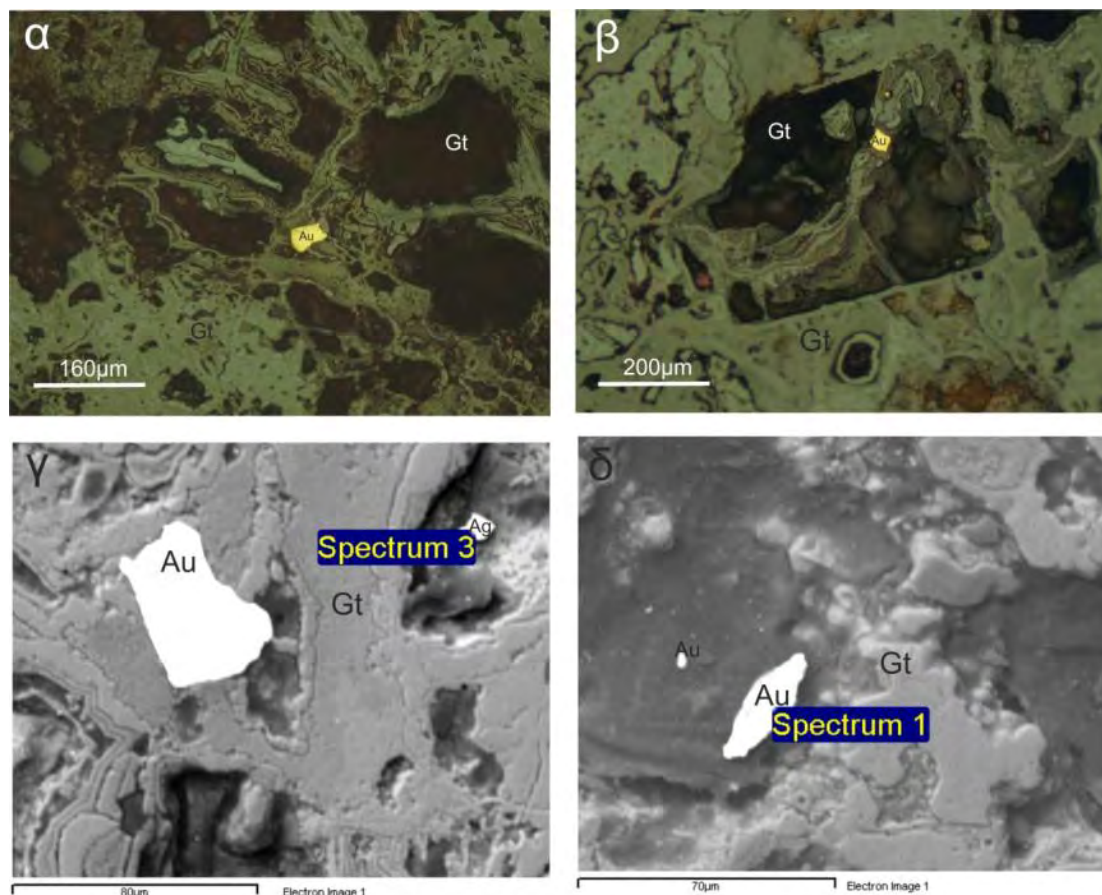
Εικόνα 8.1.3.3 α) Ίχνη της εκμετάλλευσης στα τοιχώματα της στοάς Κοκκινόχωμα-1. β) Τοιχίο υποστήριξης δομημένο από στείρο υλικό της εξόρυξης. γ) Αποψη της στοάς Κοκκινόχωμα-1. δ) Πλήρωση τμήματος της στοάς με στείρο εξορυγμένο υλικό. ε) Τομές και διατομές από τα ίχνη του μεταλλευτικού σφυριού. ζ) Θετικά εκμαγεία εργαλείων εξόρυξης από το εσωτερικό της στοάς.

8.1.5 Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Μεταλλεύματος

Από την περιοχή του Κοκκινόχωματος ελήφθησαν τρία δείγματα από τα τοιχώματα της στοάς και δύο δείγματα από στείρο υλικό στο δάπεδο της στοάς (εκβολάδες). Το μέταλλευμα αποτελείται κατά κύριο λόγο από γκαϊτίτη, καθώς επίσης από σιδηροπυρίτη, γαληνίτη, σφαλερίτη, ακανθίτη, αυτοφυή χρυσό, άργυρο και χαλκό (Εικ. 8.1.5.1.α, β, γ, δ).

Ο σιδηροπυρίτης εντοπίζεται ως υπολείμματα λόγω της έντονης οξείδωσης μέσα στον γκαϊτίτη, όπως και ο γαληνίτης και ο σφαλερίτης. Ο ακανθίτης (Ag₂S) αποτελεί ένα σπάνιο ορυκτό της μεταλλοφορίας στο Κοκκινόχωμα, σε αντίθεση με τον αυτοφυή χρυσό που εντοπίζεται συχνά. Ειδικά, σε ένα από τα

συλλεχθέντα δείγματα (SKS-1) εντοπίστηκαν πάνω από 30 κόκκοι χρυσού. Το μήκος τους κυμαίνεται από 5 έως 80 μm . Η μορφή τους είναι κυρίως ελλειψοειδής, τραπεζοειδής έως ακανόνιστη. Οι κόκκοι του αυτοφυούς αργύρου έχουν διάμετρο από 7 έως 36 μm με μορφή σφαιρική, φακοειδή έως ακανόνιστη (Εικ. 8.1.5.1.γ). Ο αυτοφυής χαλκός εντοπίζεται σπανιότερα, έχει μήκος από 5 έως 30 μm και η μορφή των κόκκων είναι κυρίως ακανόνιστη.



Εικόνα 8.1.5.1 Φωτογραφίες σε μικροσκόπιο από τη μεταλλοφορία στο Κοκκινόχωμα α) Κόκκος χρυσού (Au) σε γκαϊτίτη (Gt). Μεταλλογραφικό μικροσκόπιο //N. β) Κόκκοι χρυσού (Au) σε γκαϊτίτη (Gt). Διακρίνονται οι έδρες του οξειδωμένου σιδηροπυρίτη. Μεταλλογραφικό μικροσκόπιο //N. γ) Κόκκοι χρυσού (Au) και αργύρου (Ag) σε γκαϊτίτη (Gt). SEM back scattering image. δ) Ελλειψοειδής κόκκοι χρυσού (Au) σε γκαϊτίτη (Gt). SEM back scattering image.

Η μελέτη κάτω από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σε κόκκους του χρυσού από τη μεταλλοφορία του Κοκκινόχωματος, έδειξε ότι περιεκτικότητες σε Au κυμαίνονται από 92,63 έως 99,45 wt % και σε Ag από 0,50 έως 7,28 wt % (Πίν. 8.1.5.1). Ο μέσος χημικός τύπος των κόκκων χρυσού είναι $\text{Au}_{91,63}\text{Ag}_{8,37}$. Οι κόκκοι του αργύρου παρουσιάζουν περιεκτικότητες σε Ag από 94,3% έως 99,9 wt %.

Πίνακας 8.1.5.1 Μικροανάλυσεις κόκκων χρυσού σε μετάλλευμα της στοάς Κοκκινόχωματος.

wt%	SKM-11	SKM-12	SKM-13	SKMI-14	SKS-11	SKS-12	SKS-21	SKS-31	SKS-11b	SKS-115
Au	92,93	92,88	92,63	92,79	92,60	93,05	95,42	99,45	98,15	97,55
Ag	5,81	6,15	7,17	6,16	7,28	6,75	4,30	0,50	1,35	2,35
Σ	98,74	99,03	99,8	98,95	99,88	99,80	99,72	99,95	99,50	99,90
Εκατοστιαία Ατομική Σύσταση										
Au	89,75	89,21	87,62	89,19	87,45	88,30	92,40	99,09	97,55	95,79
Ag	10,25	10,79	12,38	10,81	12,55	11,70	7,60	0,91	2,45	4,21

Από μία χημική ανάλυση σε δείγμα μεταλλεύματος από το δάπεδο της στοάς προκύπτει ότι η περιεκτικότητα σε Au είναι 3,65 ppm και σε Ag 4,30 ppm (Πίν. 8.1.5.2). Τρία δείγματα μεταλλεύματος από το εσωτερικό της υπόγειας εκμετάλλευσης Κοκκινόχωμα-1 έδειξαν περιεκτικότητες σε Au από 0,01 έως 0,22 ppm (μ.ο. 0,08 ppm) και σε Ag από 0,10 έως 0,70 ppm (μ.ο. 0,30 ppm).

Με βάση τις χημικές αναλύσεις που έγιναν σε δείγματα από τη στοά (Πίν. 8.1.5.2) προκύπτει ότι η μεταλλοφορία είναι πλούσια σε Fe₂O₃ (37,77-79,38 wt%, μ.ό. 58,89 wt%), σε As (5285,30->10.000 ppm) και σε Cu (140,50->10.000 ppm). Επίσης οι περιεκτικότητες που εμφανίζει ο Pb είναι 11,40-963,40 ppm (μ.ό. 254,96 ppm), ο Zn 215,00-655,00 ppm (μ.ό. 456,12 ppm), το Sb 91,35-374,30 ppm (μ.ό. 189,36 ppm), το W 2,60-216,00 ppm (71,65 ppm), το V 87,00-276,00 ppm (μ.ό. 152,75 ppm) και το Bi 10,50-1328,10 ppm (μ.ό. 381,53 ppm).

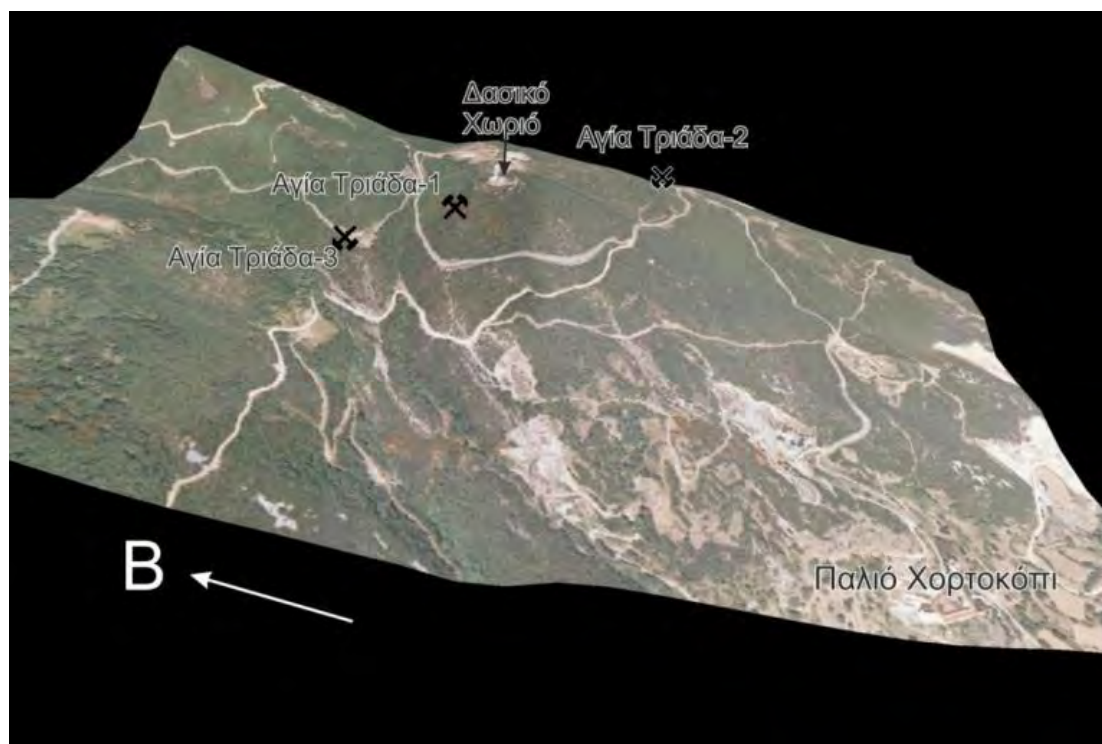
Πίνακας 8.1.5.2 Περιεκτικότητες των βασικών οξειδίων (wt %) και ιχνοστοιχείων (ppm) από δείγματα στην περιοχή του Κοκκινοχώματος. Το δείγμα SKS-1 προέρχεται από στείρο υλικό του δαπέδου (εκβολάδα), ενώ τα δείγματα SKM-1, 2, 3 από τα τοιχώματα της στοάς. Ο ολικός σίδηρος εκφράζεται σε Fe₂O₃. (bdl: κάτω του ορίου ανιχνευσιμότητας, na: δεν αναλύθηκε)

	SKS-1	SKM-1	SKM-2	SKM-3
(wt%)				
SiO ₂	6,52	1,45	na	na
Al ₂ O ₃	0,21	0,86	0,60	0,57
Fe ₂ O ₃	79,38	67,33	51,07	37,77
MgO	0,11	0,10	0,08	0,07
CaO	0,62	1,65	14,12	13,46
Na ₂ O	0,03	bdl	0,00	bdl
K ₂ O	bdl	0,02	bdl	bdl
TiO ₂	0,01	0,02	0,00	0,00
P ₂ O ₅	0,25	0,64	0,32	0,29
MnO	0,03	bdl	0,04	0,03
Cr ₂ O ₃	0,11	0,13	0,21	0,30
ppm				
Au	3,65	0,22	0,01	0,01
Ag	4,30	0,70	0,10	0,11
Cu	140,50	>10000,00	5965,80	4899,02
Pb	963,40	17,90	11,40	27,16
Zn	215,00	655,00	479,50	475,00
As	7630,70	>10000,00	6000,50	5285,30
Bi	1328,10	10,50	27,59	159,94
Ba	67,00	29,00	32,90	37,90
Be	1,00	4,00	1,70	2,90
Co	2,40	0,70	1,70	2,10
Ga	2,30	35,60	13,20	10,80
Hf	0,40	0,20	bdl	bdl
Nb	0,90	0,80	0,06	0,09
Rb	0,30	1,00	0,10	bdl
Sr	10,40	11,30	8,90	8,40
Th	4,40	0,80	1,00	1,00
U	2,60	1,50	1,10	1,00
V	87,00	276,00	143,00	105,00
W	2,60	216,00	45,50	22,50
Zr	7,40	8,50	0,10	0,20
Y	12,30	37,70	27,15	28,37
La	11,30	7,10	4,00	4,30
Ce	17,60	1,80	1,30	1,30
Sb	116,20	374,30	175,61	91,35
Hg	0,05	0,15	0,06	0,10
Tl	bdl	bdl	6,45	4,95
Se	7,00	bdl	0,10	0,20
Te	na	na	32,90	29,29

8.2 Μεταλλευτική Περιοχή Αγίας Τριάδας

8.2.1 Γεωγραφική Τοποθέτηση

Η μεταλλευτική περιοχή της Αγίας Τριάδας βρίσκεται 3.6 km δυτικά της Ελευθερούπολης και 986 m βορειοδυτικά από το εγκαταλελειμμένο χωριό του Χορτοκοπίου σε υψόμετρο 500 m. Κοντά στην κορυφή του ανατολικού λόφου της Αγίας Τριάδας με υψόμετρο 611 m βρίσκεται το ξενοδοχείο Δασικό Χωριό. Πλακοστρωμένο μονοπάτι ξεκινάει από το ξενοδοχείο με κατάληξη σε μία αρχαία υπόγεια στοά, την Αγία Τριάδα-1. Η είσοδος της υπόγειας στοάς Αγία Τριάδα-1 βρίσκεται 93 m νοτιοδυτικά του ξενοδοχείου σε υψόμετρο 605 m. Στην εγγύς περιοχή καταγράφονται και άλλες στοές (Αγία Τριάδα-2 και 3) οι είσοδοι των οποίων έχουν καταστραφεί από τη διάνοιξη των δασικών δρόμων (Εικ. 8.2.1.1). Η βλάστηση είναι αρκετά πυκνή αποτελούμενη από πρίνους και δρύες.



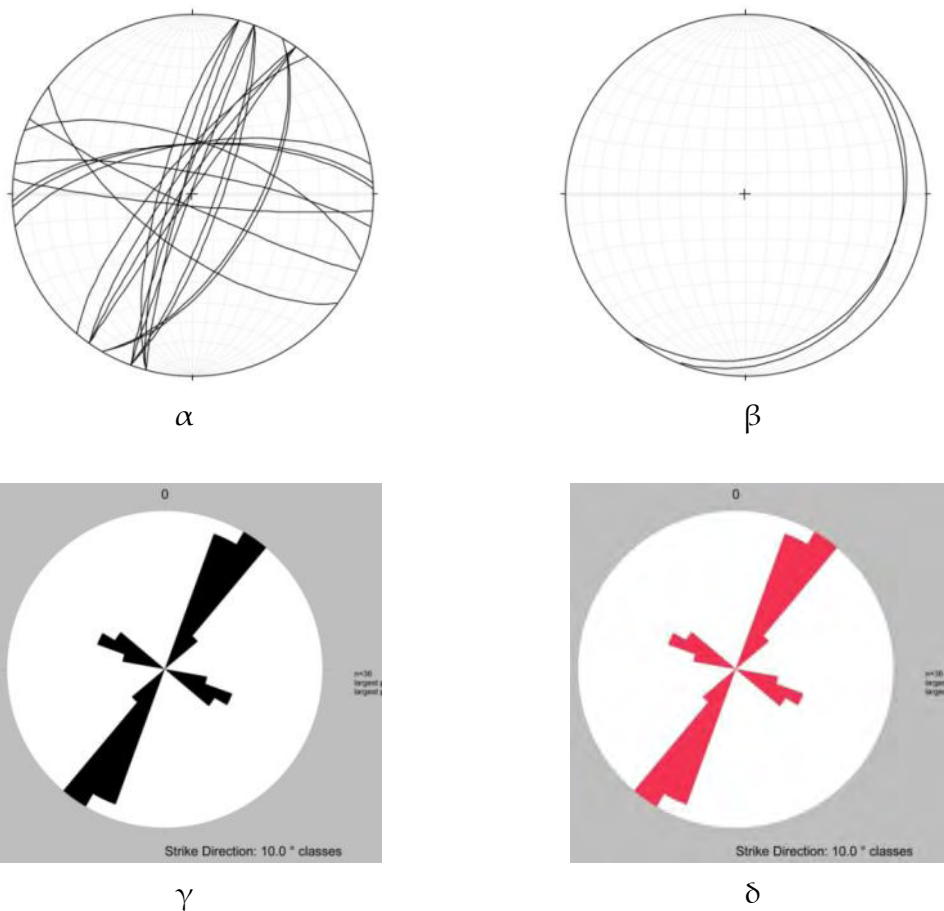
Εικόνα 8.2.1.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση της περιοχής της Αγίας Τριάδας. Σημειώνονται οι θέσεις των υπόγειων εκμεταλλεύσεων (υπόβαθρο: Basemap Klimatologio).

8.2.2 Γεωλογία-Τεκτονική

Η περιοχή αποτελείται κυρίως από μάρμαρα και γνεύσιους της ενότητας Παγγαίου. Τα ρήγματα της περιοχής έχουν βασική διεύθυνση Α-Δ, ΒΑ-ΝΔ και ΒΔ-ΝΑ. Η στοά Αγία Τριάδα-1 έχει διανοιχθεί σε μάρμαρα της ενότητας Παγγαίου, έντονα κατακερματισμένα και καρστικοποιημένα. Η γενική διεύθυνση διάνοιξης είναι ΒΑ-ΝΔ και ακολουθεί τη βασική διεύθυνση των διακλάσεων και των ρηγμάτων (Εικ. 8.2.2.1).

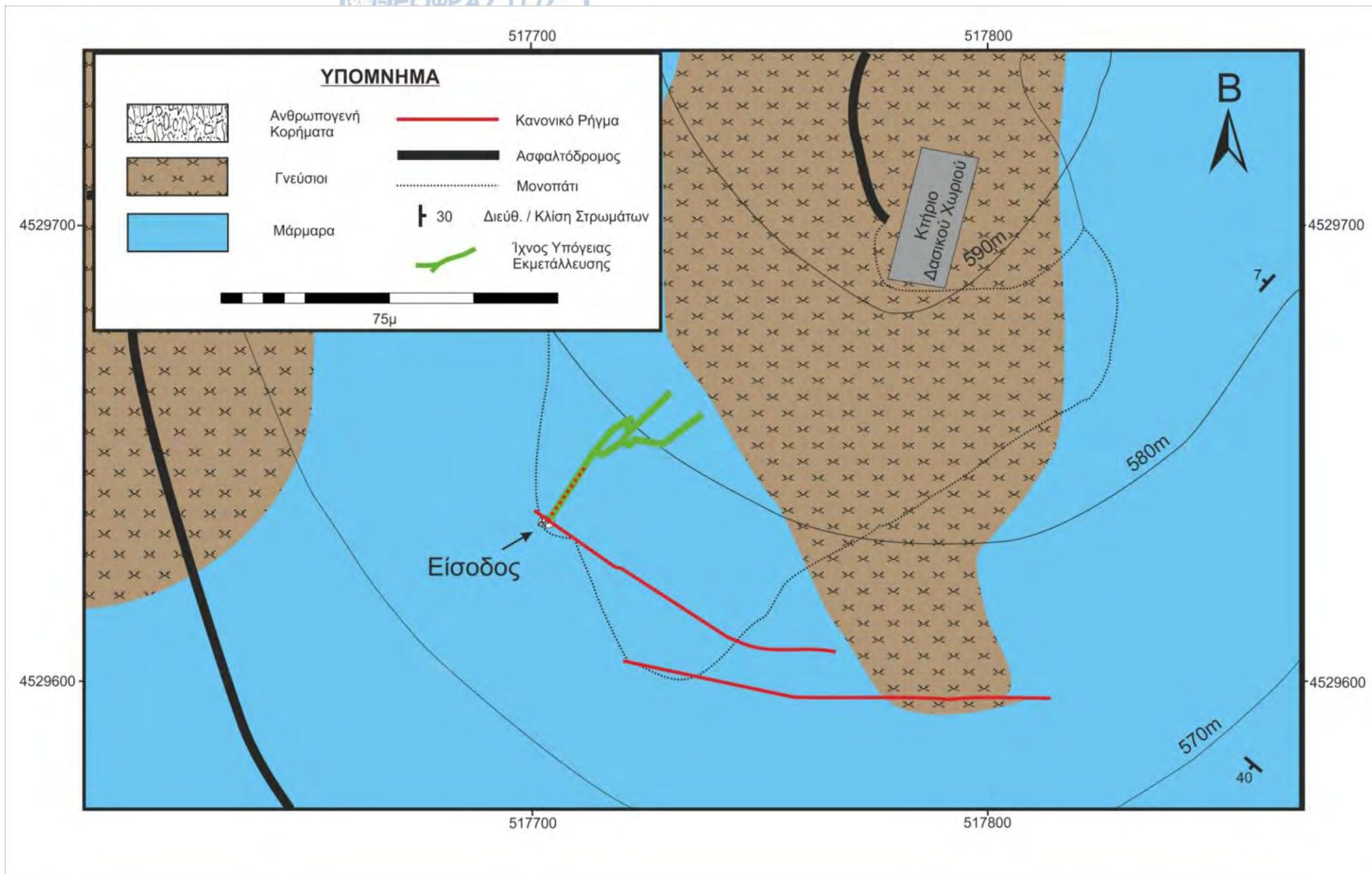
Στην είσοδο της στοάς είναι ορατή τεκτονική επιφάνεια την οποία ακολούθησε η μεταλλοφορία με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, η οποία διασταυρώνεται με την τεκτονική επιφάνεια διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ (Εικ. 8.2.2.1).

Η μεταλλοφορία, τόσο εξωτερικά όσο και εσωτερικά της στοάς, είναι οξειδωμένη και ακολουθεί τη ΒΑ-ΝΔ παράταξη των τεκτονικών ασυνεχειών, αλλά και τη σχιστότητα των μαρμάρων (Εικ. 8.2.2.1, 8.2.3.1, Σχ. 8.2.2.1). Στο εσωτερικό της στοάς Αγία Τριάδα-1 είναι εμφανής η παρουσία δύο διαφορετικών τύπων μαρμάρου. Η ακτινογραφική μελέτη έδειξε ότι το υπερκείμενο ταινιωτό μάρμαρο αποτελείται κυρίως από ασβεσίτη, ενώ το υποκείμενο είναι δολομιτωμένο, αποτελούμενο από δολομίτη και ασβεσίτη.



Σχήμα 8.2.2.1 Στερεογραφικές προβολές (κάτω ημισφαίριο) και ροδοδιαγράμματα των ασυνεχειών από το εσωτερικό της στοάς «Αγία Τριάδα-1». α. Προβολή των τεκτονικών ασυνεχειών. β. Προβολή των επιφανειών σχιστότητας. γ. Ροδοδιάγραμμα των ασυνεχειών της στοάς. δ. Ροδοδιάγραμμα ασυνεχειών που φιλοξενούν μεταλλοφορία.

Ανάμεσα σε αυτή τη στρωματογραφική επαφή των δύο διαφορετικών μαρμάρων και στην τομή της με την κύρια τεκτονική διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ εντοπίζεται μεταλλοφορία.



Εικόνα 8.2.2.1 Γεωλογικός χάρτης (κάτοψη) της μεταλλευτικής περιοχής της Αγίας Τριάδας. Σημειώνεται η είσοδος της υπόγειας εκμετάλλευσης.

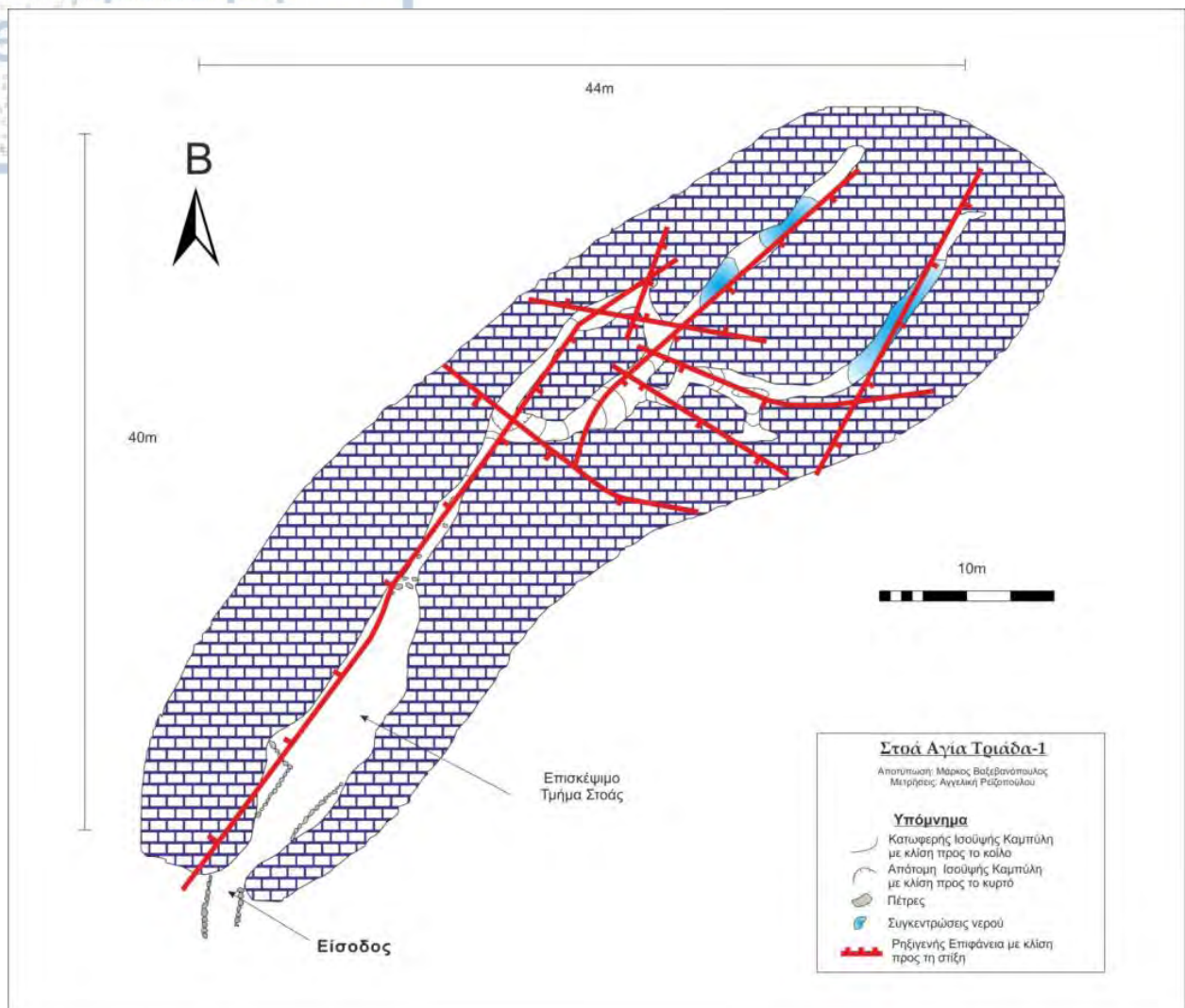
8.2.3 Περιγραφή Στοάς-Τεχνικές Εξόρυξης

Η είσοδος της στοάς Αγία Τριάδα-1 που διευρύνθηκε κατά το πρόσφατο παρελθόν από τη διεύθυνση του υφιστάμενου ξενοδοχείου έχει διαστάσεις 1,80 m x 1,47 m (πλάτος x ύψος). Πιθανότατα ήταν στενότερη λόγω πλήρωσης με χαλαρά ιζήματα και κορήματα των μαρμάρων. Τα υλικά από τη διεύρυνση της εισόδου έχουν τοποθετηθεί σε ξερολιθιές εκατέρωθεν της οδού που οδηγεί στο πρώτο τμήμα της στοάς (Εικ. 8.2.3.1, 8.2.3.2.α). Ο πρώτο θάλαμος είναι αρκετά ευρύς με μέγιστο άξονα 20,20 m και μέγιστο πλάτος και ύψος 5,10 και 1,95 m αντίστοιχα (Εικ. 8.2.3.2.γ). Στη συνέχεια οι διάδρομοι υπόγειας εκμετάλλευσης αποκτούν μικρότερες διαστάσεις με μέσο πλάτος x ύψος 0,7 m x 0,8 m. Η διατομή τους έχει ορθογώνιο, τραπεζοειδές σχήμα, ενώ σε μεγάλο μέρος έχουν αψιδωτή απόληξη (Εικ. 8.2.3.2.δ). Στο βορειοανατολικό της τμήμα η υπόγεια εκμετάλλευση χωρίζεται σε δύο κλάδους. Οι απολήξεις και των δύο κλάδων παρουσιάζουν σήμερα συγκεντρώσεις τεναγώδους νερού. Ο συνολικός όγκος της στοάς υπολογίζεται στα 134 m³.

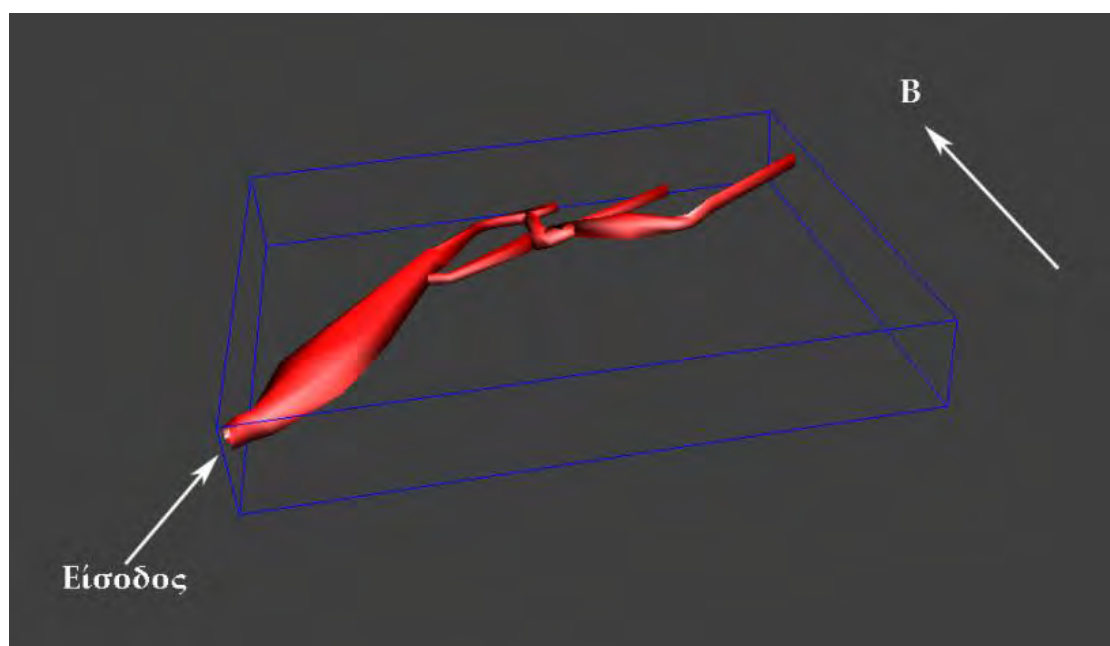
Στο εσωτερικό της παρατηρούνται στύλοι υποστήριξης οι οποίοι αποτελούνται από μάρμαρο, στο οποίο έχει λαξευθεί η μεταλλοφορία περιμετρικά.

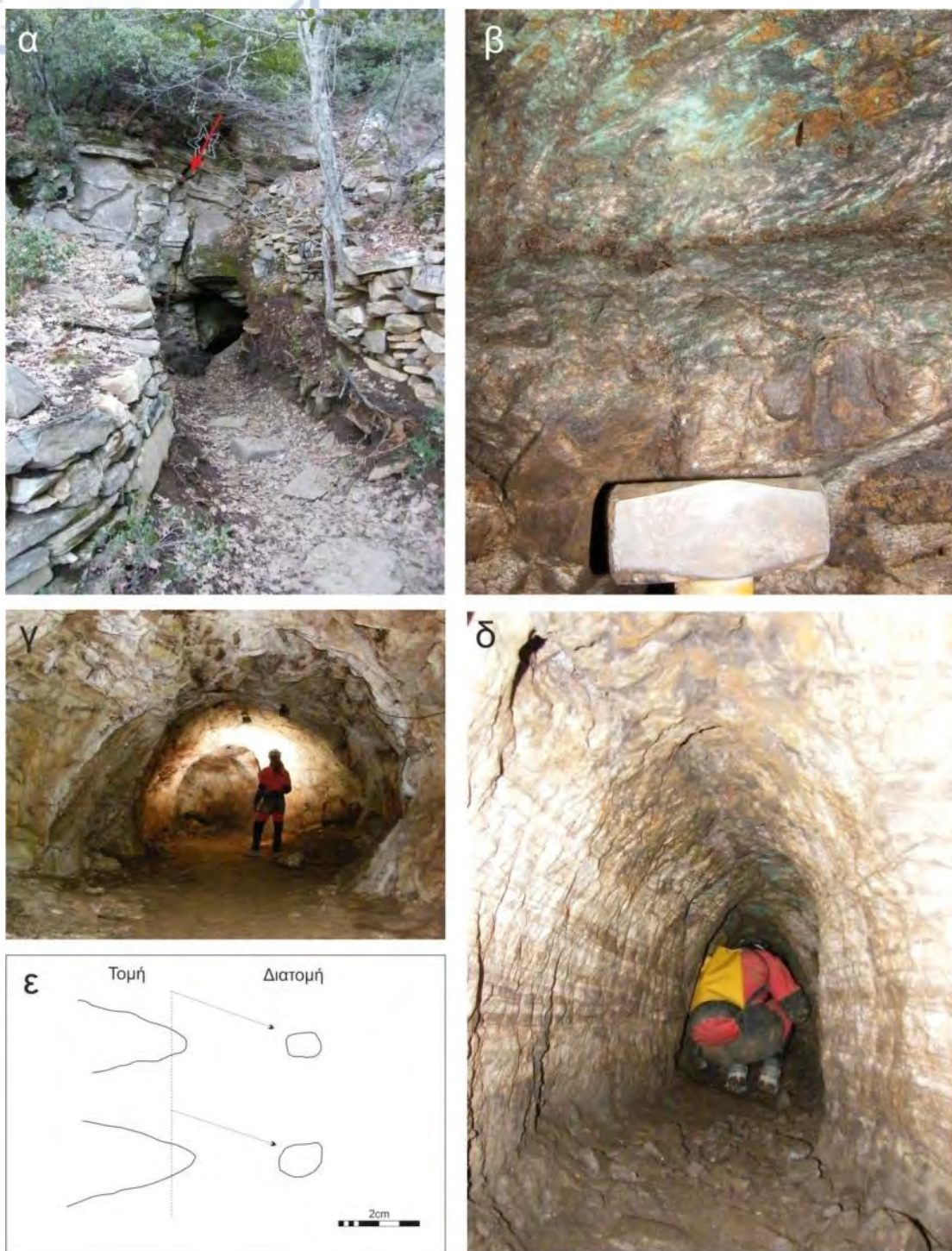
Οι περισσότερες ασυνέχειες στο εσωτερικό, κυρίως τεκτονικές, φέρουν ίχνη μεταλλοφορίας αποτελούμενη κυρίως από οξειδία του σιδήρου και του χαλκού (Εικ. 8.2.3.2.β). Πρόκειται για ρηξιγενείς επιφάνειες όπως ρήγματα και διακλάσεις, τα οποία ορίζουν τη διεύθυνση διάνοιξης της στοάς. Μέρος των ασυνεχειών και αρκετών επιφανειών της υπόγειας εκμετάλλευσης έχουν επικαλυφθεί με ανθρακική κρούστα. Μεγάλο μέρος της μεταλλοφορίας εντοπίζεται στη στρωματογραφική ασυνέχεια μεταξύ των υπερκείμενων ταινιωτών μαρμάρων και των υποκείμενων συμπαγών μαρμάρων.

Τα βασικά εργαλεία που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι το σφυρί και το καλέμι, όπως έδειξε η μελέτη των εκμαγείων από ίχνη σε θέσεις λάξευσης (Εικ. 8.2.3.2.ε). Η θερμοκρασία στο εσωτερικό της στοάς είναι 12°C και η σχετική υγρασία προσεγγίζει το 100%.



Εικόνα 8.2.3.1 Κάτοψη και τρισδιάστατη απεικόνιση του μεταλλείου «Αγία Τριάδα-1».

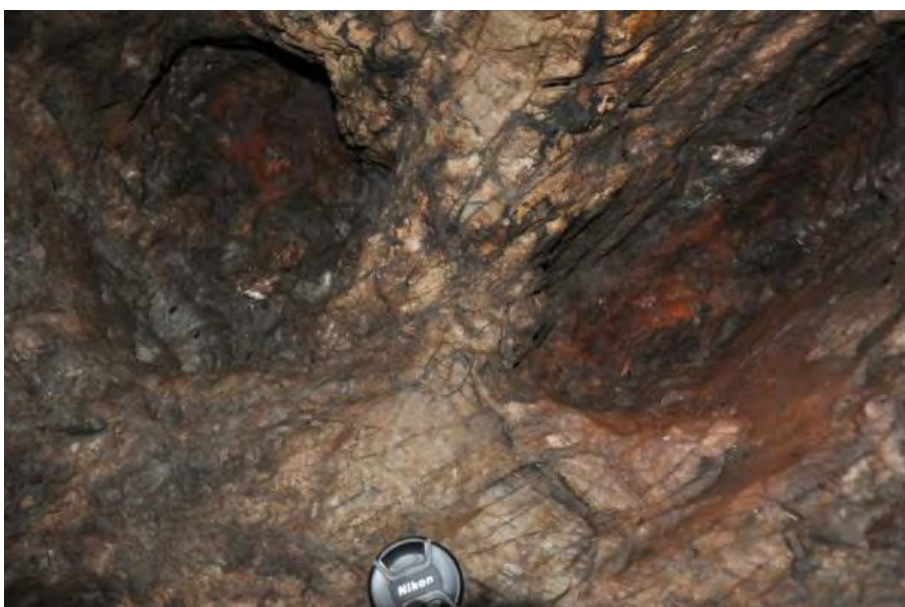




Εικόνα 8.2.3.2 α) Η είσοδος της στοάς Αγία Τριάδα-1. Σημειώνεται κανονικό ρήγμα, που αποτέλεσε την κύρια ασυνέχεια απόθεσης της μεταλλοφορίας. β) Ίχνη λάξευσης και επανθίσματα μαλαχίτη και οξειδίων του σιδήρου. γ) Ο πρώτος διευρυμένος θάλαμος της στοάς. δ) Στενοί διάδρομοι με αψιδωτή απόληξη στο βορειοδυτικό άκρο της υπόγειας εκμετάλλευσης. Στα τοιχώματα διακρίνονται ταινιωτά μάρμαρα. ε) Ίχνη μεταλλευτικού σφυριού από τη στοά Αγία Τριάδα-1.

8.2.4 Αρχαιολογικά Ευρήματα

Τόσο στην ευρύτερη μεταλλευτική περιοχή, όσο και στο δάπεδο της υπόγειας στοάς Αγία Τριάδα-1 δεν βρέθηκαν στοιχεία με αρχαιολογικό ενδιαφέρον. Στην επιφάνεια του πρώτου τμήματος της μεταλλευτικής στοάς παρατηρήθηκε ένα πολύ μικρό τμήμα κεραμικής με πράσινη εφυάλωση, που τοποθετείται στους υστεροβυζαντινούς χρόνους. Η διεύρυνση του πρώτου τμήματός της για τις ανάγκες του ξενοδοχείου, πιθανώς να κατέστρεψε υπολείμματα της μεταλλευτικής δραστηριότητας και σημαντικά αρχαιολογικά ευρήματα. Τα ίχνη του μεταλλευτικού σφυριού είναι έντονα στις φωλιές μεταλλεύματος στο βορειοδυτικό τμήμα της στοάς (Εικ. 8.2.4.1). Η είσοδος στις στοές Αγία Τριάδα-2 και 3 δεν κατέσκει δυνατή λόγω της κατάρρευσής τους από εργασίες διάνοιξης των δρόμων.



Εικόνα 8.2.4.1 Εξορυγμένες φωλιές μεταλλεύματος από τη στοά Αγία Τριάδα-1.

8.2.5 Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Μεταλλεύματος

Η μεταλλοφορία στην περιοχή Αγία Τριάδα είναι πλήρως οξειδωμένη και η ορυκτολογική σύσταση αποτελείται από γκαιίτη, καθώς και από μαλαχίτη και αζουρίτη που σχηματίζουν έντονα πράσινα και κυανά επανθίσματα στο βορειοανατολικό κυρίως τμήμα της στοάς.

Συνολικά συλλέχθηκαν δύο δείγματα από μεταλλοφόρα σώματα σε καρστικά έγκοιλα. Όπως προέκυψε από τις χημικές αναλύσεις η μεταλλοφορία είναι πλούσια σε Au και Ag με υψηλές περιεκτικότητες σε Au (34,21 έως 41,21 ppm, μ.ό. 49,26 ppm) και Ag (> 100 ppm) (Πίν. 8.2.5.1).

Οι περιεκτικότητες σε Fe_2O_3 είναι υψηλές από 34,21 έως 41,21 wt % (μ.ό. 37,71 wt%), όπως και σε Cu (> 10.000 ppm). Επίσης οι περιεκτικότητες σε Pb είναι 1950,10-2684,97 ppm (μ.ό. 2317,53 ppm), σε Zn 335,00-346,00 ppm (μ.ό. 340,50), σε As 422,80-679,20 ppm (μ.ό. 551,00 ppm), σε W 63,60-131,50 ppm (μ.ό. 97,55 ppm), σε V 432,00-474,00 ppm (μ.ό. 453,00 ppm) και σε Bi 387,53-716,20 ppm (μ.ό. 551,86 ppm).

Πίνακας 8.2.5.1 Περιεκτικότητες των βασικών οξειδίων (wt %) και επιλεγμένων ιχνοστοιχείων (ppm) από δείγματα στην περιοχή του Κοκκινοχώματος. Ο ολικός σίδηρος εκφράζεται σε Fe₂O₃. (bdl: κάτω του ορίου ανιχνευσιμότητας, na: δεν αναλύθηκε).

	PAT-3	PAT_4
(wt%)		
SiO ₂	2,78	na
Al ₂ O ₃	0,38	0,09
Fe ₂ O ₃	41,21	34,21
MgO	0,12	0,03
CaO	13,24	5,96
Na ₂ O	bdl	bdl
K ₂ O	0,05	bdl
TiO ₂	0,01	bdl
P ₂ O ₅	0,69	0,28
MnO	0,77	0,70
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00
ppm		
Au	47,34	51,18
Ag	>100,00	>100,00
Cu	>10000,00	>10000,00
Pb	1950,10	2684,97
Zn	346,00	335,00
As	679,20	422,80
Bi	716,20	387,53
Ba	49,00	35,90
Co	24,80	40,40
V	474,00	432,00
W	131,50	63,60
Zr	4,60	bdl
In	na	40,58

8.3 Μεταλλευτική Περιοχή Μαυροκορφής

8.3.1 Γεωγραφική Θέση

Η Μαυροκορφή, γνωστή και ως «Καραγκιόζ» ή «Καραγκιόλ», αποτελεί μία από τις υψηλότερες κορυφές του Παγγαίου με υψόμετρο 1479 m (Εικ. 8.3.1.1). Βρίσκεται περίπου 2,5 km ανατολικά της κορυφής Αβγό (1836 m) και 5 km ανατολικά από την υψηλότερη κορυφή του Παγγαίου το Μάτι (1956 m). Η μεταλλευτική περιοχή της Μαυροκορφής καλύπτει έκταση περίπου 6 km² (Κρικέλας, 1973). Επιφανειακά εντοπίζονται ίχνη μεταλλοφορίας σε τεκτονικές ασυνέχειες των μαρμάρων και των εναλλαγών σχιστολίθου, γνευσίων και αμφιβολιτών. Πολλές από αυτές παρουσιάζουν ενδείξεις εκμετάλλευσης, χωρίς όμως ασφαλή χρονολόγηση. Το αντιπροσωπευτικότερο στοιχείο μεταλλευτικής δραστηριότητας που βρέθηκε είναι η υπόγεια μεταλλευτική στοά, Μαυροκορφή-1, σε υψόμετρο 1299 m. Η πρόσβαση στη στοά γίνεται από μονοπάτι που ξεκινά

από τις λυόμενες εγκαταστάσεις του Δασαρχείου Καβάλας. Η βλάστηση είναι αρκετά πυκνή αποτελούμενη από οξιές και ιτάμους.



Εικόνα 8.3.1.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση της περιοχής της Μαυροκορφής Παγγαίου. Σημειώνεται η στοά Μαυροκορφή-1 (υπόβαθρο: Basemap Ktimatologio).

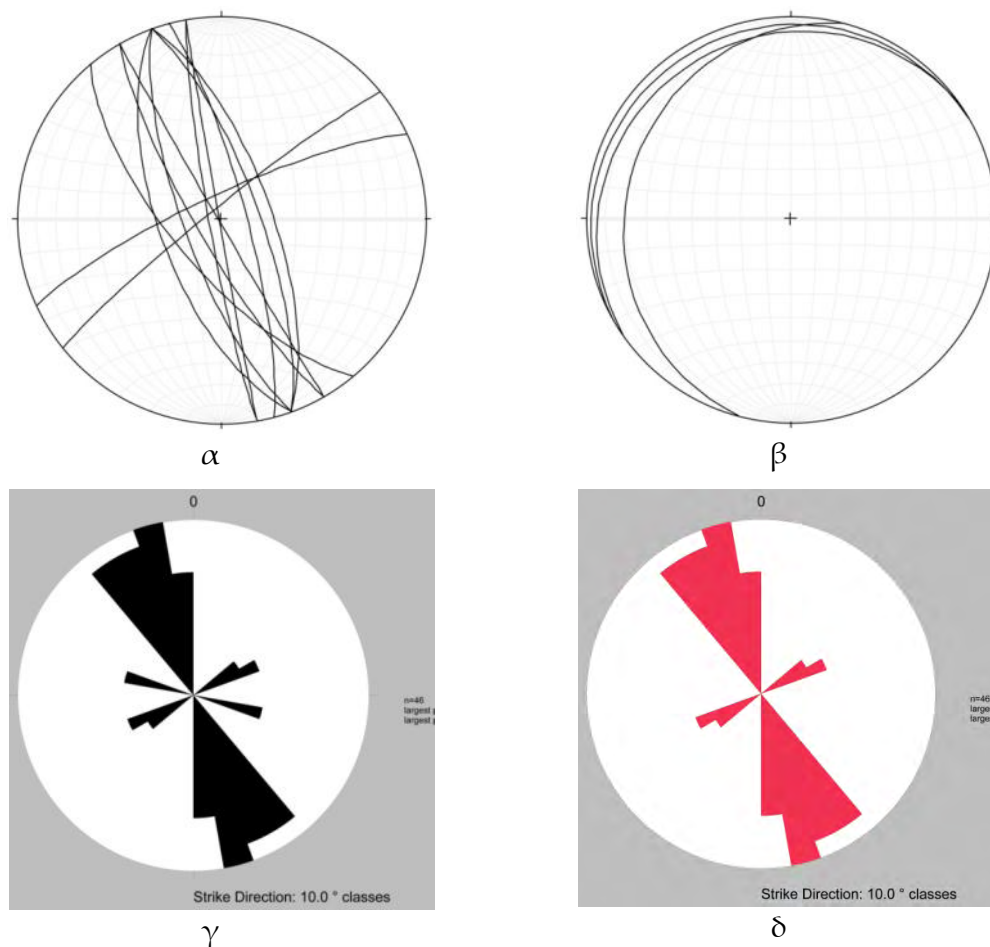
8.3.2 Γεωλογία-Τεκτονική

Η περιοχή της Μαυροκορφής δομείται από μάρμαρα με εναλλαγές σχιστολίθων, γνευσίων και αμφιβολιτών. Στην κορυφή της παρουσιάζονται μόνο τα λευκά μάρμαρα της ενότητας Παγγαίου (Εικ. 8.3.2.2), που κατά θέσεις εναλλάσσονται με σχιστολίθους και αμφιβολίτες. Στο νότιο-νοτιοανατολικό τμήμα υπάρχει η σειρά γνευσίων και γνευσιοσχιστολίθων του Παγγαίου. Η συνέχεια των λιθολογικών σχηματισμών διακόπτεται από κανονικά ρήγματα μεγάλης κλίσης με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και ΔΒΔ-ΑΝΑ. Η μεταλλοφορία εντοπίζεται στις διακλάσεις αυτών των ρηγμάτων αρκετά οξειδωμένη. Σε ρηξιγενή επιφάνεια με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, 40 m βορειοδυτικά της εισόδου της μεταλλευτικής στοάς Μαυροκορφή-1, παρατηρείται οξειδωμένη μεταλλοφορία, κυρίως με γκαϊτίτη (Εικ. 8.3.2.1).

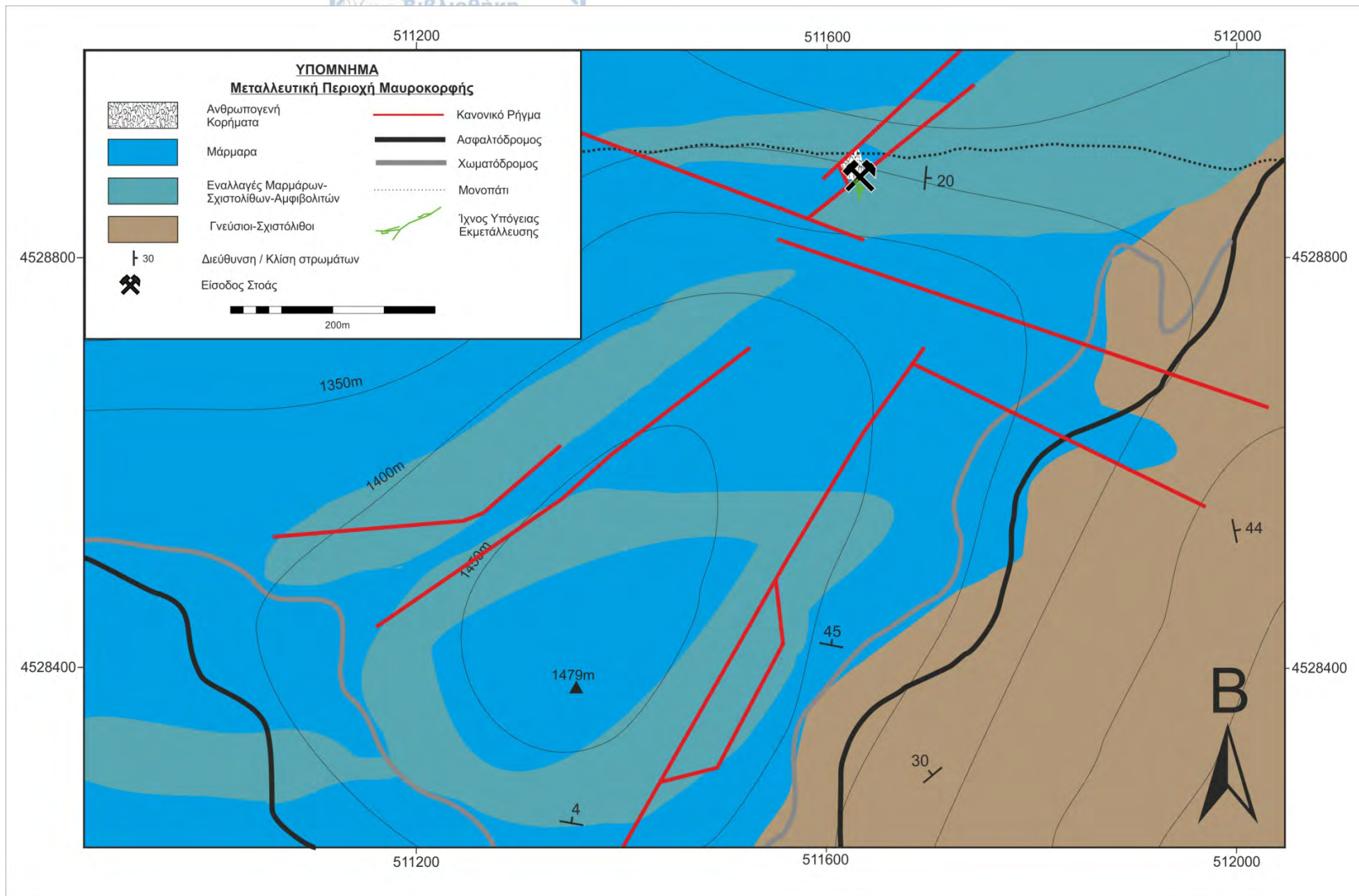
Οι κύριοι χώροι απόθεσης της μεταλλοφορίας είναι τα ρήγματα, οι διακλάσεις και οι επιφάνειες σχιστότητας. Επίσης, μέσα στα κενά της μάζας των αμφιβολιτών και των σχιστολίθων και κυρίως στις επιφάνειες σχιστότητας συναντάται οξειδωμένη ή μερικώς οξειδωμένη μεταλλοφορία (Σχ. 8.3.2.1).



Εικόνα 8.3.2.1 Οξειδωμένη μεταλλοφορία σε ρηξιγενή επιφάνεια εξωτερικά της μεταλλευτικής στοάς Μαυροκορφή-1.



Σχήμα 8.3.2.1 Στερεογραφικές προβολές (κάτω ημισφαίριο) και ροδοδιαγράμματα των ασυνεχειών από το εσωτερικό της στοάς «Μαυροκορφή-1». α. Προβολή των τεκτονικών ασυνεχειών. β. Προβολή των επιφανειών σχιστότητας. γ. Ροδοδιάγραμμα των ασυνεχειών της στοάς. δ. Ροδοδιάγραμμα ασυνεχειών που φιλοξενούν μεταλλοφορία.



Εικόνα 8.3.2.2 Γεωλογικός χάρτης (κάτοψη) της μεταλλευτικής περιοχής Μαυροκορφής.

8.3.3 Περιγραφή Στοάς-Τεχνικές Εξόρυξης

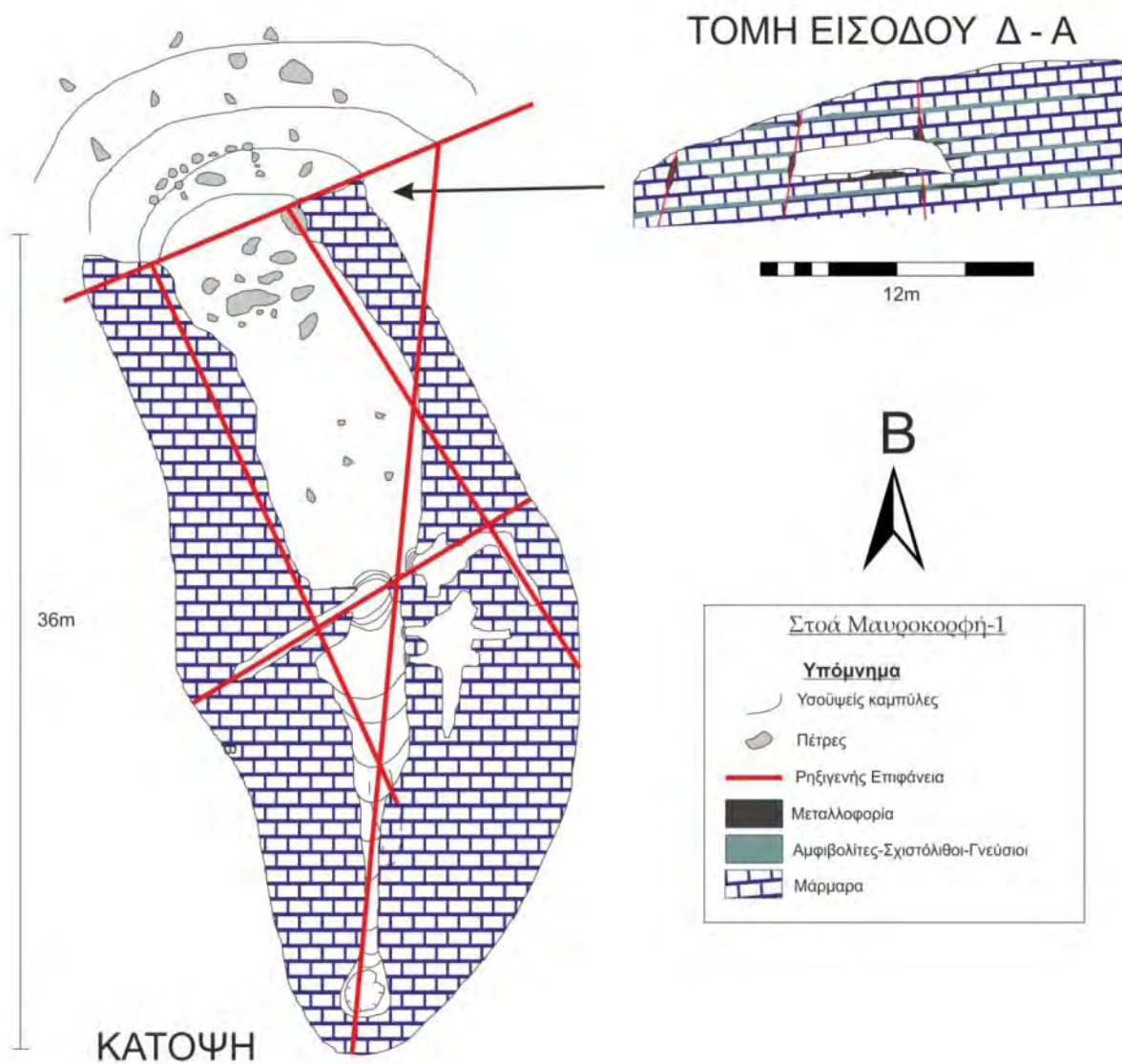
Η στοά Μαυροκορφή-1 βρίσκεται στο βορειοανατολικό τμήμα της Μαυροκορφής. Στην περιοχή εξωτερικά αυτής εντοπίζονται στείρα υλικά εξόρυξης σε κώνο με άξονα περίπου 25 m. Η είσοδος της στοάς έχει διαστάσεις 5 m x 1,6 m (πλάτος x ύψος) (Εικ. 8.3.3.1, 8.3.3.2.α) και συνολικό μήκος διαδρόμων 120 m. Η κατακόρυφη διαφορά από την είσοδο μέχρι το κατώτερο σημείο της εξόρυξης είναι 18 m. Διανοίχθηκε κατά μήκος διεύθυνσης NNA-BBΔ (Εικ. 8.3.3.1).

Με βάση τη χαρτογράφηση της στοάς Μαυροκορφή-1 και παρατηρήσεις επί της διατομής των υπόγειων εργασιών διακρίνονται δύο ξεχωριστές φάσεις εξόρυξης (Εικ. 8.3.3.2.γ). Η μία φάση ακολουθώντας τις τεκτονικές ασυνέχειες που πληρώνονται με οξειδωμένη μεταλλοφορία έχει δημιουργήσει στενούς και τραπεζοειδούς διατομής διαδρόμους (Εικ. 8.3.3.2.δ,ε). Η δεύτερη και νεότερη είναι έντονα αισθητή στην περιοχή της εισόδου της στοάς, όπου διευρύνει τις παλαιότερες στενές στοές (Εικ. 8.3.3.2.β). Επίσης, παλαιότερες εξοφλημένες υπόγειες εργασίες έχουν πληρωθεί με στείρο υλικό της εξόρυξης.

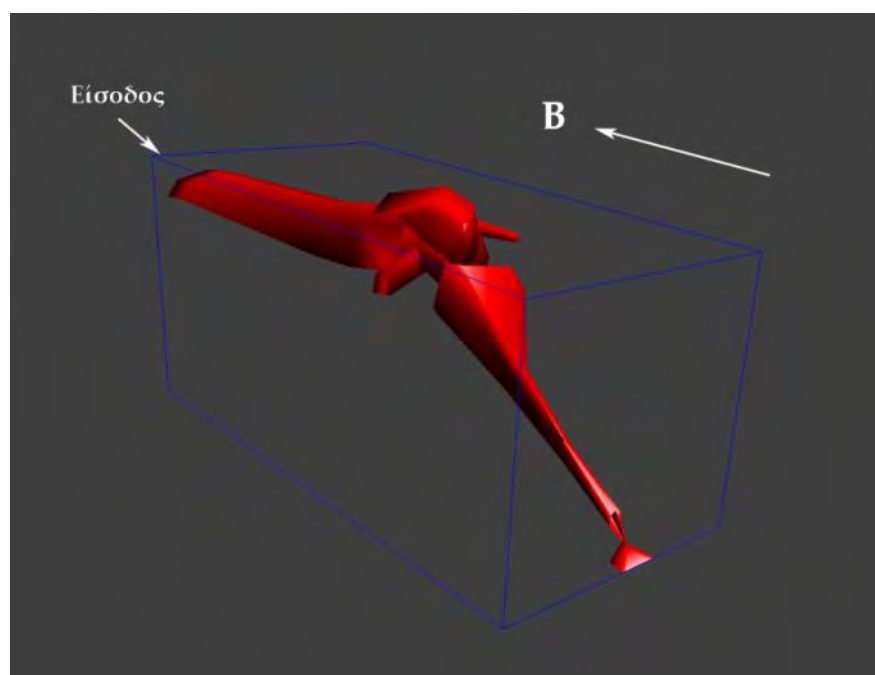
Η μεταλλοφορία εντοπίζεται στις τεκτονικές ασυνέχειες, στα κενά της σχιστότητας, καθώς και μέσα στη μάζα των χλωριτικών σχιστολίθων και αμφιβολιτών (Εικ. 8.3.3.2.ζ, η). Η διάνοιξη της στοάς ακολούθησε τις διευθύνσεις των κύριων τεκτονικών διευθύνσεων που διασταυρώνονται με τη σχιστότητα. Η μερικώς οξειδωμένη μεταλλοφορία εντοπίζεται κυρίως στους χλωριτικούς σχιστολίθους και τους αμφιβολίτες.

Τα εργαλεία που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι κυρίως το μεταλλευτικό σφυρί και το καλέμι. Ο όγκος των υπόγειων μεταλλευτικών εργασιών υπολογίζεται σε 368 m³. Στη νότια απόληξη της στοάς παρατηρείται διεύρυνση και συνέχιση της εκσκαφής από πιθανώς σύγχρονους λαθρανασκαφείς.

Η θερμοκρασία στο εσωτερικό της υπόγειας εκμετάλλευσης κυμαίνεται από 8,6 έως 14°C, ενώ σε πολλά τμήματά της η σχετική υγρασία είναι περίπου 100%.



Εικόνα 8.3.3.1 Κάτοψη με τομή της εισόδου και τρισδιάστατη απεικόνιση της στοάς «Μαυροκορφή-1».





Εικόνα 8.3.3.2 α) Η είσοδος της στοάς «Μαυροκορφή-1», όπου σημειώνονται οι τεκτονικές ασυνέχειες. β) Ο μεγάλος θάλαμος της εισόδου. γ) Τομή των δύο ξεχωριστών φάσεων εκμετάλλευσης. δ) Τμήμα της υπόγειας εκμετάλλευσης που ακολουθεί τις τεκτονικές ασυνέχειες. ε) Πλήρωση παλαιότερης εκμετάλλευσης με στείρο υλικό. ζ) Η μερικώς οξειδωμένη μεταλλοφορία σε τεκτονική ασυνέχεια. η) Φακός αμφιβολίτη στα μάρμαρα της περιοχής μελέτης. Μέσα στη μάζα του παρατηρούνται φλεβίδια μεταλλοφορίας αποτελούμενη κυρίως από γκαϊτίτη.

8.3.4 Αρχαιολογικά Ευρήματα

Η επιφανειακή κεραμική που βρέθηκε και καταγράφηκε στη στοά Μαυροκορφή-1 χρονολογείται στους Ρωμαϊκούς και στους Οθωμανικούς χρόνους. Η κεραμική Ρωμαϊκής περιόδου βρέθηκε κυρίως στα τμήματα του

μεταλλεύου που χαρακτηρίζονται από στενούς διαδρόμους, ενώ η κεραμική της Οθωμανικής περιόδου εντοπίστηκε στη διευρυμένη περιοχή της εισόδου (Εικ. 8.3.3.2.β).

8.3.5 Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Μεταλλεύματος

Η μεταλλοφορία στη στοά Μαυροκορφή-1 εντοπίζεται μέσα στις ασυνέχειες των μαρμάρων και μέσα στο χλωριτωμένο αμφιβολίτη. Είναι οξειδωμένη και μόνο κατά θέσεις εντοπίζεται μερικώς οξειδωμένη.

Τα κύρια ορυκτά είναι ο γκαιτίτης και ο μαλαχίτης. Στη μερικώς οξειδωμένη μεταλλοφορία η ορυκτολογική σύσταση αποτελείται από σιδηροπυρίτη, χαλκοπυρίτη, βισμούθινίτη, χαλκοσίνη, γκαιτίτη και μαλαχίτη. Η μάζα του χλωριτωμένου αμφιβολίτη αποτελείται κυρίως από ριπιδόλιθο (Εικ. 8.3.5.1α, β).

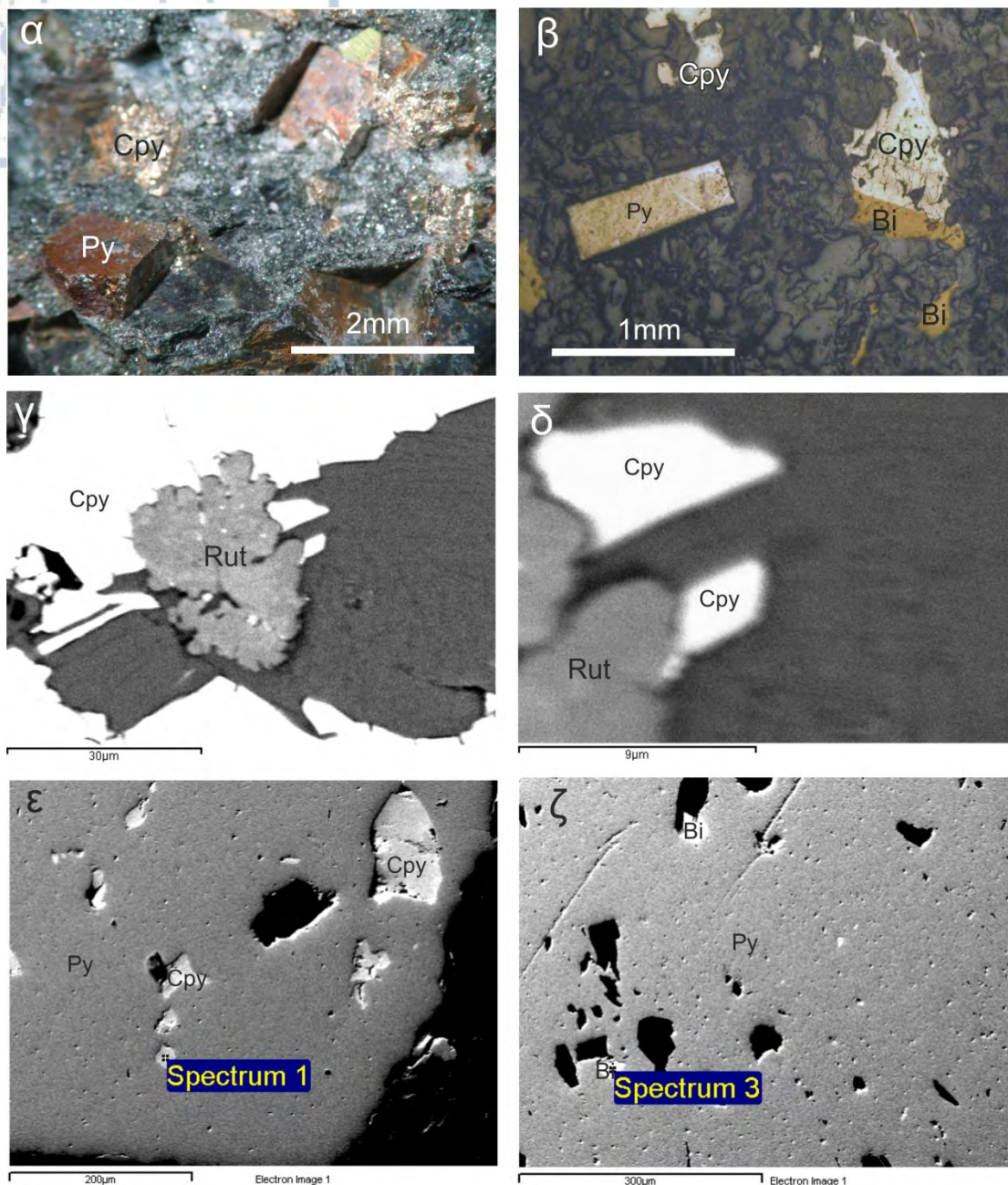
Ο σιδηροπυρίτης αποτελεί το πιο συνηθισμένο ορυκτό της μεταλλοφορίας στη στοά Μαυροκορφή-1. Είναι ιδιόμορφος έως υπιδιόμορφος, ενώ περιφερειακά και στις κατακλάσεις του μετατρέπεται σε γκαιτίτη (Εικ. 8.3.5.1α). Το μέγεθός του κυμαίνεται από 120 μm μέχρι και 4 mm. Εντοπίζεται με ποικιλία σχημάτων όπως τετραγωνικό, πενταγωνικό, εξαγωνικό, ορθογώνιο, καθώς και τριγωνικό. Μέσα στο σιδηροπυρίτη εντοπίζονται εγκλείσματα χαλκοπυρίτη, βισμούθινίτη και ρουτίλιου με μέγεθος που φθάνει έως 50 μm .

Το δεύτερο σε συχνότητα ορυκτό της μεταλλοφορίας είναι ο χαλκοπυρίτης, ο οποίος κατά θέσεις μετατρέπεται περιφερειακά σε χαλκοσίνη. Σε αρκετές περιπτώσεις εντοπίζεται σε σύμφυση με το βισμούθινίτη και το ρουτίλιο (Εικ. 8.3.5.1.β, γ, δ) ή ως εγκλείσμα στο σιδηροπυρίτη (Εικ. 8.3.5.1.ε). Το μέγεθός των κόκκων του χαλκοπυρίτη κυμαίνεται από 5 μm έως 1 mm.

Ο βισμούθινίτης εντοπίζεται είτε διάσπαρτος μέσα στο πέτρωμα ξενιστή με μέγεθος κόκκων έως και 200 μm είτε ως εγκλείσμα στο σιδηροπυρίτη με τη μορφή εγκλεισμάτων με μέγεθος έως και 40 μm (Εικ. 8.3.5.1.ζ).

Το ρουτίλιο εντοπίζεται μέσα στο χλωριτωμένο αμφιβολίτη σε σύμφυση με το χαλκοπυρίτη ή το σιδηροπυρίτη (Εικ. 8.3.5.1.γ, δ).

Όπως προκύπτει από δύο χημικές αναλύσεις (Πίν. 8.3.5.1), οι περιεκτικότητες σε Au και Ag είναι αντίστοιχα από 7,30 έως 37,41 ppm και από 12,50 έως 16,21 ppm. Για την ίδια μεταλλοφορία ο Κρικέλας (1973) αναφέρει περιεκτικότητες για τον Au από 0,05 έως 2,3 ppm και για τον Ag από 1,30 ppm έως 2,0 ppm.



Εικόνα 8.3.5.1 α) Ιδιόμορφοι κρύσταλλοι σιδηροπυρίτη (Py) και χαλκοπυρίτη (Cpy) μέσα σε χλωριτωμένο αμφιβολίτη. Εικόνα από στερεοσκόπιο. β) Κρύσταλλος σιδηροπυρίτη (Py) και χαλκοπυρίτη (Cpy) σε σύμφυση με βισμουθινίτη (Bi). Εικόνα από μεταλλογραφικό μικροσκόπιο, N//. γ) Κόκκος ρουτιλίου (Rut) σε σύμφυση με χαλκοπυρίτη (Cpy). SEM, back scattering image. δ) Κόκκοι χαλκοπυρίτη (Cpy) σε σύμφυση με Ρουτίλιο (Rut) στο πέτρωμα Ξενιστή. SEM, back scattering image. ε) Εγκλείσματα χαλκοπυρίτη (Cpy) μέσα σε σιδηροπυρίτη (Py). SEM, back scattering image. ζ) Εγκλείσματα βισμουθινίτη (Bi) μέσα σε σιδηροπυρίτη (py). SEM, back scattering image.

Οι χημικές αναλύσεις έδειξαν υψηλές περιεκτικότητες σε Fe_2O_3 που κυμαίνεται από 24,66 έως 51,62 wt % (μ.ό. 38,14 wt %), σε Cu από 9872,40 έως >10.000,00 ppm και σε As από 583,70 έως 710,10 ppm, (μ.ό. 646,90 ppm). Επίσης οι περιεκτικότητες σε Ga είναι 11,30-21,30 ppm (μ.ό. 16,30 ppm), σε W 8,80-40,20 ppm (μ.ό. 24,5 ppm), σε V <8-65 ppm, σε Bi 32,39-169,30 ppm (μ.ό. 100,85 ppm) και σε Te 4,86-20,00 ppm (μ.ό. 12,43 ppm) (Πίν. 8.3.5.1).

Πίνακας 8.3.5.1 Περιεκτικότητες των βασικών οξειδίων (wt %) και επιλεγμένων ιχνοστοιχείων (ppm) από δείγματα στην περιοχή της Μαυροκορφής. Ο ολικός σίδηρος εκφράζεται σε Fe₂O₃. (bdl: κάτω του ορίου ανιχνευσιμότητας, na: δεν αναλύθηκε).

	PMM-1	PMM_2
wt%		
SiO ₂	13,33	na
Al ₂ O ₃	4,60	4,21
Fe ₂ O ₃	51,62	24,66
MgO	2,96	1,84
CaO	0,11	0,22
Na ₂ O	bdl	bdl
K ₂ O	0,18	0,65
TiO ₂	0,10	0,07
P ₂ O ₅	bdl	0,13
MnO	0,05	0,01
Cr ₂ O ₃	bdl	0,00
ppm		
Au	7,30	37,41
Ag	12,50	16,21
Cu	9872,40	>10000,00
Pb	23,60	58,74
Zn	39,00	43,30
As	710,10	583,70
Bi	169,30	32,39
Ba	43,00	18,10
Co	6,40	32,40
Cs	0,20	6,13
Ga	21,30	11,30
Hf	1,10	bdl
Nb	3,90	0,46
Rb	4,40	66,60
Th	4,70	27,70
U	2,40	4,40
V	<8,00	65,00
W	8,80	40,20
Zr	46,60	bdl
Y	2,90	17,83
La	7,50	9,90
Ce	15,40	16,50
Cd	bdl	0,27
Sb	0,40	6,08
Hg	0,01	0,02
Se	8,80	0,80
Te	20,00	4,86

8.4 Μεταλλευτική Δραστηριότητα στην Περιοχή Αβγού

8.4.1 Γεωγραφική Θέση

Η μεταλλευτική περιοχή του Αβγού βρίσκεται γύρω από τη δεύτερη ομώνυμη και ψηλότερη κορυφή του Παγγαίου με υψόμετρο 1836 m, καλύπτοντας έκταση περίπου 10 km². Η κορυφή είναι γνωστή και με το παλαιότερο τουρκικό όνομά της ως «Πιλάφ-Τεπέ». Η περιοχή περιστοιχίζεται από το δρόμο που ανεβαίνει προς την κορυφή του Παγγαίου από το Ακροβούνι (Εικ. 8.4.1.1). Στο βόρειο τμήμα της κορυφής λειτούργησε παλαιότερα χιονοδρομικό κέντρο, για την πίστα του οποίου ισοπεδώθηκε μεγάλη έκταση καταστρέφοντας και σκεπάζοντας εισόδους στοών και επιφανειακών εργασιών. Συνολικά στο Αβγό καταγράφηκαν 1 αρχαία υπόγεια μεταλλευτική στοά και τρεις κατεστραμμένες (Εικ. 8.4.2.1). Επίσης, εντοπίστηκαν δύο σύγχρονες μεταλλευτικές στοές και 4 σπήλαια (Εικ. 8.4.2.2). Η βλάστηση στην περιοχή του Αβγού είναι ποώδης, με πολύ μικρές συστάδες δένδρων αποτελούμενες από οξιές και έλατα. Στα βορειοδυτικά της κορυφής υπάρχει ορειβατικό καταφύγιο (Χατζηγεωργίου).



Εικόνα 8.4.1.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση της κορυφής «Αβγό» (υπόβαθρο: Basemap Ktimatologio).

8.4.2 Γεωλογία-Τεκτονική

Η περιοχή της κορυφής του Αβγού αποτελείται από λευκά συμπαγή μάρμαρα. Τα μάρμαρα είναι έντονα τεκτονισμένα και καρστικοποιημένα. Στη μάζα των μαρμάρων εντοπίζονται σπήλαια και επιφανειακές δολίνες από

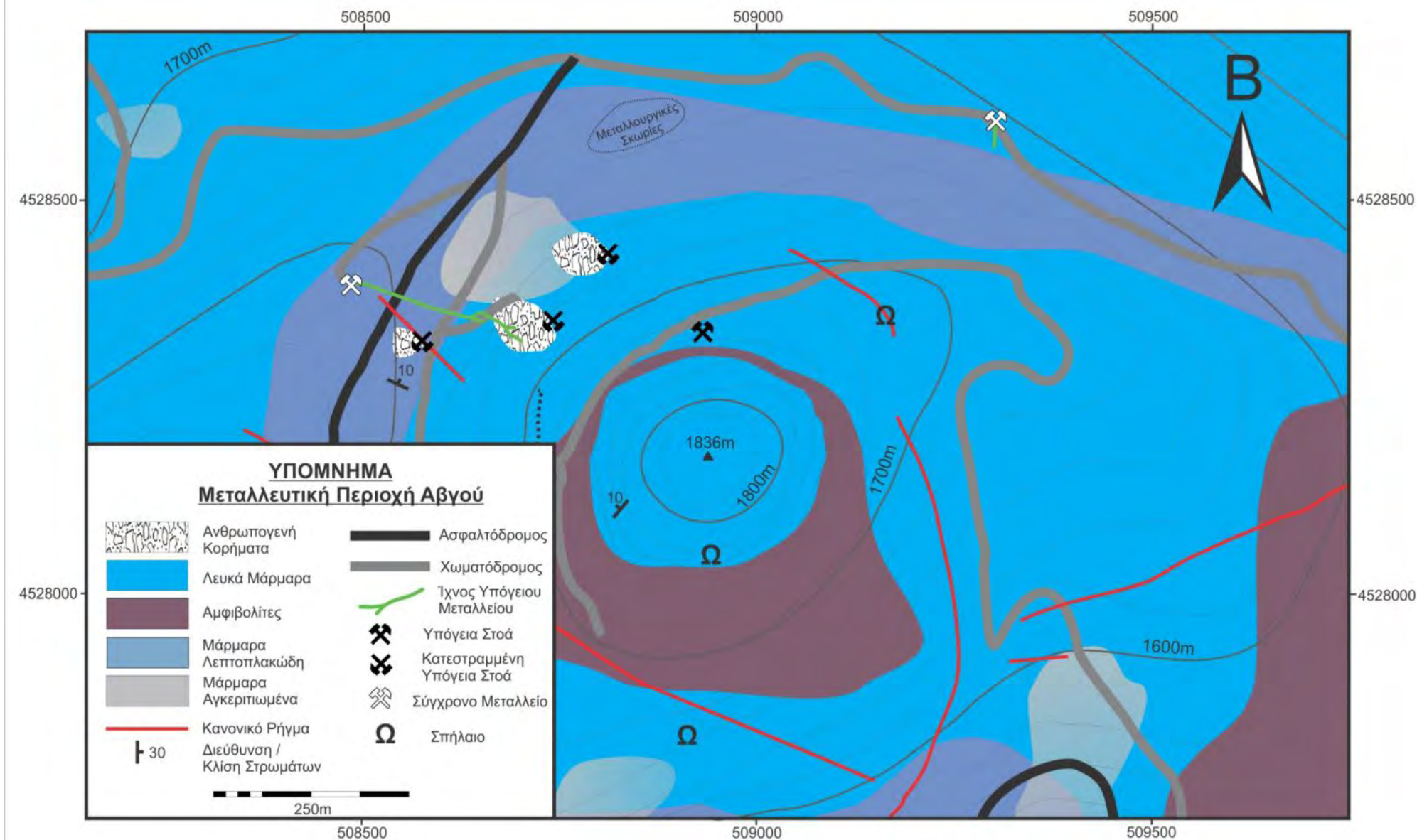
καρστική διεργασία. Τα μάρμαρα υπέρκεινται μια σειράς αμφιβολιτών με πάχος περίπου 20 m και κλίση 10°, η οποία περικλείει την κορυφή. Υποκείμενη των αμφιβολιτών εντοπίζεται μία σειρά μαρμάρων με έντονη μεταλλοφορία. Τα μάρμαρα της σειράς αυτής εμφανίζονται στα κατώτερα στρώματά τους ως λεπτοπλακώδη και ταινιωτά (ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι). Επίσης, τα μάρμαρα αυτά σε πολλές θέσεις της περιοχής του Αβγού είναι αγκεριτιωμένα.

Τα ρήγματα της περιοχής έχουν γενική διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, ΒΔ-ΝΑ έως Α-Δ (Εικ. 8.4.2.1-2). Δημιουργούν μεγάλες μορφές ρηγμάτων και συνοδών διακλάσεων. Αυτές οι τεκτονικές ασυνέχειες πληρώνονται με μεταλλοφορία, αλλά και είναι οι βασικοί άξονες καρστικοποίησης και δημιουργίας επιφανειακών και υπόγειων καρστικών μορφών.

Η μεταλλοφορία στη μεταλλευτική περιοχή του Αβγού εντοπίζεται στα υποκείμενα των αμφιβολιτών μάρμαρα, κυρίως σε τεκτονικές ασυνέχειες.



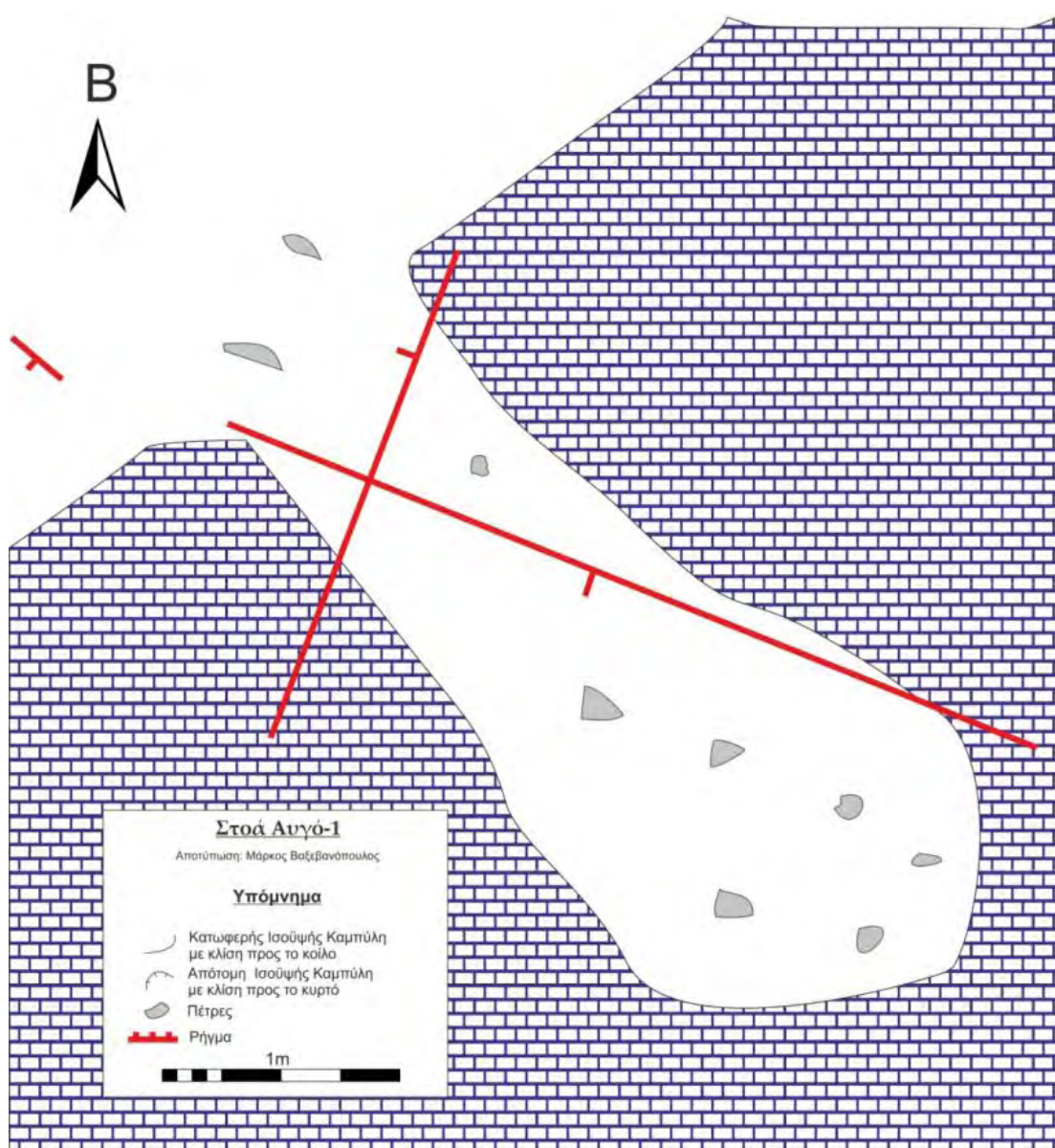
Εικόνα 8.4.2.1 Αποψη προς ανατολάς της κορυφής Αβγού. Οι είσοδοι υπόγειων εργασιών και τεκτονικές ασυνέχειες στην περιοχή του Αβγού. Με λευκό χρώμα σημειώνεται το σύγχρονο μεταλλείο του «Αβγού» και με μαύρο τα παλαιότερα. Με ανεστραμμένο σύμβολο απεικονίζεται κατεστραμμένη είσοδος μεταλλείου. Διακρίνονται με κόκκινη γραμμή τα ρήγματα και με στικτή οι επαφές των λιθολογικών σχηματισμών.



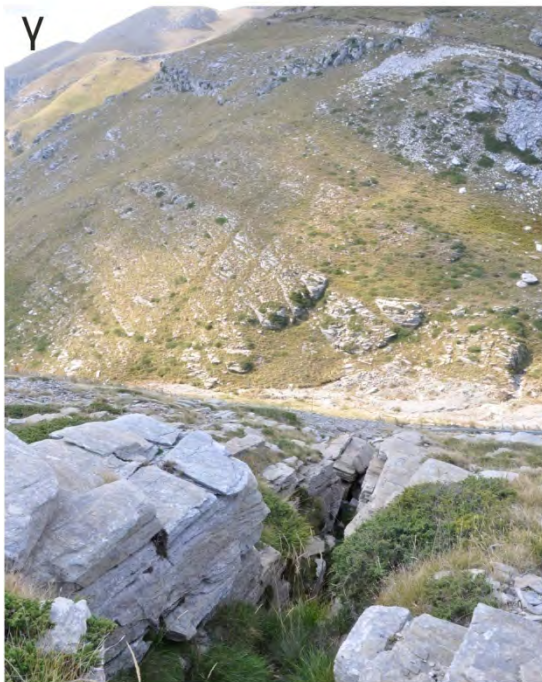
Εικόνα 8.4.2.2 Γεωλογικός χάρτης (κάτοψη) μεταλλευτικής περιοχής Αβγού.

8.4.3 Περιγραφή Στοάς-Τεχνικές Εξόρυξης

Όπως αναφέρθηκε η διαμόρφωση της πίστας του χιονοδρομικού κέντρου του Αβγού δεν επιτρέπει την παρατήρηση και τη μελέτη των μεταλλευτικών εργασιών. Μόνο μία μικρή στοά, η «Αβγό-1» μας δίνει μία εικόνα της μεταλλευτικής δραστηριότητας (Εικ. 8.4.3.1, 8.4.3.2.α). Αυτό έχει διανοιχθεί κατά μήκος των τεκτονικών ασυνεχειών των μαρμάρων που υπόκεινται των αμφιβολιτών. Στο εσωτερικό της στοάς «Αβγό-1», η μεταλλοφορία είναι ορατή κατά θέσεις, διότι στο μεγαλύτερο μέρος της έχει καλυφθεί με ασβεστιτική κρούστα (Εικ. 8.4.3.2.β). Ο όγκος της υπόγειας εκμετάλλευσης υπολογίζεται στα 2,1 m³. Τα ίχνη των εργαλείων στη στοά Αβγό-1 δείχνουν κυρίως χρήση του μεταλλευτικού σφυριού ή συνδυασμό σφυριού-καλεμιού. Εξωτερικά της στοάς, όπως και των άλλων κατεστραμμένων στοών παρατηρούνται κώνοι ανθρωπογενών κορημάτων, που αποτελούνται από λατύπες μαρμάρου και εκβολάδες (Εικ. 8.4.3.2.γ,δ). Οι τελευταίες αποτελούνται κυρίως από σιδηρομαγνανιούχα μεταλλοφορία.



Εικόνα 8.4.3.1 Κάτοψη της μεταλλευτικής στοάς «Αβγό-1».



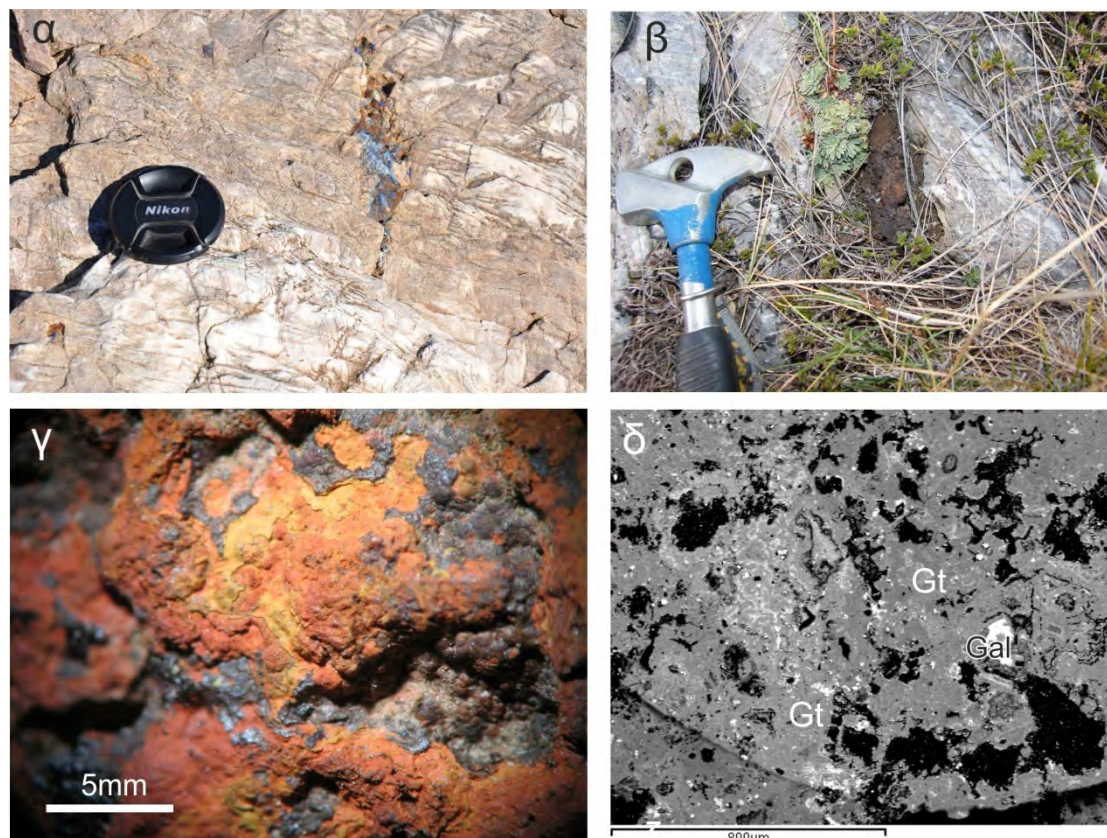
Εικόνα 8.4.3.2 α) Η είσοδος της στοάς «Αβγό-1». Διακρίνονται εξωτερικά υπολείμματα της εξόρυξης (εκβολάδες). β) Μεταλλοφορία και ίχνη εργαλείων καλυμμένα με ασβεστιτική κρούστα στη στοά «Αβγό-1». γ) Κατεστραμμένη είσοδος στοάς στη δυτική πλευρά του Αβγού, διανοιγμένη κατά μήκος κανονικού ρήγματος. δ) Κατεστραμμένη είσοδος στοάς στη βορειοδυτική πλευρά του Αβγού. Διακρίνονται σωροί εκβολάδων εκατέρωθεν της εισόδου.

8.4.4 Αρχαιολογικά Ευρήματα

Στο εσωτερικό της στοάς Αβγό-1 δεν βρέθηκε επιφανειακά κεραμική. Στους κώνους κορημάτων της εξόρυξης, αλλά και διάσπαρτα στην περιοχή του Αβγού βρέθηκε κεραμική ρωμαϊκής εποχής. Αριθμός κεραμικών οστράκων ρωμαϊκών χρόνων βρέθηκε στην περιοχή της εισόδου σπηλαιίου-καρστικής πηγής στο νότιο τμήμα του Αβγού.

8.4.5 Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Μεταλλεύματος

Η μεταλλοφορία στη θέση Αβγό είναι έντονα οξειδωμένη και αποτελείται κυρίως από γκαιίτη, μαλαχίτη και αζουρίτη. Η πρωτογενής μεταλλοφορία εμφανίζεται περιορισμένη και αποτελείται από σιδηροπυρίτη, αρσеноπυρίτη, γαληνίτη και σφαλερίτη (Εικ. 8.4.5.1.α,β). Η πλειονότητα των ορυκτών της πρωτογενούς μεταλλοφορίας μετατρέπονται σε γκαιίτη (Εικ. 8.4.5.1.γ, δ).



Εικόνα 8.4.5.1 α) Διάκλαση στο μάρμαρο που πληρώνεται από οξειδωμένη μεταλλοφορία γκαιίτη, μαλαχίτη, αζουρίτη στην περιοχή Αβγού. β) Διάκλαση πληρωμένη με γκαιίτη-σιδηροπυρίτη. γ) Μεταλλοφορία με γκαιίτη από τις εκβολάδες της μεταλλευτικής στοάς Αβγό-1. δ) Γκαιίτης (Gt) και γαληνίτης (Gal) από τη μεταλλοφορία του Αβγού. SEM, back scattering image.

Μία χημική ανάλυση που έγινε από τη μεταλλοφορία στο Αβγό και συγκεκριμένα από υπόλειμμα της εξόρυξης εξωτερικά της στοάς Αβγό-1 έδειξε περιεκτικότητες σε Au και Ag 9,4 και 10,4 ppm αντίστοιχα και περιεκτικότητα σε Fe_2O_3 (>57,18 wt %), σε Cu (>1 wt %), σε As (>1 wt %), σε Pb (1,8 wt %) και σε Zn (>1 wt %). Παρατηρούνται επίσης σχετικά υψηλές περιεκτικότητες της μεταλλοφορίας σε Cd (797,34 ppm) και Sb (436,90 ppm).

Στον Πίνακα 8.4.5.1 παρατίθενται επιπλέον χημικές αναλύσεις από τον Eliopoulos (2000) σε δύο δείγματα (AS-57 και AS-58) από την οξειδωμένη μεταλλοφορία στο μάρμαρο. Οι περιεκτικότητες σε Au, Cu, Pb, Zn, Cd και Sb είναι χαμηλότερες σε σχέση με τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής,

επειδή πιθανώς η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε στην επιφανειακή οξειδωμένη μεταλλοφορία, ενώ τα δείγματα της παρούσας διατρίβης ελήφθησαν από εξορυγμένο υλικό των υπόγειων εκμεταλλεύσεων.

Πίνακας 8.4.5.1 Περιεκτικότητες των βασικών οξειδίων (wt %) και επιλεγμένων ιχνοστοιχείων (ppm) από δείγματα στην περιοχή του Αβγού από την παρούσα διατρίβη και από Eliopoulos (2000). Ο ολικός σίδηρος εκφράζεται σε Fe₂O₃. (bdl: κάτω του ορίου ανιχνευσιμότητας, na: δεν αναλύθηκε)

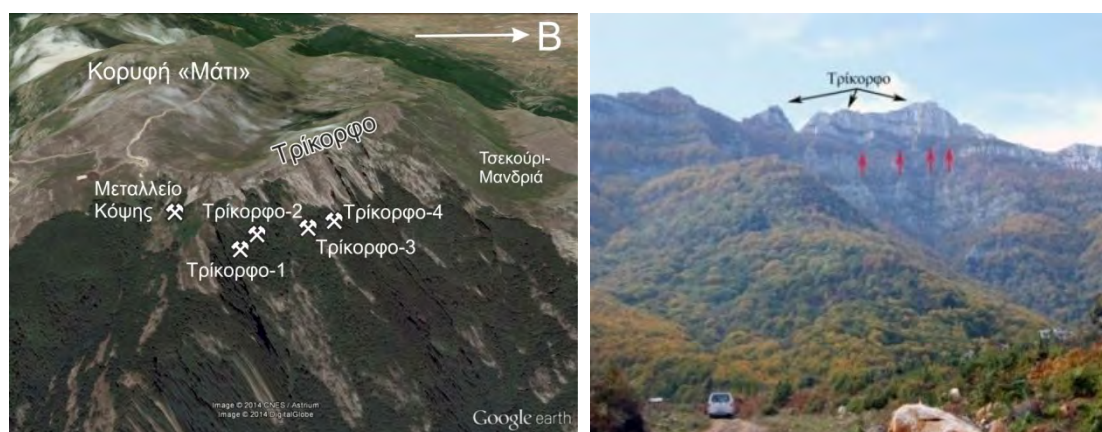
	PAV-5	As-57 (Eliopoulos, 2000)	As-58 (Eliopoulos, 2000)
wt%			
SiO ₂	na	68,81	6,30
Al ₂ O ₃	1,95	3,60	0,25
Fe ₂ O ₃	>57,18	12,14	10,10
MgO	0,03	2,20	14,47
CaO	0,18	5,07	23,60
Na ₂ O	0,00	0,86	4,51
K ₂ O	0,01	0,67	0,09
TiO ₂	bdl	0,10	bdl
P ₂ O ₅	0,07	0,11	0,04
MnO	>1,29	0,32	5,22
ppm			
Au	9,36	bdl	0,03
Ag	10,44	4,10	26,60
Cu	>10000,00	bdl	bdl
Pb	17827,16	286,00	3095,00
Zn	>10000,00	15210,00	359.460,00
As	>10000,00	140,00	723,00
Bi	5,57	9,00	1,00
Ba	11,30	105,00	4,00
Be	0,20	na	na
Co	0,80	102,00	46,00
Sr	7,70	65,00	55,00
U	1,40	6,00	bdl
V	8,00	50,00	9,00
W	0,30	na	na
Cd	797,34	na	na
Sb	436,90	bdl	bdl
Hg	2,00	na	na
Tl	0,71	na	na
Se	0,70	1,00	1,00
Te	0,04	3,00	3,00
B	32,00	na	na

8.5 Μεταλλευτική Περιοχή Κορυφής – Τρίκορφου Παγγαίου

8.5.1 Γεωγραφική Θέση

Η συγκεκριμένη μεταλλευτική περιοχή περιλαμβάνει το απότομο πρηνές, που ξεκινά από τη βορειοανατολική πλευρά της κορυφής «Μάτι» μέχρι το βορειοανατολικό τμήμα του «Δίκορφου». Το τμήμα του βουνού που περιλαμβάνει τις δύο κορυφές του «Δίκορφου» και την κορυφή «Πάτωμα» ονομάζεται «Τρίκορφο». Στο ανατολικό τους τμήμα σχηματίζουν ένα απότομο πρηνές με τρεις κορυφές ορατές από την πλευρά της Νικήσιανης.

Στην περιοχή «Κορυφή-Τρίκορφο» Παγγαίου εντοπίστηκαν συνολικά 5 υπόγειες μεταλλευτικές στοές, οι οποίες περιγράφονται για πρώτη φορά. Τέσσερις μικρές στοές «Τρίκορφο-1 έως 4» εντοπίζονται στη βάση του απότομου πρηνούς του «Δίκορφου» (Εικ. 8.5.1.1), ενώ το «Μεταλλείο Κόψης ή Κορυφής» βρίσκεται ακριβώς κάτω από το διάσελο που οδηγεί από το Τρίκορφο στην Κορυφή «Μάτι» του Παγγαίου. Η πρόσβαση στο «Μεταλλείο Κόψης» γίνεται διαμέσου του δρόμου που οδηγεί στην κορυφή «Μάτι» και μονοπατιού, ενώ στα υπόλοιπα πραγματοποιείται με καταρρίχηση από το «Τρίκορφο» ή μέσω μονοπατιού από την περιοχή «Τσεκούρι-Μανδριά».



Εικόνα 8.5.1.1 Αριστερά: Άποψη της μεταλλευτικής περιοχής Κορυφής-Τρίκορφου. Εικόνα από Google Earth. Δεξιά: Άποψη της περιοχής από την περιοχή της Νικήσιανης. Διακρίνονται οι δύο κορυφές του «Δίκορφου» και αριστερά τους η κορυφή πάτωμα σχηματίζοντας το «Τρίκορφο». Με βέλη σημειώνονται στο απότομο πρηνές οι θέσεις των 4 υπόγειων στοών του Τρίκορφου.

8.5.2 Γεωλογία-Τεκτονική

Οι υπερκείμενοι σχηματισμοί στην περιοχή Τρίκορφου είναι μάρμαρα, λευκά, έντονα τεκτονισμένα και καρστικοποιημένα. Ανατολικά του Τρίκορφου συναντάται πληθώρα επιφανειακών καρστικών σχηματισμών, όπως μία μεγάλη πόλγη και επιμέρους δολίνες. Τα μάρμαρα έχουν χρώμα λευκό, λευκότεφο έως τεφρό, είναι συμπαγή και οι κύριες τεκτονικές διευθύνσεις στη μάζα τους είναι B-N και BBD-NNA. Στη βάση των μαρμάρων εντοπίζεται ένας λεπτός σχηματισμός αμφιβολιτών πάχους από 3 έως 20 m (Εικ. 8.5.2.1). Οι αμφιβολίτες

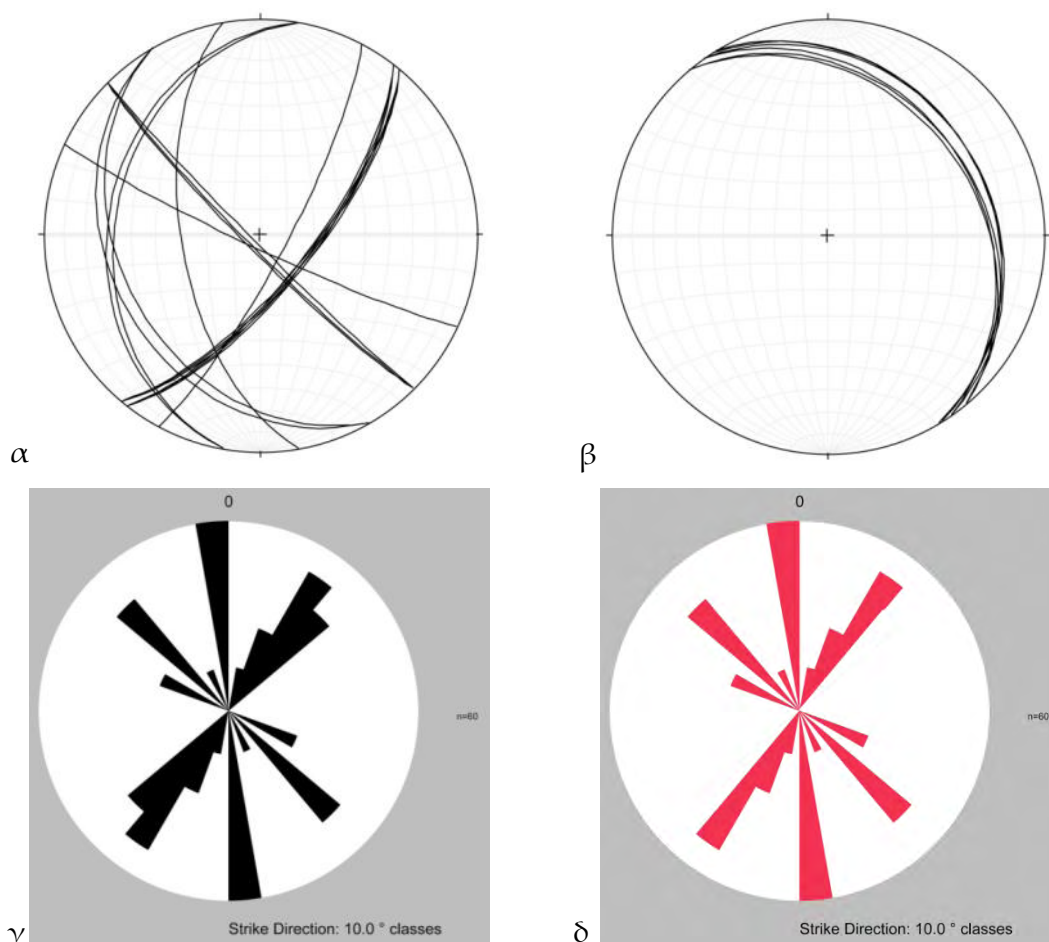
υπέρευνονται μιας σειράς δολομιτικών μαρμάρων που παρουσιάζουν εναλλαγές με μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους.

Η μεταλλοφορία που εντοπίζεται είναι οξειδωμένη και συναντάται σε τεκτονικές ασυνέχειες και σε καρστικά έγκοιλα (Εικ. 8.5.2.2). Εντοπίζεται κυρίως στο απότομο πρηνές δυτικά του «Δίκορφου» σε μικρά καρστικά έγκοιλα. Στα περισσότερα από αυτά παρατηρούνται ενδείξεις επιφανειακής εκμετάλλευσης (Εικ. 8.5.2.3).

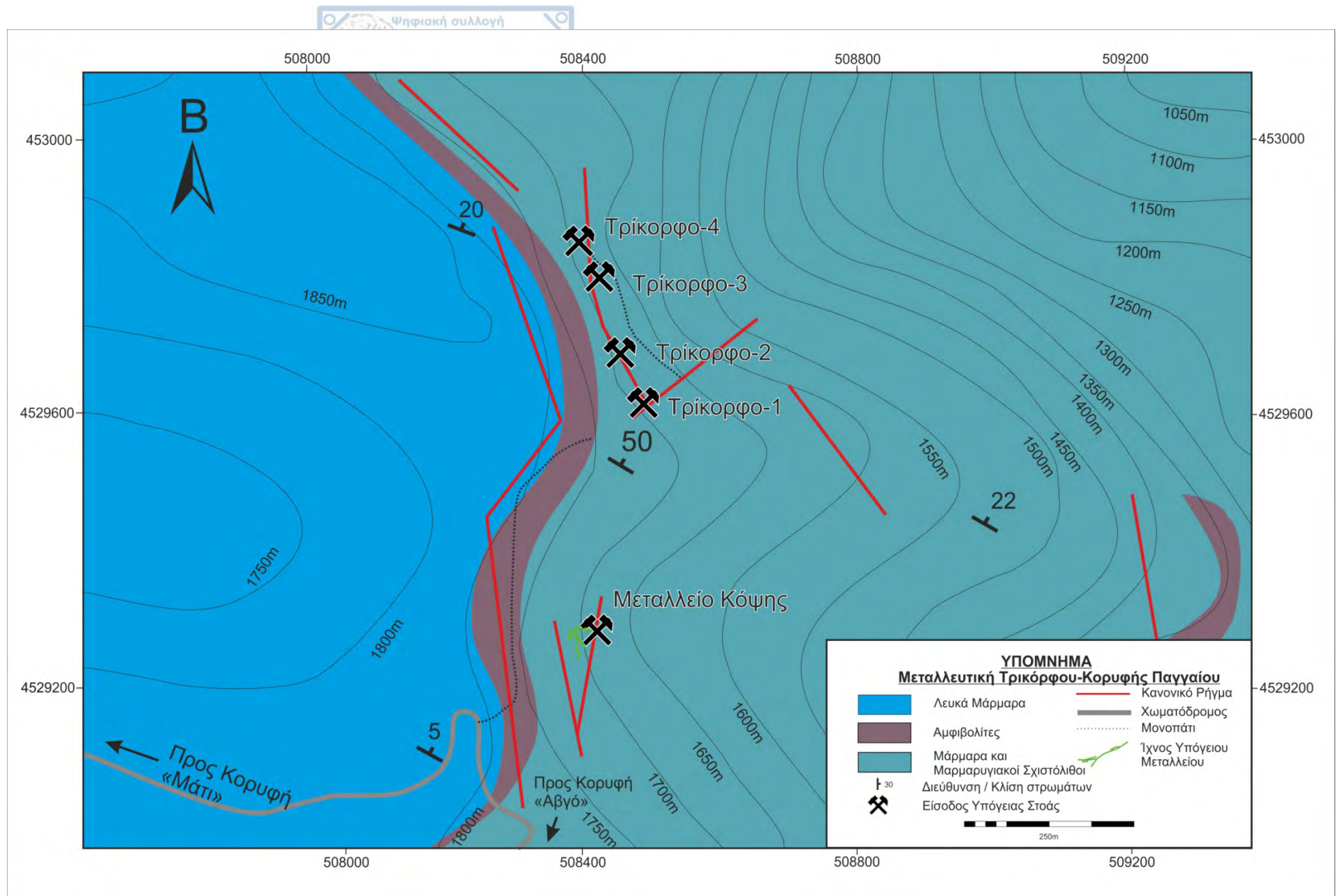


Εικόνα 8.5.2.1 α) Αμφιβολίτης παρεμβαλλόμενος στη μάζα των μαρμάρων της περιοχής «Κορυφή-Τρίκορφο». β) Μεταλλοφορία κατά μήκος ρηξιγενούς επιφάνειας στην περιοχή του «Τρίκορφου». γ) Τεκτονικό πρηνές με μικρά καρστικά έγκοιλα, όπου παρατηρείται επιφανειακή εκμετάλλευση.

Το μεγαλύτερο τμήμα της μεταλλοφορίας εντοπίζεται στα δολομιτικά μάρμαρα που υπόκεινται των αμφιβολιτών (Εικ. 8.5.2.4). Οι υπόγειες μεταλλευτικές εργασίες «Τρίκορφο1-4» και το Μεταλλείο «Κόψης» εντοπίζονται σε τεκτονικές ασυνέχειες των μαρμάρων, τα οποία υπόκεινται των αμφιβολιτών. Η μεταλλοφορία ακολουθεί τις κύριες τεκτονικές ασυνέχειες (Σχ. 8.5.2.1) διεύθυνσης ΒΒΔ-ΝΝΑ, ΒΑ-ΝΔ και ΒΔ-ΝΑ. Επίσης, μεταλλοφορία παρατηρείται και στις επιφάνειες σχιστότητας που κλίνουν προς τα ΒΑ.



Σχήμα 8.5.2.1 Στερεογραφικές προβολές (κάτω ημισφαίριο) και ροδοδιαγράμματα των ασυνεχειών από το εσωτερικό του μεταλλείου «Κόψης». α. Προβολή των τεκτονικών ασυνεχειών. β. Προβολή των επιφανειών σχιστότητας. γ. Ροδοδιάγραμμα των ασυνεχειών του μεταλλείου. δ. Ροδοδιάγραμμα ασυνεχειών που φιλοξενούν μεταλλοφορία.



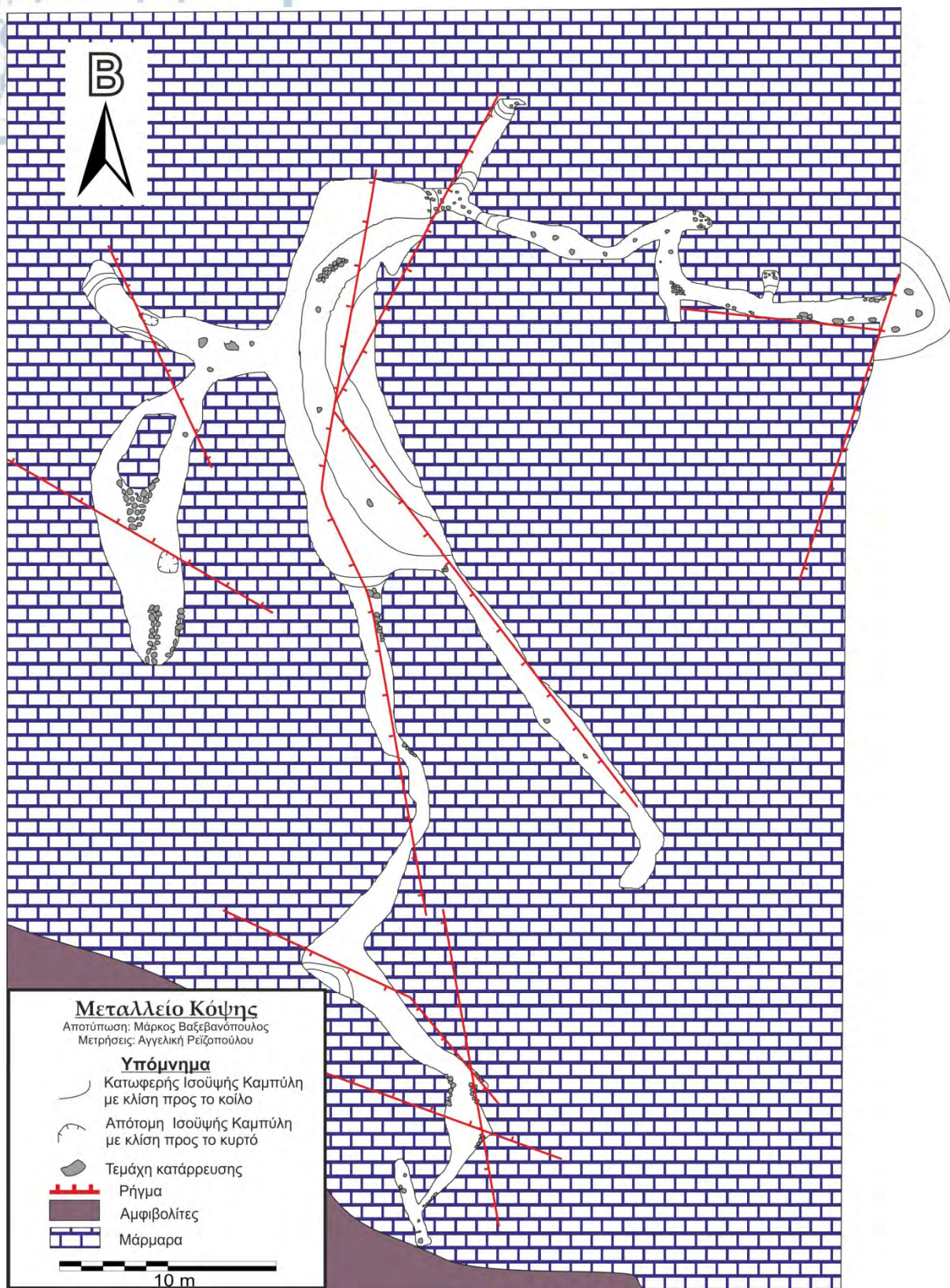
Εικόνα 8.5.2.4 Γεωλογικός χάρτης (κάτοψη) μεταλλευτικής περιοχής Τρικόρφου-Κορυφής Παγγαίου.

8.5.3 Μεταλλείο Κόψης

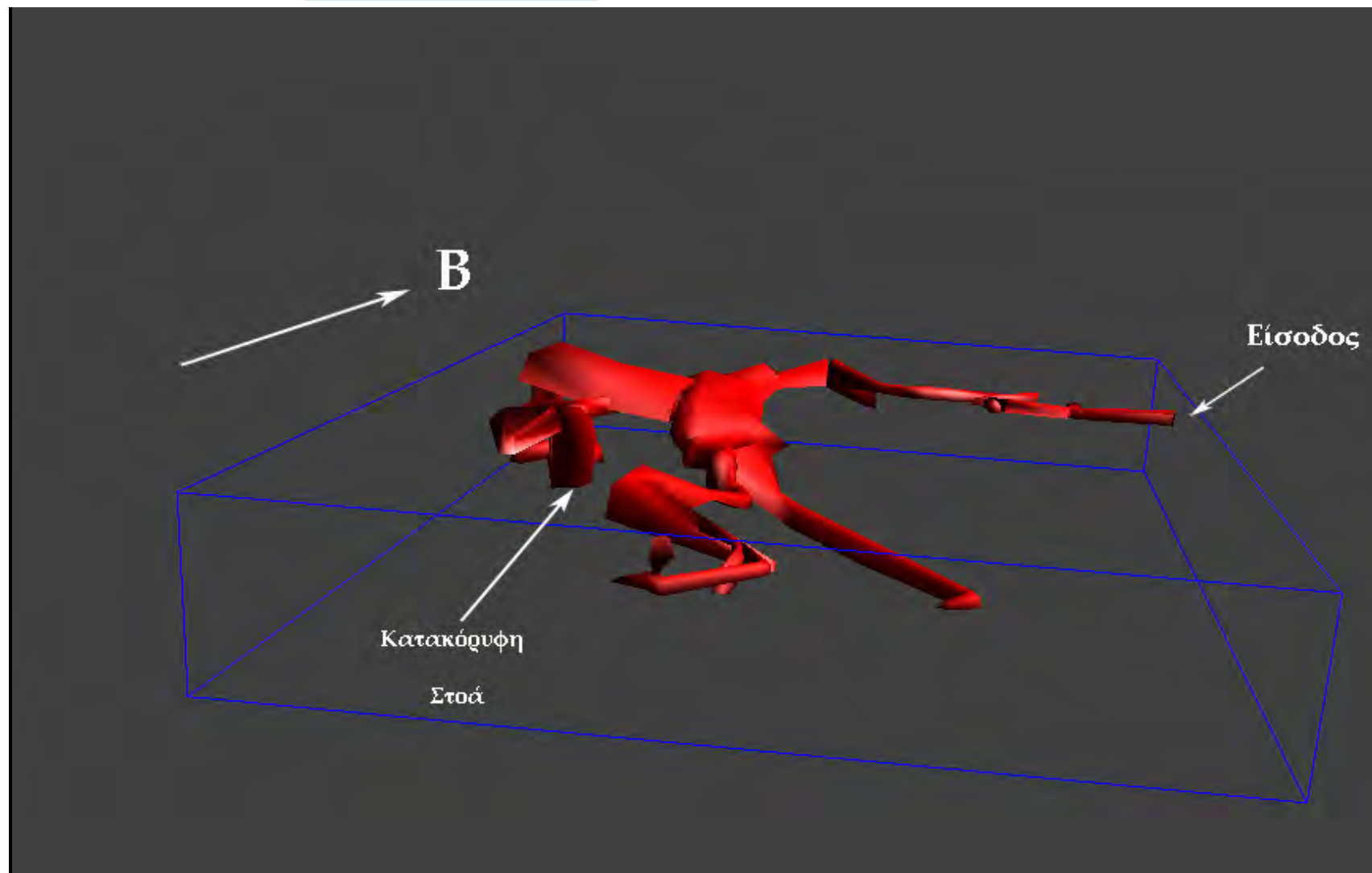
Το μεταλλείο «Κόψης» ή «Κορυφής» βρίσκεται στη νοτιοανατολική απόληξη της κορυφής «Μάτι» του Παγγαίου (υψόμετρο 1956 m) κάτω από την κόψη-διάσελο που ενώνει γεωμορφολογικά την περιοχή Τρικόρφου και Κορυφής. Η είσοδος του μεταλλείου κείται σε απότομο πρανές σε υψόμετρο 1667 m, στο οποίο σχηματίζεται μεγάλος κώνος κορημάτων. Ο αρχικός αγωγός της εισόδου έχει διαστάσεις 1,5 m x 0,7 m (πλάτος x ύψος) και είναι διανοιγμένη σε ζώνη διάτμησης των μαρμάρων με διεύθυνση κλίσης και κλίση 39/25, που διασταυρώνεται με κανονικό ρήγμα (Εικ. 8.5.3.1, 8.5.3.2, 8.5.3.3.α). Η μεταλλοφορία είναι έντονη κατά μήκος των τεκτονικών ασυνεχειών (Εικ. 8.5.3.3.β). Οι υπόγειες μεταλλευτικές εργασίες αποτελούνται από σύστημα στοών με μέση διατομή 1,5 m x 1,0 m (πλάτος x ύψος). Στο κεντρικό τμήμα του μεταλλείου σχηματίζεται μεγάλος θάλαμος με διαστάσεις 17 m x 6,4 m. Από τον κεντρικό αυτό θάλαμο ξεκινούν 4 διακλαδώσεις που ακολουθούν τη μεταλλοφορία στις τεκτονικές ασυνέχειες και στη σχιστότητα των μαρμάρων.

Στο μεγάλο θάλαμο του μεταλλείου, όπως και σε άλλους μικρότερους παρατηρούνται ξερολιθιές υποστήριξης της οροφής. Επίσης τέτοιες ξερολιθιές παρατηρούνται και στα πλευρικά τοιχώματα των διαδρόμων του μεταλλείου (Εικ. 8.5.3.3.γ, δ, ε, ζ). Επίσης στο δυτικό τμήμα του μεταλλείου παρατηρείται κατακόρυφη διάνοιξη στοάς, βάθους 2,5 m και διατομής 0,6 m x 0,4 m, ακολουθώντας τη μεταλλοφορία κατά μήκος ρήγματος (8.5.3.2). Στο βάθος του φρέατος υπάρχει μικρός οριζόντιος διάδρομος χωρίς αξιόλογο μήκος, αφού και η μεταλλοφορία μειώνεται αρκετά. Στο βορειοδυτικό τμήμα της ίδιας διακλάδωσης παρατηρείται στοά με επίσης μεγάλη κλίση που ακολουθεί τη μεταλλοφορία κατά τη διασταύρωση της σχιστότητας και ρήγματος.

Τα βασικά εργαλεία διάνοιξης όπως έδειξε η μελέτη των θετικών εκμαγείων είναι το σφυρί και το καλέμι (Εικ. 8.5.3.4). Κατά θέσεις εντοπίζονται ίχνη καύσης, που όμως δεν μπορούν να αποδοθούν στη χρήση διάνοιξης με φωτιά και νερό, αλλά σε περιστασιακές φωτιές πιθανώς για θέρμανση (Εικ. 8.5.3.2.η). Η θερμοκρασία στο εσωτερικό του μεταλλείου κυμαίνεται από 3,5 έως 6,5°C και η υγρασία 100%.



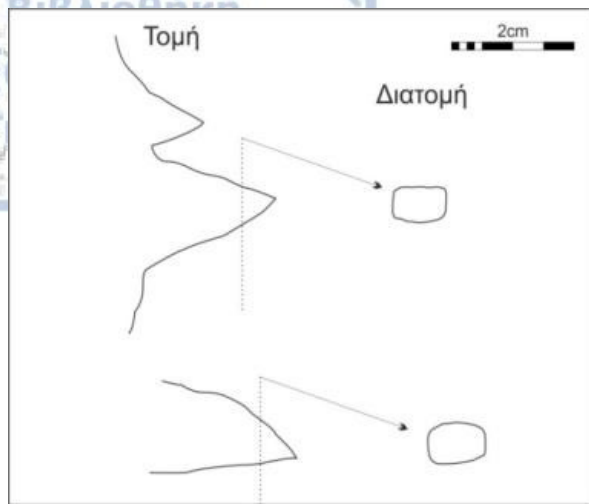
Εικόνα 8.5.3.1 Κάτοψη του μεταλλείου «Κόψης».



Εικόνα 8.5.3.2 και τρισδιάστατη απεικόνιση του μεταλλείου «Κόψης».



Εικόνα 8.5.3.3 α) Η είσοδος του μεταλλείου «Κόφης». Με διακεκομμένη γραμμή σημειώνεται κανονικό ρήγμα και με βέλος η ζώνη διάτμησης. β) Υπόλειμμα μεταλλοφόρου σώματος από το εσωτερικό του μεταλλείου. γ) Αποψη από τις στοές του μεταλλείου. δ) Ξερολιθιά υποστύλωσης καλυμμένη με δευτερογενή ασβεστίτη. ε) Ξερολιθιές υποστύλωσης πλευρικού τοιχώματος της στοάς. ζ) Πλευρικές ξερολιθιές υποστύλωσης οροφής στοάς. η) Υπολείμματα φωτιάς από το εσωτερικό του μεταλλείου. θ) Στενή διαδρομή από το εσωτερικό του μεταλλείου.



Εικόνα 8.5.3.4 Σχηματική απεικόνιση των ιχνών εκμετάλλευσης (αριστερά) με βάση θετικά εκμαγεία του μεταλλευτικού σφυριού (δεξιά) από το εσωτερικό του μεταλλείου Κόψης.

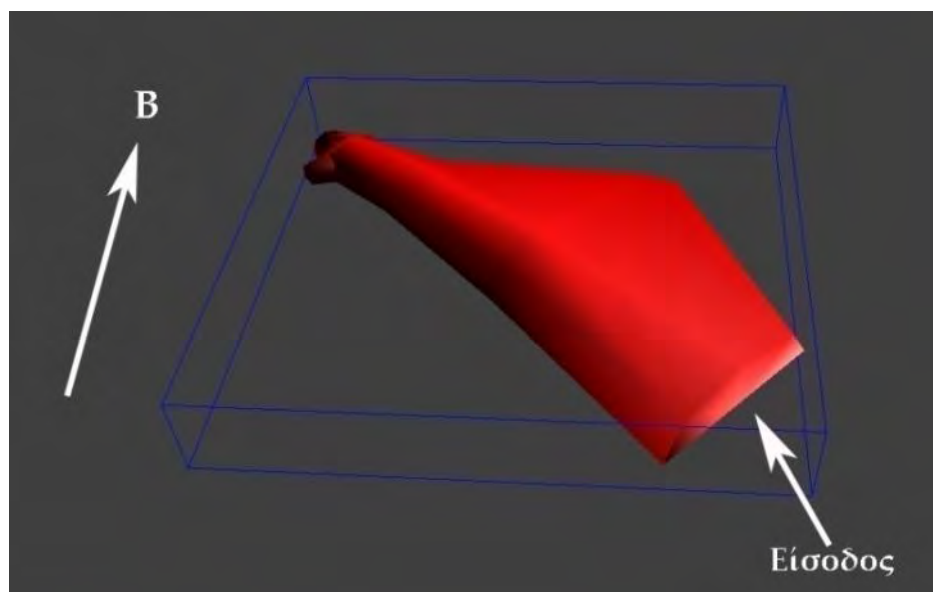
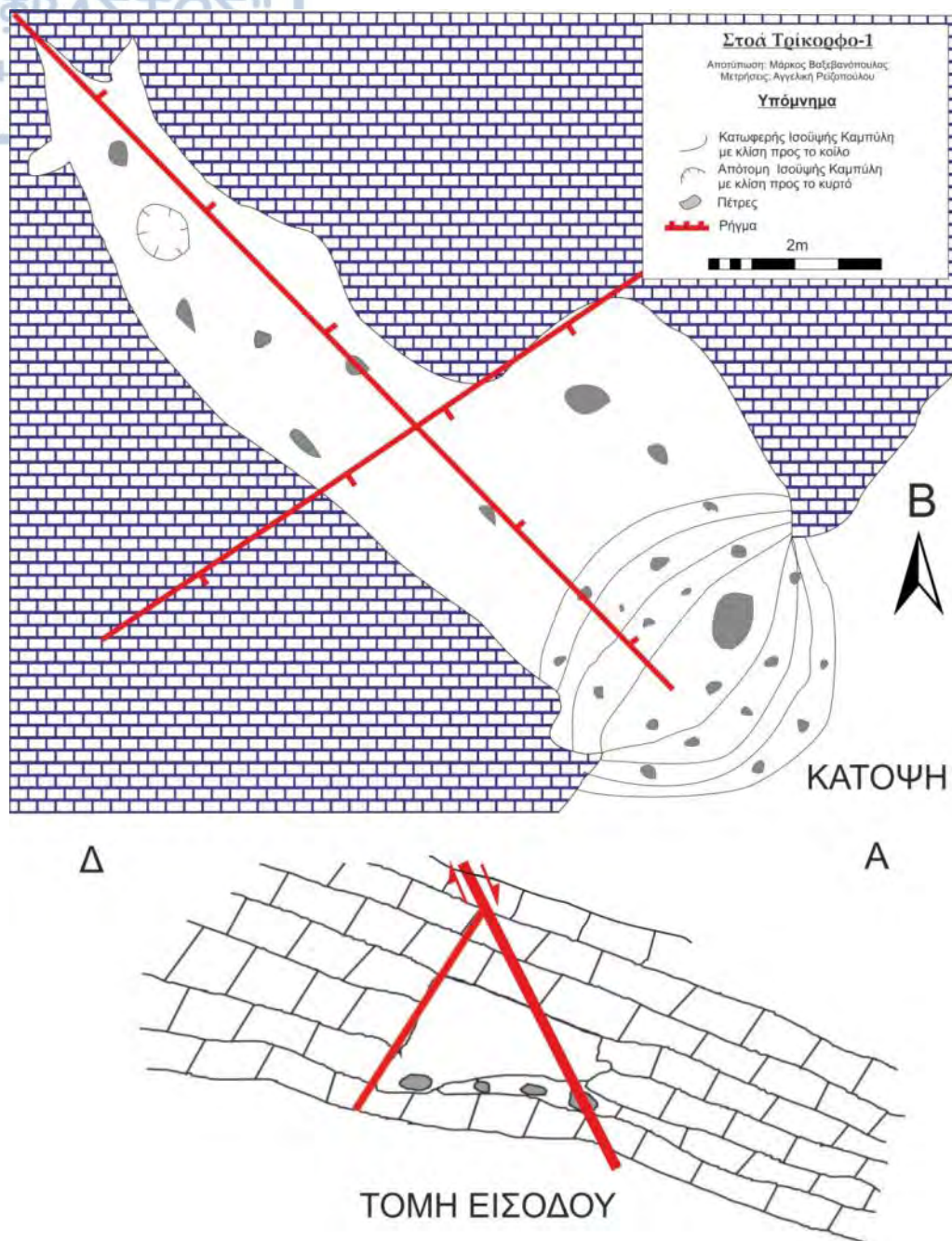
8.5.4 Μεταλλευτική Στοά Τρίκορφο-1

Η είσοδος της στοάς βρίσκεται σε υψόμετρο 1702 m σε απότομο πρανές που κλίνει προς τα νοτιοανατολικά (Εικ. 8.5.4.1). Έχει διαστάσεις 3,1 m x 0,6 m (πλάτος x ύψος). Η στοά «Τρίκορφο-1» έχει διανοιχθεί στα δολομιτικά μάρμαρα που υπόκεινται των αμφιβολιτών της περιοχής. Η διάνοιξη ακολούθησε τεκτονική ασυνέχεια με παράταξη ΒΔ-ΝΑ (Εικ. 8.5.4.2) η οποία είναι πληρωμένη με οξειδωμένη μεταλλοφορία. Επίσης, μεταλλοφόρα σώματα παρατηρούνται στα σημεία που η τεκτονική ασυνέχεια διασταυρώνεται με τη σχιστότητα των μαρμάρων (Εικ. 8.5.4.1).

Τα εργαλεία που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι σφυρί και καλέμι, ενώ ο όγκος του είναι περίπου 15 m³. Η θερμοκρασία στο εσωτερικό είναι 14,2°C, ενώ η σχετική υγρασία 59%.



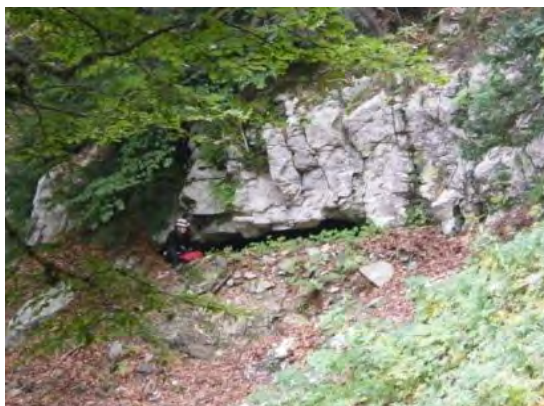
Εικόνα 8.5.4.1. Αριστερά: Άποψη της εισόδου του της υπόγειας στοάς «Τρίκορφο-1». Σημειώνεται κανονικό ρήγμα. Δεξιά: Άποψη του εσωτερικού της στοάς. Στα τοιχώματα της οροφής διακρίνεται ίχνος από την οξειδωμένη μεταλλοφορία που έχει εξορυχθεί.



Εικόνα 8.5.4.2.
Κάτοψη και
τρισδιάστατη
απεικόνιση της στοάς
«Τρίκορφο-1».

8.5.5 Μεταλλευτική Στοά Τρίκορφο-2

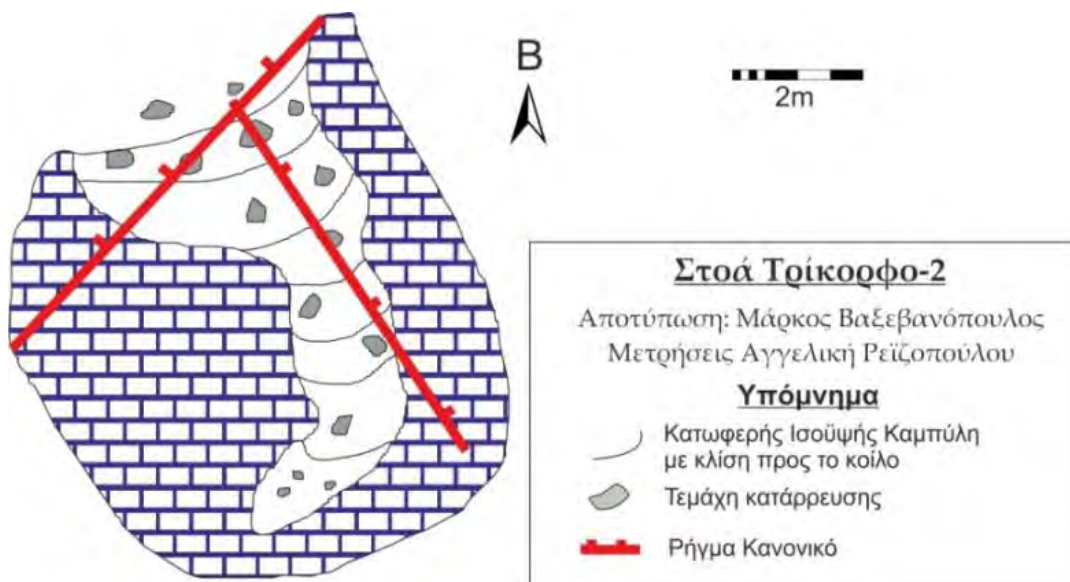
Η στοά «Τρίκορφο-2» αποτελεί τη μικρότερη υπόγεια εκμετάλλευση της περιοχής του Τρίκορφου, μιας και ο συνολικός όγκος της υπολογίζεται στα 8,6 m³. Η είσοδός της βρίσκεται 100 m βορειοδυτικά της στοάς «Τρίκορφο-1» σε υψόμετρο 1682 m. Έχει διανοιχθεί σε μάρμαρα που υπόκεινται των αμφιβολιών της περιοχής του Τρίκορφου. Οι διαστάσεις της εισόδου είναι 3,9 m x 0,9 m (πλάτος x ύψος). Ο μέγιστος άξονας διάνοιξης δεν ξεπερνά τα 9 m και ακολουθεί τις κύριες τεκτονικές ασυνέχειες παράταξης ΒΔ-ΝΑ και τις δευτερεύουσες παράταξης ΒΑ-ΝΔ (Εικ. 8.5.5.1-3).



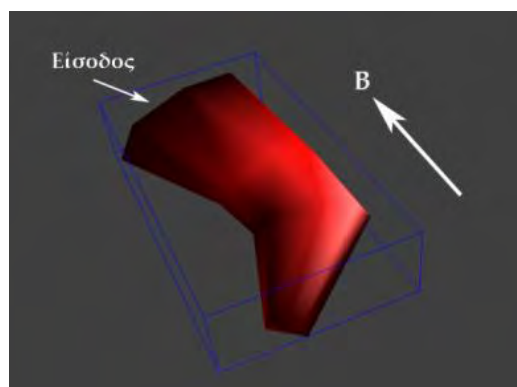
Εικόνα 8.5.5.1 Άποψη της εισόδου της στοάς «Τρίκορφο-2».



Εικόνα 8.5.5.2 Λαξευμένη επιφάνεια στο εσωτερικό της στοάς.



Εικόνα 8.5.5.3 Κάτοψη και τρισδιάστατη απεικόνιση της στοάς «Τρίκορφο-2».



8.5.6 Μεταλλευτική Στοά Τρίκορφο-3

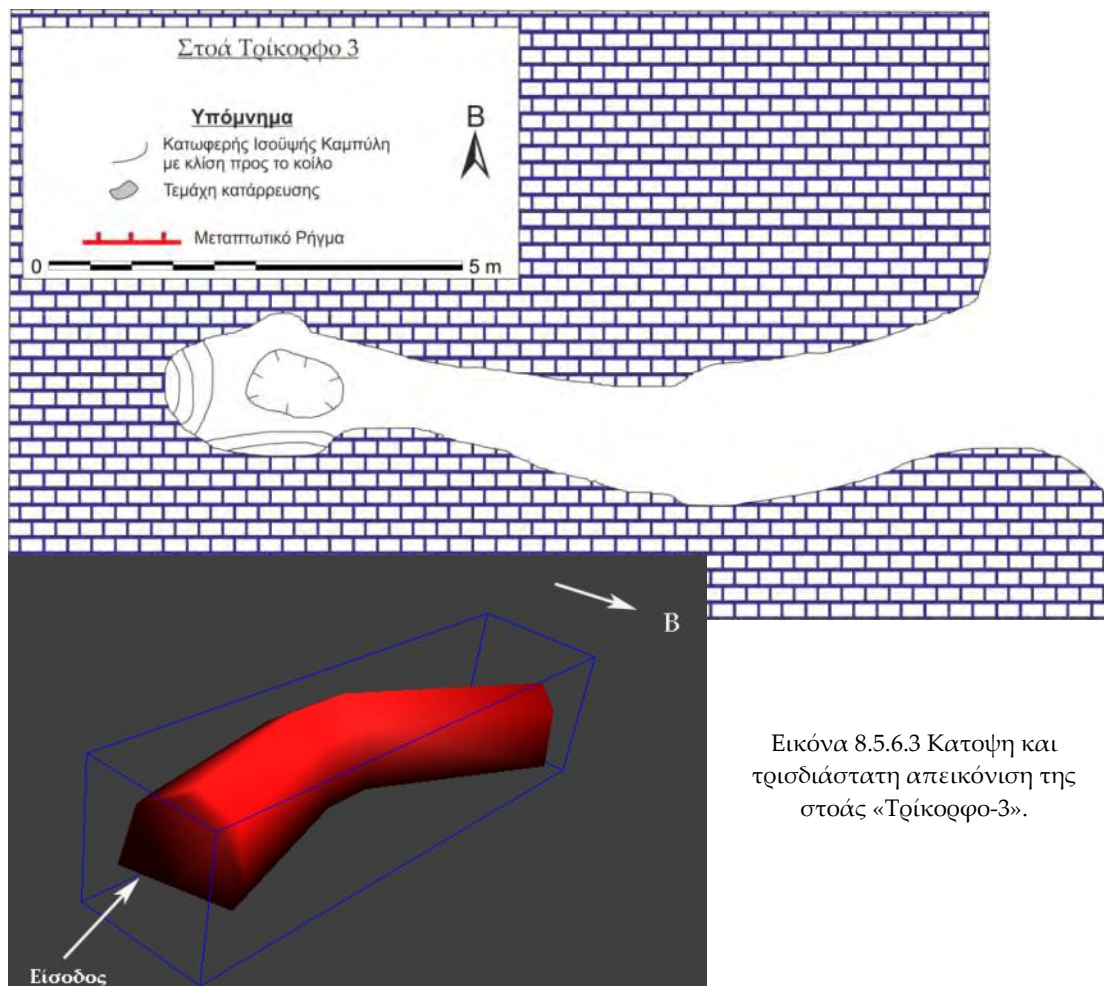
Η μεταλλευτική στοά «Τρίκορφο-3» βρίσκεται 113 m βορειοδυτικά της στοάς «Τρίκορφο-2». Η είσοδος της έχει διαστάσεις 1,93 m x 1,52 m (πλάτος x ύψος) και βρίσκεται σε υψόμετρο 1664 m (Εικ. 8.5.6.1-3). Πρόκειται για καρστικό αγωγό των μαρμάρων, ο οποίος έχει διευρυνθεί ανθρωπογενώς για την εξόρυξη της μεταλλοφορίας (Εικ. 8.5.6.2). Τα μεταλλοφόρα σώματα εντοπίζονται στις τεκτονικές ασυνέχειες των μαρμάρων, οι οποίες έχουν πάχος από 0,5 έως 14 cm. Η βασική τεκτονική ασυνέχεια της στοάς είναι ένα κανονικό ρήγμα παράταξης σχεδόν Α-Δ (8.5.6.3). Το συνολικό μήκος της είναι 13 m, ενώ ο όγκος υπολογίζεται στα 18,7 m³.



Εικόνα 8.5.6.1 Η είσοδος της στοάς «Τρίκορφο-3».



Εικόνα 8.5.6.2 Άποψη από το εσωτερικό της στοάς.



Εικόνα 8.5.6.3 Κατοψη και τρισδιάστατη απεικόνιση της στοάς «Τρίκορφο-3».

8.5.7 Μεταλλευτική Στοά Τρίκορφο-4

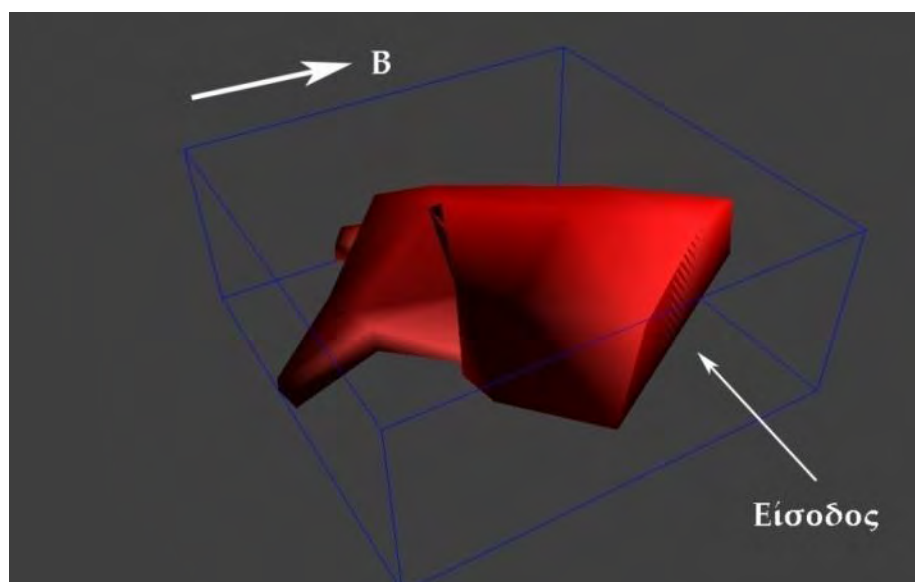
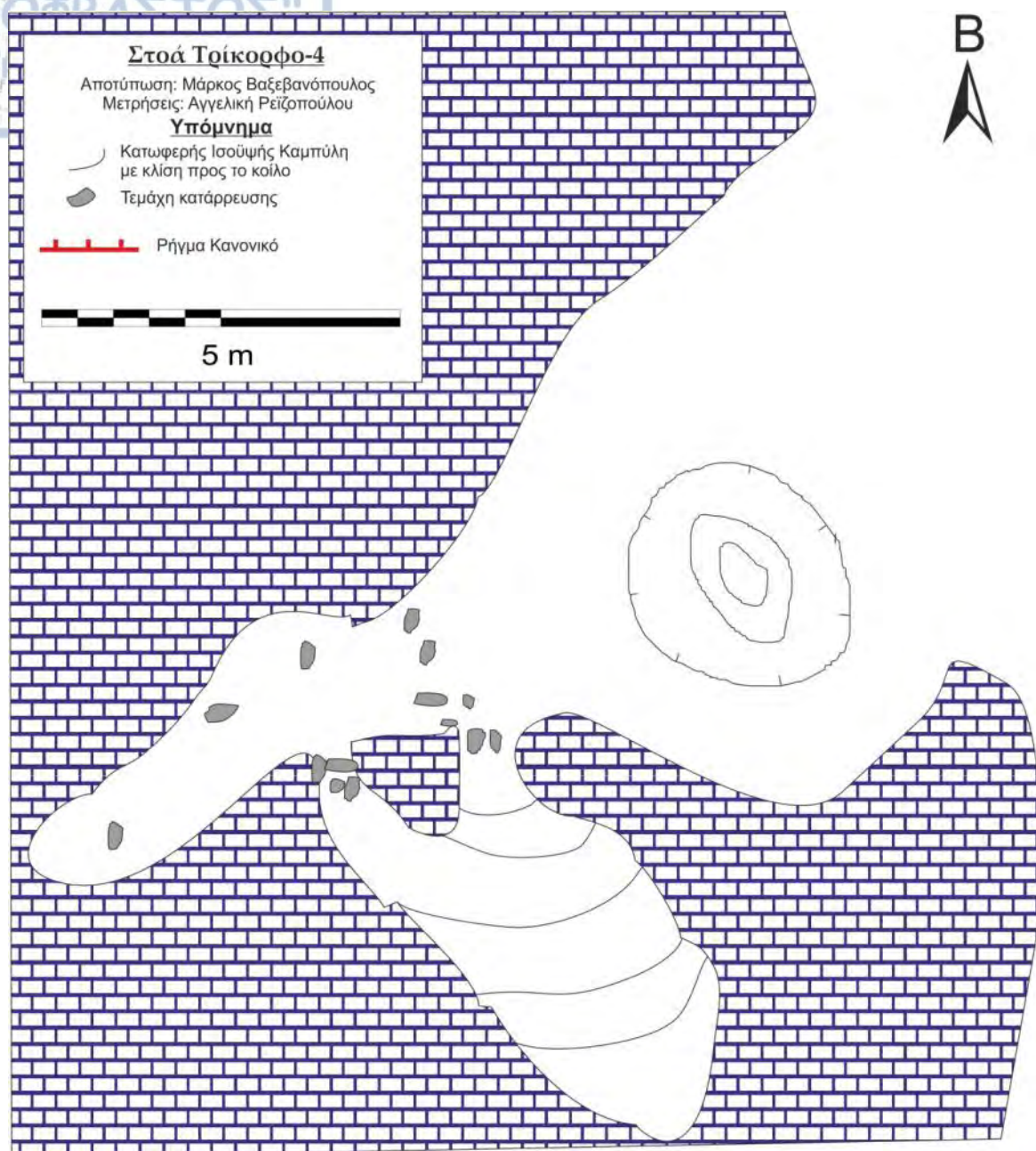
Η είσοδος της στοάς «Τρίκορφο-4» βρίσκεται σε υψόμετρο 1669 m και απέχει 40 m βορειοανατολικά του «Τρίκορφου-3». Η είσοδός της είναι αρκετά ευρεία με διαστάσεις 10,2 m x 2,8 m (πλάτος x ύψος) (Εικ. 8.5.7.1.α, 8.5.7.2). και αποτελεί τμήμα φυσικού εγκοίλου. Στο κεντρικό και νότιο τμήμα της παρατηρείται λαθρανασκαφή με βάθος περίπου 2 m (Εικ. 8.5.7.1.α-δ).

Το κεντρικό της τμήμα έχει μήκος 11 m, ενώ στο εσωτερικό της διακλαδίζεται σε ένα διάδρομο προς δυσμάς με μήκος 4,40 m και σε μία νότια στοά η οποία είναι πληρωμένη με υλικά αποσάθρωσης (Εικ. 8.5.7.2). Το μέσο ύψος των διαδρόμων είναι περίπου 0,7 m. Στα τοιχώματα της στοάς και ιδιαίτερα στις διακλάσεις παρατηρείται οξειδωμένη και μερικώς οξειδωμένη μεταλλοφορία.

Τα βασικά εργαλεία εκμετάλλευσης ήταν το σφυρί και το καλέμι. Ο συνολικός όγκος της υπόγειας εκμετάλλευσης είναι 113 m³, ενώ του υλικού που εξορύχθηκε υπολογίζεται σε 67 m³. Η θερμοκρασία στο εσωτερικό της στοάς είναι περίπου 3°C και η σχετική υγρασία 65%.



Εικόνα 8.5.7.1 α) Η είσοδος της στοάς «Τρίκορφο-4». β) Μεταλλοφορία παράλληλα στη σχιστότητα των μαρμάρων. γ) Άποψη της εισόδου από το εσωτερικό της μεταλλευτικής στοάς. δ) Μερικώς οξειδωμένη μεταλλοφορία από το εσωτερικό της στοάς.



Εικόνα 8.5.7.2 Κάτοψη και τρισδιάστατη απεικόνιση της στοάς «Τρίκορφο-4».

8.5.8 Αρχαιολογικά Ευρήματα

Στην περιοχή Κορυφής-Τρίκορφου δεν παρατηρήθηκε επιφανειακά κάποιο αρχαιολογικό εύρημα. Μόνο στο εσωτερικό των στοών εντοπίστηκε επιφανειακά κεραμική.

Στο μεταλλείο «Κόψης» η κεραμική εντοπίζεται κυρίως στα πρώτα τμήματα και κυρίως σε συγκεντρώσεις νερού. Αυτή χρονολογείται από τους ρωμαϊκούς, βυζαντινούς και οθωμανικούς χρόνους. Στις υπόγειες μεταλλευτικές εργασίες Τρίκορφο 1 έως 3 δεν εντοπίστηκε επιφανειακή κεραμική. Στη στοά Τρίκορφο 4 εντοπίστηκε κεραμική στο εσωτερικό της λαθρανασκαφής που χρονολογείται στους ρωμαϊκούς, βυζαντινούς και υστεροβυζαντινούς χρόνους.

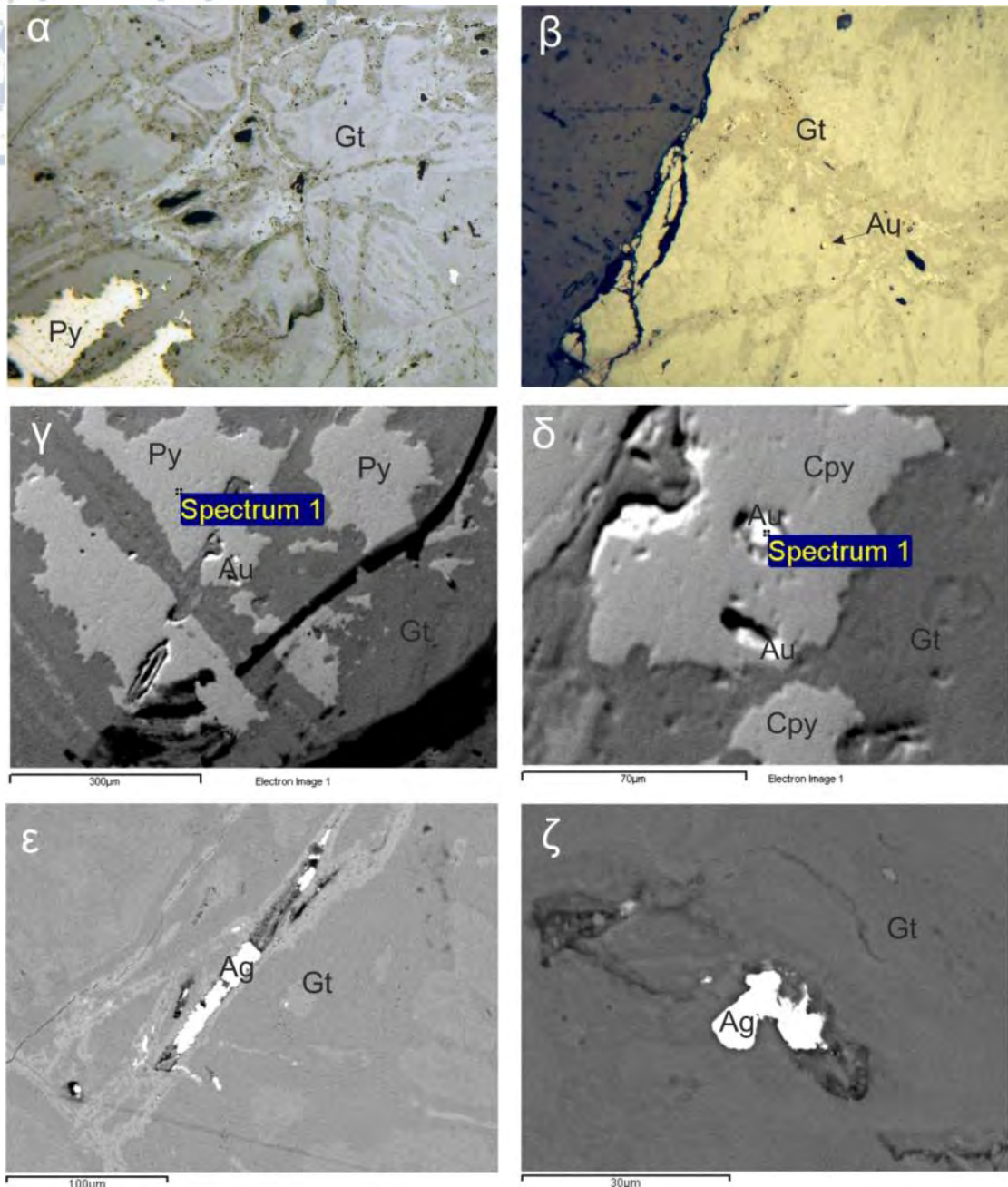
8.5.9 Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Μεταλλεύματος

Η μεταλλοφορία τόσο στο εσωτερικό του μεταλλείου «Κόψης», όσο και στις στοές Τρίκορφο 1 έως 4, είναι οξειδωμένη με κύριο ορυκτό, τον γκαιίτη. Μόνο στις στοές Τρίκορφο 3 και 4 εντοπίστηκε στις διακλάσεις των τοιχωμάτων μερικώς οξειδωμένη μεταλλοφορία που δεν έχει εξορυχθεί, όπου διακρίνονται υπολειμματικός σιδηροπυρίτης και χαλκοπυρίτης (Εικ. 8.5.9.1).



Εικόνα 8.5.9.1 Οξειδωμένη μεταλλοφορία από τη μεταλλευτική στοά «Τρίκορφο-4».

Το κύριο πρωτογενές ορυκτό της μεταλλοφορίας από τις στοές 3 και 4 είναι ο σιδηροπυρίτης και δευτερευόντως ο χαλκοπυρίτης (Εικ. 8.5.9.2.α). Και τα δύο ορυκτά οξειδώνονται σε γκαιίτη. Κατά τη μικροσκοπική μελέτη εντοπίστηκε Au μέσα στον γκαιίτη, και στο σιδηροπυρίτη, αλλά και κατά μήκος κατακλάσεων του (8.5.9.2.β-δ). Οι κόκκοι του χρυσού έχουν σχήμα ελλειπτικό, γωνιώδες έως ακανόνιστο, με διάμετρο από 5 έως 30 μm . Κόκκοι Au εντοπίζονται επίσης και σε χαλκοπυρίτη (Εικ. 8.5.9.2.δ). Επίσης, σε κατακλάσεις του γκαιίτη εντοπίστηκαν κόκκοι αυτοφυούς αργύρου. Έχουν τραπεζοειδές επίμηκες σχήμα έως ακανόνιστο με μήκος μέχρι 100 μm και πλάτος μέχρι 20 μm (Εικ. 8.5.9.2.ε-ζ).



Εικόνα 8.5.9.2 α) Σιδηροπυρίτης (Py) που μετατρέπεται σε γκαϊτίτη (Gt). Μεταλλογραφικό μικροσκόπιο, //N, μήκος φωτογραφίας 100 μm. β) Κόκκος χρυσού (Au) σε γκαϊτίτη (Gt). Μεταλλογραφικό μικροσκόπιο, //N, μήκος φωτογραφίας 0,1 mm. γ) Οξειδωμένος σιδηροπυρίτης (Py) που μετατρέπεται περιμετρικά σε γκαϊτίτη (Gt), SEM, back scattering image. δ) Κόκκος χρυσού (Au) σε χαλκοπυρίτη (Cpy), SEM, back scattering image. ε) Αυτοφυής άργυρος (Ag) σε κατάκλαση γκαϊτίτη (Gt). ζ) Κόκκος αργύρου (Ag) σε γκαϊτίτη, SEM, back scattering image.

Από την περιοχή του Τρίκορφου έγινε δειγματοληψία από τη μερικώς οξειδωμένη μεταλλοφορία (δείγμα PTM-2), από την οξειδωμένη μεταλλοφορία (δείγμα PTM-3) και από την οξειδωμένη μεταλλοφορία από το εσωτερικό του μεταλλείου «Κόψης» (δείγμα PKS-2). Οι χημικές αναλύσεις των δειγμάτων από το Τρίκορφο (Πίν. 8.5.1.) έδειξαν ιδιαίτερα υψηλές περιεκτικότητες σε χρυσό και άργυρο (έως >100 ppm). Επίσης σε σχετικά υψηλές περιεκτικότητες βρίσκονται ο Cu 935,79-1676,33 ppm (μ.ό. 1359,04 ppm), ο Zn 957,70- >10000 ppm, το As 2866,60-5094,60 ppm (μ.ό. 4082,43 ppm), το Bi 0,65- >2000 ppm, το Co 0,50-335,00 ppm (μ.ό.

541,30 ppm), το Cd 6,80-277,39 ppm (μ.ό. 98,68 ppm), το Sb 0,40-469,27 ppm (μ.ό. 173,29) και το Te 9,00-33,43 ppm (μ.ό. 21,21 ppm) (Πίν. 8.5.1).

Το δείγμα από το εσωτερικό του μεταλλείου Κόψης παρουσιάζει σχετικά χαμηλές περιεκτικότητες σε μεταλλικά στοιχεία, αφού το κύριο μέρος της μεταλλοφορίας έχει εξορυχθεί και η δειγματοληψία περιέλαβε μεγάλη ποσότητα στείρου υλικού από το μάρμαρο που φιλοξενεί τη μεταλλοφορία (CaO = 48,01 wt %). Η περιεκτικότητα σε Au και Ag είναι μόλις 1,16 ppm και 18,11 ppm αντίστοιχα.

Πίνακας 8.5.1 Περιεκτικότητες των βασικών οξειδίων (wt %) και επιλεγμένων ιχνοστοιχείων (ppm) από δείγματα στην περιοχή του Τρίκορφου (PTM-2, PTM-3) και του μεταλλείου Κόψης (PKS-2). Ο ολικός σίδηρος εκφράζεται σε Fe₂O₃. (bdl: κάτω του ορίου ανιχνευσιμότητας, na: δεν αναλύθηκε)

	PTM-2	PTM-3	PKS-2
wt%			
SiO ₂	na	3,05	na
Al ₂ O ₃	0,17	0,13	0,06
Fe ₂ O ₃	>57,18	82,86	5,10
MgO	0,17	0,44	0,36
CaO	0,43	0,38	48,01
Na ₂ O	0,02	bdl	0,01
K ₂ O	0,01	bdl	0,02
TiO ₂	bdl	bdl	0,00
P ₂ O ₅	0,06	0,04	0,03
MnO	0,11	0,04	0,34
ppm			
Au	>100,00	36,31	1,16
Ag	>100,00	>100,00	18,11
Cu	935,79	1465,00	1676,33
Pb	11092,11	6319,20	713,50
Zn	>10000,00	4541,00	957,70
As	5094,60	4286,10	2866,60
Bi	>2000,00	106,20	0,65
Ba	19,80	26,00	122,00
Be	bdl	bdl	0,50
Co	205,80	335,00	0,50
Sn	26,60	7,00	1,00
Sr	4,70	23,50	27,10
U	7,30	5,70	2,80
V	41,00	10,00	26,00
W	bdl	bdl	3,80
La	0,60	0,60	25,45
Cd	11,86	6,80	277,39
Sb	469,27	50,20	0,40
Hg	0,70	0,73	0,15
Se	16,50	20,70	bdl
Te	33,43	9,00	bdl
B	40,00	na	31,00

8.6 Μεταλλευτική Περιοχή Ασημότρυπες Παγγαίου

8.6.1 Γεωγραφική Θέση

Οι Ασημότρυπες Παγγαίου είναι ίσως η πιο φημισμένη μεταλλευτική. Το όνομα παραπέμπει σε εξόρυξη αργύρου. Σημαντικός αριθμός μεταλλευτικών στοών εντοπίζεται σε μία απόκρημνη κοιλάδα στο κέντρο της αντικλινικής δομής του Παγγαίου. Οι στοές αυτές βρίσκονται 800 m βορείως της κορυφής «Αβγό», 1700 m ανατολικά της κορυφής «Μάτι» και απέχουν περίπου 4,5 km από τα τελευταία σπίτια της Νικήσιανης. Η κοιλάδα έχει διεύθυνση Α-Δ με προσανατολισμό προς ανατολάς. Η πρόσβαση στις Ασημότρυπες γίνεται με χωματόδρομο από τη Νικήσιανη και μονοπάτι. Επίσης, από την περιοχή του «Αβγού», μονοπάτι κατευθύνεται προς το απότομο πρηνές και προσεγγίζει τις Ασημότρυπες. Η βλάστηση είναι πυκνή κυρίως με δέντρα οξιάς. Συνολικά καταγράφηκαν 11 υπόγειες μεταλλευτικές στοές, 3 σύγχρονες και 8 παλαιότερες υπόγειες εκμεταλλεύσεις. Οι παλαιότερες στοές αριθμούνται ως ΑΣ1 έως ΑΣ8 και οι σύγχρονες από ΑΣΝ1 έως ΑΣΝ3. Οι στοές ΑΣ1 έως ΑΣ4 και ΑΣΝ1 έως ΑΣΝ2 βρίσκονται στο βόρειο πρηνές της κοιλάδας, ενώ οι στοές ΑΣ5 έως ΑΣ8 και η ΑΣΝ3 στο νότιο πρηνές της κοιλάδας (Εικ. 8.6.1.1-3). Στα κατάντη των σύγχρονων στοών έχουν δημιουργηθεί μεγάλοι κώνοι κορημάτων από τα υπολείμματα της εξόρυξης.



Εικόνα 8.6.1.1 Τρισδιάστατη γεωγραφική απεικόνιση της περιοχής «Ασημότρυπες» Παγγαίου. Με ΑΣ σημειώνονται οι αρχαίες στοές και με ΑΣΝ οι σύγχρονες.



Εικόνα 8.6.1.2 Άποψη προς τα ανατολικά της κοιλάδας στην περιοχή Ασημότρυπες. Σημειώνονται οι εισοδοι των μεταλλείων.



Εικόνα 8.6.1.3 Το νότιο πρανές στην απόληξη της κοιλάδας στις Ασημότρυπες. Ακριβώς κάτω από την αρχαία στοά ΑΣ-7 βρίσκεται καλυμμένη από τα κορήματα μιας κατολίσθησης η είσοδος της σύγχρονης στοάς ΑΣΝ-3.

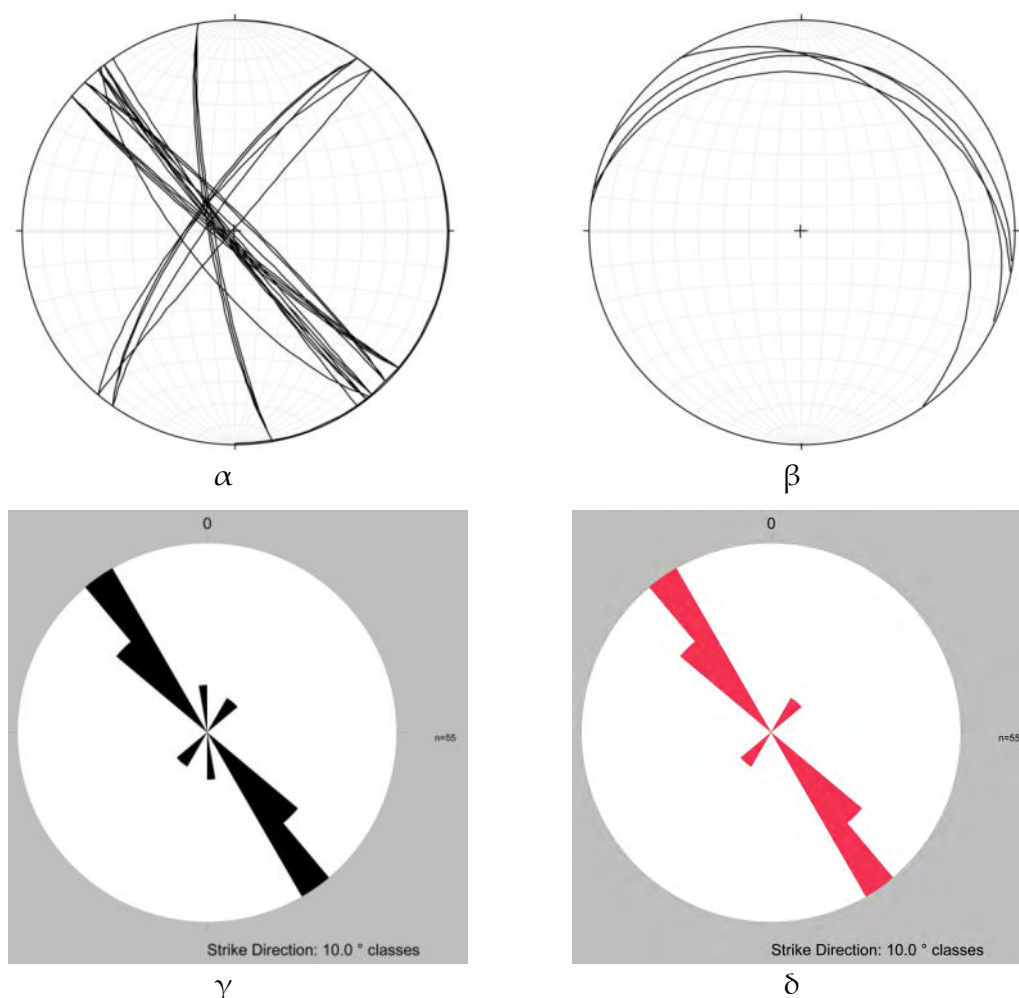
8.6.2 Γεωλογία-Τεκτονική

Η περιοχή των Ασημότρυπων χαρακτηρίζεται από την παρουσία μαρμάρων σε εναλλαγές με γνεύσιους και σχιστολίθους. Η κοιλάδα αναπτύσσεται στον πυρήνα της μεγα-αντικλινικής δομής του Παγγαίου. Τα μάρμαρα της περιοχής είναι λευκά έως τεφρά, παχυστρωματώδη έως

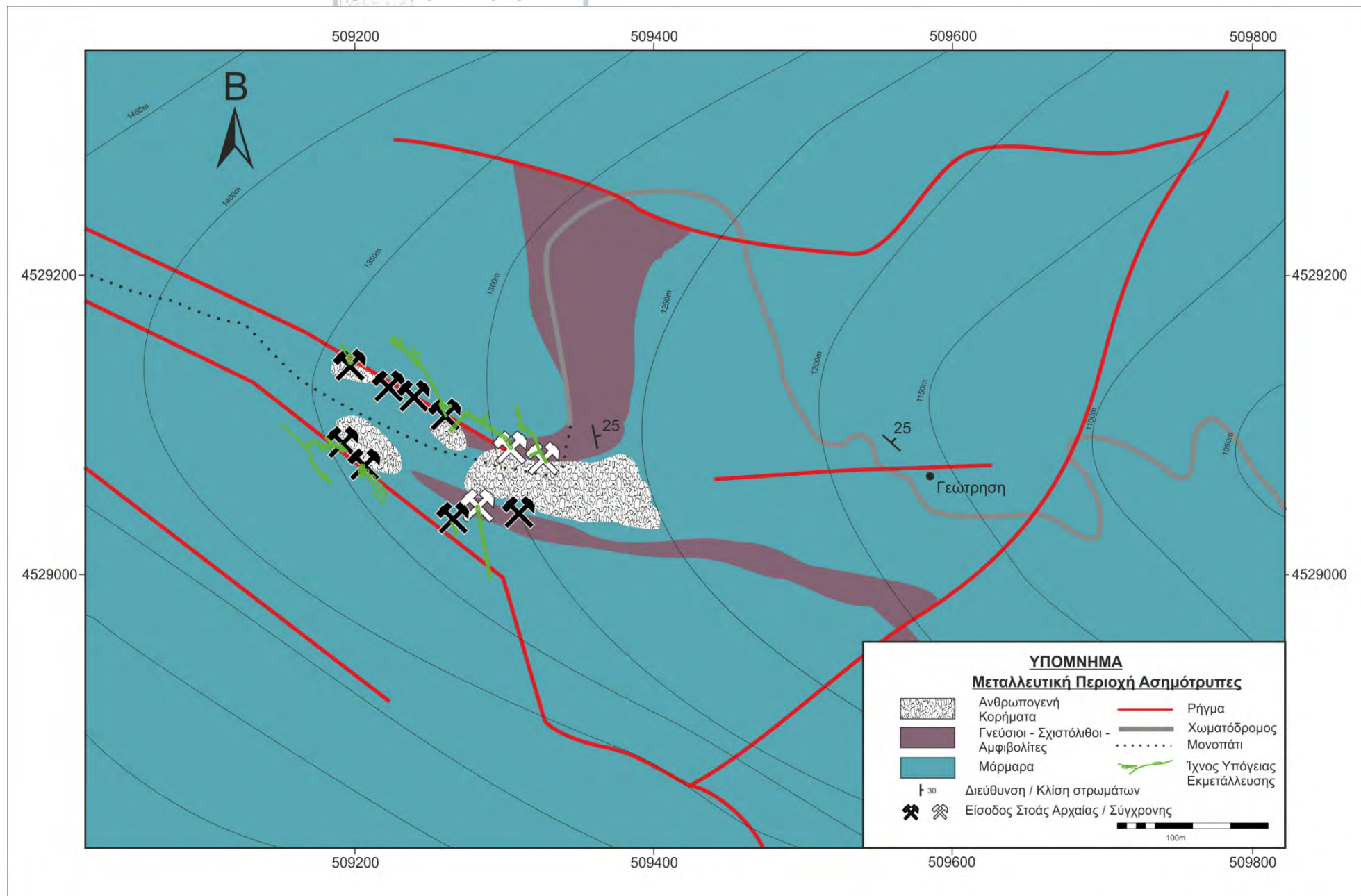
λεπτοσρωματώδη, κατά θέσεις τεκτονισμένα και καρστικοποιημένα. Σε γεώτρηση 200 m ανατολικά της περιοχής Ασημότρυπες ο υποκείμενος γρανίτης εντοπίστηκε σε βάθος 180 m (Eliopoulos, 2000).

Τα ρήγματα που δημιουργούν την κοιλάδα στις Ασημότρυπες έχουν παράταξη ΑΝΑ-ΔΒΔ έως Α-Δ. Η συνέχειά τους διακόπτεται από ρήγματα διεύθυνσης ΒΒΔ-ΝΝΑ. Η σχιστότητα των λιθολογικών σχηματισμών, όπως και οι ζώνες διάτμησης κλίνουν προς ΒΑ και Α.

Η διεύθυνση των τεκτονικών ασυνεχειών είναι ΒΔ-ΝΑ, ΒΑ-ΝΔ και ΒΒΔ-ΝΝΑ. Η μεταλλοφορία εντοπίζεται κυρίως στις διακλάσεις και στα ρήγματα με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ (Εικ. 8.6.2.1, Σχ. 8.6.2.1).



Σχήμα 8.6.2.1 Στερεογραφικές προβολές (κάτω ημισφαίριο) και ροδοδιαγράμματα των ασυνεχειών από το εσωτερικό των στοών στην περιοχή «Ασημότρυπες» Παγγαίου α. Προβολή των τεκτονικών ασυνεχειών. β. Προβολή των επιφανειών σχιστότητας. γ. Ροδοδιάγραμμα των τεκτονικών ασυνεχειών των στοών. δ. Ροδοδιάγραμμα ασυνεχειών που φιλοξενούν μεταλλοφορία.



Εικόνα 8.6.2.1 Γεωλογικός χάρτης (κάτοψη) μεταλλευτικής περιοχής «Ασημότρυπες».

8.6.3 Μεταλλευτική Στοά Ασημότρυπα-1

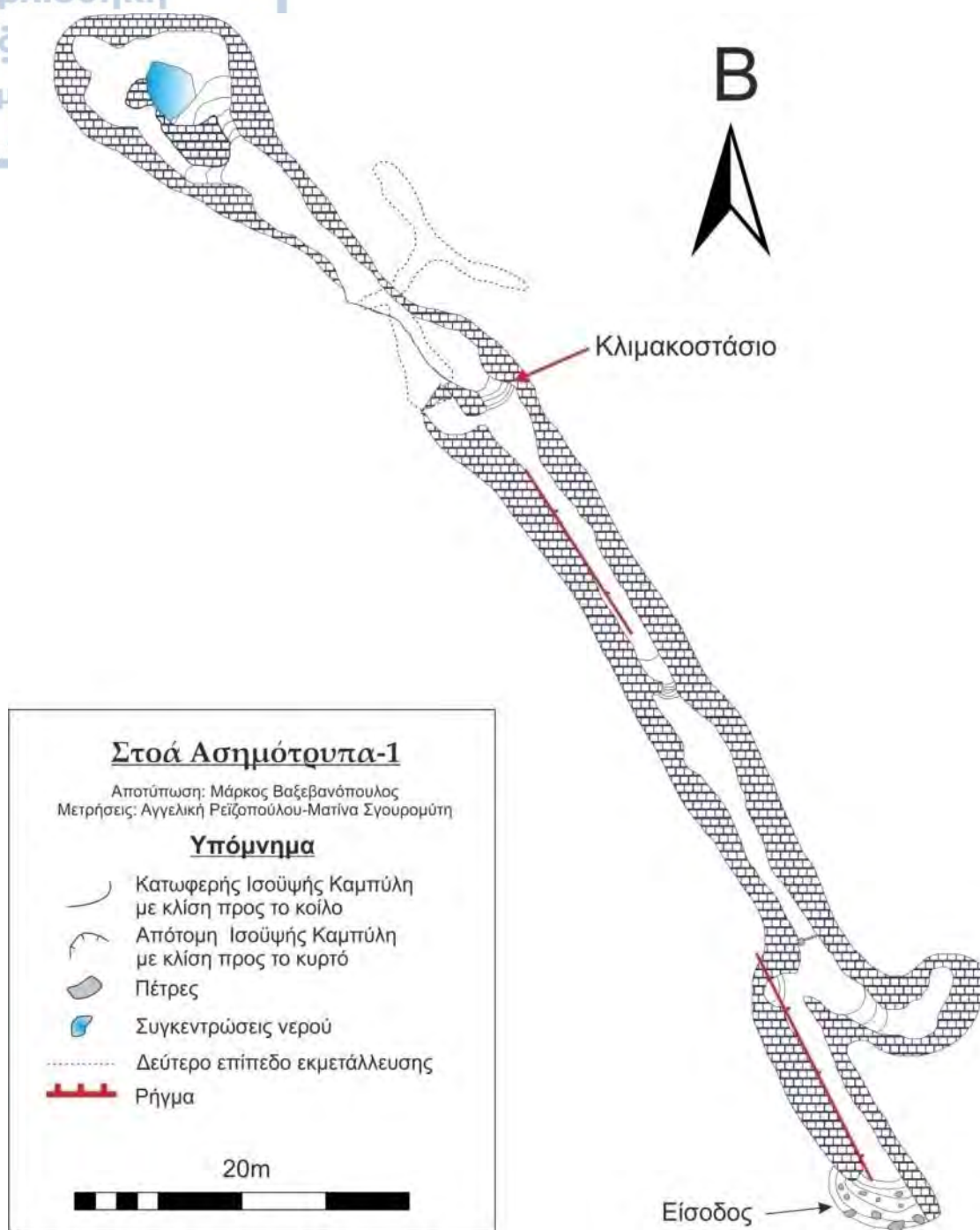
Η μεταλλευτική στοά «Ασημότρυπα-1» έχει διανοιχθεί σε άξονα μήκους 85 m και διεύθυνσης ΒΒΔ-ΝΝΑ (Εικ. 8.6.3.1-2.). Η είσοδος της στοάς εντοπίζεται στο βόρειο πρηνές της κοιλάδας, σε υψόμετρο 1311 m. Έχει διαστάσεις 1,6 m x 2,8 m (πλάτος x ύψος) και οδηγεί σε στοά επιμήκη διεύθυνσης ΒΒΔ-ΝΝΑ (Εικ. 8.6.3.1.α). Από εκεί μία διακλάδωση οδηγεί προς τα ανατολικά, ενώ ο κύριος άξονας του της υπόγειας εκμετάλλευσης συνεχίζει προς τα ΒΒΔ για ακόμη 22 m. Μεγάλο μέρος των τοιχωμάτων έχει καλυφθεί με δευτερογενή ανθρακικά ορυκτά (π.χ. ασβεστίτης).

Στο κεντρικό τμήμα της μεταλλευτικής στοάς υπάρχουν λαξευμένα σκαλοπάτια (κλιμακοστάσιο) στο ανατολικό τοίχωμα (Εικ. 8.6.3.1.β), που οδηγεί σε ανώτερο επίπεδο. Στο βορειοδυτικό της τμήμα η στοά συνεχίζει σε υποκείμενο επίπεδο. Στη βόρεια απόληξή της υπάρχει θάλαμος διαστάσεων (7,80 m x 5,00 m x 2,20 m μήκος x πλάτος x ύψος) για τη συγκέντρωση του κατεισδύοντος νερού. Σε αυτόν το θάλαμο παρατηρείται διεύρυνση παλαιότερης φάσης της στοάς (Εικ. 8.6.3.1.γ). Επίσης κατά θέσεις υπάρχουν ξερολιθιές υποστήριξης της οροφής (Εικ. 8.6.3.1.δ).

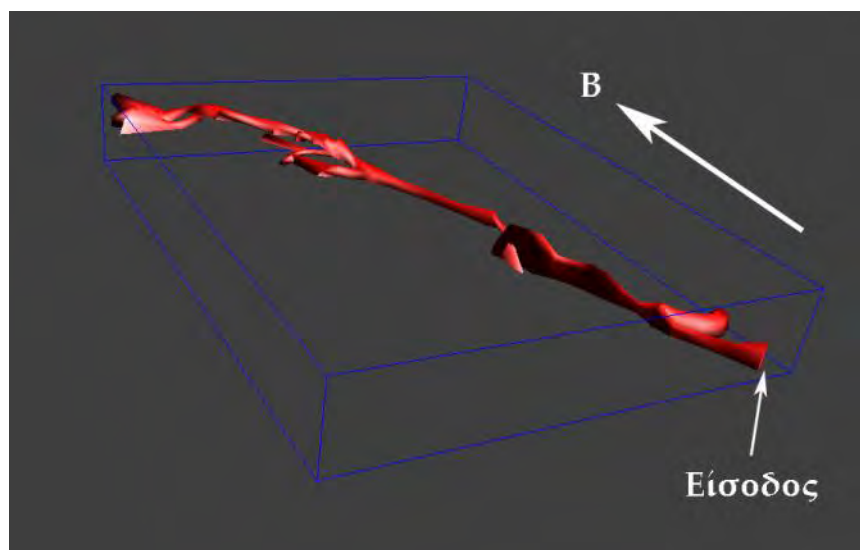
Ο συνολικός όγκος της στοάς υπολογίζεται σε 303,7 m³. Τα βασικά εργαλεία που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι το μεταλλευτικό σφυρί και το καλέμι. Επίσης σε σημεία εντοπίζεται χρήση της τσάπας.



Εικόνα 8.6.3.1 α) Η είσοδος της στοάς Ασημότρυπα-1 β) Λαξευμένα σκαλοπάτια (κλιμακοστάσιο) προσέγγισης δεύτερου επιπέδου εξόρυξης γ) Παλαιότερη φάση στο τελευταίο τμήμα της στοάς. Διακρίνεται συγκέντρωση του κατεισδύοντος νερού. δ) Στύλοι υποστήριξης της οροφής στο κεντρικό τμήμα της στοάς.



Εικόνα 8.6.3.2 Κάτοψη και τρισδιάστατη απεικόνιση της Ασημότρουπας-1.



8.6.4 Ασημότρυπα-2, Ασημότρυπα-3 και Ασημότρυπα-8

Η Ασημότρυπα-2, η Ασημότρυπα-3, καθώς και η Ασημότρυπα-8 αποτελούν μικρά φυσικά καρστικά σπήλαια στα οποία παρατηρούνται ίχνη λάξευσης στα τοιχώματα (Εικ. 8.6.4.1-2). Η Ασημότρυπα-2 και η Ασημότρυπα-3 βρίσκονται στο βόρειο πρानές της περιοχής και βρίσκονται μεταξύ των στοών Ασημότρυπα-1 και 4.

Η Ασημότρυπα-8 βρίσκεται στο νότιο πρानές της κοιλάδας (Εικ. 8.6.4.3). Αποτελεί επίσης ένα μικρού μεγέθους καρστικό σπήλαιο στο οποίο παρατηρείται μεταλλοφορία και ίχνη εκμετάλλευσής της.



Εικόνα 8.6.4.1 Η είσοδος της Ασημότρυπας-3.



Εικόνα 8.6.4.2 Ίχνη λάξευσης στα τοιχώματα της Ασημότρυπας-3.



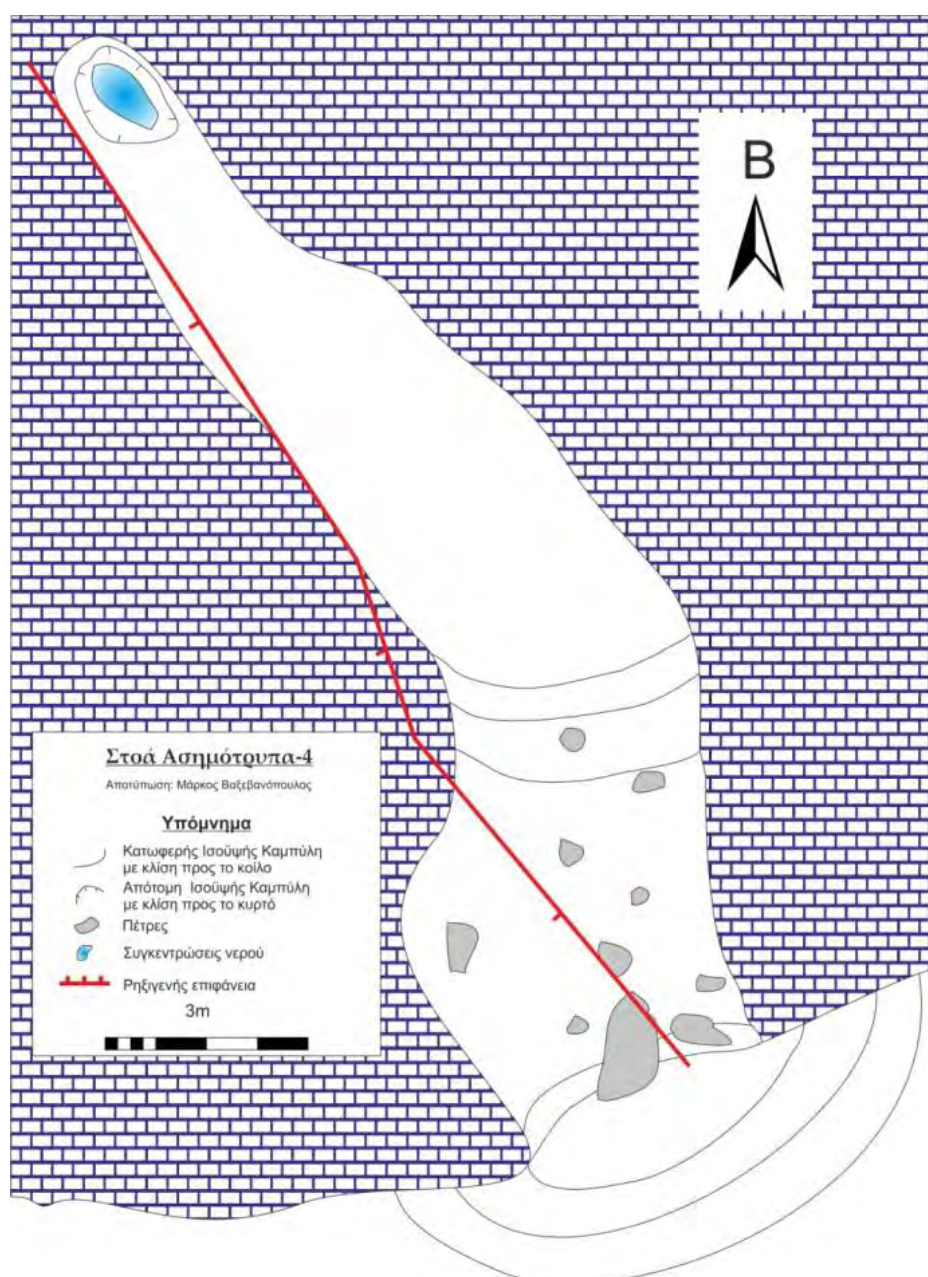
Εικόνα 8.6.4.3 Η Ασημότρυπα-8.

8.6.5 Μεταλλευτική Στοά Ασημότρυπα-4

Η στοά Ασημότρυπα-4 βρίσκεται λίγα μέτρα δυτικότερα της Ασημότρυπας-3. Αποτελεί μικρή σχετικά υπόγεια εκμετάλλευση σε άξονα διεύθυνσης ΒΒΔ-ΝΝΑ και μήκους 19,9 m (Εικ. 8.6.5.1). Η είσοδος της είναι ευρεία με διαστάσεις 3,7 m x 1,4 m (πλάτος x ύψος) και χαρακτηρίζεται από την παρουσία κορημάτων της εκμετάλλευσης (Εικ. 8.6.5.2). Στα κορήματα σε βάθος περίπου 20 cm εντοπίστηκαν οστά αιγών, καθώς και στρώματα καύσης.

Η εξόρυξη ακολούθησε μία κύρια διάκλαση με στοιχεία 235/85 (διεύθυνση κλίσης/κλίση). Κατά μήκος της παρατηρείται μεταλλοφορία μερικώς ή πλήρως οξειδωμένη. Στην απόληξη της στοάς υπάρχει φυσική συγκέντρωση κατεισδύνοντος καρστικού νερού (Εικ. 8.6.5.3).

Ο συνολικός όγκος της στοάς υπολογίζεται στα 47,4 m³. Τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι το μεταλλευτικό σφυρί και το καλέμι.



Εικόνα 8.6.5.1 Κάτοψη της Ασημότρυπας-4.



Εικόνα 8.6.5.2 Η είσοδος της στοάς
Ασημότρυπα-4.



Εικόνα 8.6.5.3 Η απόληξη της στοάς
Ασημότρυπα-4.

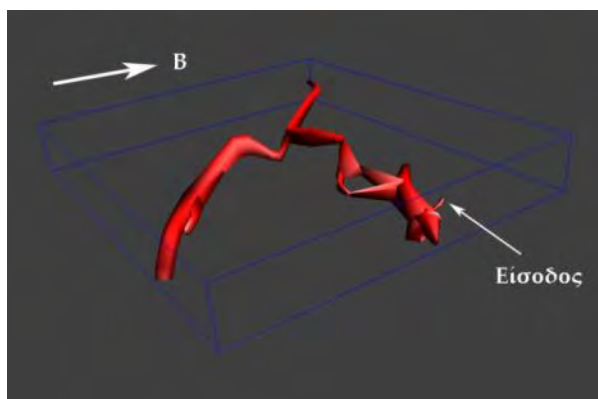
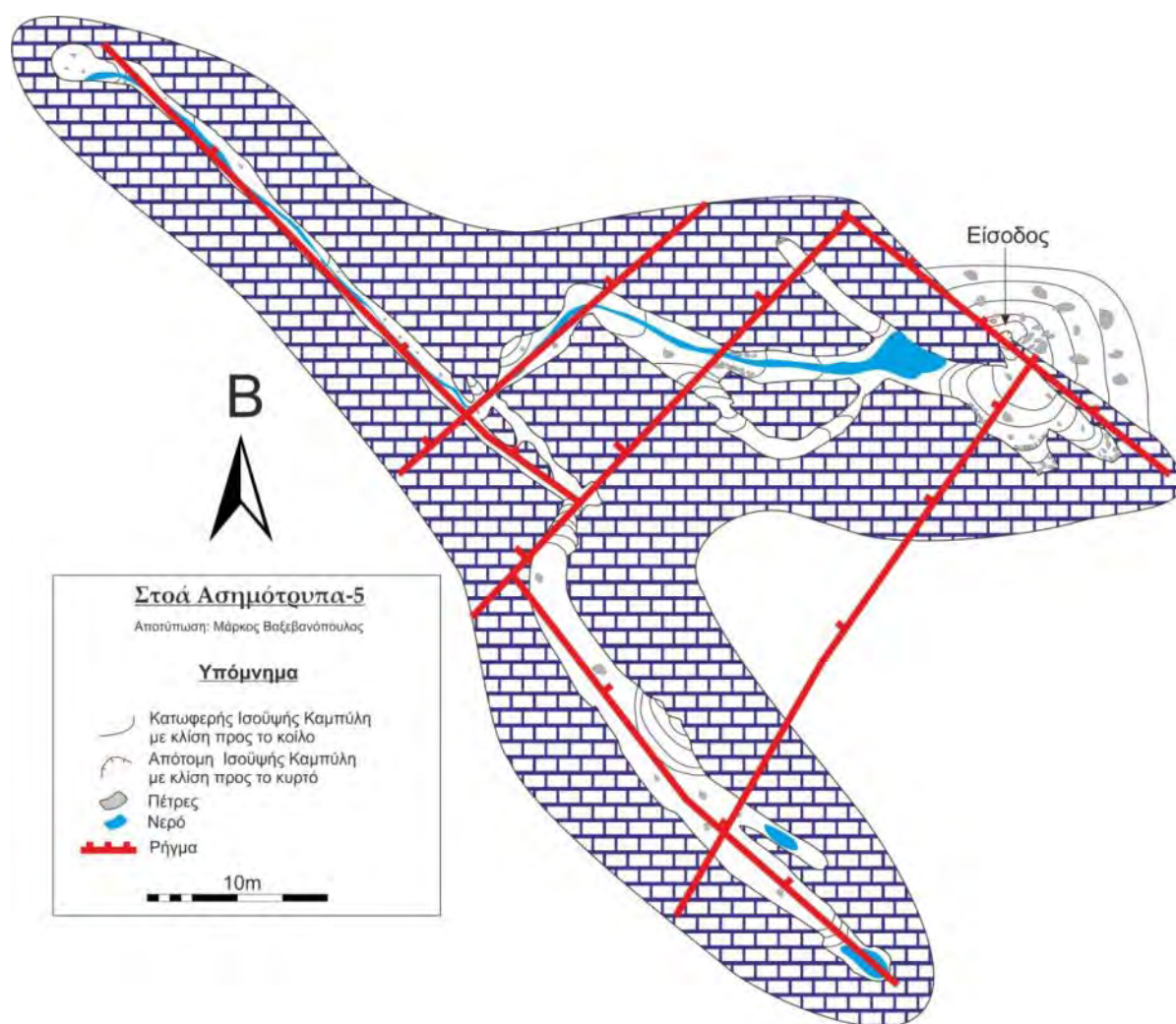
8.6.6 Μεταλλευτική Στοά Ασημότρυπα-5

Η Ασημότρυπα-5 αποτελεί τη μεγαλύτερη υπόγεια εκμετάλλευση στην περιοχή. Διανοίγεται σε οριζόντια σχεδόν διεύθυνση κατά μήκος διακλάσεων με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και ΒΔ-ΝΑ (Εικ. 8.6.6.1). Η είσοδος της στοάς είναι μικρή με κατωφερή κλίση και εντοπίζεται στο νότιο πρυνές της κοιλάδας των Ασημότρυπων (Εικ. 8.6.6.2.α). Εξωτερικά της παρατηρούνται κορήματα από την εκμετάλλευση.

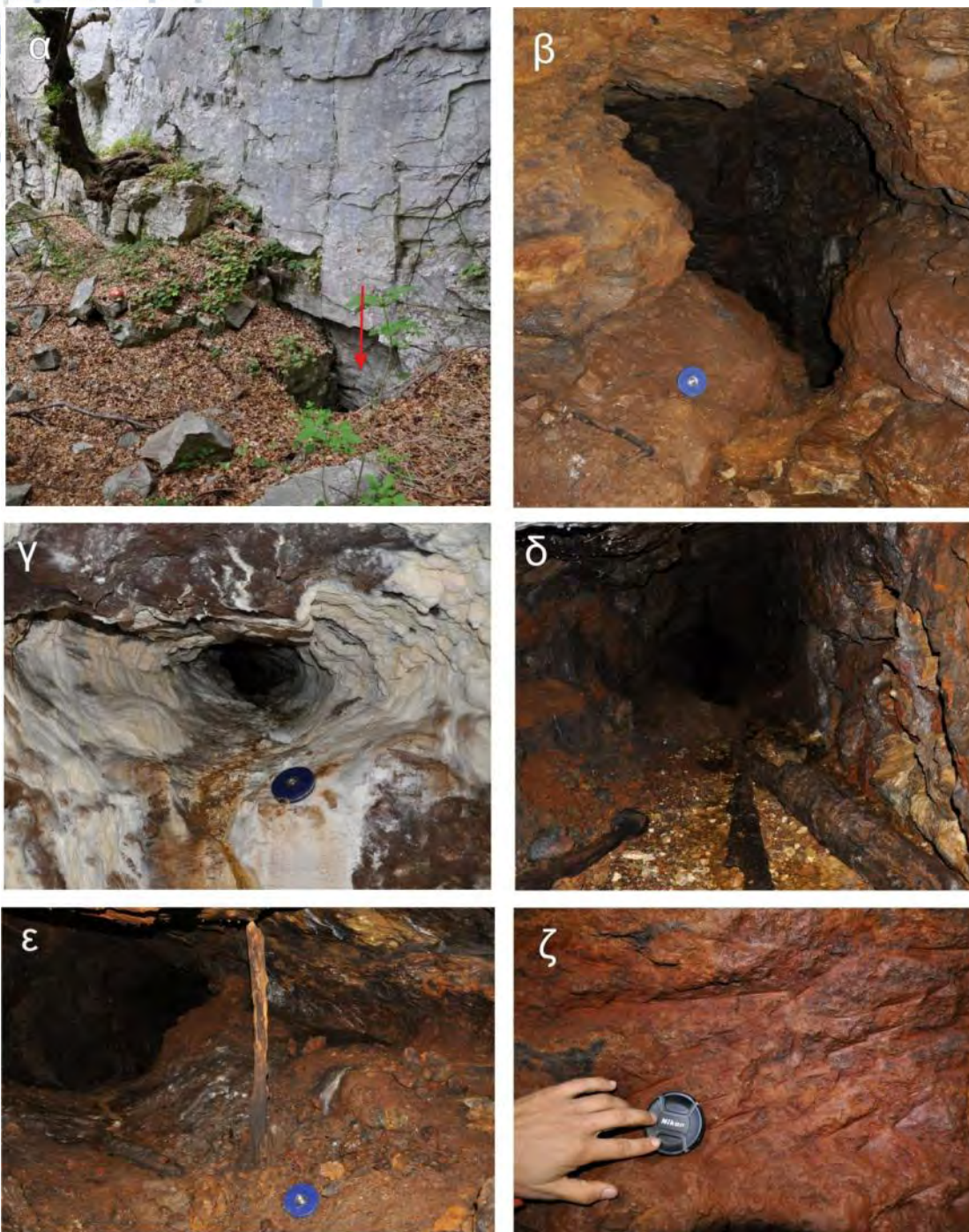
Στο εσωτερικό της στοάς παρατηρείται καρστικός αγωγός ο οποίος έχει διευρυνθεί από τη μεταλλευτική δραστηριότητα. Μάλιστα ακόμη και σήμερα παρατηρείται κίνηση του υπόγειου καρστικού νερού, που σχηματίζει υπόγεια ροή από το ΒΔ τμήμα της στοάς προς τα ανατολικά (Εικ. 8.6.6.2.β). Μεγάλο μέρος των τοιχωμάτων ειδικά στο ανατολικό του τμήμα είναι καλυμμένο με ανθρακική κρούστα (Εικ. 8.6.6.2.γ).

Από τον πρώτο θάλαμο της στοάς έχουν διανοιχθεί διαδρομές τόσο προς ΝΑ, όσο και προς ΒΔ. Η κύρια συνέχεια της υπόγειας εκμετάλλευσης γίνεται προς τα ΒΔ, από όπου μέσω στενού διαδρόμου προσεγγίζεται το δυτικό τμήμα του. Το τελευταίο έχει βασικό άξονα διάνοιξης διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ. Στην οροφή των διαδρομών παρατηρείται επαφή των μαρμάρων με τους σχιστόλιθους-γνεύσιους. Διακρίνονται τουλάχιστον δύο φάσεις εκμετάλλευσης, μία με στενές στοές με ύψος 0,9 m και μία με πιο ευρείς στοές με ύψος από 1,5 έως 2,3 m.

Σε ορισμένα σημεία της στοάς παρατηρούνται κορμοί δέντρων και σε ορισμένες περιπτώσεις σε κατακόρυφη θέση πιθανώς για στήριξη της οροφής (Εικ. 8.6.2.ε). Η προέλευσή τους είναι θέμα υπό διερεύνηση. Δεν είναι σίγουρο αν πρόκειται όντως για στηρίγματα της οροφής ή για τυχαία τοποθετημένα ξύλα από σύγχρονους λαθρανασκαφείς. Πάντως στο ανώτερο τμήμα τους παρατηρούνται ελάχιστα σημάδια σήψης. Ο Craddock (1995) αναφέρεται στην άριστη διατήρηση πολλών ευρημάτων από ξύλο στο εσωτερικό αρχαίων μεταλλείων. Στη διατήρησή τους σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι οξειδωτικές συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό των υπόγειων μεταλλευτικών δραστηριοτήτων.



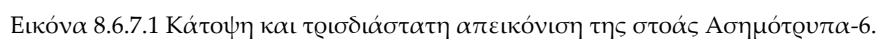
Εικόνα 8.6.6.1 Κάτοψη και τρισδιάστατη απεικόνιση της στοάς Ασκληπιείου-5.



Εικόνα 8.6.2 α) Είσοδος της Ασημότρυπας-5. Αριστερά το κράνος για μέτρο σύγκρισης. β) Αποψη από το εσωτερικό της υπόγειας εκμετάλλευσης. Στο δάπεδο παρατηρείται ροή νερού. γ) Στενός διάδρομος της εκμετάλλευσης πιθανών της παλαιότερης φάσης της στοάς. Το μεγαλύτερο μέρος καλύπτεται με ασβεστιτική κρούστα. δ) Διάδρομος της στοάς με κορήματα και ξύλα στο δάπεδό του. ε) Ξύλο τοποθετημένο σε κατακόρυφη θέση στο δυτικό τμήμα της στοάς. ζ) Ίχνη της εξόρυξης στο δυτικό τμήμα της στοάς.

Ο συνολικός όγκος της στοάς υπολογίζεται σε 399,2 m³. Αυτός περιλαμβάνει τόσο τον εξορυγμένο όγκο υλικών όσο και των όγκο των φυσικών καρστικών εγκοίλων που προϋπήρχαν της εκμετάλλευσης. Τα βασικά εργαλεία που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι το μεταλλευτικό σφυρί και το καλέμι, καθώς και

Η Ασημότρυπα-6 βρίσκεται λίγα μέτρα ανατολικά από την Ασημότρυπα-5. Έχει διεύθυνση διάνοιξης προς τα ΒΔ και ΝΑ. Η είσοδός της έχει πλάτος 13 m και ύψος περίπου 2,6 m (Εικ. 8.6.7.1-2).



Το πρώτο τμήμα της αποτελείται από στενούς καρστικούς αγωγούς των μαρμάρων που έχουν διευρυνθεί από την εξόρυξη. Μία πιθανώς νεότερη φάση εκμετάλλευσης έχει δημιουργήσει το νοτιοανατολικό τμήμα της στοάς. Πρόκειται για μεγάλο θάλαμο καρστικής μορφής που διευρύνθηκε (Εικ. 8.6.7.3). Έχει κατωφερή κλίση και σχηματίζεται μεγάλος κώνος κορημάτων με μήκος περίπου 12 m. Στην απόληξη του κώνου υπάρχει συγκέντρωση νερού (Εικ. 8.6.7.1).

Ο συνολικός όγκος της στοάς είναι 688 m³, ωστόσο το εξορυγμένο υλικό δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 250 m³. Τα βασικά εργαλεία εξόρυξης είναι το σφυρί και το καλέμι.



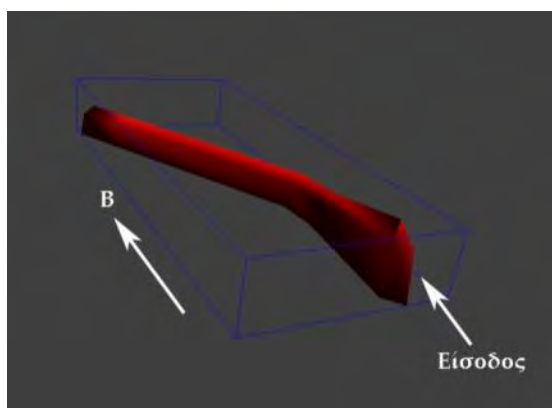
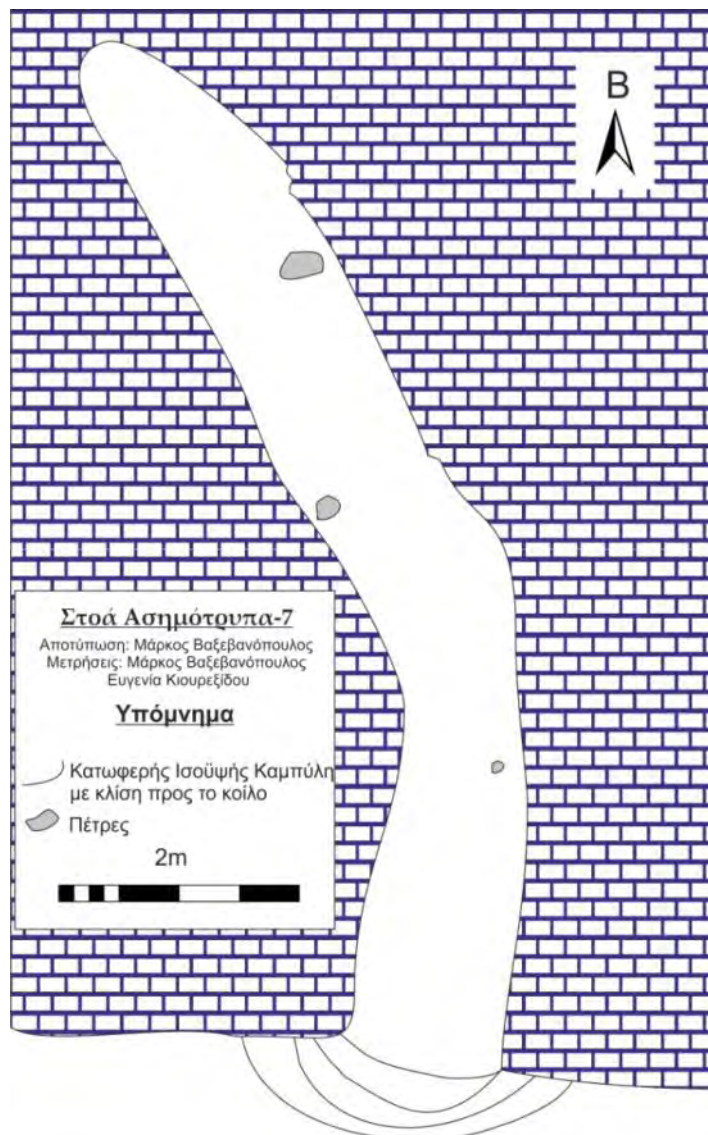
Εικόνα 8.6.7.2 Αποψη της εισόδου της Ασημότρυπας-6.



Εικόνα 8.6.7.3 Η αρχή του κώνου κορημάτων στο εσωτερικό της Ασημότρυπας-6.

8.6.8 Μεταλλευτική Στοά Ασημότρυπα-7

Η στοά Ασημότρυπα-7 (Εικ. 8.6.8.1) βρίσκεται στο νότιο πρανές της κοιλάδας στην περιοχή Ασημότρυπες, ακριβώς πάνω από τη σύγχρονη στοά ΑΣΝ-3. Η είσοδος της τελευταίας έχει καταστραφεί από κατολίσθηση. Η Ασημότρυπα-7 αποτελεί μικρή υπόγεια εκμετάλλευση με συνολικό μήκος 9 m και υπολογιζόμενο όγκο εξορυγμένου υλικού 3,5 m³. Η στοά έχει μέσες διαστάσεις 1,00 m x 0,60 m (πλάτος x ύψος). Το μεγαλύτερο μέρος της είναι καλυμμένο με ασβεστιτική κρούστα και άλλα σπηλαιοθέματα δυσκολεύοντας τη μελέτη των ιχνών της εκμετάλλευσης.



Εικόνα 8.6.8.1 Κάτοψη και τρισδιάστατη απεικόνιση της μεταλλευτικής στοάς Ασημότρυπα-7.



Εικόνα 8.6.8.2 Αποψη από το εσωτερικό της στοάς Ασημότρυπα-7.



Εικόνα 8.6.8.3 Η οξειδωμένη μεταλλοφορία καλυμμένη με σπηλαιοθέματα.

8.6.9 Αρχαιολογικά Ευρήματα

Στο εσωτερικό της στοάς Ασημότρυπα-1 εντοπίστηκε κεραμική Υστεροβυζαντινών-Οθωμανικών χρόνων. Η κεραμική είναι επιφανειακή και εντοπίστηκε στη βορειοδυτική απόληξη της στοάς. Πιθανώς να χρονολογεί την τελευταία φάση της υπόγειας εκμετάλλευσης που διεύρυνε τους παλαιότερους στενούς διαδρόμους.

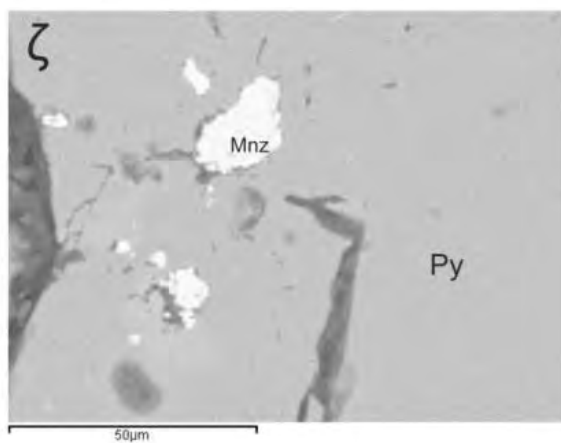
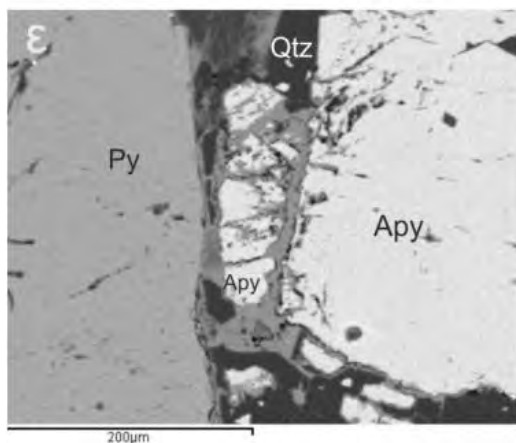
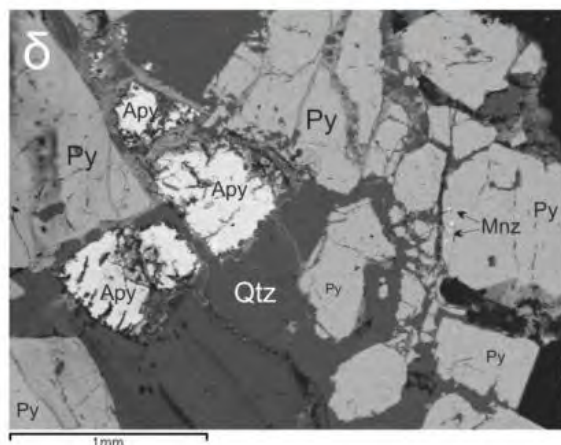
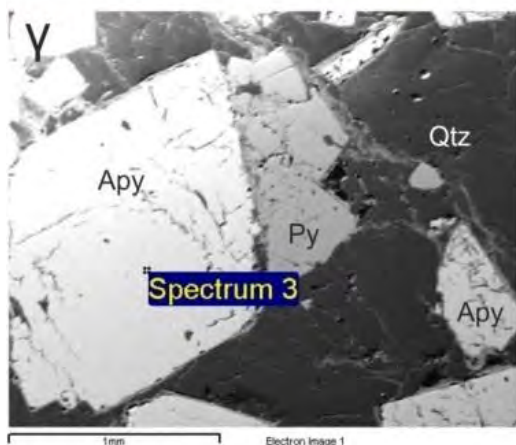
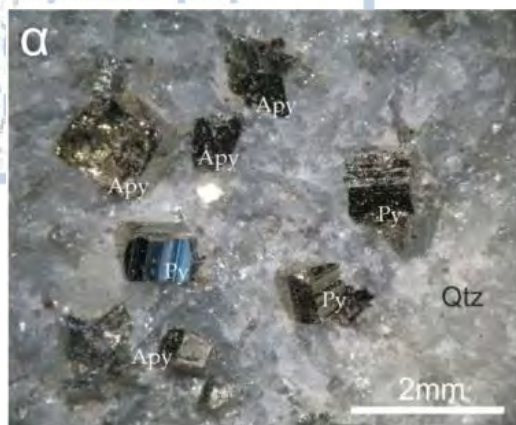
Στο εσωτερικό των υπόλοιπων στοών, αλλά και επιφανειακά στην περιοχή Ασημότρυπες δεν εντοπίστηκε κεραμική ή κάποιο άλλο αρχαιολογικό στοιχείο. Σποραδικά εμφανίζονται μέσα στη στρωματογραφία των υπόγειων στοών ίχνη καύσης.

8.6.10 Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Μεταλλεύματος

Η μεταλλοφορία στην περιοχή Ασημότρυπες εντοπίζεται κυρίως μέσα σε χαλαζιακές φλέβες (Εικ. 8.6.10.1.α). Η ορυκτολογική μελέτη έδειξε ότι η μεταλλοφορία αποτελείται από αρσеноπυρίτη, σιδηροπυρίτη, χαλκοπυρίτη, γαληνίτη, σφαλερίτη, μαγνητοπυρίτη, μαρκασίτη, τετραεδρίτη, ρουτίλιο, καθώς επίσης και από γκαιτίτη, μαλαχίτη και αζουρίτη. Τα σύνδρομα ορυκτά είναι κατά κύριο λόγο ο χαλαζίας, ο μοσχοβίτης και ο μοναζίτης.

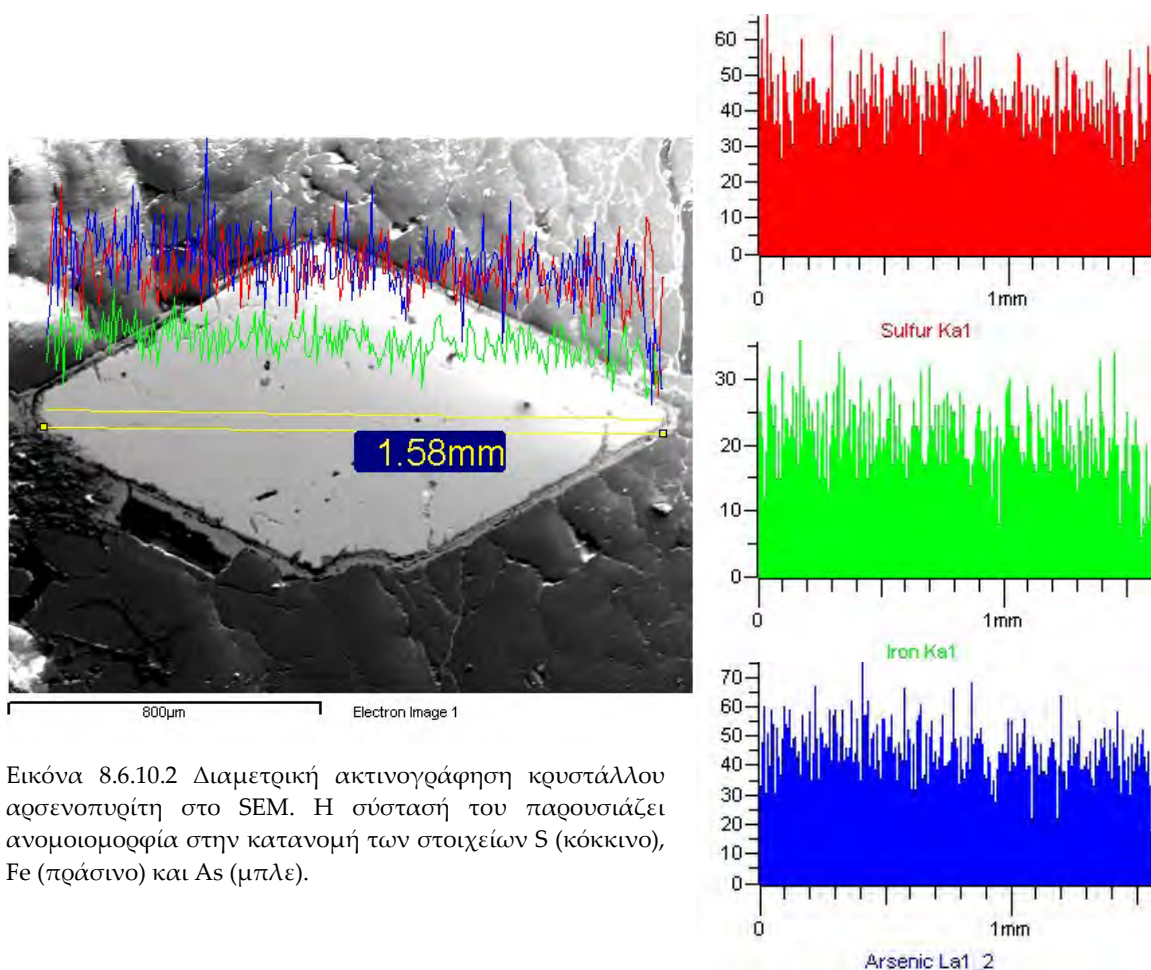
Στις παλαιότερες στοές η μεταλλοφορία εμφανίζεται μερικώς ή εξολοκλήρου οξειδωμένη (Εικ. 8.6.10.1.β) ακολουθώντας τις ασυνέχειες του πετρώματος (ρήγματα, διακλάσεις, σχιστότητα). Η οξειδωμένη μεταλλοφορία έχει εξορυχθεί εξολοκλήρου, ενώ η μερικώς οξειδωμένη παραμένει *in situ*.

Το κυριότερο ορυκτό της μεταλλοφορίας είναι ο αρσеноπυρίτης. Εμφανίζεται σε ιδιόμορφους ή υπιδιόμορφους κρυστάλλους, και σε σύμφυση με σιδηροπυρίτη (Εικ. 8.6.10.1.γ). Οι κρύσταλλοι έχουν έντονη κατακλαστική υφή, με κενά που πληρώνονται από χαλαζία (Εικ. 8.6.10.1.δ). Ο αρσеноπυρίτης δείχνει φαινόμενα οξείδωσης περιφερειακά, όπου μετατρέπεται σε οξείδιο του Fe-As (Εικ. 8.6.10.1.ε).



Εικόνα 8.6.10.1 α) Κρύσταλλοι αρσеноπυρίτη (Apy) και σιδηροπυρίτη (Py) σε χαλαζία (Qtz) από την πρωτογενή μεταλλοφορία στις Ασημότρυπες. Εικόνα από στερεοσκόπιο. β) Οξειδωμένη μεταλλοφορία με γκαϊτίτη, μαλαχίτη και αζουρίτη. γ) Αρσеноπυρίτης (Apy) σε σύμφυση με σιδηροπυρίτη (Py). SEM, back-scattering image. δ) Αρσеноπυρίτης (Apy) και σιδηροπυρίτης (Py) με κατακλαστική υφή σε χαλαζία (Qtz). Διακρίνονται κόκκοι μοναζίτη (Mnz) μέσα στο σιδηροπυρίτη. SEM, back-scattering image. ε) Κρύσταλλοι σιδηροπυρίτη (Py) και αρσеноπυρίτη (Apy). Στο αριστερό του άκρο ο κρύσταλλος του αρσеноπυρίτη οξειδώνεται περιφερειακά και στις κατακλάσεις σε οξείδιο του Fe-As. SEM back-scattering image. ζ) Έγκλεισμα μοναζίτη (Mnz) σε σιδηροπυρίτη (Py). SEM, back-scattering image.

Οι κρύσταλλοι του αρσеноπυρίτη έχουν μήκος από 5 μm έως 3 mm. Περιέχουν εγκλείσματα, όπως ρουτίλιο, μοναζίτη και χαλαζία με μέγεθος από 3 έως 40 μm (Εικ. 8.6.10.1.ζ). Στον αρσеноπυρίτη εντοπίζονται επίσης οι περισσότεροι υπομικροσκοπικοί κόκκοι Au σε σύγκριση με το σιδηροπυρίτη (Eliopoulos and Kilias, 2011). Ο αρσеноπυρίτης παρουσιάζει ανομοιόμορφη σύσταση ακόμη και κατά μήκος του ίδιου κόκκου. Τα στοιχεία Fe, As και S εμφανίζουν ανομοιόμορφη κατανομή σε μία διαμετρική ακτονογράφηση ενός κρυστάλλου αρσеноπυρίτη, όπως φαίνεται στα αντίστοιχα διαγράμματα (Εικ. 8.6.10.2).

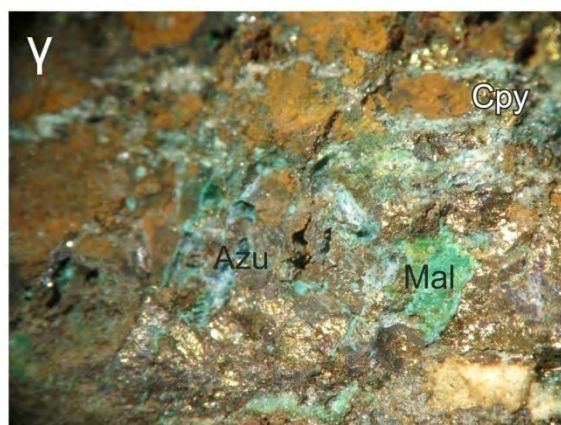
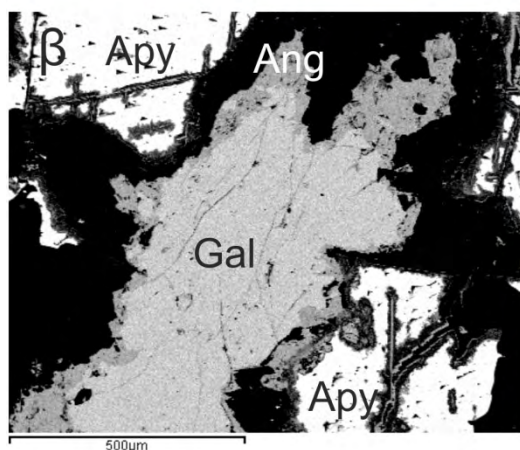
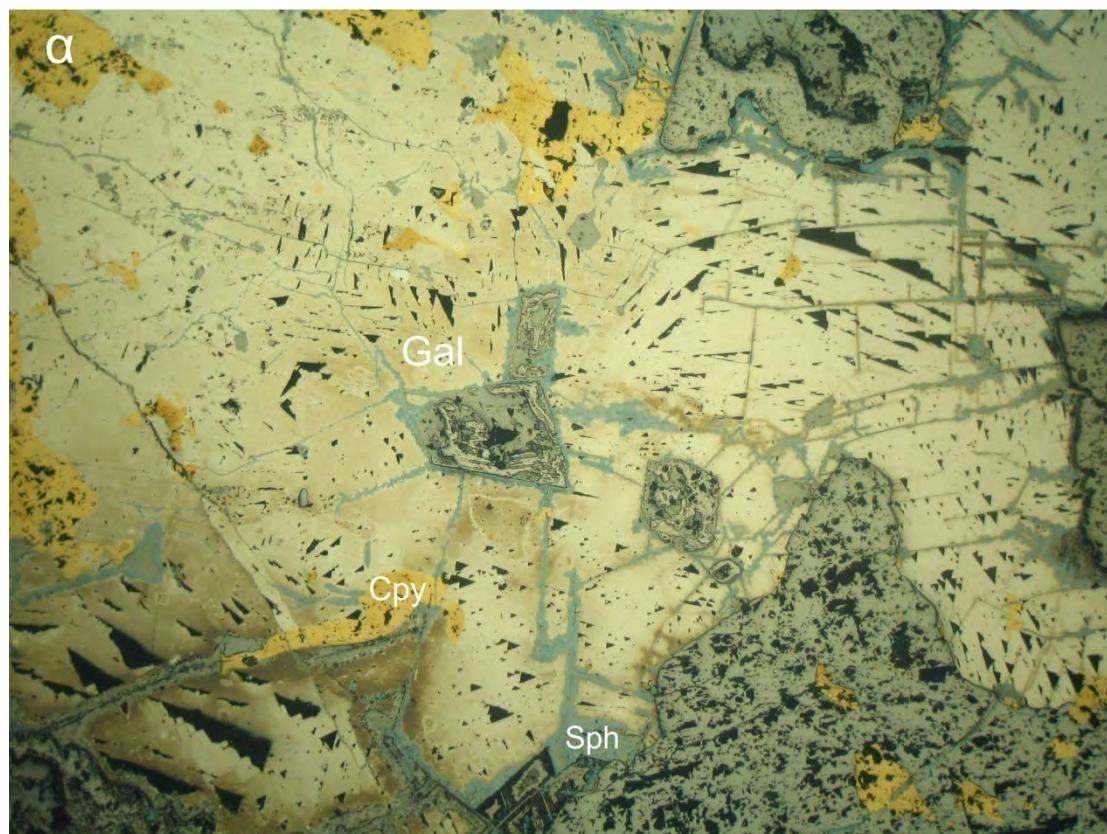


Εικόνα 8.6.10.2 Διαμετρική ακτονογράφηση κρυστάλλου αρσеноπυρίτη στο SEM. Η σύστασή του παρουσιάζει ανομοιομορφία στην κατανομή των στοιχείων S (κόκκινο), Fe (πράσινο) και As (μπλε).

Ο σιδηροπυρίτης αποτελεί το δεύτερο κυριότερο ορυκτό της μεταλλοφορίας στις Ασημότρυπες. Απαντά ως ιδιόμορφος ή υπιδιόμορφος και βρίσκεται σε σύμφυση με αρσеноπυρίτη και έχει έντονη κατακλαστική υφή. Οι κρύσταλλοί του έχουν μήκος από 10 μm έως 5 mm. Μέσα στο σιδηροπυρίτη εντοπίζονται εγκλείσματα ρουτιλίου, μοναζίτη και χαλαζία από 5 έως 60 μm . Από τις μικροανάλυσεις προκύπτει ότι ο σιδηροπυρίτης παρουσιάζει σημαντικές περιεκτικότητες σε As, που κυμαίνονται από 0,01 έως 3,80 wt% (Eliopoulos and Kilias, 2011). Επίσης ο αρσеноπυρίτης χαρακτηρίζεται από την παρουσία υπομικροσκοπικών κόκκων χρυσού. Η χημική σύσταση του σιδηροπυρίτη δείχνει

υψηλές περιεκτικότητες σε Au με περιεκτικότητες από 0,5 μέχρι και 29 ppm (Eliopoulos and Kiliyas, 2011).

Ο γαληνίτης έχει ακανόνιστη μορφή και παρατηρείται σε σύμφυση με σφαλερίτη και χαλκοπυρίτη (Εικ. 8.6.10.3). Στα όριά του καθώς και στις κατακλάσεις του αλλοιώνεται σε κερουσίτη και αγγλεσίτη (Εικ. 8.6.10.4). Ο σφαλερίτης και ο χαλκοπυρίτης εμφανίζονται επίσης με ακανόνιστη μορφή στη μεταλλοφορία στην περιοχή Ασημότρυπες. Ο χαλκοπυρίτης αντικαθίσταται από κοβελλίνη, χαλκοσίνη, μαλαχίτη και αζουρίτη (Εικ. 8.6.10.5).



Εικόνα 8.6.10.3 α) Γαληνίτης (Gal), χαλκοπυρίτης (Cpy) και σφαλερίτης (Sph) από την πρωτογενή μεταλλοφορία στις Ασημότρυπες. //N Μήκος φωτογραφίας 500 μm (Μεταλλογραφικό μικροσκόπιο) β) Γαληνίτης (Gal) περιστοιχισμένος από κρυστάλλους αρσеноπυρίτη (Apy). Στα όριά του μεταπίπτει σε αγγλεσίτη (Ang). Εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. γ) Χαλκοπυρίτης (Cpy) που έχει μετατραπεί σε μαλαχίτη (Mal) και αζουρίτη (Azu). Μήκος φωτογραφίας 0,8 mm (Εικόνα από στερεοσκόπιο).

Οι χημικές αναλύσεις σε δείγματα μεταλλεύματος (PAM-3, PAM-4, PAM-5) από την περιοχή Ασημότρυπες έδειξαν περιεκτικότητες σε Au από 0,04 έως 13,50 ppm, ενώ η περιεκτικότητα σε Ag είναι >100 ppm. Τα δείγματα PAM-3 και PAM-5 προέρχονται από την πρωτογενή μεταλλοφορία από τις σύγχρονες στοές, ενώ το δείγμα PAM-4 από την οξειδωμένη μεταλλοφορία της στοάς Ασημότρυπα-4. Επίσης στον Πίν. 8.6.10.1 περιέχονται και αναλύσεις τεσσάρων δειγμάτων από τον Eliopoulos (2000). Παρατηρείται ότι η οξειδωμένη μεταλλοφορία περιέχει την υψηλότερη περιεκτικότητα σε Ag (>100 ppm).

Οι περιεκτικότητες σε Fe_2O_3 κυμαίνονται από 30,74 έως 53,24 wt%, ενώ οι περιεκτικότητες σε As είναι >10000,00 ppm, σε Cu 8,6-1588,52 ppm (μ.ό. 556,30 ppm), σε Pb 168,30-2613,46 ppm (μ.ό. 1493,12 ppm) και σε Zn 10,00-4667,00 ppm (μ.ό. 2220,97 ppm). Επίσης η περιεκτικότητα σε V είναι 39,00-151,00 ppm, σε W 42,90-314,90 ppm και σε Cd 47,93-96,90 ppm. Το δείγμα PAM-4 από την οξειδωμένη μεταλλοφορία έδωσε υψηλές περιεκτικότητες σε Hg (615,00 ppm) κάτι που προφανώς απαιτεί μία πιο λεπτομερή μελέτη στο μέλλον.

Στις χημικές αναλύσεις του Πίνακα 8.6.10.1 τα δείγματα AS-19 και AS-21 προέρχονται από την πρωτογενή μεταλλοφορία της στοάς Ασημότρυπα-4. Επίσης, το δείγμα AS-25 προέρχεται από πυριτικό υλικό από την περιοχή εξωτερικά της στοάς Ασημότρυπα-4 με περιεχόμενο γκαιτίτη και το AS-26 από μάρμαρο με μετάλλευμα. Τα δείγματα PAM-3 και PAM-5 προέρχονται από την πρωτογενή μεταλλοφορία, ενώ το δείγμα PAM-4 από την οξειδωμένη.

Πίνακας 8.6.10.1 Περιεκτικότητες των βασικών οξειδίων (wt %) και επιλεγμένων ιχνοστοιχείων (ppm) από δείγματα στην περιοχή Ασημότρυντες από την παρούσα διατριβή και από Eliopoulos (2000). Ο ολικός σίδηρος εκφράζεται σε Fe₂O₃. (bdl: κάτω του ορίου ανιχνευσιμότητας, na: δεν αναλύθηκε)

	PAM-3	PAM-4	PAM-5	AS-19 (Eliopoulos, 2000)	AS-21 (Eliopoulos, 2000)	As-25 (Eliopoulos, 2000)	AS-26 (Eliopoulos, 2000)
wt%							
SiO ₂	na	na	14,08	4,30	6,40	32,60	3,68
TiO ₂	na	0,00	0,23	bdl	0,01	bdl	bdl
Al ₂ O ₃	na	0,11	4,61	0,84	1,83	0,81	0,75
Fe ₂ O ₃	na	30,74	53,24	42,50	48,00	15,00	0,93
MgO	na	0,30	1,46	5,58	0,19	0,75	1,47
MnO	na	0,17	0,60	0,02	0,03	0,14	0,10
CaO	na	26,17	2,74	0,91	1,42	10,90	49,60
K ₂ O	na	0,02	0,47	0,18	0,29	0,20	0,13
Na ₂ O	na	0,01	0,05	0,07	0,11	0,08	0,04
P ₂ O ₅	na	0,23	0,56	0,33	0,02	0,04	0,03
ppm							
Au	8,35	6,30	11,55	13,50	13,30	0,60	0,04
Ag	6,80	>100,00	15,20	6,70	12,60	4,10	9,80
Cu	8,60	1588,52	71,80	bdl	3380,00	12,00	bdl
Pb	168,30	2613,46	1697,60	106,00	327,00	125,00	15,00
Zn	10,00	1985,90	4667,00	45,00	317,00	3,000	19,00
As	>10000,00	>10000,00	>10000,00	496250,00	396850,00	10500,00	331,00
Bi	20,80	35,63	12,60	44,00	58,00	3,00	bdl
Ba	na	148,10	279,00	13,00	22,00	79,00	12,00
Cr	na	0,00	68,42	62,00	228,00	28,00	29,00
Sb	na	0,60	1,00	70,00	100,00	2,00	bdl
Co	na	3,20	14,30	46,00	69,00	33,00	29,00
Rb	na	1,10	23,10	4,00	10,00	6,00	2,00
Sr	na	88,00	70,70	1,00	11,00	89,00	210,00
Ni	na	bdl	0,60	95,00	116,00	20,00	20,00
Th	na	0,50	2,50	28,00	21,00	bdl	bdl
U	na	5,20	47,80	bdl	bdl	bdl	3,00
V	na	39,00	151,00	4,00	15,00	7,00	3,00
W	na	42,90	314,90	na	na	na	na
Zr	na	0,30	36,50	18,00	34,00	14,00	18,00
Y	na	10,03	33,20	bdl	bdl	3,00	4,00
Cd	bdl	47,93	96,90	na	na	na	na
Sb	20,90	67,28	42,80	na	na	na	na
Hg	0,02	615,00	0,77	na	na	na	na
Se	2,00	0,20	bdl	5,00	5,00	1,00	bdl
Te	na	0,30	bdl	3,00	3,00	3,00	bdl

8.7 Μεταλλευτική Περιοχή Νεροστριάς

Άμεσα γειτνιάζουσα με τις Ασημότρυπες είναι η περιοχή Νεροστριά Νικήσιανης. Στην περιοχή εντοπίζονται ίχνη τόσο αρχαίας μεταλλευτικής δραστηριότητας, όσο και σύγχρονης από την εταιρία Ηλιόπουλος-Βωζίτες Παρνασσού.

8.7.1 Γεωγραφική Θέση

Η περιοχή Νεροστριά βρίσκεται 1,5 km νοτιοδυτικά της μεταλλουργικής περιοχής της Νικήσιανης (Λειβάδια) και 1,5 km βορειοανατολικά από τις Ασημότρυπες. Μέσα σε κοιλάδα χειμάρρου εντοπίζεται η είσοδος μιας αρχαίας στοάς και 85 m προς τα κατάντη του η είσοδος μίας σύγχρονης μεταλλευτικής στοάς (Εικ. 8.7.1.1-2). Και οι δύο στοές έχουν διανοιχθεί στον πλουτωνίτη της Νικήσιανης, πλησίον της επαφής του με τα υπερκείμενα μάρμαρα. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονη δασώδη βλάστηση με οξιές και πλατάνους.



Εικόνα 8.7.1.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση της περιοχής Νεροστριάς και των εισόδων των στοών.

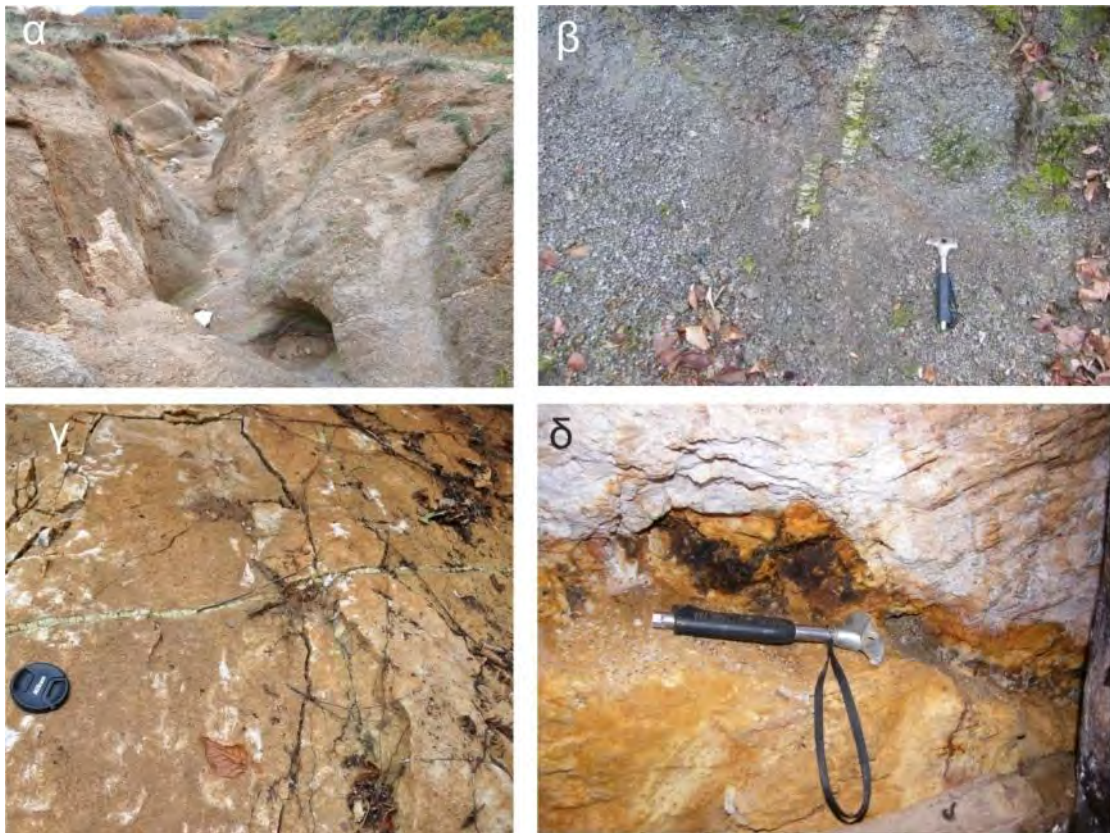


Εικόνα 8.7.1.2 Είσοδος της σύγχρονης μεταλλευτικής στοάς στην περιοχή Νεροστριά.

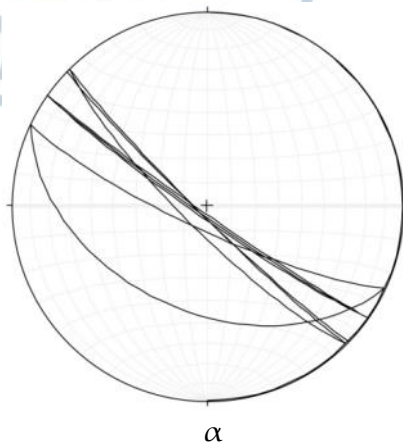
8.7.2 Γεωλογία-Τεκτονική

Η περιοχή της Νεροστριάς δομείται από την παρουσία μαρμάρων τα οποία υπέρκεινται της πλουτωνικής εμφάνισης της Νικήσιανης (Εικ. 8.7.2.1.α). Ο πλουτωνίτης εμφανίζεται στα κατάντη της κοιλάδας, όπου και καλύπτεται στη συνέχεια από κορήματα των χειμάρρων της περιοχής. Η μάζα του χαρακτηρίζεται από πλήθος πηγματιτικών φλεβών, φλέβες μεταλλοφορίας, αλλά και τα κανονικά ρήγματα (Εικ. 8.7.2.1.β). Τα μάρμαρα εμφανίζονται ισχυρώς ανακρυσταλλωμένα στις περιοχές επαφής με το πλουτωνικό σώμα. Επίσης φιλοξενούν φλέβες με δευτερογενή ασβεστίτη (8.7.2.1.γ). Οι κύριες τεκτονικές γραμμές της περιοχής της Νεροστριάς έχουν παράταξη διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ και ΒΑ-ΝΔ.

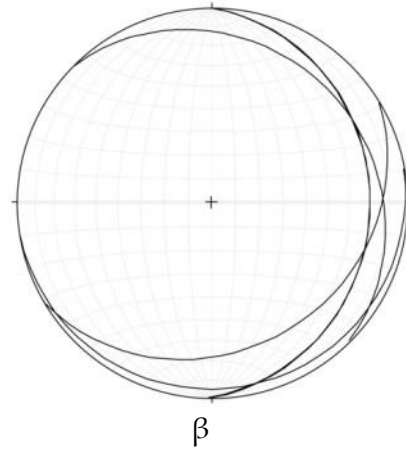
Η μεταλλοφορία είναι διάσπαρτη στη μάζα του πλουτωνίτη σε φλέβες και συγκεντρώσεις. Επίσης εντοπίζεται στην επαφή του πλουτωνίτη με τα υπερκείμενα μάρμαρα. Τα κενά που δημιουργούνται στην επαφή του πλουτωνίτη και μαρμάρων πληρώνονται με μεταλλοφορία με πάχος μέχρι και 50 cm (Εικ. 8.7.2.1.δ). Οι τεκτονικές ασυνέχειες που φιλοξενούν τη μεταλλοφορία στη στοά Νεροστριά-1 έχουν διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, ενώ οι επιφάνειες της σχιστότητας που επίσης περιέχουν μεταλλοφόρα σώματα κλίνουν προς Α (Σχ. 8.7.2.1).



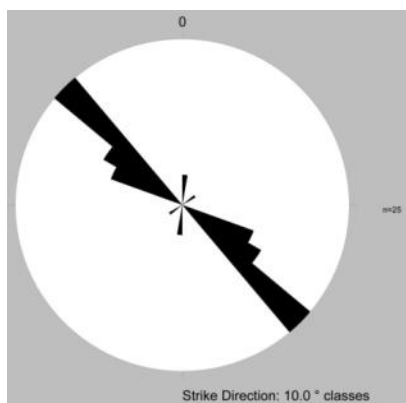
Εικόνα 8.7.2.1 α) Ο γρανίτης όπως αποκαλύπτεται σε σημεία έντονης διάβρωσης. β) Μετατοπισμένη πηγματιτική φλέβα από ρήγμα. γ) Φλέβα δευτερογενούς ασβεστίτη στη μάζα των μαρμάρων. δ) Φωλιά μεταλλεύματος στην επαφή του πλουτωνίτη με τα υπερκείμενα μάρμαρα της περιοχής.



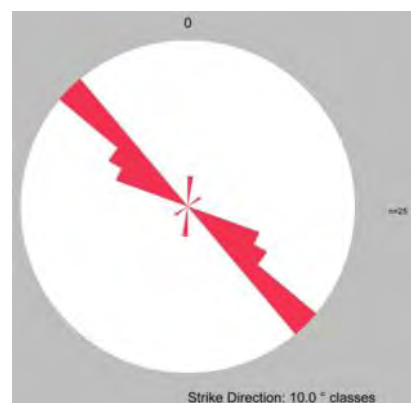
α



β



γ

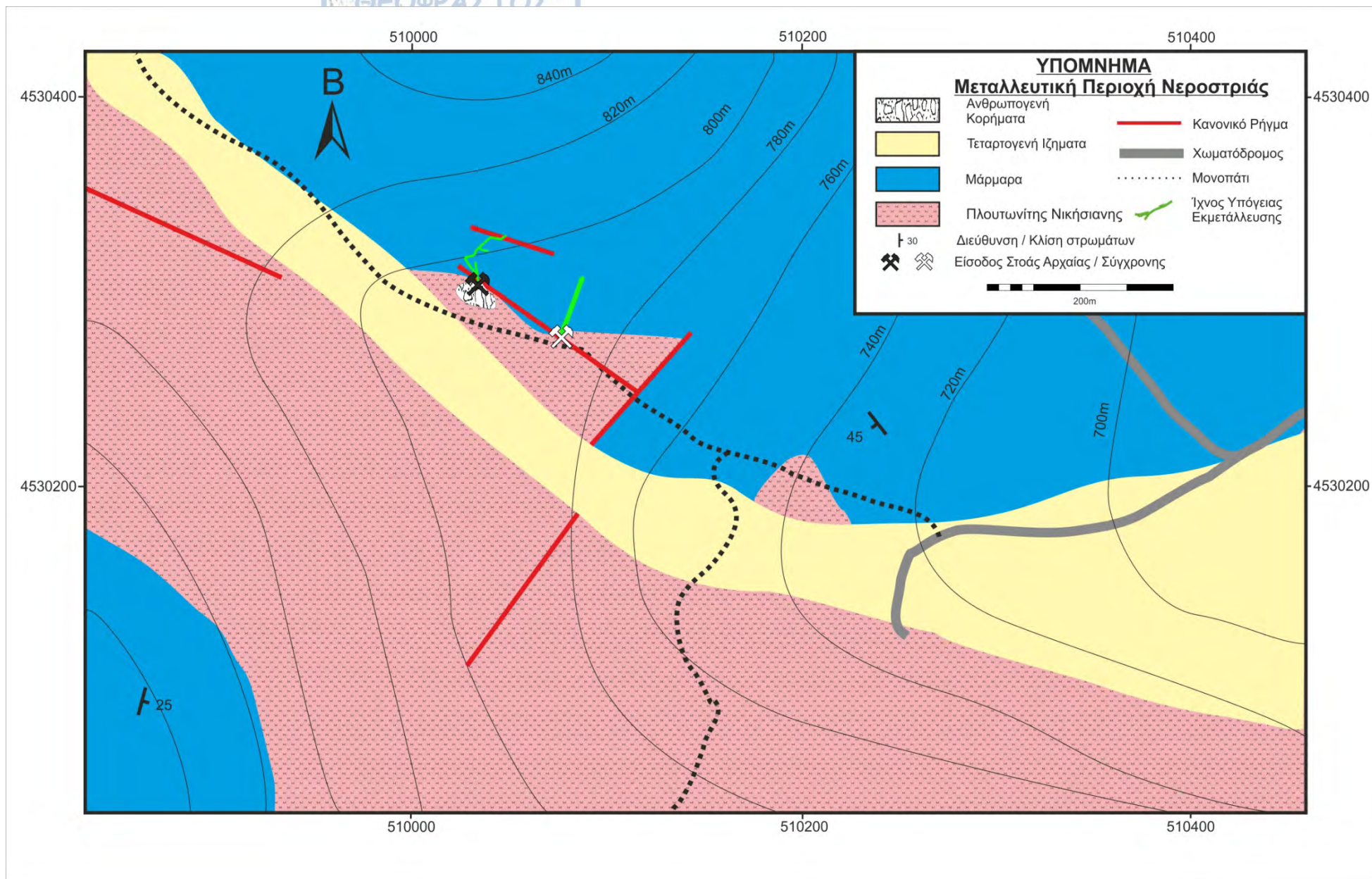


δ

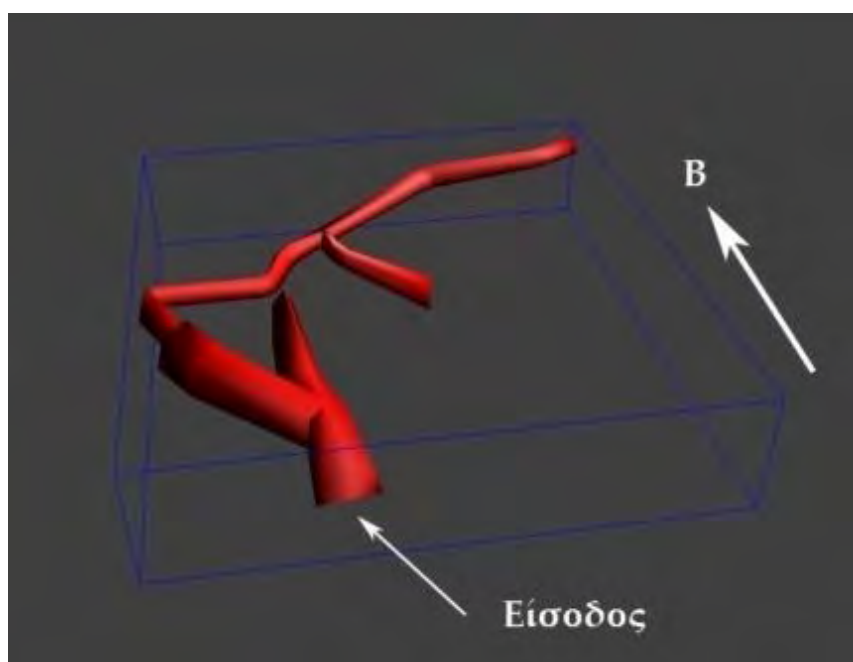
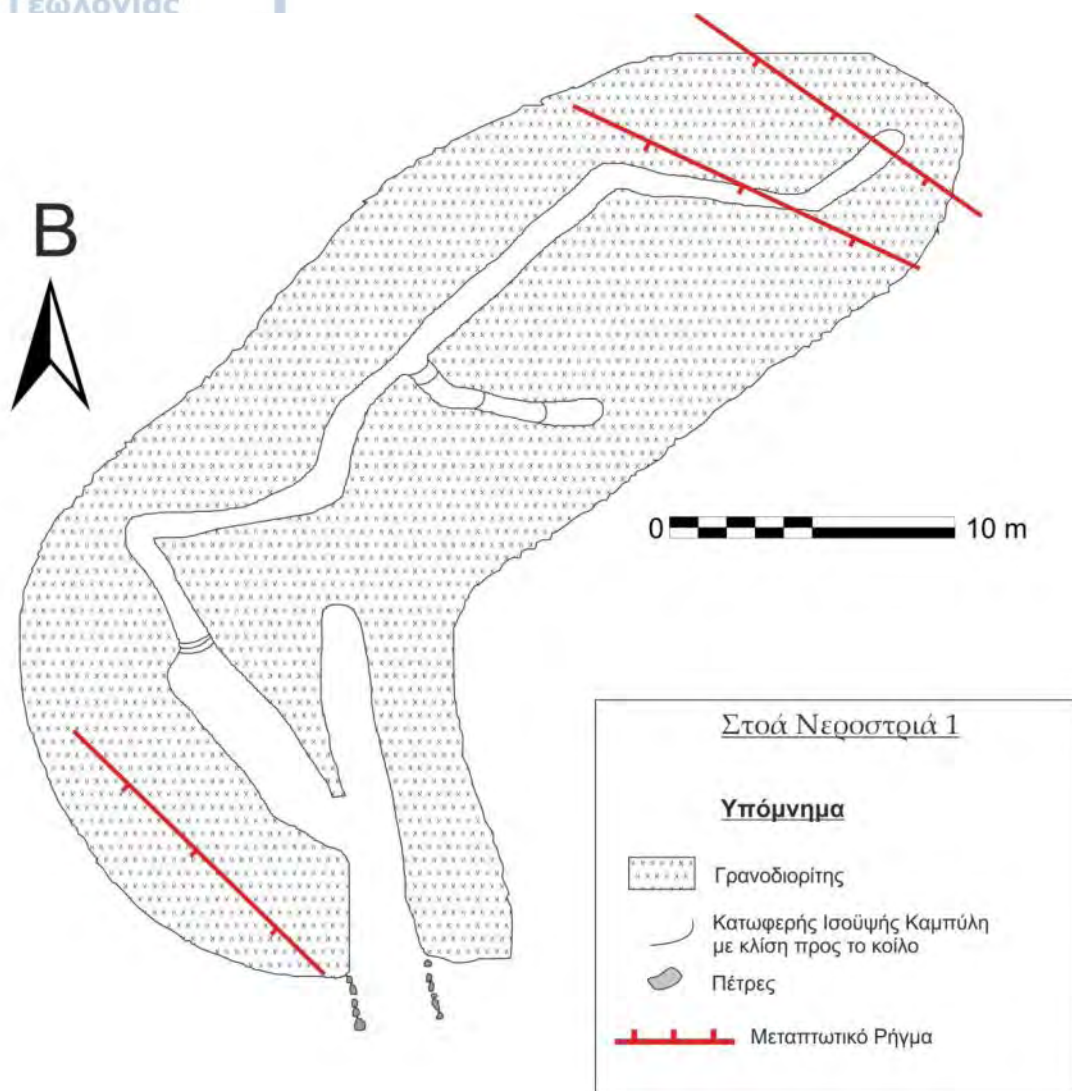
Σχήμα 8.7.2.1 Στερεογραφικές προβολές (κάτω ημισφαίριο) και ροδοδιαγράμματα των ασυνεχειών από το εσωτερικό της στοάς «Νεροστριά-1». α. Προβολή των τεκτονικών ασυνεχειών. β. Προβολή των επιφανειών σχιστότητας. γ. Ροδοδιάγραμμα των τεκτονικών ασυνεχειών της στοάς. δ. Ροδοδιάγραμμα τεκτονικών ασυνεχειών που φιλοξενούν μεταλλοφορία.

8.7.3 Περιγραφή Στοάς -Τεχνικές Εξόρυξης

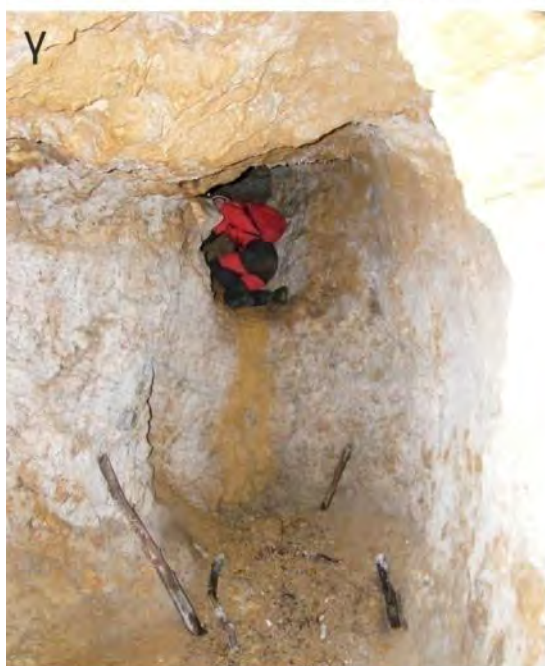
Η είσοδος της στοάς Νεροστριά-1 βρίσκεται σε υψόμετρο 768 m και έχει διανοιχθεί στον πλουτωνίτη της Νικήσιανης και συγκεκριμένα στην επαφή του με τα υπερκείμενα μάρμαρα (Εικ. 8.7.6.α). Στο εσωτερικό του δεν εμφανίζονται τα υπερκείμενα μάρμαρα. Το τμήμα της εισόδου έχει διευρυνθεί από σύγχρονη μεταλλευτική δραστηριότητα της Εταιρείας Βωξίτες Παρνασσού τη δεκαετία του 1970. Αρχικά η σύγχρονη στοά είναι επιμήκης με μήκος 12,2 m και διατομή 2m x 2 m (Εικ. 8.7.3.1, 8.7.3.2.α, β). Ακολουθεί την αρχαία στοά προς τα βορειοδυτικά και σταματάει μετά από 3 m. Στο σημείο αυτό υπάρχει ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα σύζευξης αρχαίας και σύγχρονης μεταλλευτικής στοάς (8.7.3.2.γ). Η μέση διατομή της αρχαίας στοάς είναι 1 m x 1 m και έχει κυρίως αψιδωτή οροφή (Εικ. 8.7.3.2.δ).



Εικόνα 8.7.4 Γεωλογικός χάρτης (κάτοψη) μεταλλευτικής περιοχής Νεροστριάς.



Εικόνα 8.7.3.1 Κάτοψη και τρισδιάστατη απεικόνιση της στοάς Νεροστριά-1.

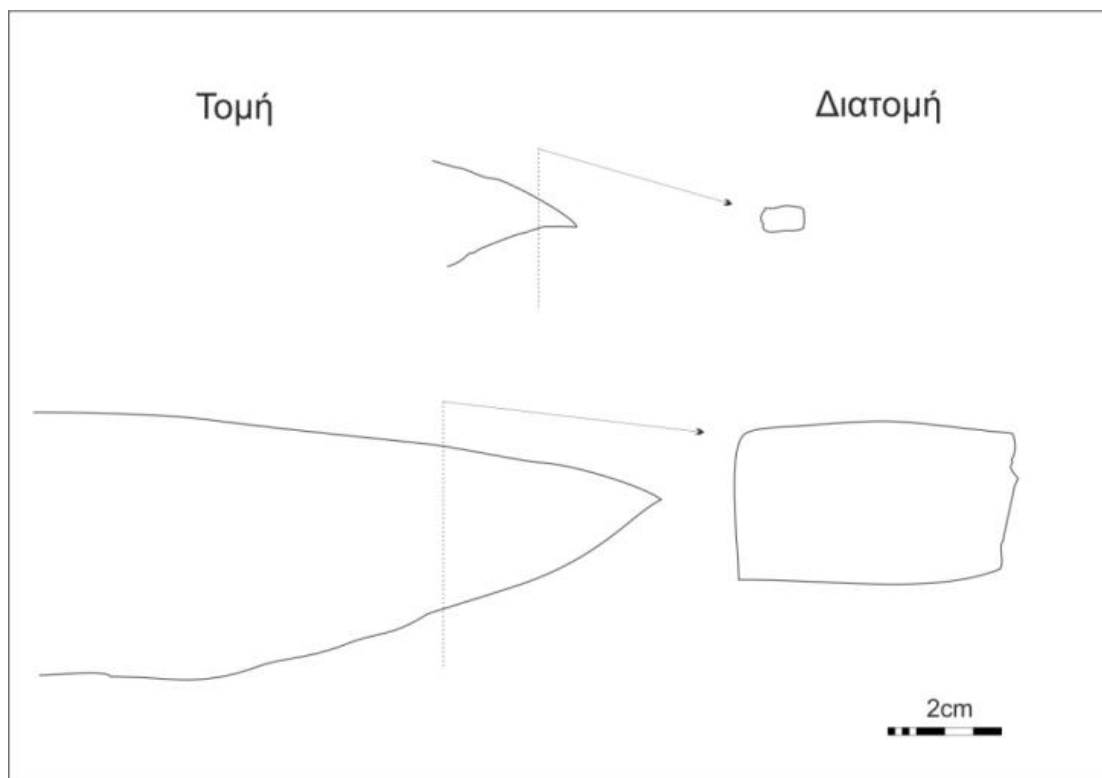


Εικόνα 8.7.3.2 α) Είσοδος της αρχαίας στοάς Νεροστριά-1. Τα υπερκείμενα μάρμαρα με τον υποκείμενο πλουτωνίτη. β) Το πρώτο τμήμα της στοάς. Διακρίνονται φυλλώδεις φλέβες μεταλλοφορίας στο γρανίτη. γ) Το σημείο συνάντησης της σύγχρονης με την αρχαία στοά. δ) Άποψη της στοάς στη βορειοανατολική απόληξη. Διακρίνεται η αψιδωτή απόληξη της διατομής. ε) Ίχνος μεταλλευτικό σφυριού στην οξειδωμένη μεταλλοφορία. ζ) Ίχνος σφήνας στο τοίχωμα της στοάς.

Η αρχαία μεταλλευτική στοά συνεχίζεται προς τα βόρεια και βορειοανατολικά για περίπου 40 m. Στο μέσο περίπου της στοάς υπάρχει διακλάδωση προς ανατολικά για περίπου 6 m.

Η διάνοιξη ακολουθεί την οξειδωμένη μεταλλοφορία μέσα στον πλουτωνίτη, η οποία διακόπτεται από μικρά ρήγματα προς το τέλος της υπόγειας εκμετάλλευσης. Στο πρώτο τμήμα της αρχαίας στοάς ένα μεγάλο μέρος της έχει καλυφθεί με δευτερογενή ανθρακική κρούστα και σπηλαιοθέματα. Η παρουσία των ανθρακικών αποθέσεων εξηγείται από την κίνηση κατεισδύοντος νερού από τα υπερκείμενα μάρμαρα προς τις ασυνέχειες του γρανίτη.

Ο όγκος των υπόγειων μεταλλευτικών εργασιών είναι $100,1 \text{ m}^3$. Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στην αρχαία εκμετάλλευση είναι το σφυρί και το καλέμι, ενώ σε σημεία παρατηρείται χρήση σφήνας (Εικ. 8.7.3.2.ε, ζ, 8.7.3.3). Η θερμοκρασία στο εσωτερικό της στοάς είναι $11,8^\circ\text{C}$ και η σχετική υγρασία 100%.



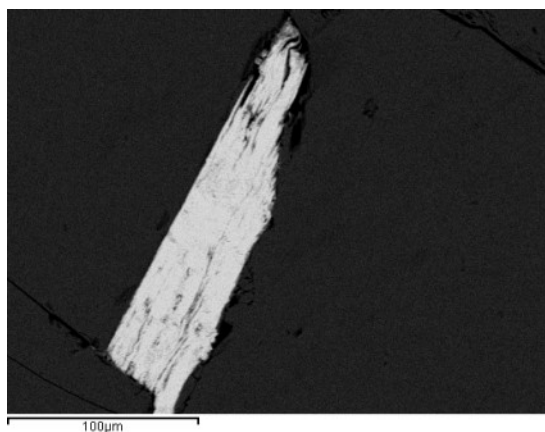
Εικόνα 8.7.3.3 Ίχνη από το μεταλλευτικό σφυρί (πάνω) και σφήνας (κάτω) από τη στοά Νεροστριά-1.

8.7.4 Αρχαιολογικά Ευρήματα

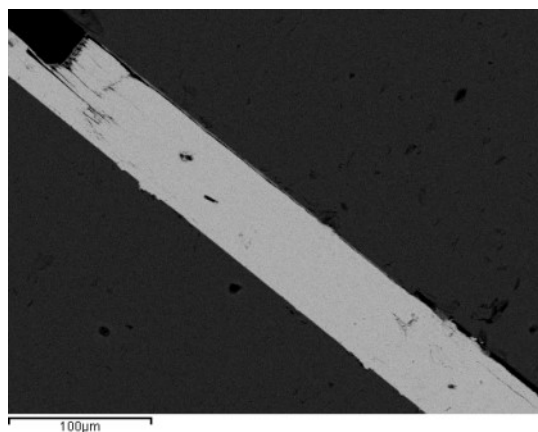
Στη στοά Νεροστριά-1 δεν παρατηρήθηκε επιφανειακή κεραμική, ούτε άλλα ανθρωπογενή υπολείμματα, εκτός από διάσπαρτα ίχνη καύσης άγνωστης χρονολογίας.

8.7.5 Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Μεταλλεύματος

Το μέταλλευμα στην περιοχή Νεροστριά και συγκεκριμένα στη σύγχρονη στοά αποτελείται κυρίως από σιδηροπυρίτη και αρσеноπυρίτη, και σε ορισμένες περιπτώσεις από ορυκτά του Bi-Te. Από τα ορυκτά του Bi-Te, το A αποτελείται από Bi, Te και Pb, ενώ το ορυκτό B από Bi, Te και Pt (Πίν. 8.7.5.1). Το ορυκτό A (Εικ. 8.7.5.1) έχει σύσταση παρόμοια με αυτή του τσουμοΐτη (tsumoite - BiTe), του κοχκαρίτη (kochkarite - PbBi₄Te₇) ή του ρουκλιδγαΐτη (rucklidgeite - (Bi,Pb)₃Te₄), τα οποία είναι σπάνια και εντοπίζονται σε υδροθερμικές φλέβες με Au. Ειδικά, ο τσουμοΐτης συνδέεται με συνθήκες skarn, ενώ ο κοχκαρίτης και ο ρουκλιδγαΐτης με επιθερμικές φλέβες χαλαζία (Shimazaki and Ozawa, 1978; Anufriyev et al, 1974; Zan'yalon and Begizov, 1977). Το ορυκτό B (Εικ. 8.7.5.2) έχει σύσταση ανάλογη που προσομοιάζει τα ορυκτά τσουμοΐτη (tsumoite - BiTe), μασλοβίτης (maslovite - PtBiTe), ο οποίος επίσης συνδέεται με υδροθερμικά ρευστά (Bayliss, 1989). Και τα δύο ορυκτά A και B είναι δυνατό να αποτελούν κρυστάλλους τσουμοΐτη πλούσιους σε Pb και Pt αντίστοιχα με χημικό τύπο είτε (Bi,Pb)Te για την A φάση είτε (Bi,Pt)Te για τη B φάση.



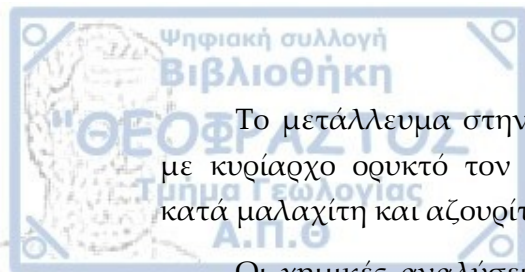
Εικόνα 8.7.5.1 Επιμήκης κρύσταλλος τσουμοΐτη πλούσιου σε Pb (ορυκτό A) μέσα σε σιδηροπυρίτη από την περιοχή της Νεροστριάς. SEM, back-scattering image.



Εικόνα 8.7.5.2 Επιμήκης κρύσταλλος τσουμοΐτη πλούσιου σε Pt (ορυκτό B) μέσα σε σιδηροπυρίτη από την περιοχή της Νεροστριάς. SEM, back-scattering image.

Πίνακας 8.7.5.1 Μικροαναλύσεις των ορυκτών A και B από τη μεταλλοφορία της Νεροστριάς.

w/t%	Ορυκτό A	Ορυκτό B
Bi	53,07	57,01
Te	39,01	38,91
Pb	7,92	0,00
Pt	0,00	4,08
Σ	100,00	100,00



Το μέταλλευμα στην αρχαία στοά Νεροστριά-1 είναι πλήρως οξειδωμένο με κυρίαρχο ορυκτό τον γκαϊτίτη. Η οξειδωμένη μεταλλοφορία παρουσιάζει κατά μαλαχίτη και αζουρίτη.

Οι χημικές αναλύσεις ενός δείγματος (PNN-1) από τη μεταλλοφορία της Νεροστριάς στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής σε συνδυασμό με δύο αναλύσεις σε μεταλλοφόρες χαλαζιακές φλέβες από τον Eliopoulos (2000) (Πίν. 8.7.2) έδειξαν περιεκτικότητες σε Au από 0,01 έως 0,06 ppm και σε Ag από 1,20 έως 4,00 ppm.

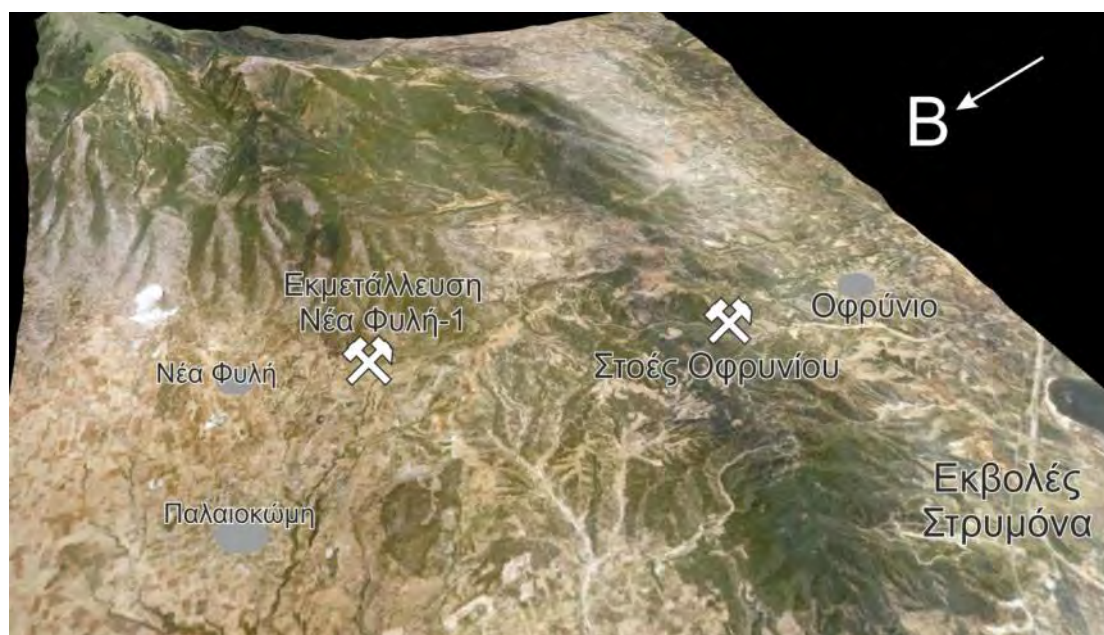
Οι χημικές αναλύσεις έδειξαν επίσης υψηλές περιεκτικότητες σε Fe_2O_3 που κυμαίνεται από 9,90 έως >57,18 wt %, σε Cu έως 157,25 ppm και σε As από 39,00 έως 1195,7 ppm. Επίσης οι περιεκτικότητες σε Pb είναι 21,00-210,00 ppm (μ.ό. 93,29 ppm), σε Zn 25,00-47,00 ppm (μ.ό. 33,3 ppm), σε Co 90,50-126,00 ppm (μ.ό. 109,83 ppm), σε Cr 1,80-866 ppm (μ.ό. 367,6), σε Ni 11,90-133,00 ppm (μ.ό. 51,30 ppm), σε V 7,00-158,00 ppm (μ.ό. 71,00 ppm) και σε Te 3,00-58,00 ppm (μ.ό. 23,01 ppm) (Πίν. 8.7.5.2).

Πίνακας 8.7.5.2 Περιεκτικότητες των βασικών οξειδίων (wt %) και επιλεγμένων ιχνοστοιχείων (ppm) από δείγματα στην περιοχή Νεροστριά από την παρούσα διατριβή και από Eliopoulos (2000). Ο ολικός σίδηρος εκφράζεται σε Fe₂O₃. (bdl: κάτω του ορίου ανιχνευσιμότητας, na: δεν αναλύθηκε)

	PNN-1	AS-61 (Eliopoulos, 2000)	AS-63 (Eliopoulos, 2000)
wt%			
SiO ₂	na.	65,50	76,50
TiO ₂	bdl.	0,02	0,11
Al ₂ O ₃	3,06	9,40	4,75
Fe ₂ O ₃	>57,18	15,30	9,90
MgO	0,20	0,17	2,75
MnO	0,01	0,02	0,05
CaO	0,29	0,70	3,86
K ₂ O	bdl	4,20	0,52
Na ₂ O	bdl	1,47	0,50
P ₂ O ₅	0,21	0,05	0,07
ppm			
Au	0,02	0,06	0,01
Ag	2,99	4,00	1,20
Cu	157,25	bdl.	bdl
Pb	48,88	210,00	21,00
Zn	27,90	25,00	47,00
As	1195,70	140,00	39,00
Bi	2,81	103,00	7,00
Ba	15,60	569,00	12,00
Cr	1,80	235,00	866,00
Sb	11,68	2,00	2,00
Co	90,50	113,00	126,00
Nb	0,08	na	na
Rb	0,40	107,00	9,00
Sr	3,20	130,00	68,00
Ni	11,90	9,00	133,00
Th	11,60	32,00	1,00
U	35,90	5,00	bdl
V	158,00	7,00	48,00
W	9,10	na	na
Zr	0,40	27,00	33,00
Y	47,18	11,00	11,00
Se	0,20	1,00	1,00
Te	8,04	58,00	3,00

8.8 Μεταλλευτική Περιοχή Δυτικού Παγγαίου

Στη δυτική απόληξη του Παγγαίου από την περιοχή της Νέας Φυλής μέχρι το Οφρύνιο εντοπίζεται οξειδωμένη μεταλλοφορία με βαρύτη. Η μεταλλοφορία φιλοξενείται στα μάρμαρα της περιοχής που εμφανίζονται ιδιαίτερα εμποτισμένα σε σιδηροξειδία. Η αρχαία μεταλλευτική δραστηριότητα εστιάστηκε κυρίως στην περιοχή νοτιοανατολικά της Νέας Φυλής και βορείως του Οφρυνίου, όπου εντοπίστηκε υπόγεια μεταλλευτική δραστηριότητα (Εικ. 8.8.1).



Εικόνα 8.8.1. Μεταλλευτική δραστηριότητα στο Δυτικό Παγγαίο. (υπόβαθρο: Basemap Ktimatologio)

8.8.1 Επιφανειακή Εκμετάλλευση Νέας Φυλής

Η μεταλλευτική δραστηριότητα στη «Νέα Φυλή-1» εντοπίζεται 1600 m περίπου νότια του χωριού της Νέας Φυλής και 2,3 km νοτιοανατολικά της Παλαιοκώμης σε υψόμετρο 216 m. Η προσέγγιση στην εκμετάλλευση γίνεται διαμέσου χωματόδρομου από τη Νέα Φυλή. Η βλάστηση στην περιοχή είναι αραιή αποτελούμενη κυρίως από πρίνους και άλλους θάμνους, με καλλιεργήσιμες ζώνες στην κατάντη περιοχή.

8.8.1.1 Γεωλογία-Τεκτονική

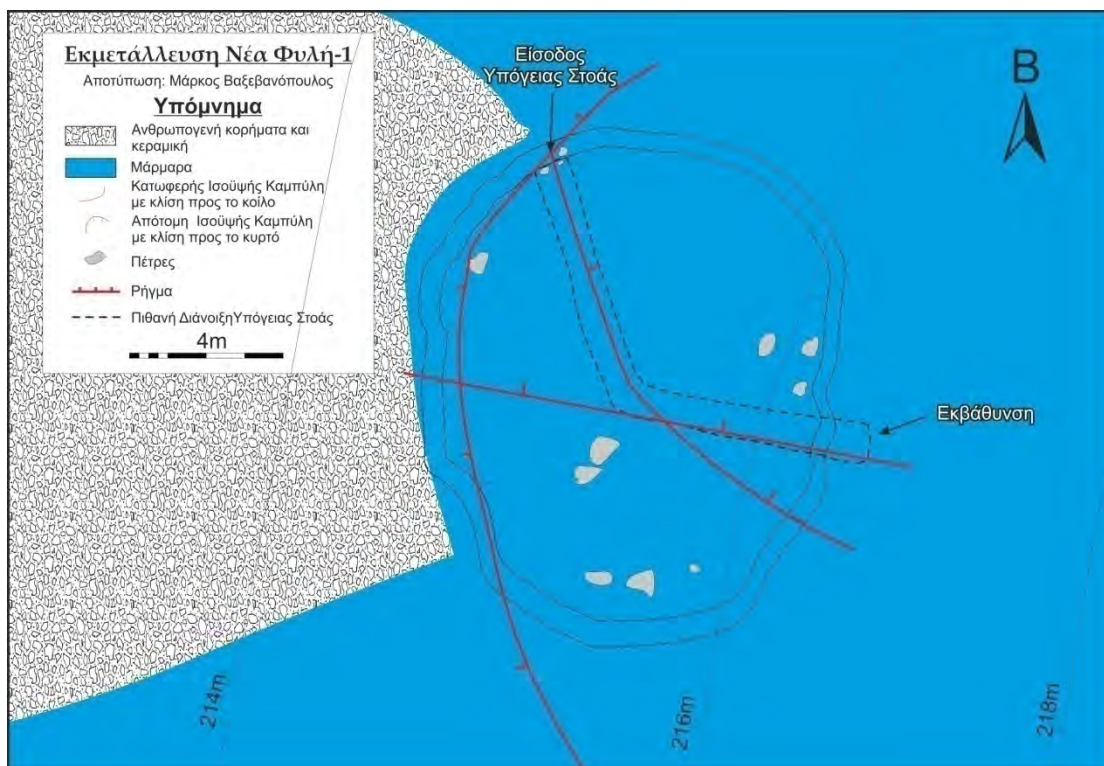
Η περιοχή της μεταλλευτικής δραστηριότητας «Νέα Φυλή-1» χαρακτηρίζεται από την παρουσία μαρμάρων της ενότητας Παγγαίου. Τα μάρμαρα είναι ισχυρώς εμποτισμένα με σιδηροξειδία και χαρακτηρίζονται από την παρουσία βαρύτη ιδιαίτερα σε καρστικά έγκοιλα. Η μεταλλοφορία ακολουθεί τις τεκτονικές ασυνέχειες της περιοχής και συγκεντρώνεται ιδιαίτερα στα σημεία διασταύρωσης των ασυνεχειών. Τα ρήγματα έχουν διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ μέχρι ΒΒΔ-ΝΝΑ και Α-Δ.

8.8.1.2 Περιγραφή-Τεχνικές Διάνοιξης

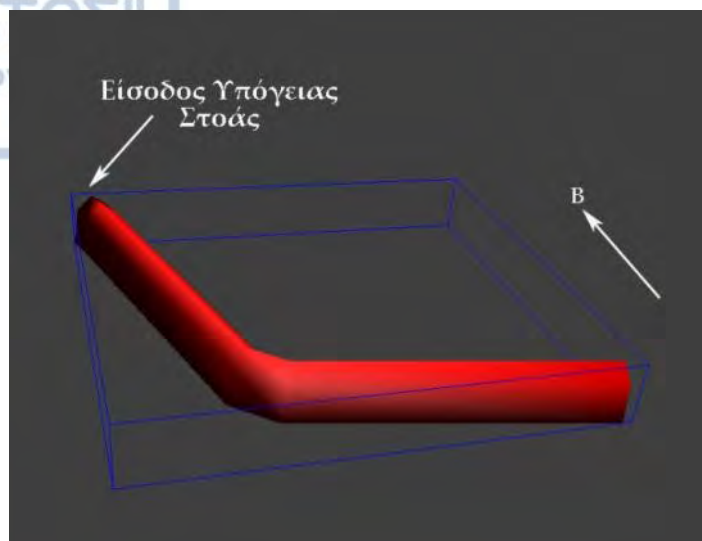
Η μεταλλευτική δραστηριότητα «Νέα Φυλή-1» αποτελεί μία ανοιχτή εκμετάλλευση με διαστάσεις 13.5 m x 9 m και μέσο βάθος 3 m (Εικ. 8.8.1.2.1). Ο χώρος της επιφανειακής εξόρυξης σχηματίζει έλλειψη στο οριζόντιο επίπεδο με το μέγιστο άξονα με διεύθυνση Β-Ν και το μικρότερο Α-Δ. Η επιφάνεια της εκμετάλλευσης έχει εμβαδό 81 m². Η μορφολογία στην περιοχή έχει κλίση προς δυτικά και για αυτό το ανατολικό πρανάς έχει βάθος εξόρυξης 6 m και το ανατολικό 1,5 m. Ο συνολικός όγκος της εκμετάλλευσης υπολογίζεται περίπου στα 214 m³.

Στο βόρειο άκρο εντοπίζεται ίχνος εισόδου υπόγειας στοάς (Εικ. 8.8.1.2.2, 8.8.1.2.3.α), όπως επίσης και στο ανατολικό πρανάς μία εκβάθυνση με ορθογώνια διατομή (Εικ. 8.8.1.2.3.β). Η διατομή τους παρουσιάζει μικρή κύρτωση στο άνω μέρος. Αυτά τα στοιχεία οδηγούν στην υπόθεση πιθανής παλαιότερης φάσης εξόρυξης με υπόγεια προσπέλαση. Μία δεύτερη φάση εκμετάλλευσης είναι η επιφανειακή που κατέστρεψε το μεγαλύτερο μέρος της προηγούμενης υπόγειας εξόρυξης. Η διατομή της υπόγειας στοάς υπολογίζεται σε 0,9 m x 1 m (πλάτος x ύψος). Τα τοιχώματα χαρακτηρίζονται από την παρουσία φωλεών μεταλλεύματος πλήρως εξορυγμένων (Εικ. 8.8.1.2.3.γ). Η διάνοιξη ακολουθεί τις βασικές τεκτονικές γραμμές όπου εντοπίζεται η μεταλλοφορία (Εικ. 8.8.1.2.3.δ).

Ο όγκος της υπόγειας εκμετάλλευσης υπολογίζεται σύμφωνα με τη χαρτογράφηση περίπου στα 11 m³. Στην επιφάνεια του μαρμάρου και στις δύο φάσεις εκμετάλλευσης παρατηρούνται ίχνη λάξευσης από σφυρί και καλέμι, ενώ κατά θέσεις χρησιμοποιείται η σφήνα. Στην κατάντη περιοχή και σε επιφάνεια περίπου 200 m² παρατηρούνται απορρίμματα της εκμετάλλευσης και διάσπαρτη κεραμική.



Εικόνα 8.8.1.2.1 Κάτοψη της επιφανειακής εκμετάλλευσης Νέα Φυλή-1.



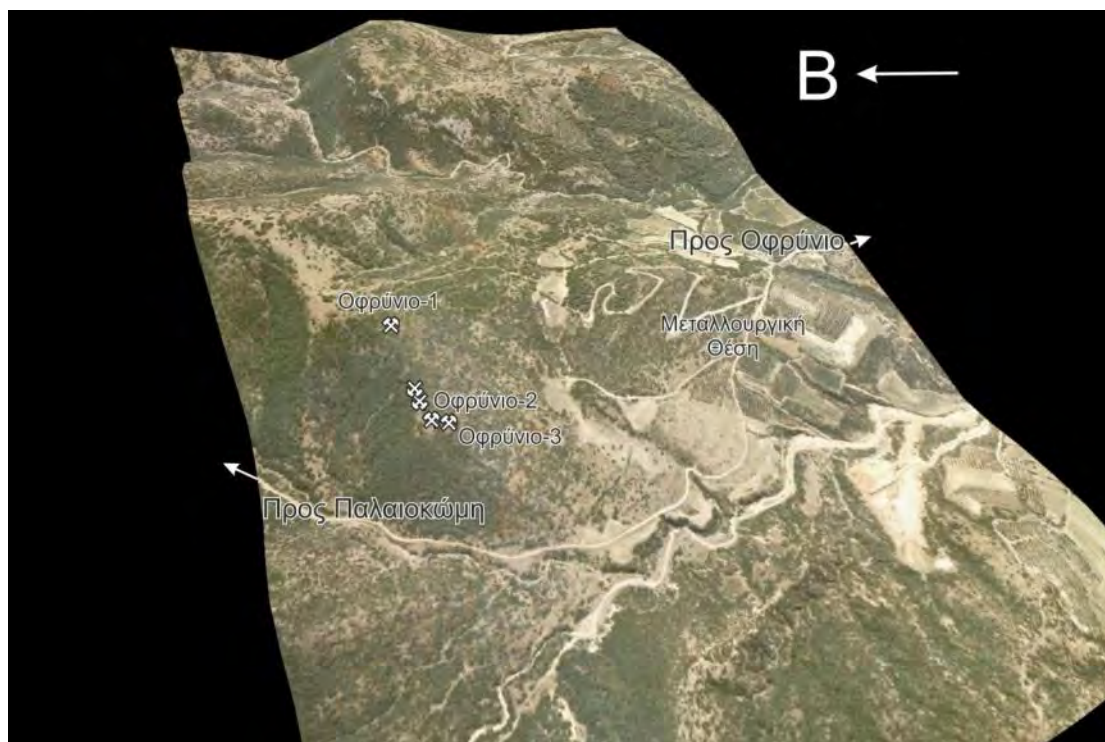
Εικόνα 8.8.1.2.2 Τρισδιάστατη απεικόνιση της παλαιότερης υπόγειας φάσης της στοάς Νέα Φυλή-1.



Εικόνα 8.8.1.2.3 α) Άποψη από την είσοδο της υπόγειας στοάς (σημειώνεται με βέλος). β) Άποψη από την εκβάθυνση στο ανατολικό πρανάς (σημειώνεται με βέλος). γ) Φωλιά μεταλλεύματος πλήρως εξορυγμένη. δ) Μεταλλοφορία βαρύτερη και σιδηροξειδίων κατά μήκος τεκτονικής επιφάνειας.

8.8.2 Υπόγειες Στοές Περιοχής Οφρυνίου

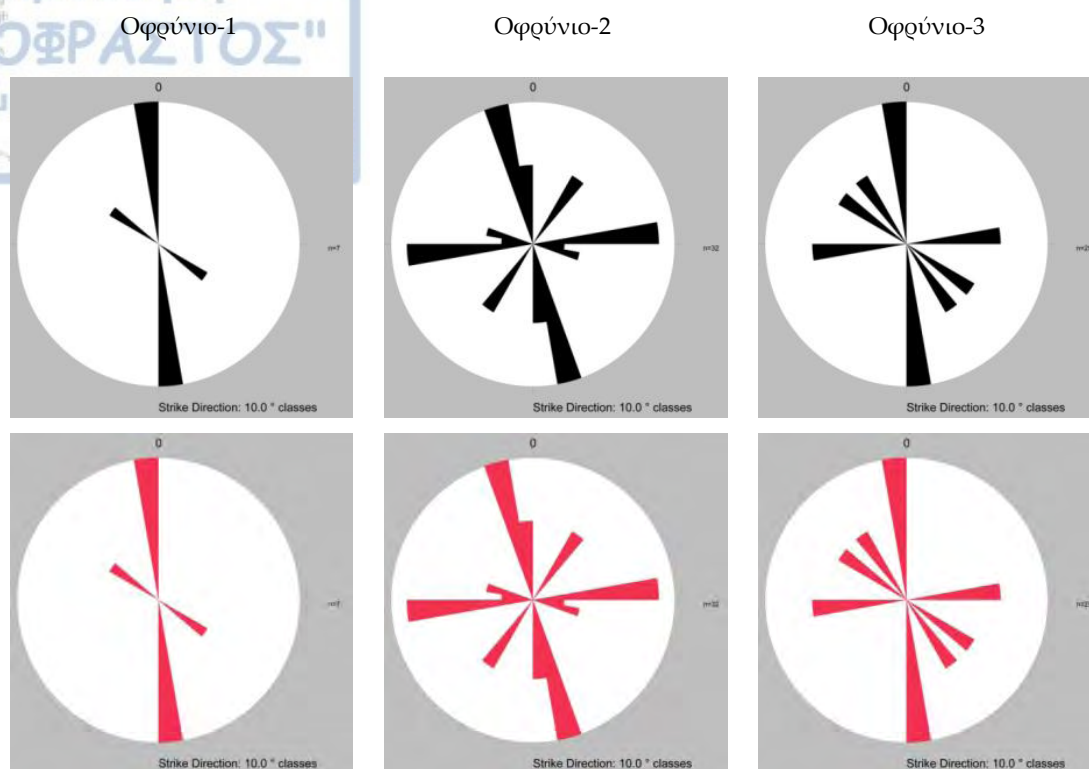
Στην περιοχή «Κόλιακας», 2,2 km βορείως του Οφρυνίου, εντοπίζονται 3 υπόγειες μεταλλευτικές στοές. Η πρόσβαση σε αυτές γίνεται από τον παλιό δρόμο Οφρυνίου-Μεσολακιάς (Παλαιοκώμης). Οι εισοδοί τους βρίσκονται σε πρανές με βόρειο προσανατολισμό (Εικ. 8.8.2.1). Η βλάστηση στην περιοχή των στοών χαρακτηρίζεται από την παρουσία πυκνών πρίνων.



Εικόνα 8.8.2.1 Γεωγραφική τοποθέτηση των υπόγειων στοών του Οφρυνίου.

8.8.2.1 Γεωλογία-Τεκτονική

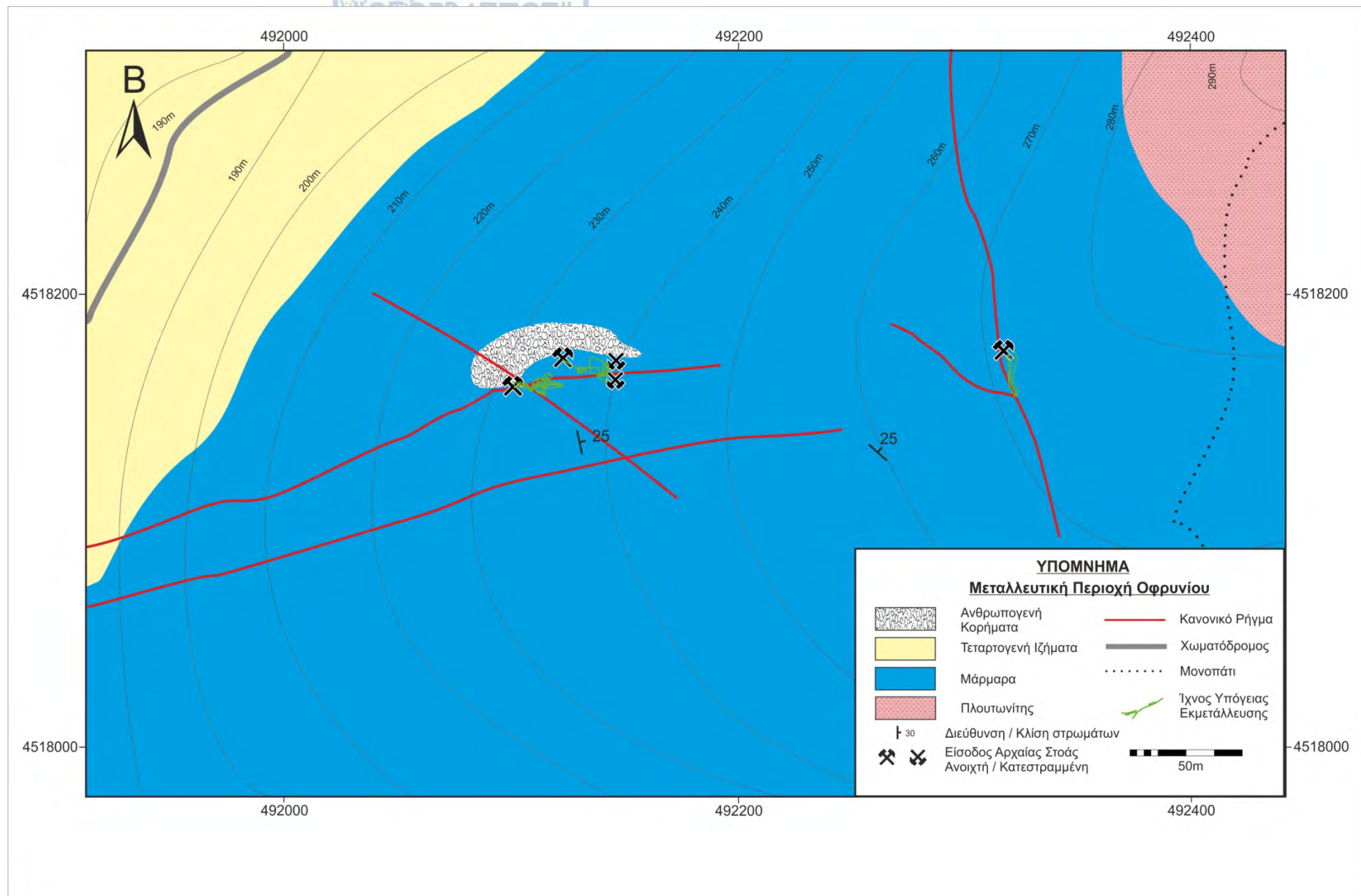
Στην περιοχή «Κόλιακας» ο πλουτωνίτης εμφανίζεται μόλις 100 m βορειοανατολικά της υπόγειας εκμετάλλευσης «Οφρύνιο-1» (Εικ. 8.8.2.1.1). Επίσης είναι έντονη η παρουσία μαρμάρων εμποτισμένων με σιδηροξείδια και κατά θέσεις με σιδηρούχο μεταλλοφορία με βαρύτερη εντοπιζόμενη στις διακλάσεις και στα ρήγματα των μαρμάρων της περιοχής. Τα μάρμαρα είναι μαζώδη έντονα τεκτονισμένα και καρστικοποιημένα. Οι ρηξιγενείς επιφάνειες έχουν κύρια διεύθυνση ΒΒΔ-NNA, και δευτερεύουσες Α-Δ και ΒΑ-NΔ, ΒΔ-ΝΑ (Σχ. 8.8.2.1.1).



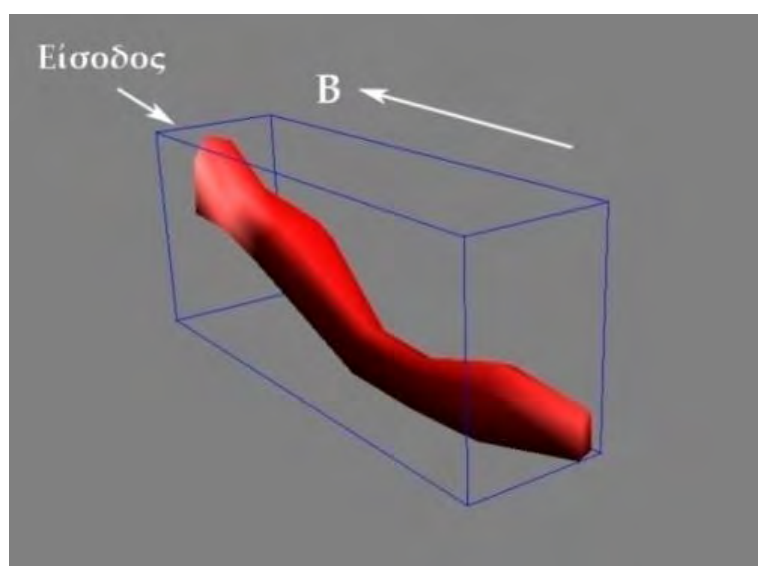
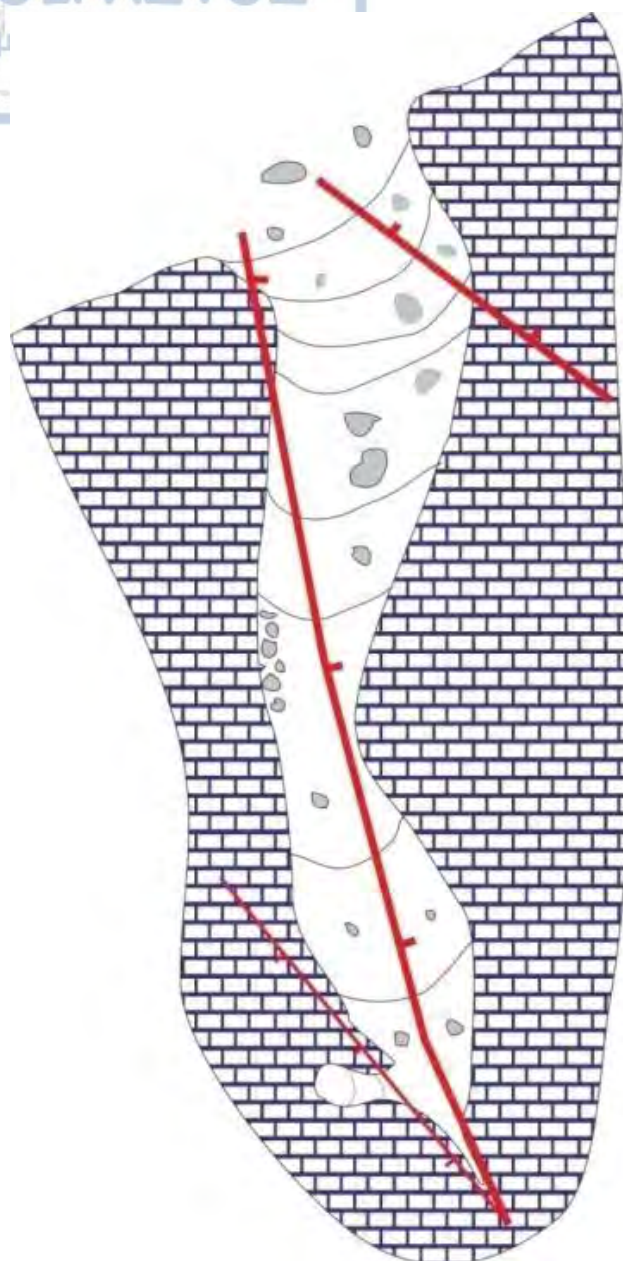
Σχήμα 8.8.2.1.1 Ροδοδιαγράμματα των τεκτονικών ασυνεχειών (πάνω) και ασυνεχειών που φιλοξενούν μεταλλοφορία (κάτω) από το εσωτερικό των στοών στην περιοχή του Οφρυνίου.

8.8.2.2 Υπόγεια Στοά Οφρύνιο-1

Η στοά Οφρύνιο-1 αποτελεί μία περιορισμένων διαστάσεων υπόγεια εκμετάλλευση της περιοχής. Η είσοδος του βρίσκεται σε υψόμετρο 265 m. Η εκμετάλλευση πιθανότατα ξεκίνησε επιφανειακά με εξόρυξη της μεταλλοφορίας σε ρήγμα με παράταξη BBD-NNA (Εικ. 8.8.2.2.1-2). Στη συνέχεια η εξόρυξη ακολούθησε τη μεταλλοφορία υπόγεια προς τα NNA (Εικ. 8.8.2.2.3). Το συνολικό μήκος της στοάς είναι 13 m, ενώ η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ εισόδου και χαμηλότερου σημείου είναι 3 m. Η είσοδος του έχει διαστάσεις 3 m x 0,7 m (πλάτος x ύψος). Η είσοδος όπως και τα πρώτα τμήματα της υπόγειας εκμετάλλευσης χαρακτηρίζονται από την πληθώρα των στείρων υπολειμμάτων της εξόρυξης. Τα βασικά εργαλεία που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι το σφυρί και το καλέμι. Ο συνολικός όγκος της στοάς είναι περίπου 15 m³.



Εικόνα 8.8.2.1.1 Γεωλογικός χάρτης (κάτοψη) μεταλλευτικής περιοχής Οφρυνίου.



Εικόνα 8.8.2.2.1 Κάτοψη και τρισδιάστατη απεικόνιση της στοάς «Οφρύνιο-1».



Εικόνα 8.8.2.2.2 Η είσοδος της στοάς «Οφρύνιο-1». Διακρίνεται το ρήγμα της εισόδου.

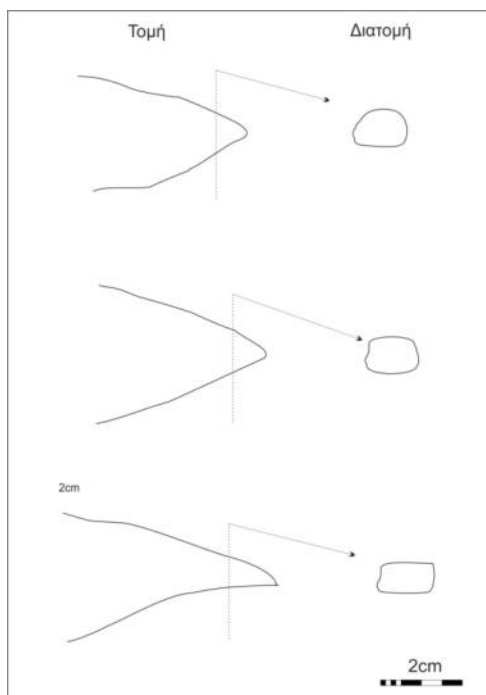


Εικόνα 8.8.2.2.3 Αποψη από το εσωτερικό της στοάς.

8.8.2.3 Υπόγεια Στοά Οφρύνιο-2

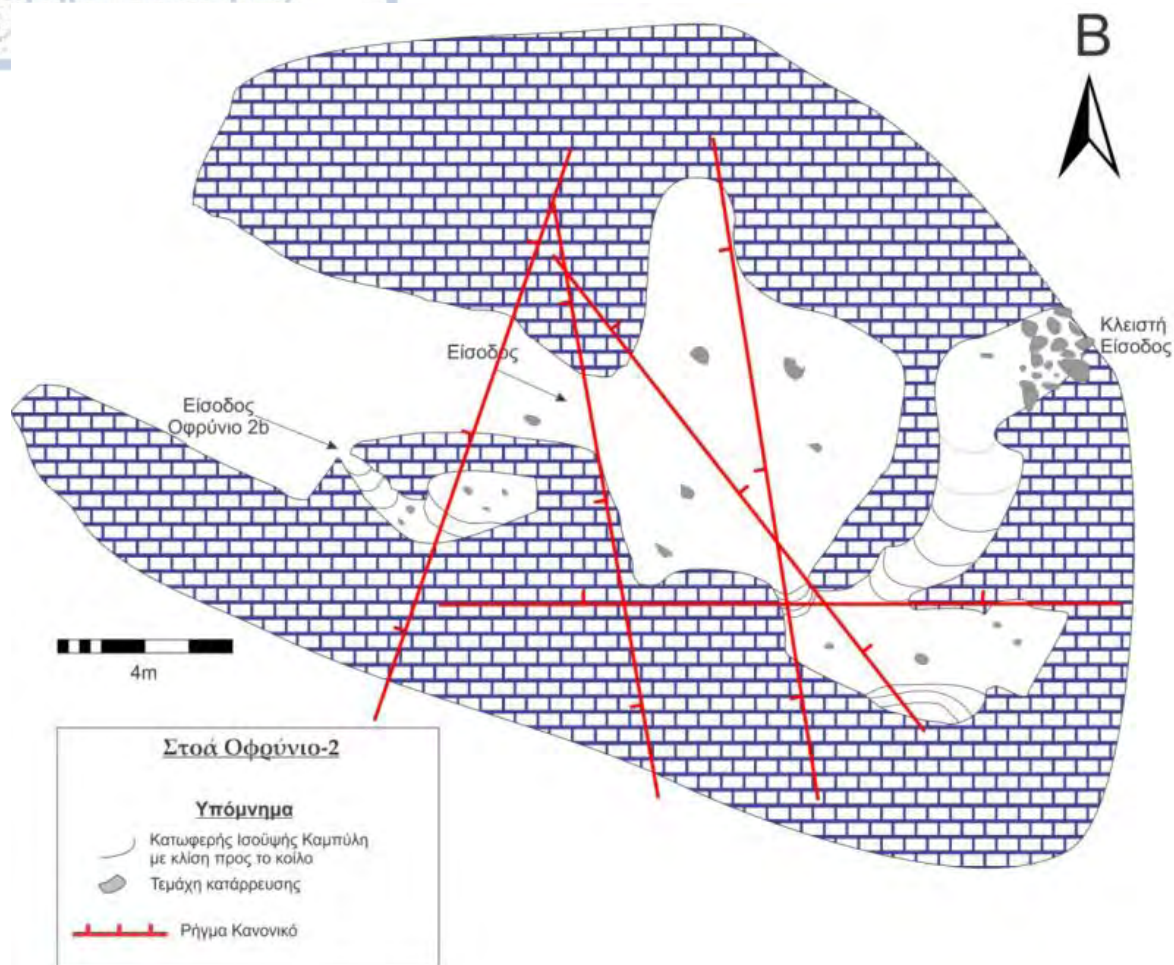
Η είσοδος της υπόγειας στοάς «Οφρύνιο-2» βρίσκεται 200 m ανατολικά αυτής του «Οφρυνίου-1». Αποτελείται από δύο κλάδους οι οποίοι πιθανώς κατά την πρόοδο της εξόρυξης ενώθηκαν. Η ανατολική είσοδος είναι κλειστή λόγω της συσσώρευσης κορημάτων. Κατά τη διάρκεια της επιφανειακής έρευνας διαπιστώθηκε ότι η έξοδος προς τα δυτικά διαθέτει δύο διαφορετικές διακλαδώσεις πληρωμένες με ίζημα και κορήματα. Τα εργαλεία που έχουν χρησιμοποιηθεί για την εξόρυξη είναι κυρίως το σφυρί και το καλέμι (Εικ. 8.8.2.3.1).

Η είσοδος στη στοά Οφρύνιο-2 πραγματοποιείται από το ανατολικό της τμήμα(Εικ. 8.8.2.3.2), το οποίο χαρακτηρίζεται από την παρουσία εξορυγμένου υλικού (Εικ. 8.8.2.3.3.α). Στο νοτιοανατολικό τμήμα της κύριας εισόδου υπάρχει μία μικρή δευτερεύουσα στοά η «Οφρύνιο-2b», η οποία πιθανότατα επικοινωνούσε με την υπόλοιπη υπόγεια εκμετάλλευση, αλλά έχει πληρωθεί με υλικά της εξόρυξης (Εικ. 8.8.2.3.3.β).

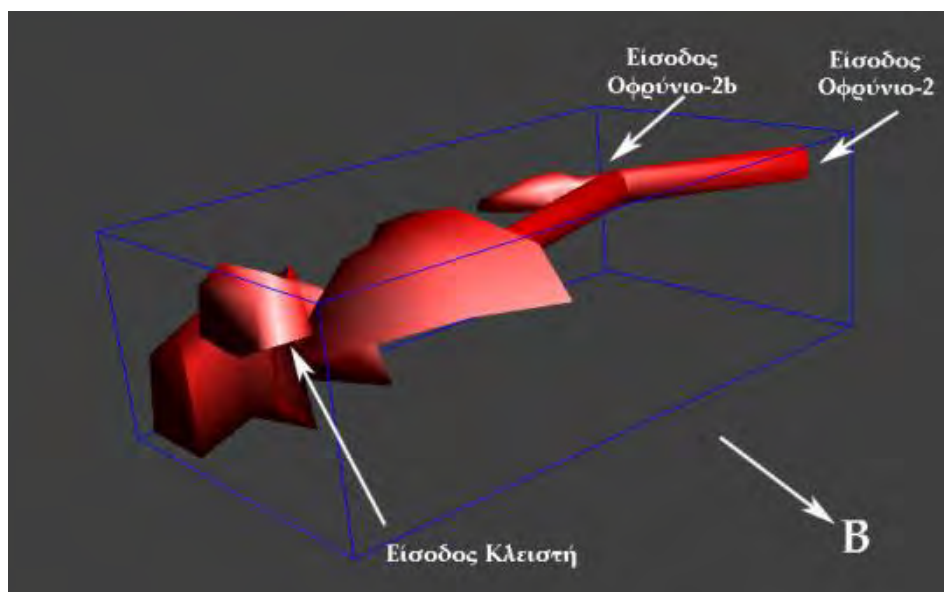


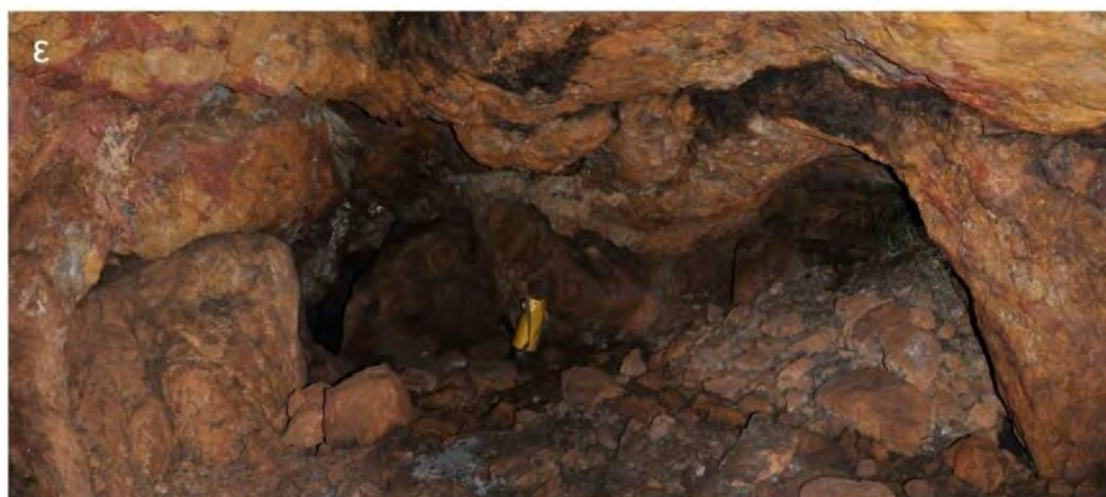
Στο ανατολικό τμήμα της στοάς «Οφρύνιο-2» γίνεται αντιληπτό ότι η εκμετάλλευση αν και ξεκίνησε στο οριζόντιο επίπεδο με ύψος διαδρόμων περίπου 1 m, στη συνέχεια ακολούθησε κατά βάθος τη μεταλλοφορία (Εικ. 8.8.2.3.3.γ, δ, ε). Ο συνολικός όγκος της στοάς είναι 174 m³. Η θερμοκρασία στο εσωτερικό της είναι 12,9°C και η σχετική υγρασία 100%.

Εικόνα 8.8.2.3.1. Ίχνη του μεταλλευτικού σφυριού από τη στοά Οφρύνιο-2.



Εικόνα 8.8.2.3.2 Κάτοψη και τρισδιάστατη απεικόνιση της υπόγειας στοάς «Οφρύνιο-2».



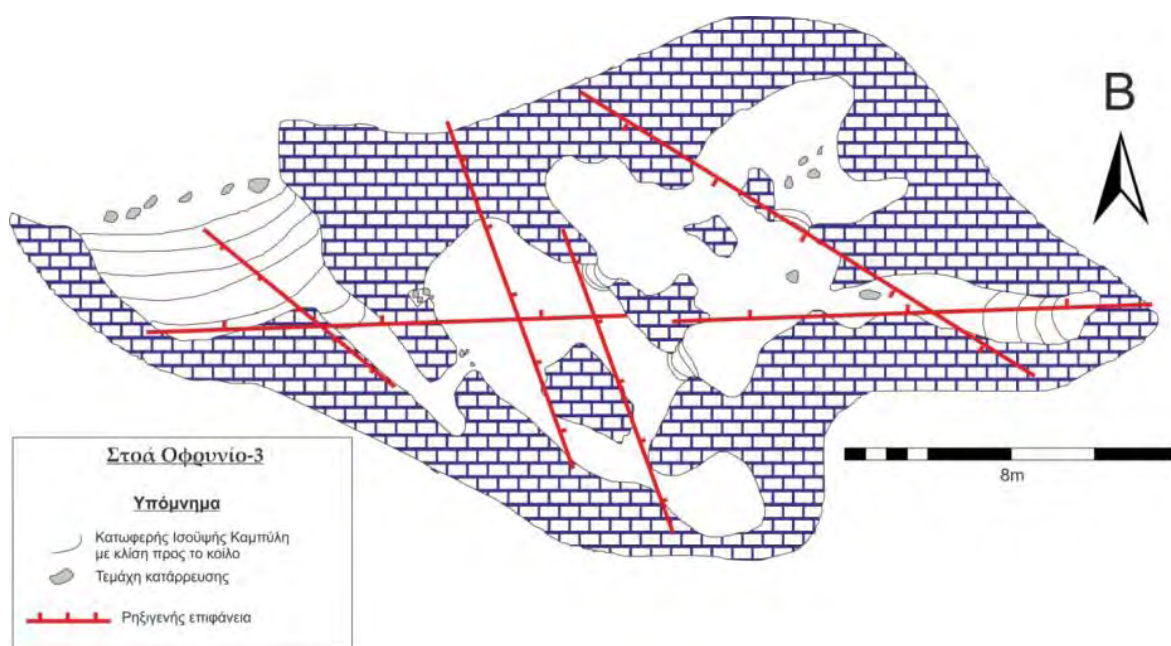


Εικόνα 8.8.2.3.3 α) Εκβολάδες στην περιοχή της ανατολικής εισόδου της στοάς «Οφρύνιο-2». β) Πληρωμένη στοά «Οφρύνιο-2b» γ) Αλληπάλληλα επίπεδα εκμετάλλευσης. δ) Σημείο εξόρυξης της μεταλλοφορίας. ε) Αποψη από το ανατολικό τμήμα της στοάς »Οφρύνιο-2« με συσσωρευμένα απορρίμματα της εξόρυξης στα δεξιά (περιοχή κύριας εισόδου).

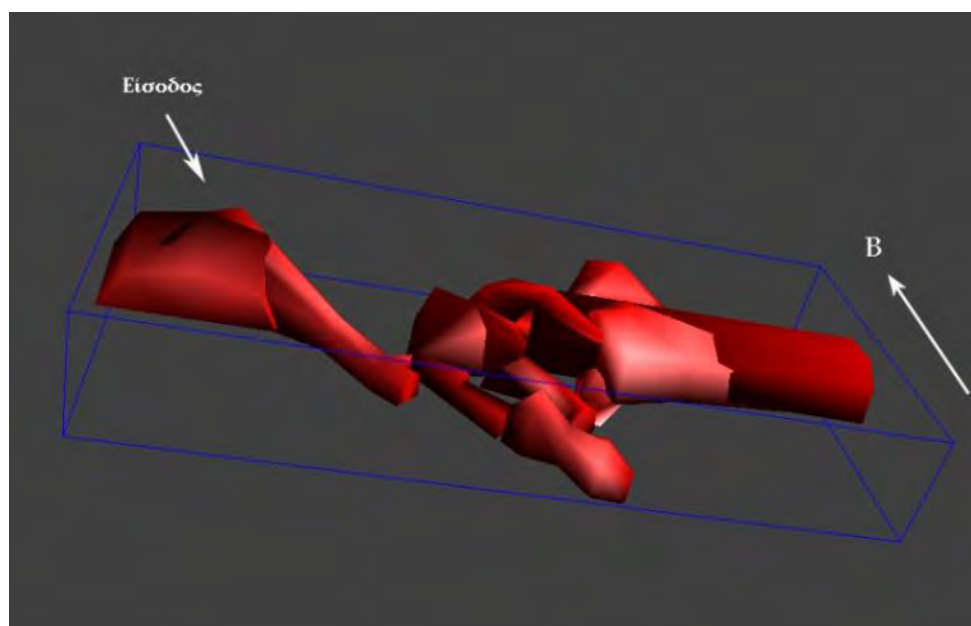
8.8.2.4 Υπόγεια Στοά Οφρύνιο-3

Η είσοδος της στοάς «Οφρύνιο-3» βρίσκεται 24 m ανατολικά από την κύρια είσοδο της στοάς «Οφρύνιο-2» διανοιγόμενη σε μάρμαρα. Έχει διαστάσεις 5 m x 1,5 m (πλάτος x ύψος), σχηματίζοντας μία μικρή βραχοσκεπή με βάθος 3 m (Εικ. 8.8.2.4.1). Στη συνέχεια η στοά διακλαδίζεται προς τα ανατολικά μέσα στη μάζα των μαρμάρων (Εικ. 8.8.2.4.2-3). Έχει διανοιχθεί σε οριζόντιο επίπεδο με συνολικό μήκος στοών 66 m.

Τα εργαλεία που έχουν χρησιμοποιηθεί όπως προκύπτει από τη μελέτη των ιχνών τους στα τοιχώματα της στοάς είναι το σφυρί και το καλέμι. Ο συνολικός της όγκος υπολογίζεται στα 183 m³. Η θερμοκρασία στο εσωτερικό της κυμαίνεται μεταξύ 11 και 12,9°C και η σχετική υγρασία 100%.



Εικόνα 8.8.2.4.1 Κάτοψη και τρισδιάστατη απεικόνιση της υπόγειας στοάς «Οφρύνιο-3».





Εικόνα 8.8.2.4.2 Άποψη της εισόδου της στοάς Οφρύνιο-3.



Εικόνα 8.8.2.4.3 Άποψη από τον κεντρικό θάλαμο της στοάς Οφρύνιο-3.

8.8.3 Αρχαιολογικά ευρήματα στις μεταλλευτικές εργασίες της περιοχής Δυτικού Παγγαίου

Στη δυτική απόληξη της μεταλλευτικής εργασίας Νέα Φυλή-1 και στα κατάντη της επιφανειακής εξόρυξης παρατηρείται επιφανειακή κεραμική Ρωμαϊκών χρόνων. Επίσης, παρατηρούνται διάσπαρτα υπολείμματα από τον καθαρισμό του μεταλλεύματος.

Στο εσωτερικό της μεταλλευτικής στοάς Οφρύνιο-3 η παρατηρούμενη επιφανειακή κεραμική τοποθετείται στους Ρωμαϊκούς χρόνους, ενώ στις υπόλοιπες στοές δεν εντοπίστηκε επιφανειακή κεραμική.

Στην ευρύτερη περιοχή του Οφρυνίου έχουν βρεθεί εγκαταστάσεις Αρχαϊκής, Κλασικής, Ελληνιστικής και Ρωμαϊκής περιόδου (στοιχεία από ΙΗ' ΕΠΚΑ). Επιπρόσθετα, καταγράφονται οικισμοί προϊστορικών χρόνων.

8.8.4 Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Μεταλλεύματος

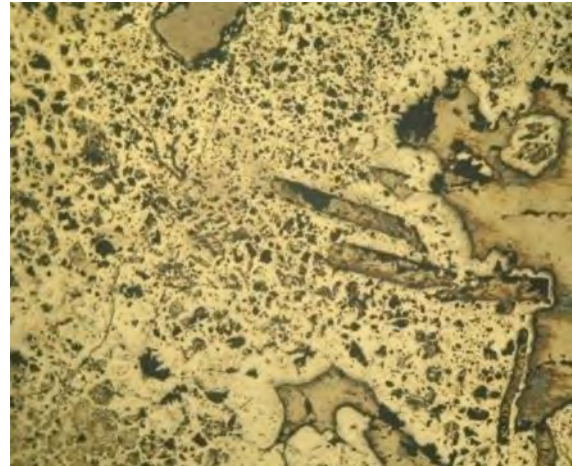
Από τη μεταλλοφορία του Δυτικού Παγγαίου ελήφθησαν δείγματα μεταλλεύματος από την επιφανειακή εξόρυξη Νέα Φυλή-1 (PFM-1), από τις εξωτερικές εκβολάδες της στοάς Οφρύνιο-2 (POF-1) και από το εσωτερικό της στοάς Οφρύνιο-3 (POF-3).

Η μεταλλοφορία της περιοχής του Οφρυνίου-Νέας Φυλής είναι οξειδωμένη και τα βασικότερα ορυκτά της είναι ο γκαιτίτης και ο βαρύτης (Εικ. 8.8.4.1-2).

Από τις χημικές αναλύσεις που έγιναν στα δείγματα προκύπτει ότι στη μεταλλοφορία του Δυτικού Παγγαίου η περιεκτικότητα σε Au είναι πολύ χαμηλή και φθάνει έως 0,01 ppm, ενώ σε Ag κυμαίνεται από 22,00 έως 75,51 ppm (Πίν. 8.8.4.1).



Εικόνα 8.8.4.1 Γκαιτίτης με βαρύτη στην περιοχή του Οφρυνίου, στο Δυτικό Παγγαίο. Μήκος φωτογραφίας 13mm.



Εικόνα 8.8.4.2 Γκαιτίτης με βαρύτη από την περιοχή Οφρυνίου. Μεταλλογραφικό μικροσκόπιο, //N, μήκος φωτογραφίας 1mm.

Ο Pb έχει περιεκτικότητα που κυμαίνεται από 0,1 έως 0,2 wt %, ο Zn από 0,05 έως >0,1 wt %, το As από 53,40 έως 4265,30 ppm και το Sb έχει περιεκτικότητα από 163,27 έως >2000,00 ppm. Επίσης στο δείγμα (POF-3) από το Οφρύνιο βρέθηκαν σχετικά υψηλές περιεκτικότητες σε V (1635,00 ppm), La (57,70 ppm) και Ce (78,40 ppm) (Πίν. 8.8.4.1).

Σε χημικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν από τον Επιτρόπου (1993) από γεωτρήσεις στα μάρμαρα της περιοχής ο Ag βρίσκεται σε πολύ χαμηλή περιεκτικότητα (0,6 ppm), ενώ σε υψηλές περιεκτικότητες βρίσκεται το Ba (5400-22400 ppm).

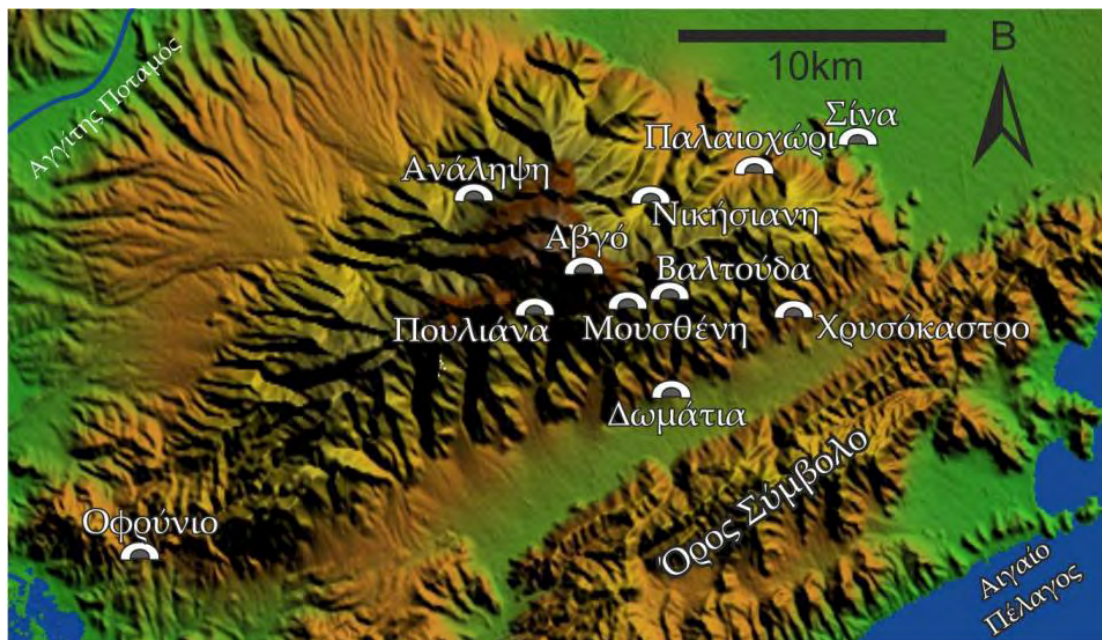
Πίνακας 8.8.4.1 Περιεκτικότητες των βασικών οξειδίων (wt %) και επιλεγμένων ιχνοστοιχείων (ppm) από δείγματα στην περιοχή Δυτικού Παγγαίου. Ο ολικός σίδηρος εκφράζεται σε Fe₂O₃. (bdl: κάτω του ορίου ανιχνευσιμότητας, na: δεν αναλύθηκε)

	PFM-1	POF-1	POF-3	M-1 (Επιτρόπου, 1993)	M-2 (Επιτρόπου, 1993)
SiO ₂	na	na	na	na	na
Al ₂ O ₃	0,17	0,11	0,42	0,56	0,75
Fe ₂ O ₃	1,20	47,31	20,90	6,50	5,30
MgO	0,07	0,18	0,18	15,2	0,58
CaO	0,98	3,26	2,32	29,4	44,8
Na ₂ O	0,03	0,00	bdl	0,02	0,01
K ₂ O	0,04	bdl	0,01	0,06	0,16
TiO ₂	0,00	0,00	0,04	na	na
P ₂ O ₅	0,07	0,09	1,01	na	na
MnO	0,02	0,59	0,26	0,40	0,40
Au	0,01	0,00	0,00	na	na
Ag	75,51	21,51	22,00	0,60	0,60
Cu	51,27	32,27	236,73	29,00	72,00
Pb	18503,19	11011,64	17013,73	1500,00	830
Zn	>10000,00	5574,40	9412,00	315,00	400,00
As	186,40	53,40	4265,30	0,00	0,00
Bi	0,07	0,12	0,19	na	na
Ba	1879,50	3133,60	592,10	22400,00	5400,00
Be	bdl	0,20	11,40	na	na
Cr	6,10	5,30	41,00	na	na
Sr	39,60	52,90	12,80	na	na
Th	0,60	0,30	14,70	na	na
U	2,50	11,90	10,00	na	na
V	3,00	6,00	1635,00	na	na
W	bdl	0,20	61,30	na	na
La	2,00	0,90	57,70	na	na
Ce	2,30	1,20	78,40	na	na
Mo	2,18	15,44	20,67	na	na
Ni	23,70	19,10	17,30	na	na
Cd	103,32	18,51	16,67	na	na
Sb	387,90	163,27	>2000,00	bdl	bdl
Hg	31,00	21,9	15,46	na	na
Te	0,05	0,04	0,05	na	na
B	44,00	5,00	38,00	na	na

9. ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ ΣΤΟ ΟΡΟΣ ΠΑΓΓΑΙΟ

Στην περιοχή του Παγγαίου, στο πλαίσιο της εκπόνησης της παρούσας διατριβής, εντοπίστηκαν 11 περιοχές αρχαίας μεταλλουργικής δραστηριότητας (Εικ. 9.1). Από αυτές πολλές είναι γνωστές και μελετήθηκαν από διάφορους ερευνητές στο παρελθόν (Παπασταματάκη, 1975; 1985; Unger, and Schütz, 1981; Nerantzis, 2009a). Κάποιες περιοχές μεταλλουργικής δραστηριότητας έχουν περιορισμένη έκταση και για αυτό το λόγο ορίζονται ως «θέσεις». Οι θέσεις αυτές εντοπίζονται σε περιοχές του Οφρυνίου, στην κορυφή «Αβγό», βόρεια της Μουσθένης και στο Χρυσόκαστρο, ενώ μεγάλης έκτασης θεωρούνται αυτές στην περιοχή της Ανάληψης, στην Πουλιάνα Μεσορόπης, στα Δωμάτια, στη Νικήσιανη, στη Βαλτούδα, στο Παλαιοχώρι και στην περιοχή Σίνα Αντιφιλιππων. Αξίζει να ανφερθεί ότι μεγάλο ποσοστό των μεταλλουργικών σκωριών έχει χρησιμοποιηθεί στην επίστρωση των αγροτικών και δασικών δρόμων με αποτέλεσμα τον περιορισμό του όγκου τους.

Επίσης, σκωρίες εντοπίζονται στα θεμέλια αρκετών κτισμάτων στη σημερινή Ελευθερούπολη λόγω της ύπαρξης μεταλλουργικού κέντρου παραγωγής σιδήρου κατά την Οθωμανική περίοδο σύμφωνα με ένα φιορμάνι του 1583 μ.Χ. (Anhegger, 1943; Murphey, 1980). Η κατηγορία αυτή δεν μελετήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Θέσεις αρχαίας μεταλλουργίας εντοπίζονται και σε περιοχές γειτονικού όρους Συμβόλου, οι οποίες επίσης δεν περιγράφονται στο παρόν πόνημα.

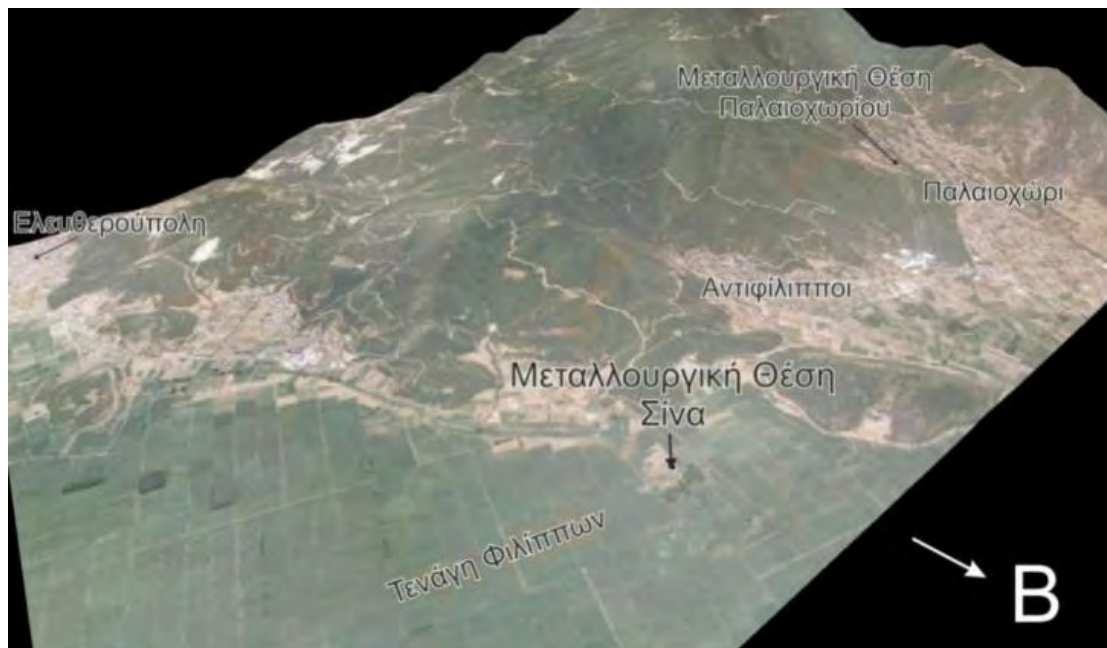


Εικόνα 9.6 Γεωγραφική τοποθέτηση των περιοχών και θέσεων με μεταλλουργική δραστηριότητα στο όρος Παγγαίο.

9.1 Μεταλλουργική Περιοχή Σίνα

9.1.1 Περιγραφή Θέσης

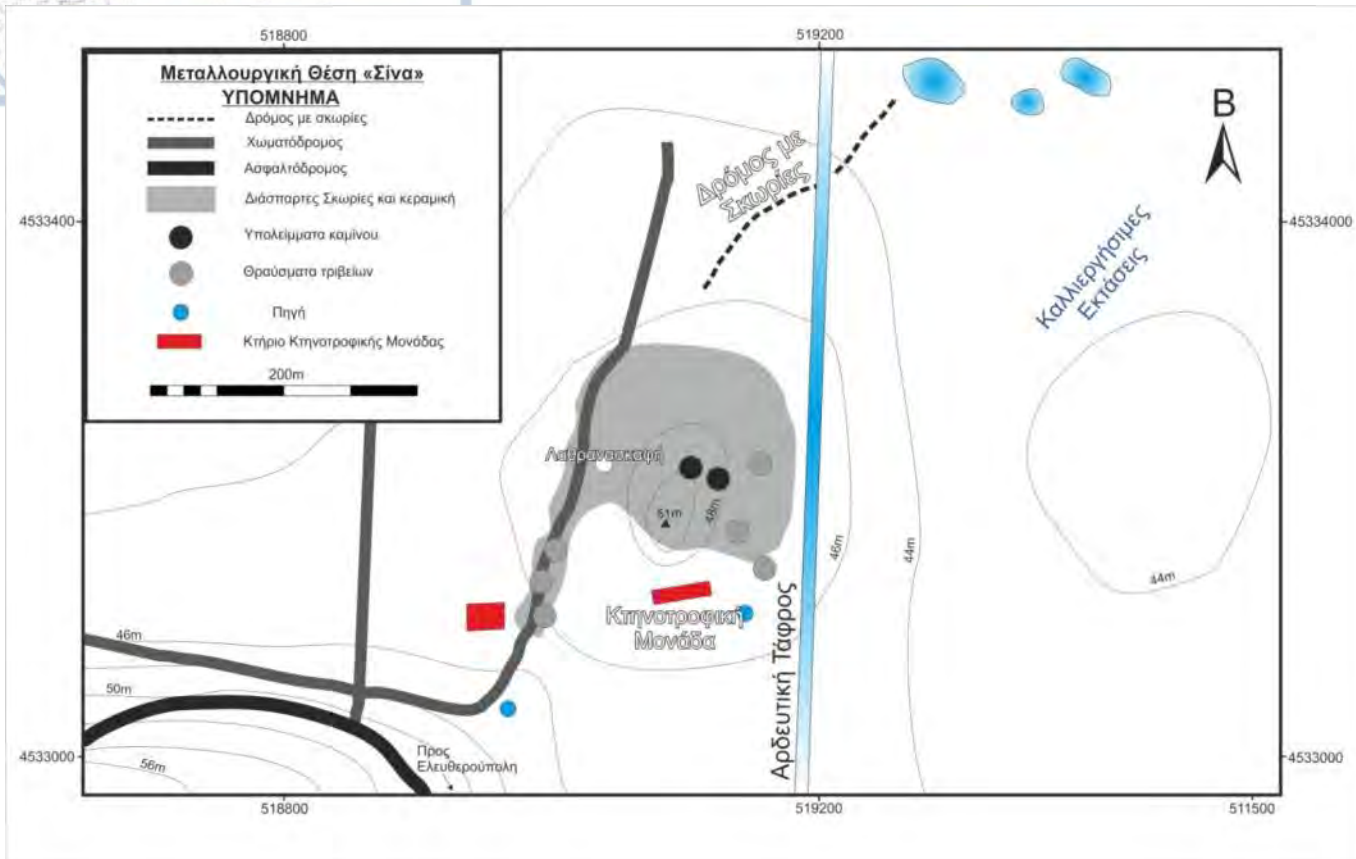
Ο λόφος στην περιοχή Σίνα βρίσκεται στο βορειοανατολικό άκρο του Παγγαίου, 1,5 km βορειοανατολικά του χωριού Αντιφίλιπποι και 4 km βορειοδυτικά της Ελευθερούπολης (Εικ. 9.1.1.1). Καλύπτει έκταση περίπου 35 στρεμμάτων (35.000 m²). Στα βόρεια και βορειοανατολικά του λόφου Σίνα εκτείνονται τα τενάγη των Φιλίππων (Εικ. 9.1.1.2). Η κορυφή του έχει υψόμετρο 51 m, ενώ η βάση του 46 m (A.S.L.). Στο νότιο και νοτιοδυτικό του τμήμα υπάρχουν δύο κτηνοτροφικές μονάδες.



Εικόνα 9.1.1.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση της ευρύτερης περιοχής της μεταλλουργικής θέσης «Σίνα».



Εικόνα 9.1.1.2 Νότια πλευρά του λόφου Σίνα. Στο βάθος δεξιά διακρίνονται τα τενάγη των Φιλίππων.



Εικόνα 9.1.1.3 Κάτοψη της μεταλλουργικής περιοχής Σίνα.

Τα ίχνη της μεταλλουργικής δραστηριότητας εντοπίζονται κυρίως στο βόρειο τμήμα του λόφου (Εικ. 9.1.1.3), όπου παρατηρούνται διάσπαρτες μεταλλουργικές σκωρίες επιφανειακά (9.1.1.4.α) και σε κάποιες περιπτώσεις μέχρι βάθος 10 cm. Το κάλυμμα αυτό με σκωρίες συνοδεύεται κατά θέσεις με κεραμική πιθανώς ρωμαϊκής περιόδου και καλύπτει έκταση περίπου 25 στρεμμάτων. Στο δυτικό τμήμα του λόφου υπάρχει λαθρονασκαφική τομή βάθους περίπου 50 cm, ενώ στο κεντρικό και βόρειο τμήμα παρατηρούνται τμήματα πιθανώς μεταλλουργικών καμίνων, αποτελούμενα από τεμάχια γνευσίων συγκολλημένα με αργιλικό συνδετικό υλικό (Εικ.9.1.1.4.β).

Στην ανατολική πλευρά του λόφου, αλλά και στη νοτιοδυτική απόληξη του λόφου Σίνα παρατηρούνται θραύσματα από τριβεία πιθανώς για την κονιοποίηση του μεταλλεύματος. Κάποια τεμάχια έχουν κοίλο σχήμα, ενώ άλλα είναι ορθογώνια παραλληλεπίπεδα (Εικ. 9.1.1.4.γ, δ). Τα ορθογώνια τεμάχια των τριπτήρων παρουσιάζουν εγκάρσιες ραβδώσεις παράλληλες ανά 1 cm περίπου, πιθανώς για τον αποτελεσματικότερο τεμαχισμό του μεταλλεύματος. Τα περισσότερα θραύσματα τριπτήρων παρατηρούνται στο νοτιοδυτικό τμήμα του

λόφου, ενώ κάποια έχουν εντοπιστεί και στο ανατολικό πρανές. Επίσης, στις νότιες υπώρειες το λόφου υπάρχουν δύο πηγές νερού.



Εικόνα 9.1.1.4 α) Μεταλλουργικές σκωρίες στη βόρεια πλευρά του λόφου Σίνα. β) Τμήματα πιθανώς μεταλλουργικών καμίνων. γ) Τριπτήρας ορθογώνιου σχήματος με παράλληλες αυλακώσεις εγκάρσια στις πλευρές του. δ) Τμήμα τριπτήρα με κοίλη τη μία πλευρά του και παράλληλες αυλακώσεις στην επιφάνειά του.

9.1.2 Περιγραφή – Ορυκτολογική και Χημική Σύσταση Υπολειμμάτων Μεταλλουργίας

Οι σκωρίες που συναντώνται στη μεταλλουργική θέση Σίνα είναι συμπαγείς έως ημισυμπαγείς, με ειδικό βάρος περίπου $3,6 \text{ gr/cm}^3$ και είναι μερικώς μαγνητικές. Πολλές από τις σκωρίες περιέχουν στη μάζα τους τμήματα speiss.

Από τη μικροσκοπική μελέτη προέκυψε ότι τα κύρια ορυκτά των σκωριών στο λόφο Σίνα είναι ο βουστίτης και ο κιρσταϊνίτης, τα οποία βρίσκονται μέσα σε υαλώδη μάζα (Εικ. 9.1.2.1.α, β). Επιπλέον εντοπίζεται χαλκοσύνης με κατακλαστική υφή (Εικ. 9.1.2.1.δ). εντοπίζονται επίσης Τα κοκκία με μεταλλικό

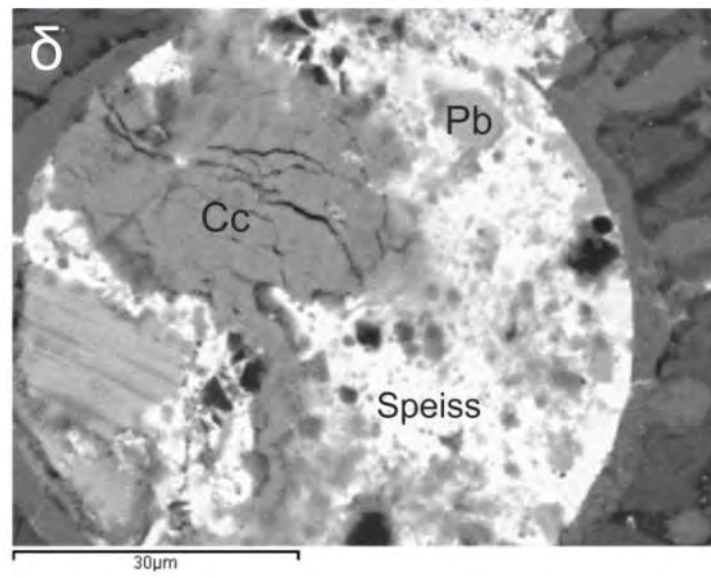
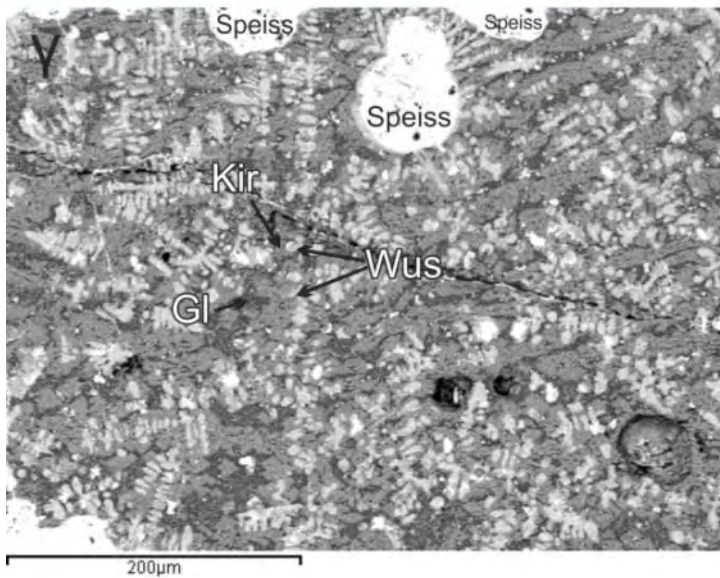
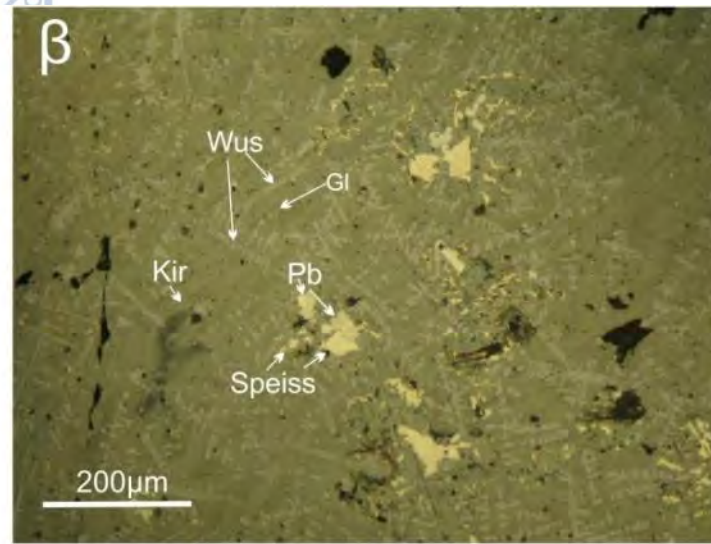
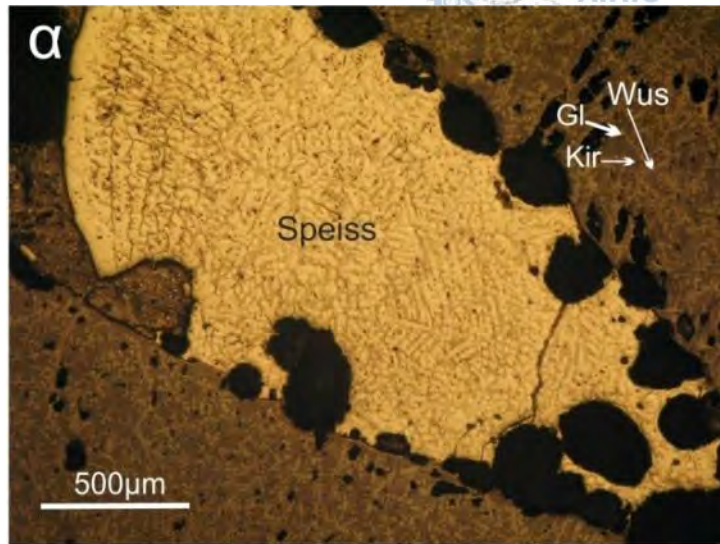
Pb και Cu ή σύστασης speiss στη μάζα της σκωρίας έχουν μορφή σφαιρική, ωοειδή ή ακανόνιστη (Εικ. 9.1.2.1.γ, δ). Ο βουστίτης παρουσιάζει δένδριτική μορφή μέσα στην ναλώδη μάζα, η οποία προσεγγίζει τη χημική σύσταση του ανορθίτη. Ο μεταλλικός Pb μέσα στα κοκκία παρουσιάζει ίχνη Fe, Sb, Cr και S. Τα κοκκία speiss αποτελούνται κυρίως από Fe, As, Cu και Sb, (Πίν. 9.1.2.1) με ίχνη από Pb, Pt και S.

Πίνακας 9.1.2.1 Μικροαναλύσεις σε κοκκία speiss (Speiss prills).

wt%	Speiss (a)	Speiss (b)	Speiss (c)	Speiss (d)	Speiss (e)
Fe	49,23	40,48	40,99	45,13	43,01
As	41,52	49,91	46,45	53,54	47,23
Cu	0,00	0,00	0,00	1,33	2,87
Sb	7,72	9,63	12,13	0,00	3,27
S	1,52	0,00	0,53	0,00	3,61
Σ	99,99	100,02	100,10	99,99	99,98

Ο συντελεστής ιξώδους των σκωριών από τη θέση Σίνα είναι $\eta_i=2,72$ δείχνοντας ότι πρόκειται για ιδιαίτερα λεπτόρρευστη σκωρία. Ο παράγοντας G έχει τιμή 0,15. Ο παράγοντας S έχει τιμή 0,77 δείχνοντας μία σκωρία με υψηλό ποσοστό σε βουστίτη.

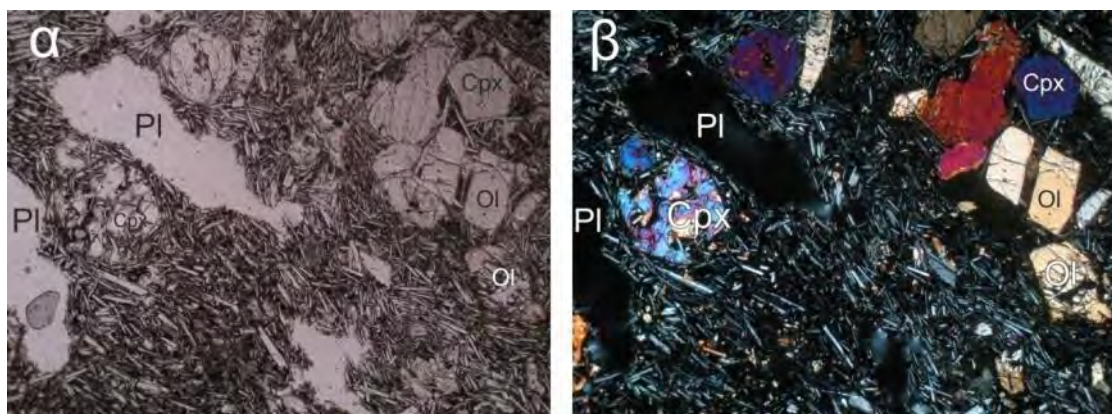
Από τις χημικές αναλύσεις ολικού δείγματος (Πίν. 9.1.2.2) προκύπτει ότι ο Au έχει περιεκτικότητα από 0,06 έως 1,04 ppm (μ.ο. 0,55 ppm) και ο Ag από 1,58 ppm μέχρι >100,00 ppm. Η περιεκτικότητα σε Fe_2O_3 είναι από 55,10 έως 61,79 wt % (μ.ο. 58,45 wt %), του Pb έως 1,5 wt %, του Cu από 494,55 έως 1458,00 ppm (μ.ο. 976,28 ppm), του Zn από 1402,00 έως 2152,50 ppm (μ.ο. 1777,25 ppm) και του As από 2359,80 έως 7400,10 ppm (μ.ο. 4879,95) (Παράρτημα Γ). Ιδιαίτερα υψηλή περιεκτικότητα εμφανίζει το Sb με πάνω από 2000,00 ppm. Αξιόλογες περιεκτικότητες έχουν και τα ιχνοστοιχεία Ba (μ.ο. 238,00 ppm), Sr (μ.ο. 155,50 ppm), Sn (μ.ο. 83,80 ppm), Bi (μ.ο. 83,93 ppm), Cr (μ.ο. 61,60 ppm), Rb (μ.ο. 32,90 ppm), V (31,00 ppm), La (μ.ο. 45,00 ppm) και Ce (μ.ο. 42,75 ppm).



Εικόνα 9.1.2.1 Φωτογραφίες από μεταλλουργικές σκωρίες στο λόφο Σίνα. α) Κοκκίο αποτελούμενο από SPEISS μέσα στη μάζα της μεταλλουργικής σκωρίας. Μεταλλογραφικό μικροσκόπιο //N. β) Δενδριτικός βουσιτίτης (Wus) με κιρσταϊνίτη (Kir) σε ναλώδη μάζα (Gl). Διακρίνονται τα σφαιρίδια από speiss και μολύβδο (Pb) (λευκοκίτρινο χρώμα). Μεταλλογραφικό μικροσκόπιο //N. γ) Δενδριτικός βουσιτίτης (Wus), με κιρσταϊνίτη (Kir) μέσα σε ναλώδη μάζα (Gl). Διακρίνονται σφαιρικά κοκκία Speiss με περιεκτικότητες σε Cu από 1 έως 11%. SEM, back scattering image. δ) Κοκκίο Pb και Speiss με περιεκτικότητα σε Cu έως και 18%. Διακρίνεται ο χαλκοσύνης (Cc) με κατάκλαστική υφή. SEM, back scattering image.

Τα τεμάχια των γνευσίων που εντοπίζονται στο λόφο Σίνα συνδέονται μεταξύ τους με αργιλικό υλικό. Επίσης, παρουσιάζουν σε σημεία τους σημάδια υαλοποίησης. Πιθανώς πρόκειται για τμήματα από τα τοιχώματα μεταλλουργικής καμίνου.

Τα τριβεία αποτελούνται από ολιβινικό βασάλτη (βασαλτικό τραχειανδεσίτη) με χαρακτηριστική σκωριώδη υφή, όπως έδειξε η μικροσκοπική μελέτη τους. Στη μάζα του ηφαιστίτη παρατηρούνται κυρίως φαινοκρύσταλλοι πλαγιόκλαστων και κατά θέσεις πυροξένων και ολιβίνη, μέσα σε μία μικροκρυσταλλική μάζα από πλαγιόκλαστα (Εικ. 9.1.2.2.α, β). Η μελέτη των πλαγιόκλαστων στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM) έδειξε ότι πρόκειται για βυτωβνίτης. Το ευρεθέν βασαλτικό υλικό παρουσιάζει ομοιότητες σε ότι αφορά την ορυκτολογική και χημική του σύσταση με το βασαλτικό πέτρωμα από τις Μικροθήβες Μαγνησίας (Βαβάλιου, 2014) παρέχοντας ενδείξεις για ανάλογες εμπορικές σχέσεις.



Εικόνα 9.1.2.2 Φωτογραφίες του ολιβινικού βασάλτη των λίθινων τριβείων α) Πλαγιόκλαστα (Pl), ολιβίνης (Ol) και κλινοπυρόξενοι (Cpx) μέσα σε μικροκρυσταλλική μάζα πλαγιόκλαστων. //N, Πολωτικό μικροσκόπιο. Μήκος φωτογραφίας 1 mm. β) Η εικόνα 9.1.2.1α με +N.

9.1.3 Δρόμος με μεταλλουργικές σκωρίες

Από τη βόρεια πλευρά του λόφου Σίνα εντοπίζεται δρόμος άγνωστης χρονολόγησης με πλάτος που κυμαίνεται από 2,50 έως 2,80 m κατασκευασμένος με βασικό υλικό τις μεταλλουργικές σκωρίες. (Εικ. 9.1.3.1). Το πάχος του είναι 10-16 cm και διέρχεται μέσα από την τύρφη στα τενάγη των Φιλιππων. Ως συνδετικό υλικό χρησιμοποιείται άργιλος, πιθανότατα από την εγγύς περιοχή. Ανάμεσα στις σκωρίες παρατηρείται και αδιάγνωστη κεραμική. Ο δρόμος στο πρώτο του τμήμα έχει μήκος 117 m και κατεύθυνση προς τα βορειοανατολικά, διακοπτόμενος από την κατασκευή μίας σύγχρονης αρδευτικής τάφρου. Μετά την τάφρο ένα δεύτερο τμήμα του συνεχίζει για άλλα 48 m και μετά χάνεται στην περιοχή βορειοανατολικά του λόφου Σίνα μέσα σε μία συστάδα λιμνών.

Ανάμεσα στις λίμνες εντοπίζονται σποραδικά σκωρίες, αλλά χωρίς σαφές ίχνος του δρόμου. Η κατεύθυνση του δρόμου οδηγεί προς τους Φιλίππους. Η παρουσία αυτού του δρόμου με τις σκωρίες δείχνει σαφώς την επανάχρηση των υπολειμμάτων της εκκαμίνευσης. Βέβαια αποτελεί ζητούμενο η εύρεση και άλλων τμημάτων του προς την περιοχή των Φιλίππων.



Εικόνα 9.1.3.1 Άποψη του δρόμου με τις σκωρίες.

9.2 Μεταλλουργική Θέση Χρυσόκαστρου

9.2.1 Περιγραφή Θέσης

Η μεταλλουργική θέση στο Χρυσόκαστρο δεν παρουσιάζει επιφανειακά μεγάλη ποσότητα μεταλλουργικών σκωριών. Οι διάσπαρτες σκωρίες εντοπίζονται κυρίως στο δυτικό πραινές του λόφου «Αετοπλαγιά», που βρίσκεται περίπου 1200 m βορείως του χωριού Χρυσόκαστρο και 2300 m βορειοανατολικά του χωριού Αυλή (Εικ. 9.2.1.1). Η μεταλλουργική θέση του Χρυσόκαστρου καλύπτει έκταση περίπου 5 στρεμμάτων σε υψόμετρο από 355 έως 408 m. Οι σκωρίες δείχνουν ότι προέρχονται από τα ανάντη σημεία της περιοχής, όπου όμως έχει λειτουργήσει σύγχρονο λατομείο, καταστρέφοντας το μεγαλύτερο μέρος της μεταλλουργικής θέσης. Στην περιοχή του λατομείου βρέθηκε επιφανειακή κεραμική.



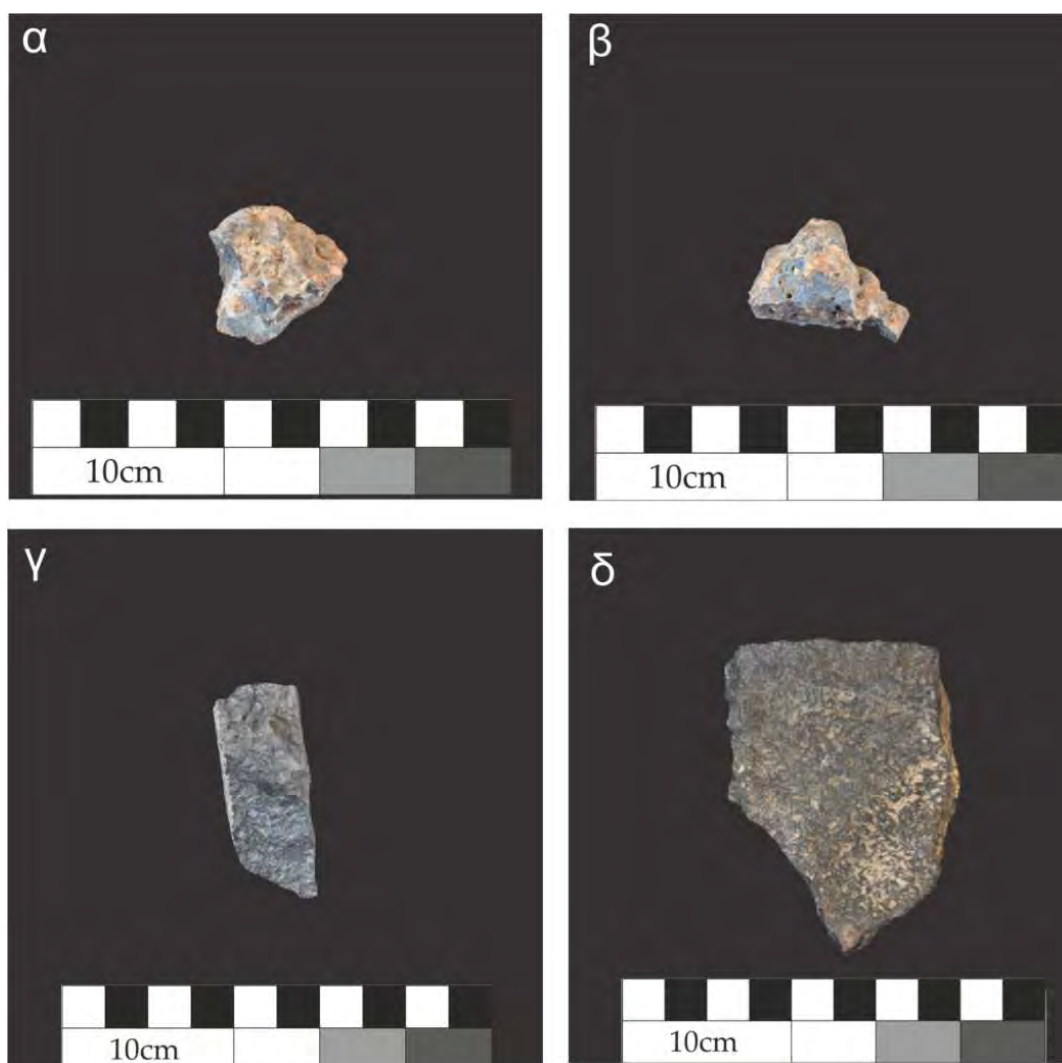
Εικόνα 9.2.1.1 Μεταλλουργική θέση Χρυσόκαστρου Παγγαίου.

9.2.2 Περιγραφή – Ορυκτολογική και Χημική Σύσταση Μεταλλουργικών Σκωριών

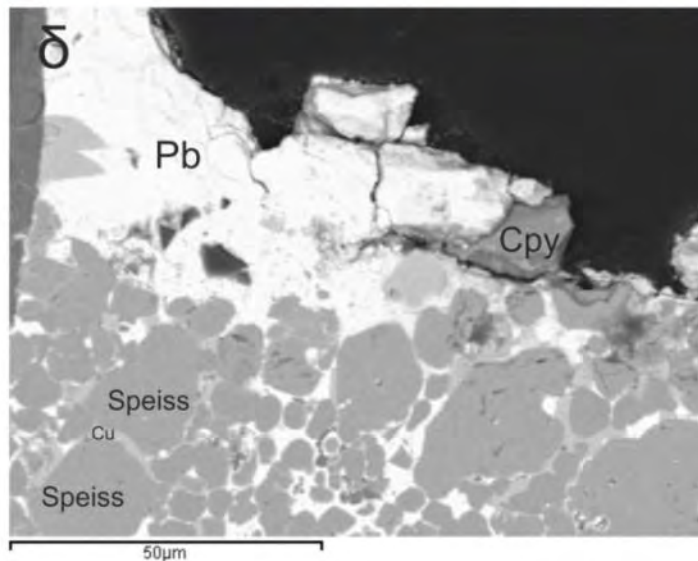
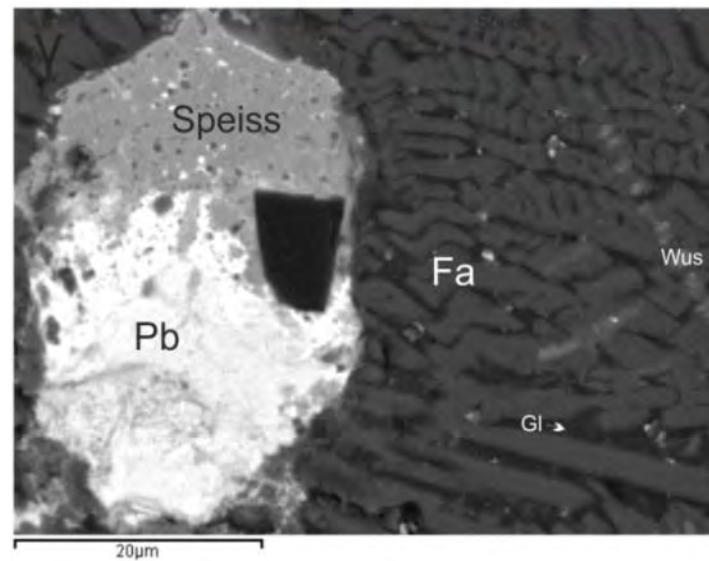
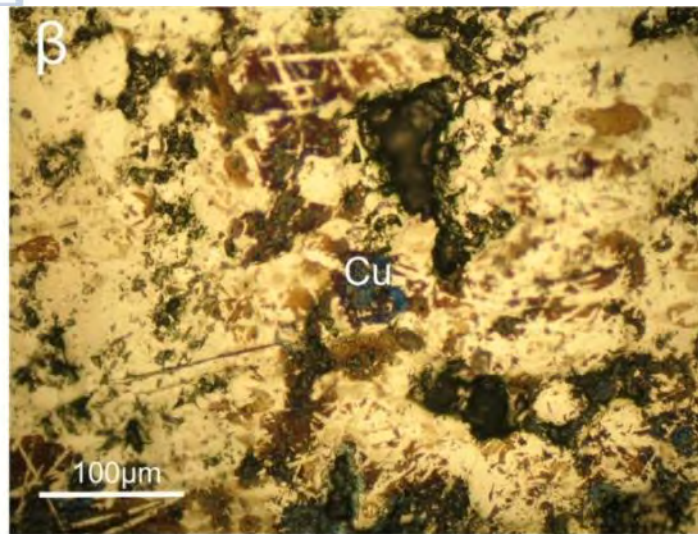
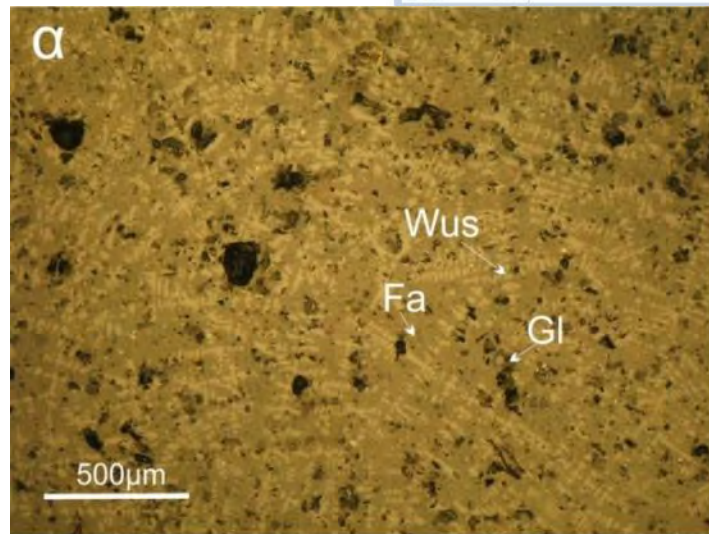
Οι μεταλλουργικές σκωρίες που εντοπίζονται στο δυτικό πραινές της Αετοπλαγιάς Χρυσόκαστρου είναι συμπαγείς έως ημισυμπαγείς (Εικ. 9.2.2.1.α-γ) και φέρουν έντονα σημάδια επιφανειακής εξαλλοίωσης. Έχουν ειδικό βάρος περίπου 3 gr/cm³ και είναι ασθενώς μαγνητικές. Ανάμεσα στα ευρήματα παρατηρείται μεγάλος αριθμός σκωριών speiss με πλεπατυσμένο σχήμα (Εικ. 9.2.2.1.δ).

Από τη μικροσκοπική μελέτη προέκυψε ότι τα κύρια ορυκτά των μεταλλουργικών σκωριών από τη θέση «Αετοπλαγιά» Χρυσοκάστρου είναι ο βουσίτης που παρουσιάζει δενδριτική μορφή, ο κίρσταϊνίτης και ο φαυαλίτης, τα οποία βρίσκονται μέσα σε υαλώδη μάζα με σύσταση ανορθίτη και ο χαλκοπυρίτης (Εικ. 9.2.2.2.α, β). Μέσα στη μάζα παρατηρούνται κοκκία με Pb και Cu ή speiss (Εικ. 9.2.2.2.γ). Τα κοκκία με Pb εμφανίζουν αξιόλογες περιεκτικότητες σε Sb (έως 50,43 wt %), σε Cl (έως 15,50 wt %), ενώ τα κοκκία speiss έχουν περιεκτικότητες σε Cu (έως 46,86 wt %) και σε Sb (έως 43,19 wt %). Επιπλέον, σε αριθμό σκωριών συναντάται χαλκοπυρίτης, ο οποίος παρουσιάζεται ως υπολείμμα από το μέταλλευμα στο τήγμα (Εικ. 9.2.2.2.δ).

Η χημική ανάλυση σε ένα δείγμα σκωρίας (βλ. παράρτημα, δείγμα PCH-1) έδειξε περιεκτικότητα σε Au 4,85 ppm και σε Ag >100,00 ppm. Η περιεκτικότητα του Fe₂O₃ στις σκωρίες είναι > 57,19 wt %, του Pb 0,71 wt %, του Cu 0,60 wt % και του As πάνω από 1,00 wt %. Ιδιαίτερα υψηλή περιεκτικότητα εμφανίζει το Sb πάνω από 2000 ppm.



Εικόνα 9.2.2.1 Μεταλλουργικές σκωρίες από το λόφο «Αετοπλαγιά» Χρυσοκάστρου. α) Συμπαγής σκωρία β) Ημισυμπαγής σκωρία γ) Σκωρία speiss δ) Πεπλατυσμένη σκωρία speiss.

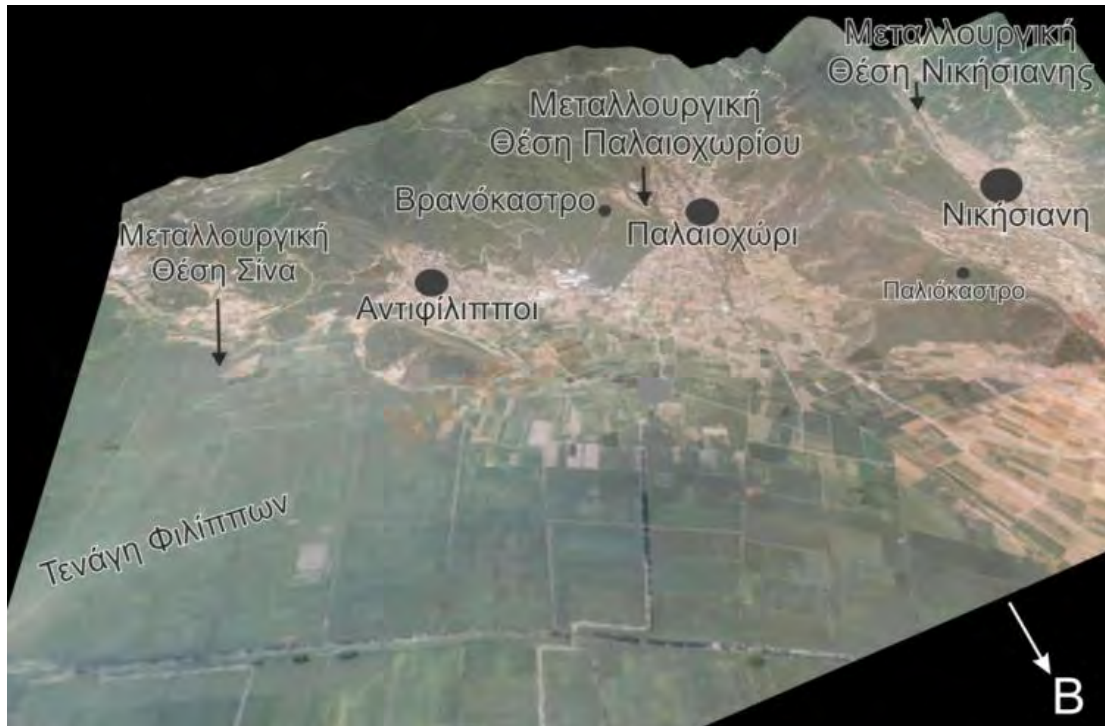


Εικόνα 9.2.2.2 Φωτογραφίες από σκωρίες στη θέση «Αετοπλαγιά» Χρυσοκάστρου. α) Δενδριτικός βουσίτης (Wus) και φαυαλίτης (Fa) μέσα σε υαλώδη μάζα (Gl). Μεταλλογραφικό μικροσκόπιο //N. β) Κοκκία Cu μέσα στη μάζα της σκωρίας. Μεταλλογραφικό μικροσκόπιο //N. γ) Δενδριτικός βουσίτης (Wus) με φαυαλίτη (Fa) μέσα σε υαλώδη μάζα (Gl). Κοκκία μεταλλικού Pb και speiss. SEM, back scattering image. δ) Μεταλλικός Cu και Pb ανάμεσα σε κοκκία speiss. Διακρίνεται χαλκοπυρίτης (Cpy) SEM, back scattering image.

9.3 Μεταλλουργική Περιοχή Παλαιοχωρίου

9.3.1 Περιγραφή θέσης

Η μεταλλουργική περιοχή του Παλαιοχωρίου βρίσκεται 200 m ανατολικά του ομώνυμου χωριού (Εικ. 9.3.1.1) και είναι γνωστή στους κατοίκους της περιοχής ως «Καμένες Πέτρες». Βρίσκεται σε πρανές με βορειανατολικό προσανατολισμό απέχοντας 530 m από το λόφο του «Βρανόκαστρου» και 1700 m από τη θέση «Παλιόκαστρο». Το Βρανόκαστρο αποτελεί φρούριο βυζαντινών χρόνων, ενώ στη θέση «Παλιόκαστρο» υπάρχει φρούριο ρωμαϊκών χρόνων.



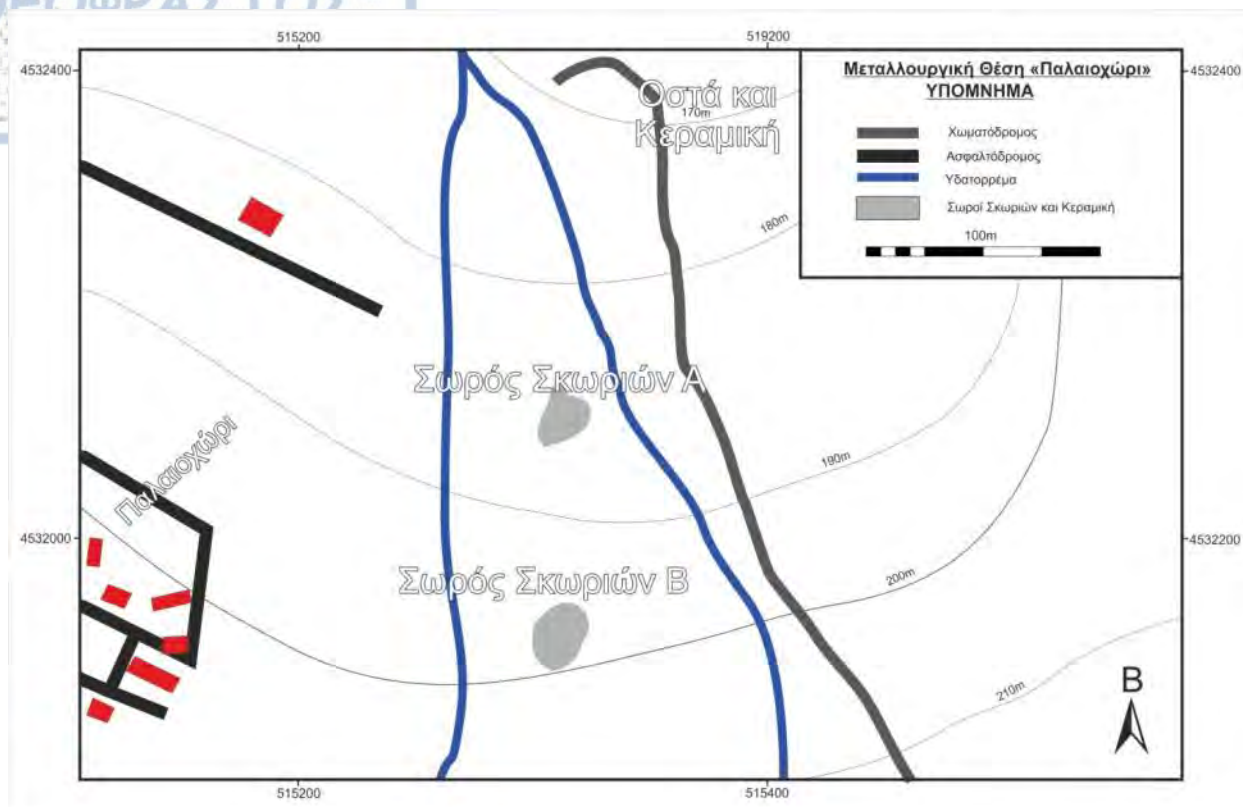
Εικόνα 9.3.1.1 Άποψη της μεταλλουργικής περιοχής του Παλαιοχωρίου. (υπόβαθρο: Basemap Ktimatologio)

Στην περιοχή εντοπίζονται δύο σωροί σκωριών (Α και Β) σε πρανές εκατέρωθεν ενός ρέματος ανατολικά του ρέματος του Τρανού Λάκκου με συνεχή ροή νερού καθ' όλη τη διάρκεια το χρόνου. Ο σωρός Α βρίσκεται σε υψόμετρο 186 m και έχει έκταση 629 m² (Εικ. 9.3.1.2.α, γ). Ο σωρός Β βρίσκεται 70 m νοτίως του σωρού Α, σε υψόμετρο 196 m και έχει έκταση 812 m² (Εικ. 9.3.1.2.β, δ).

Στην περιοχή βορειανατολικά των σωρών σκωριών του Παλαιοχωρίου εντοπίζονται διάσπαρτη κεραμική (Ρωμαϊκής και Υστεροβυζαντινής περιόδου) και ανθρώπινα οστά, πιθανώς προερχόμενα από τάφους. Κεραμική εντοπίζεται επίσης διάσπαρτη στους σωρούς των σκωριών (Εικ. 9.3.1.3).



Εικόνα 9.3.1.2 α) Ο σωρός σκωριών Α. Στο βάθος διακρίνεται στην κορυφή το Βρανόκαστρο. β) Η μεταλλουργική περιοχή του Παλαιοχωρίου. Με βέλος σημειώνεται ο σωρός σκωριών Β. Στο βάθος αριστερά διακρίνεται στην κορυφή του λόφου το «Βρανόκαστρο». γ) Αποψη των σκωριών του σωρού Α. δ) Αποψη των σκωριών του σωρού Β.



Εικόνα 9.3.1.3 Κάτοψη της μεταλλουργικής θέσης Παλιοχωρίου.

9.3.2 Περιγραφή – Ορυκτολογική και Χημική Σύσταση Μεταλλουργικών Σκωριών

Οι σκωρίες των δύο σωρών παρουσιάζουν όμοια χαρακτηριστικά (Εικ. 9.3.2.1.α,β). Είναι συμπαγείς έως ημισυμπαγείς με μέσο ειδικό βάρος $3,2 \text{ gr/cm}^3$. Ανάμεσα στις σκωρίες παρατηρούνται σκωρίες spreiss πεπλατυσμένες με ειδικό βάρος $4,5 \text{ gr/cm}^3$. Η πλειονότητα των σκωριών και των δύο σωρών είναι ασθενώς έως ισχυρά μαγνητικές.



Εικόνα 9.3.2.1 α) Ημισυμπαγής σκωρία ρευστικής μορφής από το σωρό Α. β) Ημισυμπαγής σκωρία ρευστικής μορφής από το σωρό Β.

Η μικροσκοπική μελέτη έδειξε ότι οι σκωρίες αποτελούνται κυρίως από φαυαλίτη-μοντισελίτη, μαγνητοπυρίτη και βουσίτη (Εικ. 9.3.2.2.α-δ). Οι ορυκτές αυτές μορφές βρίσκονται μέσα σε υαλώδη μάζα με σύσταση που προσομοιάζει τη χημική σύσταση αυγίτη. Ο φαυαλίτης έχει περιεκτικότητες σε Mg (έως 2,3 wt%) και Ca (έως 13,58 wt %), μέχρι το πολύμορφο του μοντισελλίτη. Η μορφή των κρυστάλλων του φαυαλίτη είναι κυρίως αλυσιδωτή, ενώ κατά θέσεις παρουσιάζουν σκαφοειδή μορφή. Οι σκαφοειδείς κρύσταλλοι έχουν μήκος από 400 έως 140 μm και πλάτος από 55 έως 80 μm . Οι αλυσιδωτοί κρύσταλλοι έχουν μήκος από 300 έως 900 μm και πλάτος από 40 έως 80 μm . Αυτές οι μορφές κρυστάλλων δείχνουν μία ταχύτητα κρυστάλλωσης 80° C/h (Donaldson, 1976), με τμήματα των σκωριών (πιθανών εσωτερικότερα) να έχουν ψυχθεί με πιο χαμηλό ρυθμό κρυστάλλωσης.

Ο βουσίτης εμφανίζεται ανάμεσα στους κρυστάλλους του φαυαλίτη και του μοντισελλίτη και στην υαλώδη μάζα.

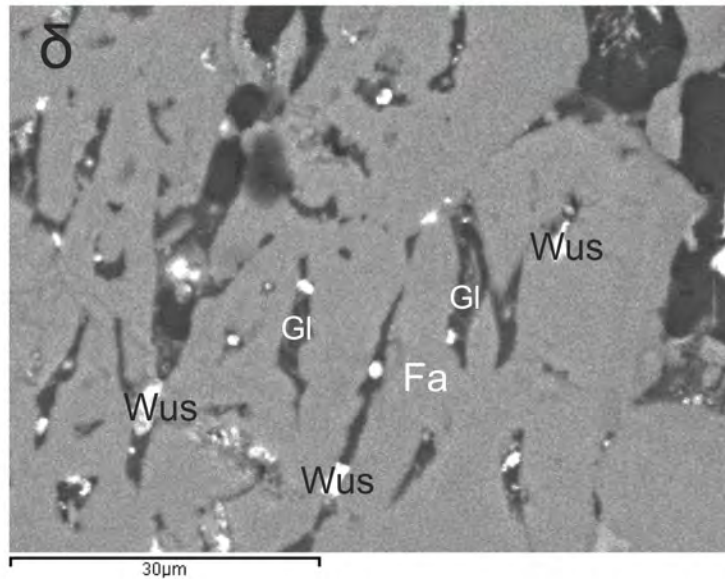
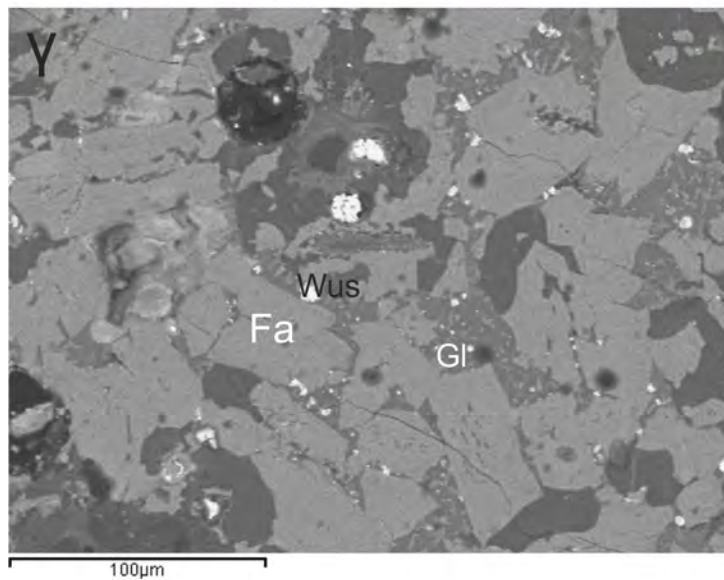
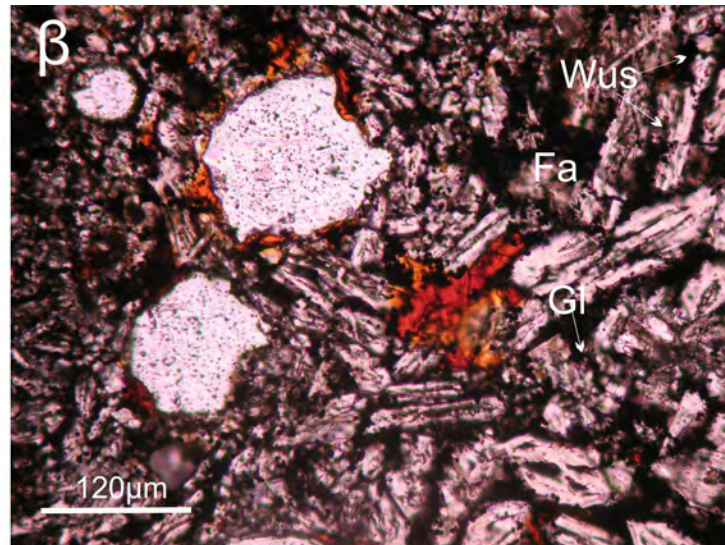
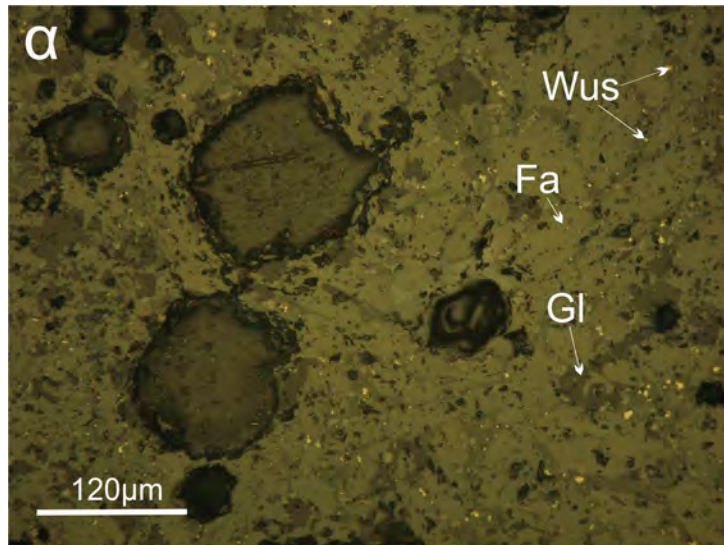
Μέσα στη μάζα της σκωρίας παρατηρούνται κοκκία Pb, καθώς και κοκκία σύστασης speiss. Η μορφή τους είναι συνήθως σφαιρική, ωοειδής έως ακανόνιστη. Μέσα στα κοκκία speiss ο Fe έχει περιεκτικότητα από 34,15 έως 64,34 wt%, το As από 11,29 έως 59,68 wt %, το Sb από 2,18 έως 10,46 wt %, ο Cu από 2,18 έως 26,42 wt %, ενώ εντοπίζονται και Mn (μ.ό. 1,75 wt %), Pb (μ.ό. 9,26 wt %) και Rh (μ.ό. 1,50 wt %).

Τα κοκκία αυτοφυσούς Pb περιέχουν Pb από 81,50 έως 100,00 wt %, Fe έως 18,10 wt % και ίχνη Sb (μ.ό. 2,79 wt %) και Ce (5,40 wt %).

Ο συντελεστής ιξώδους των σκωριών από τη μεταλλουργική περιοχή του Παλαιοχωρίου είναι $\eta=1,95$ δείχνοντας ότι πιθανώς πρόκειται για λεπτόρρευστη σκωρία με χαμηλό ιξώδες. Ο παράγοντας G έχει τιμή 0,20. Ο παράγοντας S έχει τιμή 1,10 δείχνοντας μία σκωρία σε μεγάλο ποσοστό φαυαλιτική.

Η χημική ανάλυση των σκωριών από τη μεταλλουργική περιοχή του Παλαιοχωρίου έδειξε περιεκτικότητες σε Au 0,17 ppm και σε Ag 1,96 ppm.

Ο Fe_2O_3 έχει περιεκτικότητα από 35,27 έως 42,42 wt %. Ο Cu εμφανίζει χαμηλές περιεκτικότητες (125,00-433,00 ppm), ενώ οι περιεκτικότητες που έχει ο Pb είναι 0,90 wt %, ο Zn 0,90 wt % και το As 0,40 wt %. Επίσης οι περιεκτικότητες σε Sb είναι 1540 ppm, σε Sr 287 ppm και σε Ba 826-417 ppm.



Εικόνα 9.3.2.2 Φωτογραφίες σε μικροσκόπιο από σκωρίες στη μεταλλουργική θέση Παλαιοχωρίου α) Βουσιτίτης (Wus) σε φαυαλίτη (Fa). Οι βαθύχρωμες φάσεις είναι η ναλώδης μάζα (Gl), ενώ διακρίνονται οι σπές της σκωρίας. Μεταλλογραφικό μικροσκόπιο, N//. β) Η φωτογραφία 9.3.5α με πολωτικό μικροσκόπιο. Διακρίνονται οι επιμήκεις κρύσταλλοι του φαυαλίτη. N//. γ) Φαυαλίτης (Fa) μέσα σε ναλώδη μάζα (Gl). Με λευκό χρώμα διακρίνεται ο βουσιτίτης (Wus). SEM Back scattering image. δ) Επιμήκεις κρύσταλλοι φαυαλίτη (Fa) μέσα σε ναλώδη μάζα (Gl). Με λευκό χρώμα διακρίνεται ο βουσιτίτης (Wus). SEM Back scattering image.

9.4 Μεταλλουργική Περιοχή Νικήσιανης

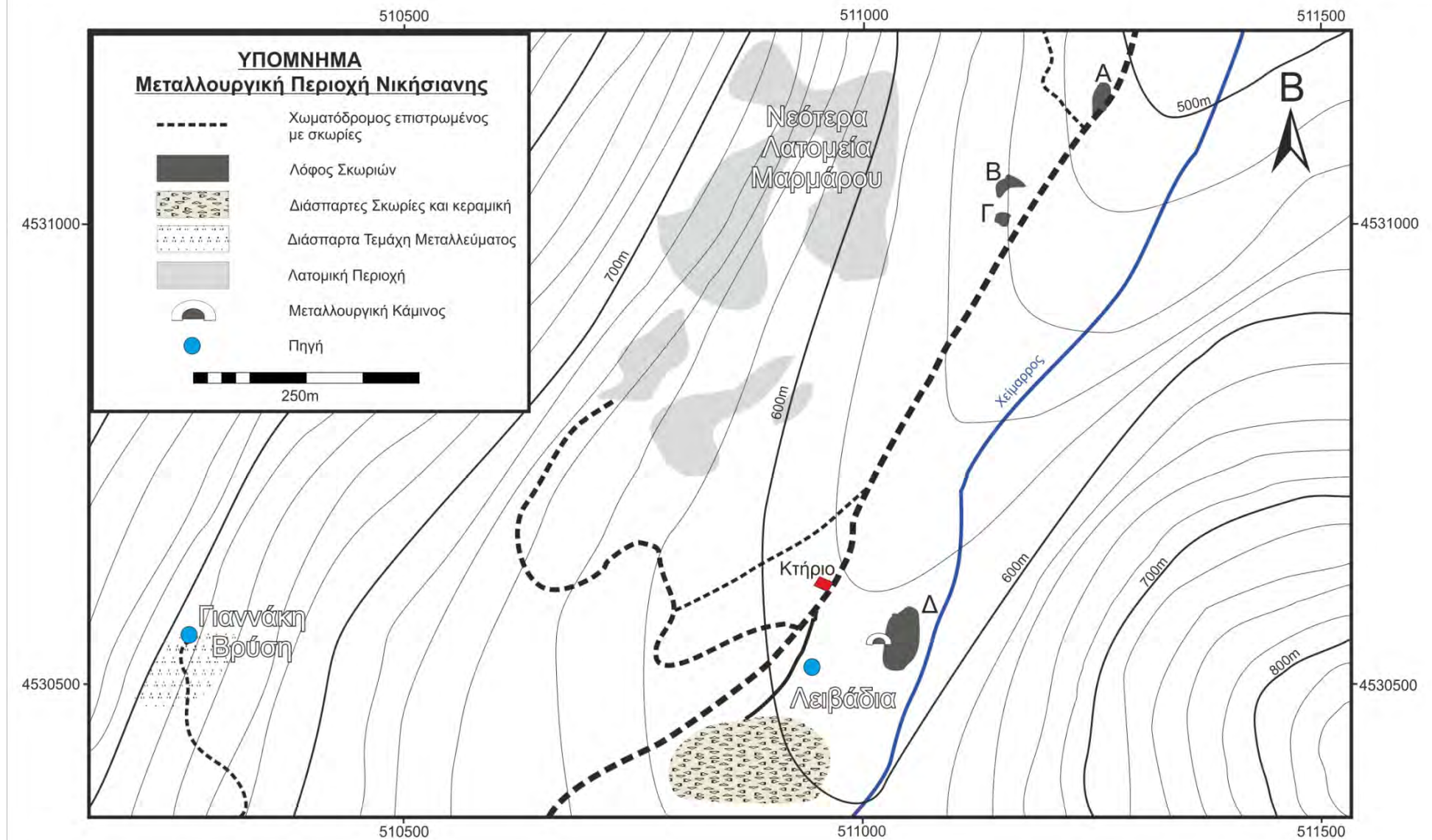
9.4.1 Περιγραφή Θέσης

Η ευρύτερη περιοχή της Νικήσιανης χαρακτηρίζεται από την παρουσία αρκετών σωρών με μεταλλουργικές σκωρίες. Περιστοιχίζεται από τη μεταλλευτική περιοχή της Μαυροκορφής, του Αβγού, του Τρίκορφου και των Ασημότρυπων (Εικ. 9.4.1.1). Υπάρχουν αναφορές τοπικών πληροφορητών ότι σε πολλά σημεία των οικισμών θεμελιώθηκαν κτήρια πάνω σε στρώσεις και λόφους σκωριών, όπως το κτήριο του σχολείου στη Γεωργιανή.



Εικόνα 9.4.1.1 Γεωγραφική τοποθέτηση της μεταλλουργικής περιοχής της Νικήσιανης στην περιοχή Λειβάδια. (υπόβαθρο: Basemap Ktimatologio).

Η περιοχή Λειβάδια βρίσκεται 2,3 km NNA της Νικήσιανης και χαρακτηρίζεται από πληθώρα μεταλλουργικών σκωριών. Ανατολικά της θέσης ρέει χείμαρρος με συνεχή ροή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Οι σκωρίες εντοπίζονται σε σωρούς στην περιοχή, με κυριότερους τους τέσσερις σωρούς (Α έως Δ), όπως σημειώνονται στο χάρτη (Εικ. 9.4.1.2, 9.4.1.3.α-δ). Σύμφωνα με μαρτυρίες κατοίκων οι περισσότεροι σωροί των σκωριών χρησιμοποιήθηκαν πρόσφατα για την επίστρωση των χωματόδρομων. Ο σωρός Α έχει έκταση 0,3 στρέμματα, ο σωρός Β 0,065 στρέμματα, ο σωρός Γ 0,3 στρέμματα και ο σωρός Δ που είναι και ο μεγαλύτερος έχει έκταση 1,7 στρέμματα. Το πάχος τους δεν είναι γνωστό για αυτό και δεν μπορεί να γίνει υπολογισμός του όγκου τους. Η συνολική έκταση που καλύπτουν οι σκωρίες στη Νικήσιανη ξεπερνούν τα 10 στρέμματα.



Εικόνα 9.4.1.2 Χάρτης της μεταλλουργικής περιοχής Νικήσιανης.



Εικόνα 9.4.1.3 α) Σωρός σκωριών Α. β) Σωρός σκωριών Β. γ) Σωρός σκωριών Γ. δ) Σωρός σκωριών Δ. ε) Κοντινή άποψη των σκωριών στο σωρό Δ με διάσπαρτα κεραμικά θραύσματα.

Στην περιοχή πραγματοποιήθηκε γεω-αρχαιολογική ανασκαφή το 1983 από το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών σε συνεργασία με τη ΙΗ' Εφορεία Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων σε μεταλλουργική κάμινο της πρώιμης Τουρκοκρατίας⁴⁰. Η ανασκαφή αποκάλυψε δύο συνεχόμενα

⁴⁰ Αρχαιολογικόν Δελτίον, Υπουργείο Πολιτισμού, (1983), Τόμος 38, Μέρος Β', 2 Χρονικά, Αθήνα 1989.

μεταλλευτικά καμίinia που ήταν μερικώς κατεστραμμένα (Εικ. 9.4.1.4). Η επιφανειακή έρευνα γύρω από τα καμίinia και τους σωρούς των σκωριών αποκάλυψε κεραμική ελληνιστικών και ρωμαϊκών χρόνων, χωρίς όμως να βεβαιωθεί η σχέση τους με τη μεταλλουργική δραστηριότητα.

Τα μεταλλουργικά κατάλοιπα στην ευρύτερη περιοχή αποτελούνται από συμπαγείς έως ημισυμπαγείς σκωρίες, σκωρίες spreiss, καθώς και μικρό αριθμό από σπογγώδεις σκωρίες. Επίσης, συναντώνται υπολείμματα από τοιχώματα μεταλλουργικών καμίνων. Επιπλέον στην περιοχή νότια των Λειβαδίων, ανάμεσα στις σκωρίες και στην κεραμική εντοπίστηκε κατά τη διάρκεια της επιφανειακής έρευνας ένας τριπτήρας από γνεύσιο, πιθανώς για την λειοτρίβηση του μεταλλεύματος.



Εικόνα 9.4.1.4 Υπολείμματα μεταλλουργικής δραστηριότητας, πιθανώς κάμινοι, στην περιοχή Λειβάδια Νικήσιανης (Παπασταματάκη, 1985).

9.4.2 Περιγραφή – Ορυκτολογική και Χημική Σύσταση Υπολειμμάτων Μεταλλουργίας

Οι σκωρίες από τους σωρούς της Νικήσιανης είναι κυρίως συμπαγείς έως ημισυμπαγείς, ενώ κάποιες εμφανίζουν σπογγώδη υφή (Εικ. 9.4.2.1). Οι σκωρίες spreiss είναι πολυάριθμες στους επιμέρους σωρούς, ενώ αρκετές έχουν πεπλατυσμένο σχήμα. Όλες οι σκωρίες εμφανίζονται επιφανειακά μερικώς οξειδωμένες. Τα τεμάχια από τα τοιχώματα των καμίνων αποτελούνται από γνεύσιο, ενώ στην επιφάνειά τους παρατηρείται αργιλικό συνδετικό υλικό.

Η μικροσκοπική ανάλυση των σκωριών έδειξε ότι αποτελούνται κυρίως από ορυκτά της σειράς του ολιβίνη, μοντισελλίτη, μελανοτεκίτη και βουσιτίτη. Οι

ορυκτές αυτές φάσεις βρίσκονται μέσα σε υαλώδη μάζα με σύσταση ανορθίτη. Τα ορυκτά της σειράς του ολιβίνη είναι περισσότερο φαυαλίτης και λιγότερο ο μοντισελλίτης (Εικ. 9.4.2.2.α). Επίσης συναντώνται κοκκία στη μάζα της σκωρίας (Εικ. 9.4.2.2.β).



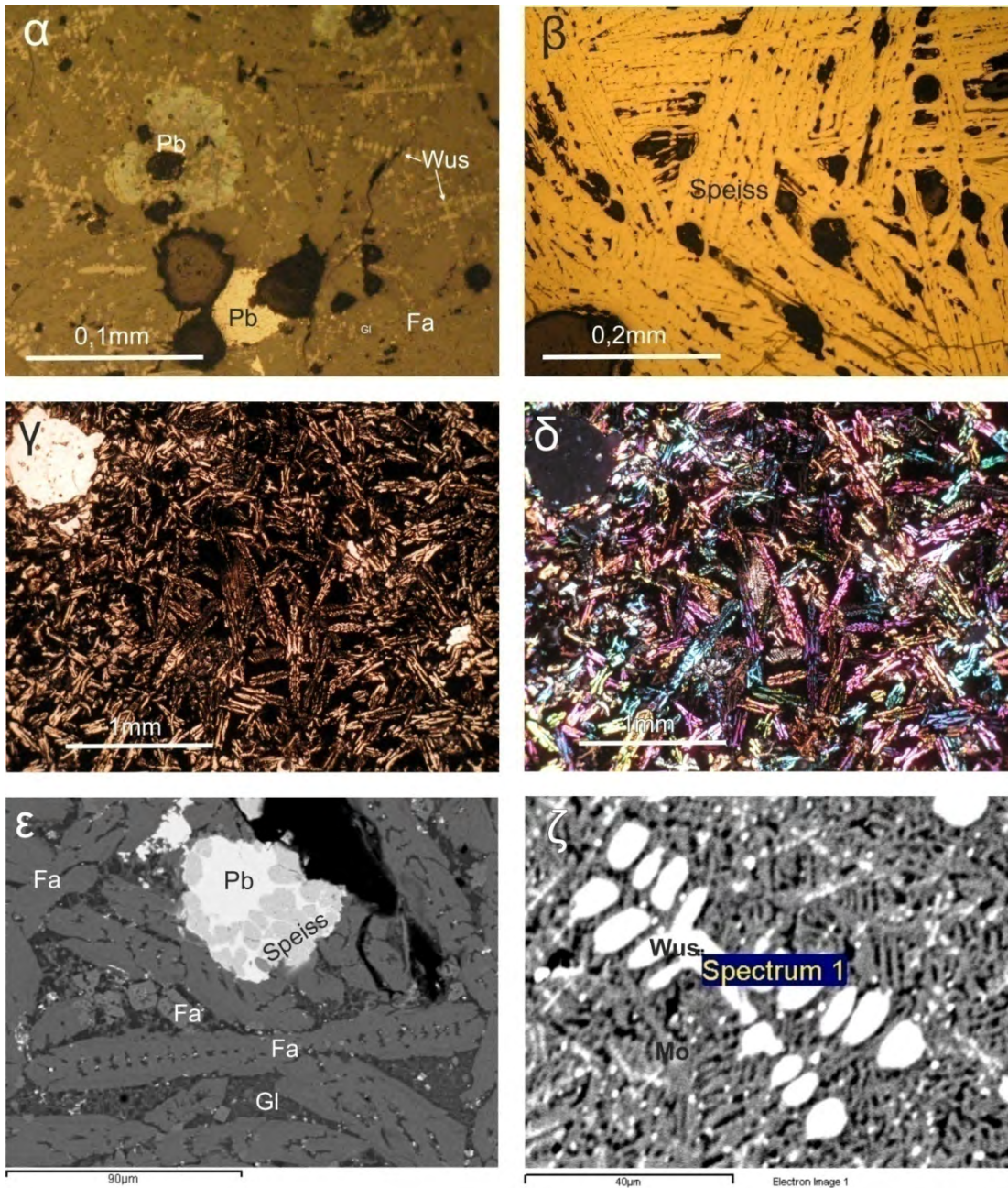
Εικόνα 9.4.2.1 Δείγματα σκωριών από τους σωρούς της Νικήσιανης.

Οι περισσότεροι κρύσταλλοί του φαυαλίτη και του μοντισελλίτη είναι σκελετομορφοί, ενώ λιγότεροι έχουν αλυσιδωτή μορφή (Εικ. 9.4.2.2.γ,δ,ζ). Οι σκελετόμορφοι κρύσταλλοι έχουν μήκος από 60 έως 300 μm και πλάτος από 40 έως 160 μm . Οι αλυσιδωτοί κρύσταλλοι έχουν μήκος από 380 έως 500 μm και πλάτος από 60 έως 180 μm . Αυτές οι μορφές κρυστάλλων δείχνουν μία ταχύτητα κρυστάλλωσης από 40 έως 50, μέχρι και 80° C/h (Donaldson, 1976).

Τα μεταλλικά κοκκία αποτελούνται κατά κανόνα από speiss και αυτοφυή Pb (Εικ. 9.4.2.2ε). Τα κύρια στοιχεία των κοκκίων speiss είναι ο Fe και το As, ενώ εντοπίζονται ίχνη από Cu, Pb, Sb και Cl. Ο Cu στα κοκκία speiss κυμαίνεται από 1,78 έως 2,24 wt %, ο Pb από 62,45 έως 99,98 wt %, το Sb από 12,75 έως 24,14 wt % και το Cl 6,42 wt %.

Ο συντελεστής ιξώδους των σκωριών από τη μεταλλουργική περιοχή της Νικήσιανης είναι $\eta_i=2,15$ δείχνοντας ότι πρόκειται για λεπτόρρευστη σκωρία με χαμηλό ιξώδες. Ο παράγοντας G έχει τιμή 0,23 και ο παράγοντας S τιμή 0,95 πολύ κοντά στη σύσταση της καθαρά φαυαλιτικής σκωρίας. Οι χημικές αναλύσεις των σκωριών από τη μεταλλουργική περιοχή της Νικήσιανης (Βλ. Παράρτημα Γ-Δ, δείγματα PNL-1, με ICP-MS και PNL-2 με XRF) δείχνουν ότι η περιεκτικότητα του Au είναι 0,66 ppm και του Ag 9,45 ppm, ενώ ο Cu έχει μέση περιεκτικότητα 0,2 wt %. Τα κύρια μεταλλικά στοιχεία της σκωρίας είναι ο Fe_2O_3

με περιεκτικότητες από 39,12 έως 40,09 wt %, το As 0,2 wt %, ο Pb 0,54 wt % και ο Zn 0,40 wt %. Σε σχετικά υψηλές περιεκτικότητες εντοπίζονται τα στοιχεία Sr (191,80 ppm), B (53,00 ppm) και το B (30 ppm). Οι περιεκτικότητες που έχει το Sb είναι από 412 έως 874 ppm.



Εικόνα 9.4.2.2 Φωτογραφίες μεταλλουργικών σκωριών από τη Νικήσιανη. α) Δενδριτικές μορφές βουσίτη (Wus) σε φαυαλίτη (Fa) και ναλώδη μάζα (Gl). Διακρίνονται κοκκία Pb. Μεταλλογραφικό μικροσκόπιο, // N. β) Κοκκίο speiss αποτελούμενο από Fe και As. Μεταλλογραφικό μικροσκόπιο, N//. γ) Αλυσιδωτές μορφές κρυστάλλων φαυαλίτη (Fa) μέσα στη μάζα σκωρίας. Πολωτικό Μικροσκόπιο, //N. δ) γ) Αλυσιδωτές μορφές κρυστάλλων φαυαλίτη (Fa) μέσα στη μάζα σκωρίας. Πολωτικό Μικροσκόπιο, +N. ε) Κοκκία μολύβδου (Pb) με speiss μέσα σε μάζα από κρυστάλλους φαυαλίτη (Fa) και ναλώδη μάζα (Gl). SEM back scattering image. ζ) Δενδριτικός βουσίτης (Wus) μέσα σε μάζα από κρυστάλλους μοντισελλίτη (Mo) και ναλώδη μάζα (Gl). SEM back scattering image.

9.5 Μεταλλουργική Περιοχή Βαλτούδας

9.5.1 Περιγραφή Θέσης

Η μεταλλουργική περιοχή της Βαλτούδας βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα του Παγγαίου βόρεια από τη Μουσθένη. Κατά τα έτη 2012 και 2013 σε συνεργασία με την ΙΗ' Εφορεία Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής αρχαιομεταλλουργική ανασκαφή στην περιοχή, μέρος των αποτελεσμάτων της οποίας παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 9.5.1.1 Η γεωγραφική θέση της Βαλτούδας στο Παγγαίο. (υπόβαθρο: Basemap Ktimatologio)

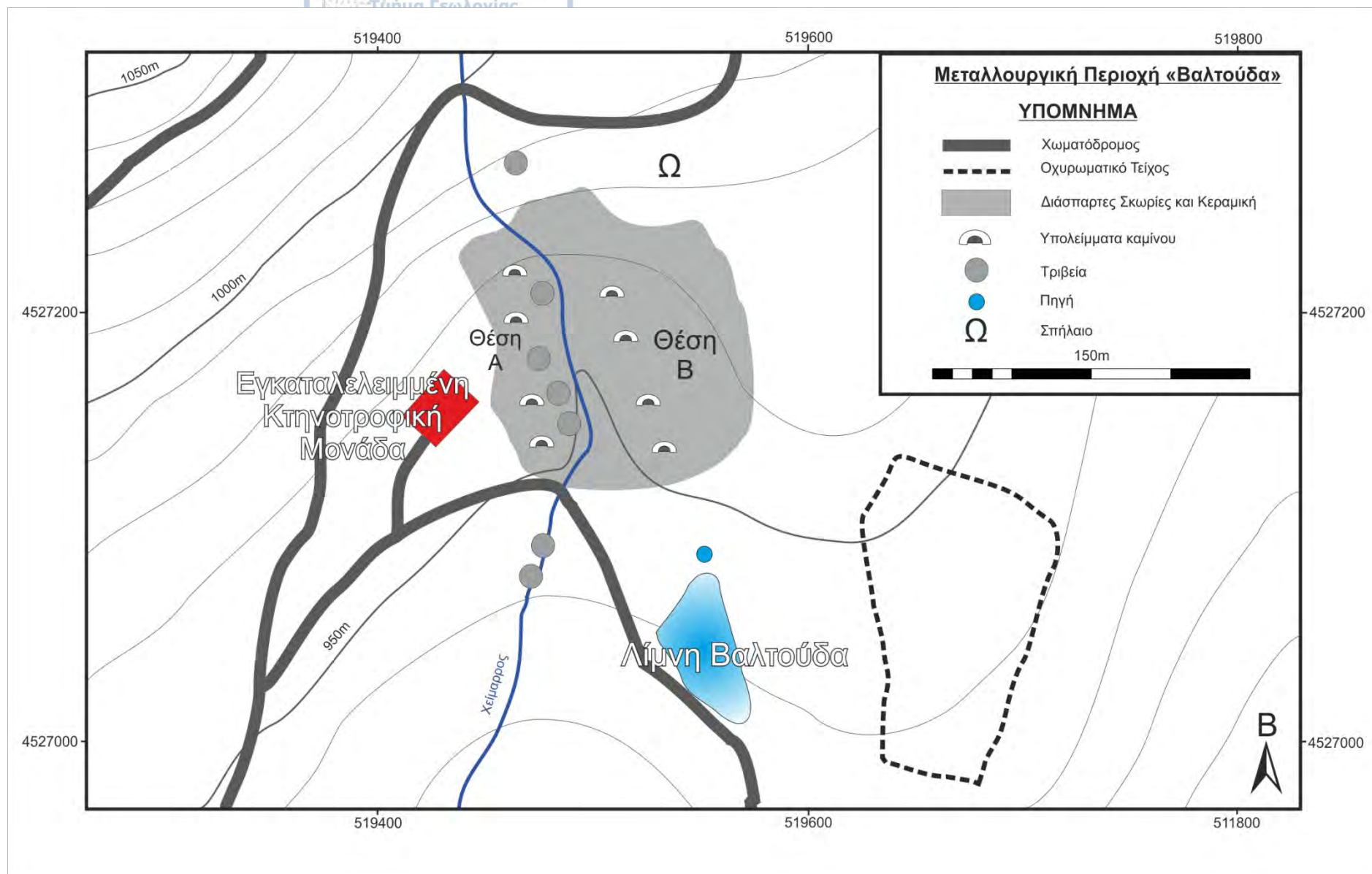
Η περιοχή της Βαλτούδας βρίσκεται σε υψόμετρο μεταξύ 940 και 1000 m, 1 km νοτιότερα από τη μεταλλευτική περιοχή της Μαυροκορφής και 2 km νοτιοανατολικά της μεταλλευτικής περιοχής του Αβγού (Εικ. 9.5.1.1). Το όνομα της περιοχής προέρχεται από τη λίμνη και τη βαλτώδη έκταση (Εικ. 9.5.1.2-3). Το νερό της λίμνης προέρχεται από καρστική πηγή στο βόρειο μυχό της. Η μεταλλουργική περιοχή καλύπτει έκταση περίπου 18 στρεμμάτων. Νοτιοανατολικά του μεταλλουργικού χώρου εντοπίζεται υπόλειμμα οχυρωματικού τείχους μήκους 406 m. Είναι χτισμένο με λατύπες μαρμάρου και το ύψος του φθάνει μέχρι 1 m. Βορειοανατολικά της Βαλτούδας εντοπίζεται είσοδος σπηλαίου, γύρω από το οποίο έχουν γίνει κατά καιρούς λαθροανασκαφές. Διακρίνονται δύο θέσεις με μεταλλουργικά υπολείμματα, η μία (Α) στα δυτικά και η άλλη (Β) στα ανατολικά εκατέρωθεν ενός ρέματος (Εικ. 9.5.1.3).



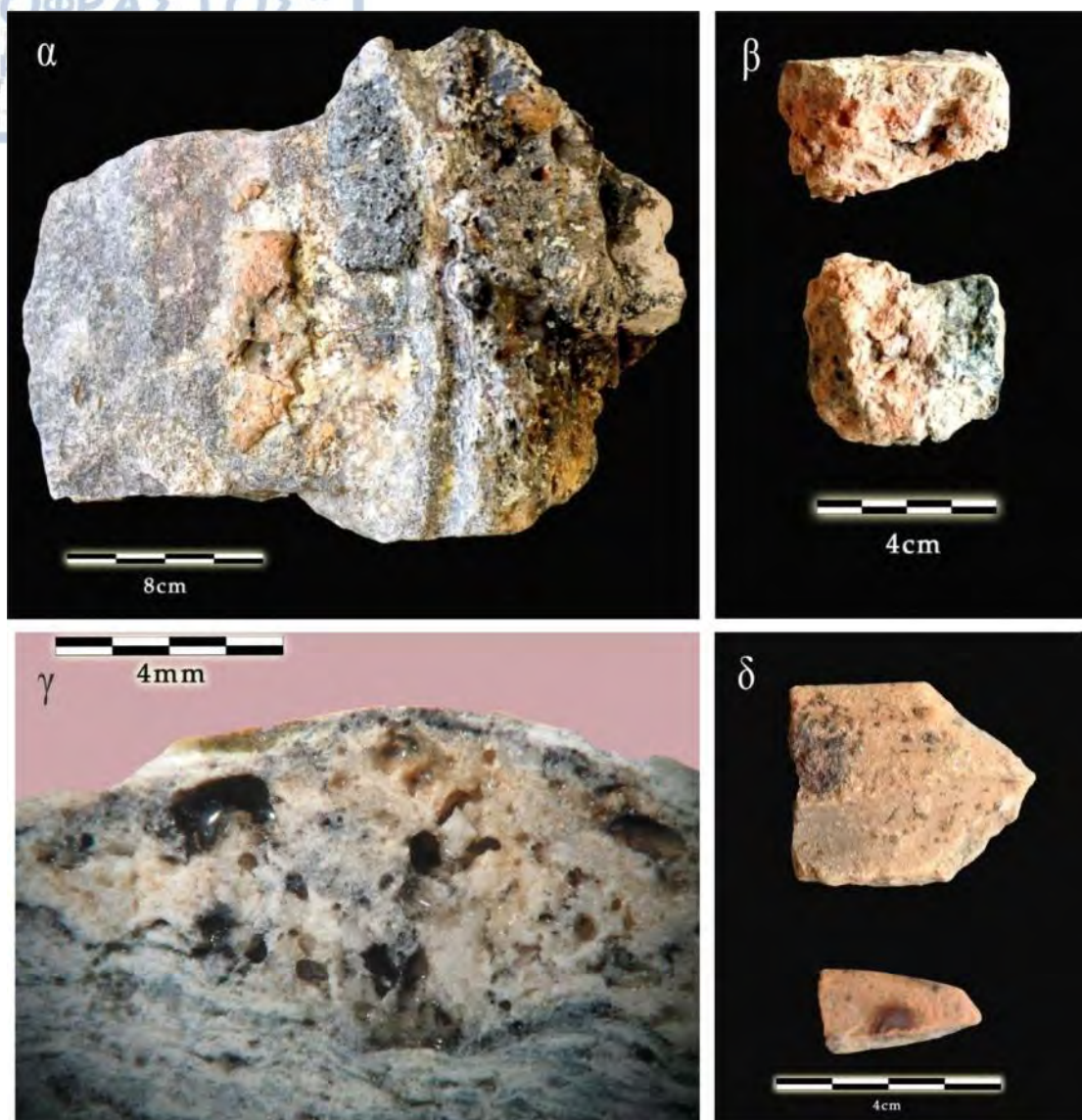
Εικόνα 9.5.1.2 Η μεταλλουργική περιοχή της Βαλτούδας. Αποψη προς Βορρά. Στο βάθος η Μαυροκορφή.

Στη θέση Α οι σκωρίες είναι διάσπαρτες επιφανειακά ανάμεσα σε θραύσματα από τοιχώματα καμίνου και τριβεία. Τα τριβεία αποτελούνται από μεγάλες γνευσιακές λατύπες με μικρές κοιλότητες στην επιφάνειά τους. Κατά θέσεις υπάρχουν εκβαθύνσεις στην επιφάνεια του εδάφους. Στη θέση Β παρατηρούνται συγκεντρώσεις από λατύπες μαρμάρου, με υπολείμματα από τοιχώματα καμίνου και επιφανειακές σκωρίες. Στην επιφάνεια συναντάται αραιά κεραμική ρωμαϊκής περιόδου.

Ανάμεσα στα επιφανειακά ευρήματα στην περιοχή της Βαλτούδας, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι λίθινοι τριπτήρες για τον τεμαχισμό του μεταλλεύματος. Συνολικά καταγράφηκαν 7 μεγάλα τεμάχια, τα οποία αποτελούνται από γνευσιακές λατύπες. Στη μεγαλύτερη επιφάνειά τους παρουσιάζουν μία ή περισσότερες εκβαθύνσεις για τη συγκέντρωση και κρούση του μεταλλεύματος. Επίσης, επιφανειακά, όσο και σε στρώματα βάθους έως και 2 m της μεταλλουργικής περιοχής Βαλτούδας παρατηρούνται τεμάχια γνευσίου τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των τοιχωμάτων της μεταλλουργικής καμίνου (Εικ. 9.5.1.4.α). Στην εσωτερική επιφάνειά τους παρουσιάζουν φαινόμενα υαλοποίησης εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας (Εικ. 9.5.1.4.β). Ανάμεσα στα τεμάχια παρατηρείται η χρήση αργιλικού συνδετικού υλικού. Το αργιλικό υλικό που βρισκόταν προς το εσωτερικό τμήμα της καμίνου φέρει επίσης ίχνη όπτησης από τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονταν (Εικ. 9.5.1.4.β,γ). Επίσης, στις επιφάνειες των ευρημάτων της κεραμικής παρατηρούνται ίχνη από το μεταλλικό τήγμα (Εικ. 9.5.1.4.δ).



Εικόνα 9.5.1.3 Κάτοψη της μεταλλουργικής περιοχής Βαλτούδας.



Εικόνα 9.5.1.4 α) Τμήμα τοιχώματος της μεταλλουργικής καμίνου αποτελούμενο από γνεύσιο. Στην επιφάνειά του παρατηρούνται υπολείμματα της αργιλικής επένδυσης. β) Τεμάχια της αργιλικής επένδυσης της καμίνου. γ) Υαλοποίηση των κόκκων χαλαζία στην ανώτερη επιφάνεια γνευσίου. δ) Τμήματα κεραμικής από τη Βαλτούδα με ίχνη από το μεταλλικό τήγμα.

Κατά την αρχαιομεταλλουργική ανασκαφή αποκαλύφθηκε σε βάθος 40 cm κυκλική κατασκευή, συνολικής διαμέτρου 150 cm, πάχους 60 cm και ύψους περίπου 30 cm (Εικ. 9.5.1.5.α). Τα τεμάχια της κατασκευής, τα οποία αποτελούνται κυρίως από γνεύσιο, είναι τοποθετημένα συγκεντρικά, ενώ επίπεδες πλάκες καλύπτουν το δάπεδο στο κέντρο της. Η ακριβής χρήση της ευρεθείσας κατασκευής δεν είναι δυνατό να εξακριβωθεί. Μπορούμε να υποθέσουμε ότι πρόκειται για βάση καμίνου. Ίσως διανοιγόταν ένας λάκος αρχικά ο οποίος επενδυόταν με πέτρες. Στη συνέχεια πάνω σε αυτή τη βάση χτιζόταν η μεταλλουργική κάμινος.

Η κατασκευή της μεταλλουργικής καμίνου με βάση τα ευρεθέντα τεμάχια γινόταν σχεδόν αποκλειστικά με λατύπες γνευσίου. Στην περιοχή της Βαλτούδας καταγράφηκαν πάνω από 65 υπολείμματα μεταλλουργικής καμίνου, τα οποία έχουν διαστάσεις από 5-10 cm έως και 70 cm (Εικ. 9.5.15.β).

Το συνδετικό υλικό μεταξύ των γνευσιακών λατυπών ήταν κυρίως αργιλικό. Με αυτό το υλικό επενδύεται κατά θέσεις εσωτερικά και εξωτερικά η καμίνος, όπως παρατηρείται στα διάσπαρτα τεμάχια των γνευσίων (Εικ. 9.5.15.γ). Το πάχος της εσωτερικής αργιλικής επένδυσης δεν ξεπερνά το 1,5 cm.

Στα υπολείμματα της μεταλλουργικής καμίνου δεν παρατηρήθηκαν οπές για την τοποθέτηση φυσερών και ακροφυσιών.



Εικόνα 9.5.15 α) Κυκλική κατασκευή από τη θέση Α της Βαλτούδας που αποκαλύφθηκε κατά τη διάρκεια της αρχαιομεταλλουργικής ανασκαφής. Πιθανότατα πρόκειται για κατεστραμμένη βάση μεταλλουργικής καμίνου. Στο εσωτερικό της παρατηρούνται ίχνη μεταλλουργικής σκωρίας. β) Μεγάλο τμήμα μεταλλουργικής καμίνου από την περιοχή της Βαλτούδας. γ) Τμήμα μεταλλουργικής καμίνου με αργιλικό υλικό επένδυσης.

9.5.2 Περιγραφή-Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Υπολειμμάτων Μεταλλουργίας

Οι σκωρίες στο μεταλλουργικό χώρο της Βαλτούδας είναι συμπαγείς, ημισυμπαγείς, σπογγώδεις, ενώ εντοπίζονται και σκωρίες spreiss (Εικ. 9.5.2.1.α, β).

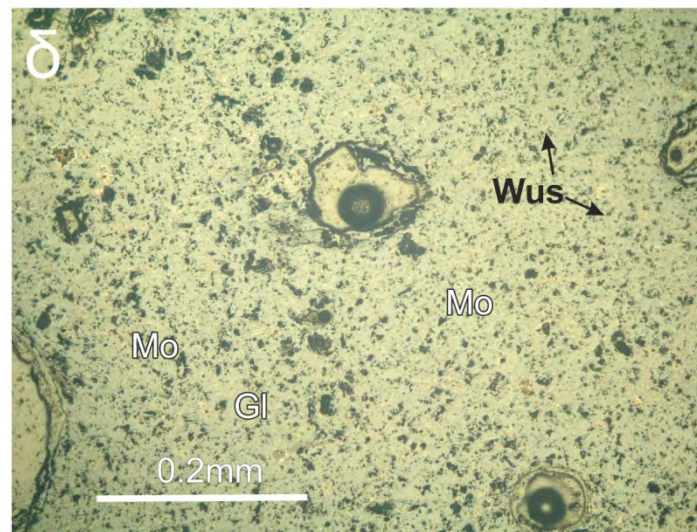
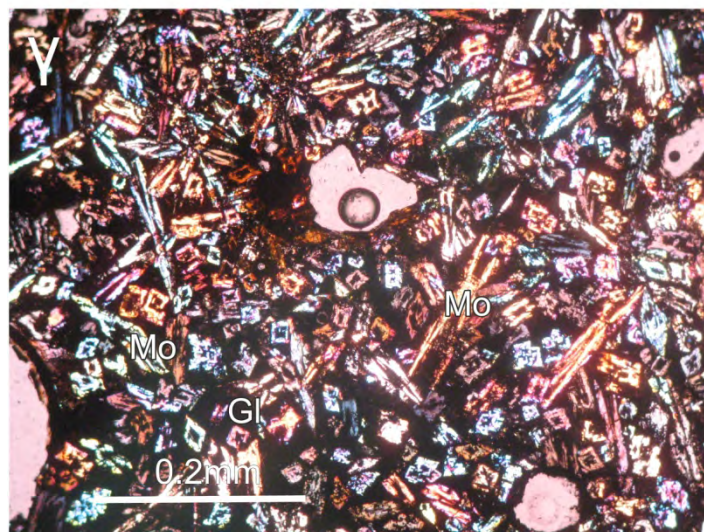
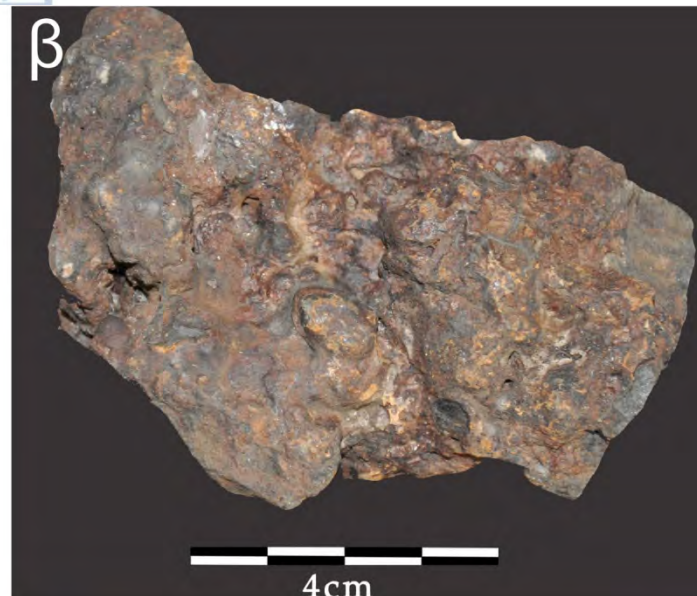
Οι σκωρίες αποτελούνται από ορυκτά της σειράς του ολιβίνη, από βουστίτη και υαλώδη μάζα, ενώ σπανιότερα εντοπίζονται ατακαμίτης και μελανοτεκίτης. Τα ορυκτά της σειράς του ολιβίνη είναι κυρίως φαυαλίτης, μαγνησιούχος κίρσταϊνίτης και μοντισελλίτης (Εικ. 9.5.2.1.γ, δ). Οι κρύσταλλοι των ορυκτών της σειράς του ολιβίνη παρουσιάζουν σκαφοειδή μορφή. Σε ορισμένες περιπτώσεις μεταπίπτουν σε σκελετόμορφους κρυστάλλους. Οι σκελετόμορφοι αυτοί κρύσταλλοι έχουν μέσες διαστάσεις 400x100 μm. Οι σκαφοειδείς κρύσταλλοι έχουν μήκος από 90 έως 400 μm και πλάτος από 60 έως 140 μm. Επίσης ανάμεσα στα ορυκτά εντοπίζονται σπάνια ατακαμίτης και μελανοτεκίτης.

Με βάση τα κοκκία και διάφορες μεταλλικές υπολειμματικές φάσεις που παρατηρούνται στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, οι σκωρίες της Βαλτούδας μπορούν να διακριθούν σε τρεις ομάδες. Στην Α' ομάδα κατανέμονται σκωρίες στις οποίες παρατηρείται χαλκοπυρίτης, γαληνίτης και σιδηροπυρίτης που δεν έχουν αντιδράσει εξολοκλήρου στο τήγμα. Τα μεταλλικά κοκκία αποτελούνται κυρίως από Pb και λιγότερο από Cu κι έχουν σχήμα κυρίως ακανόνιστο έως ημισφαρικό (Εικ. 9.5.2.2.α, β). Ο Pb εμφανίζεται και ως οξείδιο, ενώ τα μεταλλικά του κοκκία περιέχουν Mo, Al και Cl.

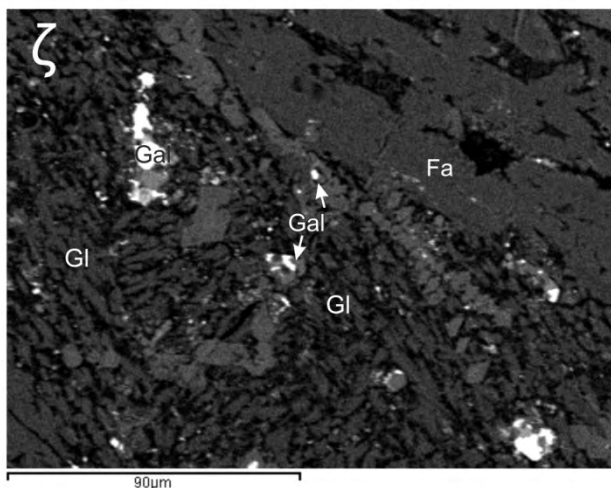
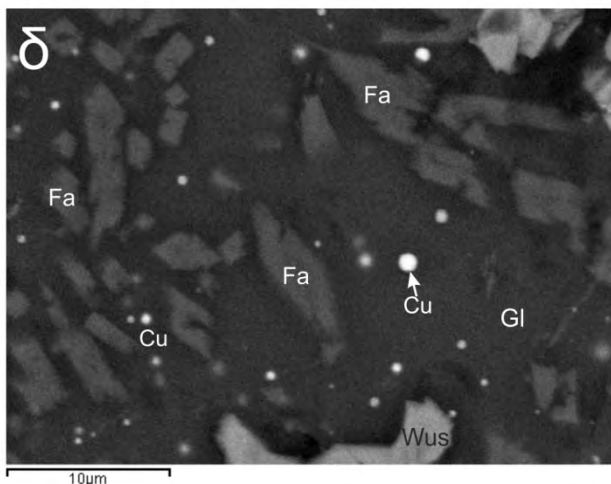
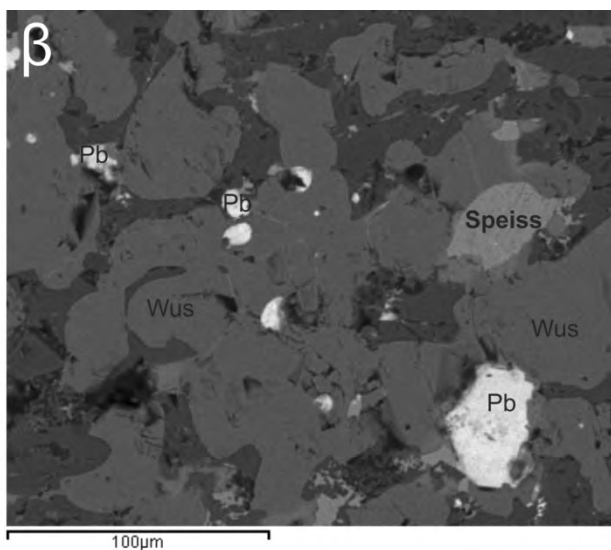
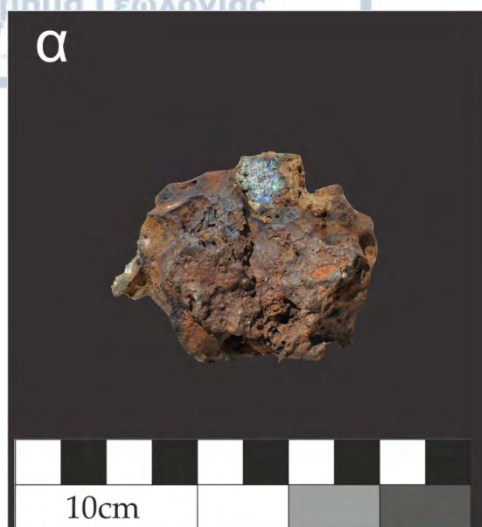
Στη Β' ομάδα σκωριών εντοπίζονται κοκκία Cu με περιεκτικότητες 59,70 έως 99,98 wt % και με χαμηλές περιεκτικότητες σε Pb, Fe, As και Zr (Εικ. 9.5.2.2.γ, δ). Τα κοκκία παρατηρούνται μέσα στην υαλώδη μάζα, η οποία σε μεγάλο ποσοστό περιέχει κρυστάλλους φαυαλίτη. Έχουν σχήμα ημισφαιρικό έως σφαιρικό.

Ανάμεσα στις σκωρίες συναντάται και μία τρίτη ομάδα με κοκκία που αποτελούνται από μεταλλικό Pb, ενώ σε πολλά τμήματα της σκωρίας παρατηρείται άτηκτος γαληνίτης (Εικ. 9.5.2.2.ε, ζ). Τα κοκκία έχουν σχήμα ακανόνιστο και βρίσκονται με τη μορφή εγκλεισμάτων σε υαλώδη μάζα και ανάμεσα σε κρυστάλλους φαυαλίτη, μαγνησιούχου κίρσταϊνίτη και μοντισελλίτη.

Ο συντελεστής ιξώδους των σκωριών στη Βαλτούδα κυμαίνεται από $\nu_i=1,21-2,65$. Ο παράγοντας G έχει τιμή 0,02 έως 1,45. Ο παράγοντας S έχει τιμή 0,76 έως 0,70.



Εικόνα 9.5.2.1 Φωτογραφίες μεταλλουργικών σκωριών από τη Βαλτούδα. α) Μεταλλουργική σκωρία από τη θέση Α. β) Σκωρία spreiss από τη θέση Α στη Βαλτούδα. γ) Κρύσταλλοι μοντισελλίτη (Mo) σε ναλώδη μάζα (Gl). Πολωτικό μικροσκόπιο, N+. δ) Η εικόνα 9.5.6γ σε μεταλλογραφικό μικροσκόπιο, N//. Βουσιτίτης (Wus) μέσα σε πυριτική μάζα από μοντισελλίτη (Mo) και ναλώδη μάζα.



Εικόνα 9.5.2.2 α) Σκωρία Α' ομάδας β) Σκωρία Α' ομάδας όπου διακρίνονται κοκκία Pb και speiss σε μάζα από βουσίτη (Wu) και ναλώδη μάζα (Gl). SEM back scattering image. γ) Σκωρία Β' ομάδας δ) Σκωρία Β' ομάδας με κοκκία χαλκού (Cu) και κρυστάλλους φαυαλίτη (Fa) σε ναλώδη μάζα (Gl). SEM back scattering image. ε) Σκωρία Γ' ομάδας ζ) Σκωρία Γ' ομάδας με γαληνίτη (Gal) μέσα σε μάζα από φαυαλίτη (Fa) και ύαλο (Gl). SEM back scattering image.

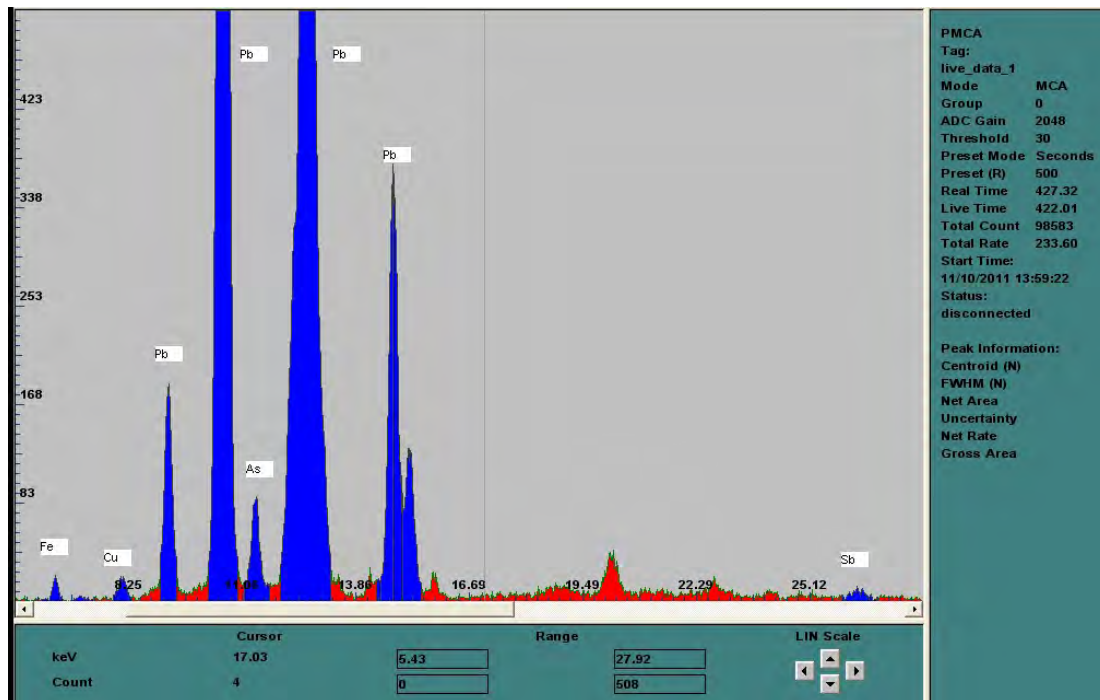
Με βάση τις χημικές αναλύσεις δειγμάτων από τη μεταλλουργική περιοχή της Βαλτούδας (Παράρτημα Γ) ο Au έχει περιεκτικότητα από 0,22 έως 0,96 ppm και ο Ag από 20,84 έως 65,20 ppm. Ο Cu έχει περιεκτικότητα από 0,14 έως 2,61 wt % (μ.ό. 1,38 wt %). Τα βασικά μεταλλικά στοιχεία των σκωριών είναι ο Fe_2O_3 (από 52,17 έως >57,19 wt %), ο Pb (από 1,63 έως 1,73 wt %, μ.ό. 1,65 wt %), ο Zn (από 0,8 έως >1,00 wt %) και το As (0,57 έως 0,66 wt %, μ.ό. 0,62 wt %). Το Sb βρίσκεται σε περιεκτικότητα από 121,43 έως 311,42 ppm (μ.ό. 247,27 ppm), το Ba από 100,70 έως 190,40 wt % (μ.ό. 145,30 ppm) και το Sr από 69,90 έως 191,70 ppm (μ.ό. 121,90 ppm).



Εικόνα 9.5.2.3 Λίθινο τριβείο από την περιοχή της Βαλτούδας Παγγαίου με μία εκβάθυνση για την κονιοποίηση του μεταλλεύματος. Στο εσωτερικό του εντοπίστηκαν ίχνη μεταλλεύματος.

Στην περιοχή της Βαλτούδας εντοπίστηκαν 7 λίθινα αντικείμενα με εκβανθύνσεις στις επιφάνειές τους (Εικ. 9.5.2.3, Πίν. 9.5.2.2). Οι εκβανθύνσεις παρατηρούνται και στις δύο επιφάνειες των λίθινων αντικειμένων. Το υλικό κατασκευής τους είναι γνεύσιος, που έχει ομοιότητες με το γνεύσιο της περιοχής.

Επιφανειακή ανάλυση XRF στις εκβαθύνσεις των τριπτήρων εντόπισε Pb, Fe, Cu, As και Sb (Εικ. 9.5.2.4). Άρα πιθανότατα πρόκειται για τριβεία που χρησιμοποιούνταν κατά τη διάρκεια του καθαρισμού του μεταλλεύματος (εμπλουτισμός).



Εικόνα 9.5.2.4 Επιφανειακή ανάλυση XRF σε λίθινο τριπτήρα από την περιοχή Βαλτούδα Παγγαίου.

Πίνακας 9.5.2.2 Αναλυτικός περιγραφικός πίνακας των λίθινων τριβείων που βρέθηκαν στη μεταλλουργική περιοχή της Βαλτούδας Παγγαίου.

Κωδικός Τριπτήρα	Εκβαθύνσεις	Μήκος	Πλάτος	Ύψος
PVALO-1	2	29	20	8
PVALO-2	5	28	19	7
PVALO-3	4	36	24	13
PVALO-4	3	29	15	12
PVALO-5	1	18	13	5
PVALO-6	4	18	11	6
PVALO-7	1	18	10	5

9.6 Μεταλλουργική Θέση Μουσθένης

9.6.1 Περιγραφή Θέσης

Η μεταλλουργική θέση Μουσθένης βρίσκεται 1,8 km νότια της μεταλλευτικής περιοχής του Αβγού και 2,5 km νοτιοδυτικά της μεταλλουργικής περιοχής της Βαλτούδας (Εικ. 9.6.1.1). Πρόκειται για διάσπαρτες επιφανειακά σκωρίες στην ανάντη περιοχή μιας πηγής, που καλύπτουν μια μικρή έκταση περίπου 30 m².

Σε επιφάνεια γνευσίου στην εν λόγω μεταλλουργική θέση παρατηρούνται λαξευτές εκβαθύνσεις με μέση διάμετρο 12 cm και μέσο βάθος 4 cm. Εντοπίζονται περισσότερες από 20 οπές που πιθανότατα χρησιμοποιούνταν για τη θραύση και τη λειοτρίβηση του μεταλλεύματος (Εικ. 9.6.1.2).



Εικόνα 9.6.1.1 Γεωγραφική τοποθέτηση της μεταλλουργικής θέσης Μουσθένης. (υπόβαθρο: Basemap Ktimatologio)



Εικόνα 9.6.1.2 α) Αποψη της μεταλλουργικής θέσης Μουσθένης β) Διευθετημένη πηγή νερού στη μεταλλουργική θέση. γ) Το γνευσιακό υπόβαθρο λαξευμένο πιθανώς για τη λειοτρίβηση του μεταλλεύματος. δ) Οπές στην επιφάνεια του βράχου της εικόνας 9.6.1.2.γ πιθανώς για τη θραύση του μεταλλεύματος.

9.6.2 Περιγραφή-Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Υπολειμμάτων Μεταλλουργίας

Οι σκωρίες της μεταλλουργικής θέσης Μουσθένης παρουσιάζουν συμπαγή μορφή, ενώ σε μερικές διακρίνεται μέρος της επένδυσης της καμίνου. Έχουν μέσο ειδικό βάρος $2,8 \text{ gr/cm}^3$ και είναι ασθενώς μαγνητικές.

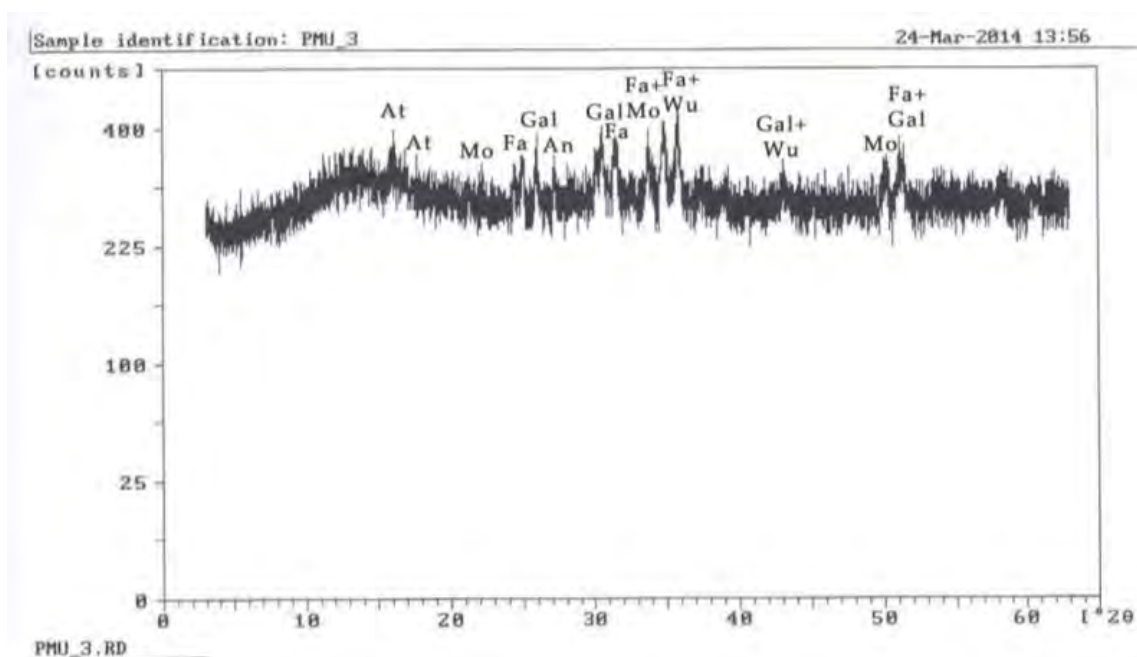
Τα κύρια ορυκτά των σκωριών της μεταλλουργικής θέσης της Μουσθένης είναι ο φαΰαλίτης, ο μοντισελλίτης και ο βουστίτης, ο γαληνίτης, ο ατακαμίτης, ο αυτοφυής μόλυβδος και το spreiss (Εικ. 9.6.2.1). Οι κρύσταλλοι του φαΰαλίτη και του μοντισελλίτη έχουν σκαφοειδή έως σκελετική μορφή (Εικ. 9.6.2.2.α, β). Οι σκαφοειδείς κρύσταλλοι έχουν μήκος από 350 έως 120 μm και πλάτος από 195 έως 80 μm . Οι αλυσιδωτοί κρύσταλλοι έχουν μήκος από 900 έως 700 μm και πλάτος από 200 έως 65 μm . Αυτές οι μορφές κρυστάλλων δείχνουν μία ταχύτητα κρυστάλλωσης από 7 έως 40°C/h .

Στη μάζα της σκωρίας παρατηρούνται κοκκία Pb και spreiss, και κρύσταλλοι γαληνίτη και ατακαμίτη (Εικ. 9.6.2.2.γ). Επίσης, στο αργιλικό υλικό από την

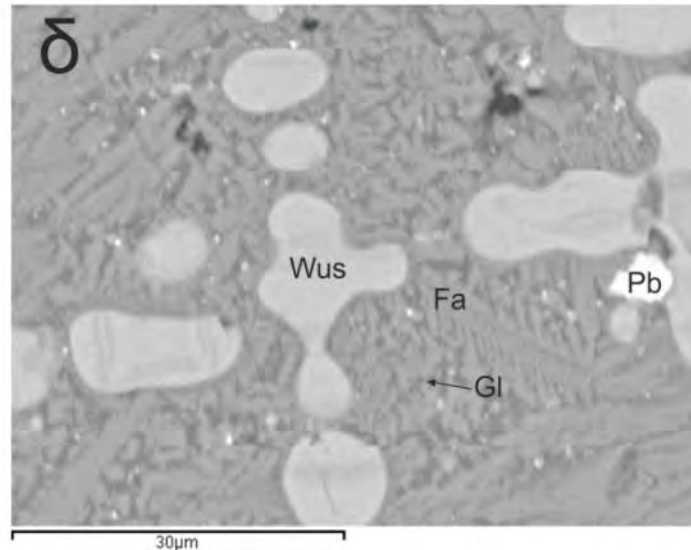
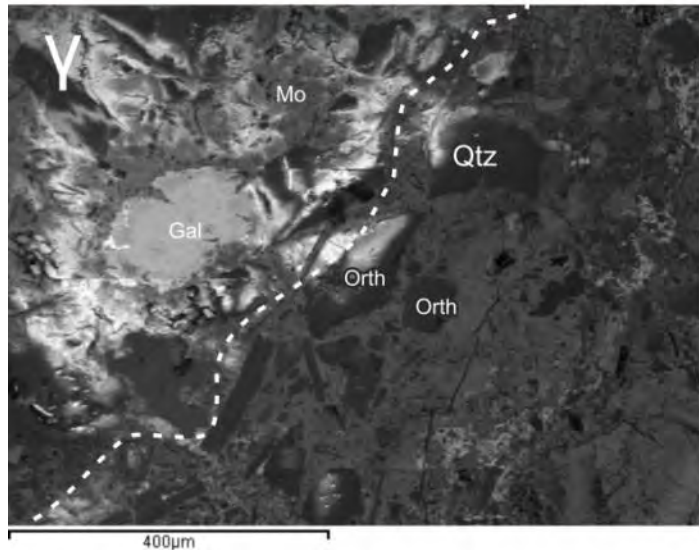
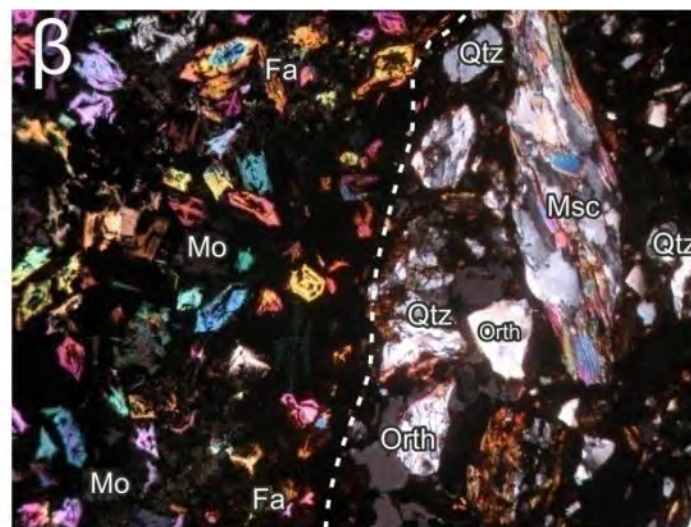
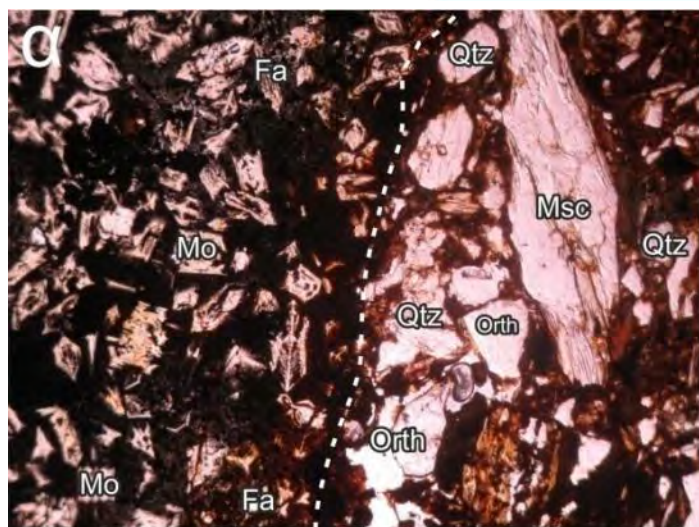
επένδυση της καμίνου εντοπίζονται κρύσταλλοι χαλαζία, ορθόκλαστου και πλαγιόκλαστου (Εικ. 9.6.2.2.δ).

Ο συντελεστής ιξώδους των σκωριών στη μεταλλουργική θέση της Μουσθένης είναι $\eta=1,42$ δείχνοντας λεπτόρευστη σκωρία με χαμηλό ιξώδες. Ο παράγοντας G έχει τιμή 0,30. Ο παράγοντας S έχει τιμή 1,45.

Από τη χημική ανάλυση μιας σκωρίας από τη μεταλλουργική περιοχή της Μουσθένης (βλ. Παράρτημα, δείγμα PMU-2) προκύπτει ότι ο Au έχει περιεκτικότητα 0,29 ppm και ο Ag 11,52 ppm. Ο Cu έχει χαμηλή περιεκτικότητα (0,05 wt %). Ο Pb έχει περιεκτικότητα 1,2 wt %, το As 2,25 wt % και ο Zn 0,54 wt %. Χαμηλές περιεκτικότητες εντοπίστηκαν στα στοιχεία Sb (73,50 ppm), V (80,00 ppm), Sr (210,30 ppm) και στο Ba (196,40 ppm).



Εικόνα 9.6.2.1 Ορυκτολογική σύσταση σκωρίας από τη θέση της Μουσθένης, όπως προκύπτει από ακτινογραφική μελέτη (XRD). Fa: Φαϊαλίτης, Mo: Μοντισελίτης, Wu: Βουσιτίτης, Gal: Γαληνίτης, At: Ατακαμίτης, An: Ανοοθίτης



Εικόνα 9.6.2.2 Φωτογραφία από μεταλλουργικές σκωρίες στη θέση Μουσθένη. α) Φαΰαλίτης (Fa) και μοντισελλίτης (Mo) σε ναλώδη μάζα (Gl) από τη μεταλλουργική θέση της Μουσθένης. Δεξιά διακρίνεται το αργιλικό υλικό της επένδυσης της καμίνου αποτελούμενο από χαλαζία (Qtz), ορθόκλαστο (Orth), μοσχοβίτη (Msc). Πολωτικό μικροσκόπιο, μήκος φωτογραφίας 0,5mm, //N. β) Φαΰαλίτης (Fa) και μοντισελλίτης (Mo) σε ναλώδη μάζα (Gl) από τη μεταλλουργική θέση της Μουσθένης. Δεξιά διακρίνεται το αργιλικό υλικό της επένδυσης της καμίνου αποτελούμενο από χαλαζία (Qtz), ορθόκλαστο (Orth) και μοσχοβίτη (Msc). Πολωτικό μικροσκόπιο, μήκος φωτογραφίας 0,5mm, +N. γ) Επαφή της σκωρίας με με αργιλικό υλικό της καμίνου. Η σκωρία αποτελείται από γαληνίτη (Gal) και μοντισελλίτη (Mo), ενώ το υλικό της καμίνου από χαλαζία (Qtz) και ορθόκλαστο (Orth). SEM back scattering image. δ) Βουσίτης (Wus), φαΰαλίτης (Fa) και σφαιρίδια Pb σε ναλώδη μάζα της σκωρίας (Gl). SEM back scattering image.

9.7 Μεταλλουργική Περιοχή Πουλιάνας

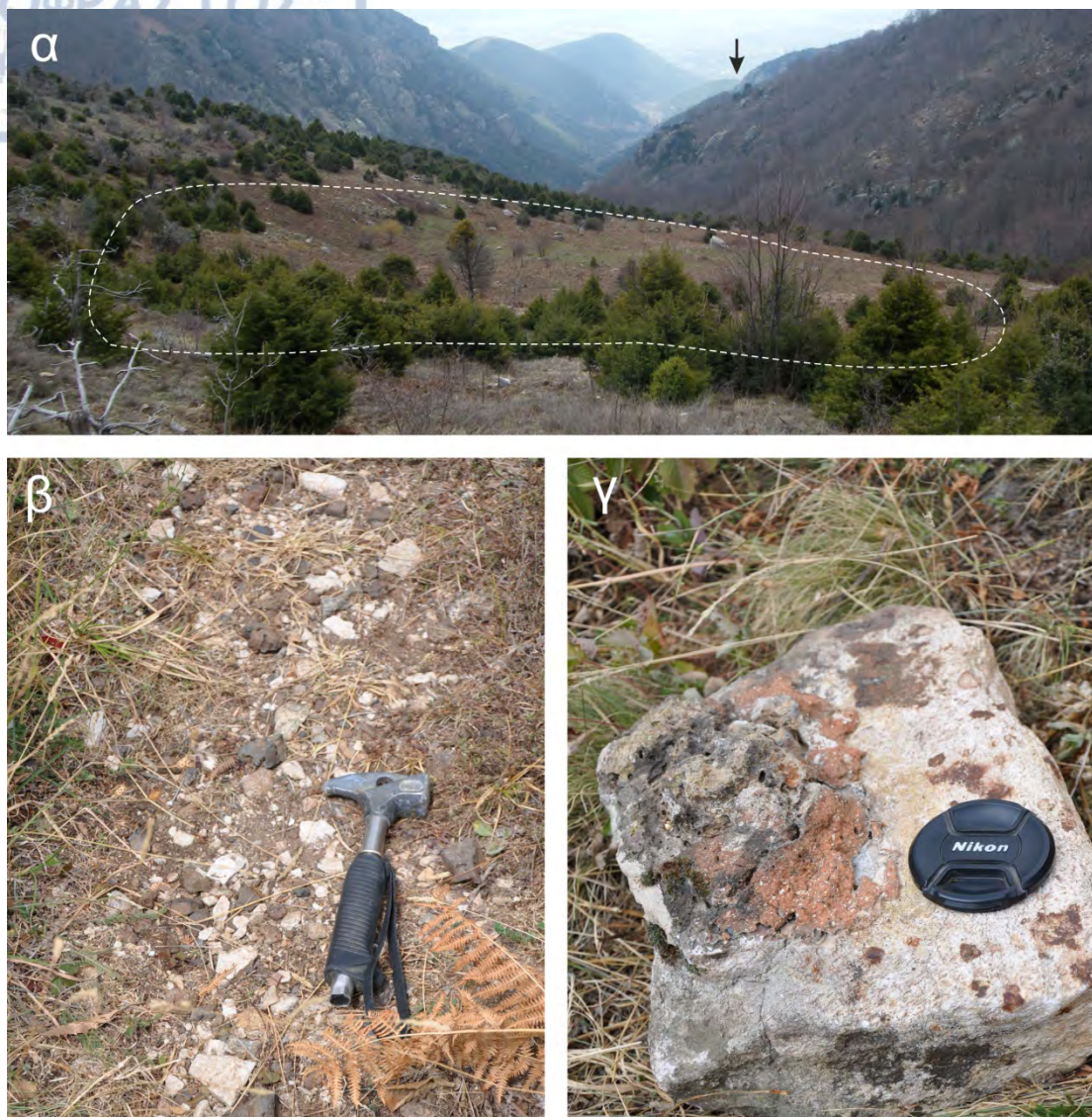
9.7.1 Περιγραφή Θέσης

Η μεταλλουργική περιοχή της Πουλιάνας βρίσκεται 3 km βόρεια της Μεσορόπης και 1,8 km νοτιοανατολικά της μεταλλευτικής περιοχής του Αβγού σε υψόμετρο 977 m (Εικ. 9.7.1.1). Σε απόσταση 1200 m νοτιοανατολικά της Πουλιάνας, στη θέση «Τσαγκάρη Λάκκος» εντοπίστηκε επίσης μικρή ποσότητα σκωριών.



Εικόνα 9.7.1.1 Η μεταλλουργική περιοχή της Πουλιάνας και η θέση «Τσαγκάρη Λάκκος».

Η περιοχή της Πουλιάνας βρίσκεται σε πρανές με νότιο προσανατολισμό και σχετικά πιο ήπια κλίση σε σχέση με τις γύρω περιοχές. Ο όρος «πουλιάνα» αποδίδεται από τους ντόπιους σε ορεινές περιοχές με ήπιο ανάγλυφο και χαρακτηριστική χαμηλή βλάστηση, κυρίως από φτέρες. Η μεταλλουργική αυτή θέση καλύπτει έκταση περίπου 5 στρεμμάτων, όπου εντοπίζονται επιφανειακά πολυάριθμες σκωρίες, καθώς και υπολείμματα καμίνων (Εικ. 9.7.1.2.α-γ). Στο ρέμα δυτικά της Πουλιάνας υπάρχει ροή νερού καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, το οποίο πηγάζει από το σπήλαιο Βοσκοβρύση 350 m βορειοδυτικά της μεταλλουργικής περιοχής.

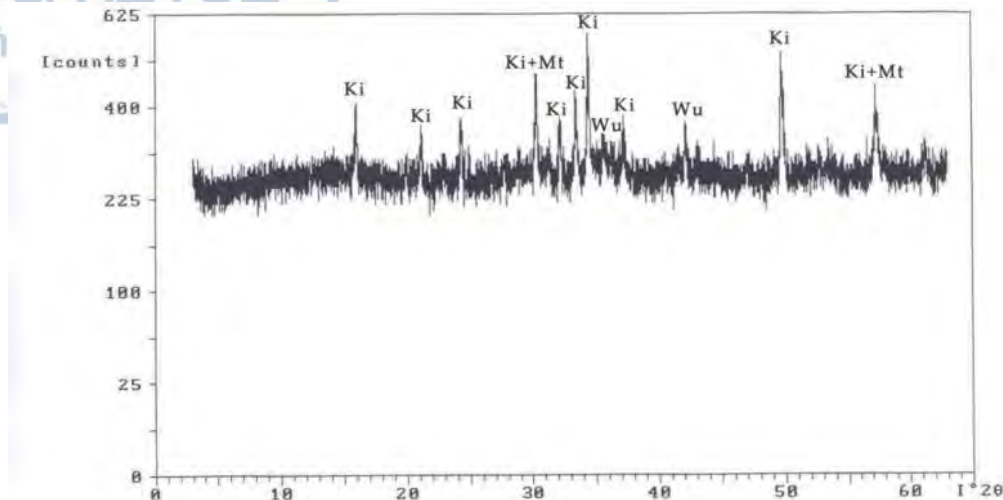


Εικόνα 9.7.1.2 α) Η μεταλλουργική περιοχή Πουλιάνας (στικτή γραμμή) και το χωριό Μεσορόδη στο βάθος (μαύρο βέλος). β) Διάσπαρτες σκωρίες στην περιοχή της Πουλιάνας. γ) Τέμαχος γνευσίου με υπολείμματα αργιλικού υλικού πιθανότατα από τη μεταλλουργική κάμινο.

9.7.2 Περιγραφή-Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Υπολειμμάτων Μεταλλουργίας

Οι σκωρίες χαρακτηρίζονται συμπαγείς έως ημισυμπαγείς, ενώ αρκετές εμφανίζουν επιφανειακή οξειδωση. Επίσης, συναντώνται κάποιες σκωρίες με σπογγώδη υφή και αρκετές σκωρίες spreiss. Η μικροσκοπική και ακτινογραφική μελέτη των σκωριών από την περιοχή της Πουλιάνας έδειξε ότι αυτές αποτελούνται κυρίως από Mn-κιρσταϊνίτη, Fe-Mn-μοντισελλίτη, φαυαλίτη, βουσιτίτη και μαγνητίτη (Εικ. 9.7.2.1). Τα ορυκτά αυτά αναπτύσσονται μέσα σε υαλώδη μάζα.

Οι κρύσταλλοι των ορυκτών της σειράς του ολιβίνη (Mn-κιρσταϊνίτης, Fe-Mn-μοντισελλίτης, φαυαλίτης) έχουν σκαφοειδή έως αλυσιδωτή μορφή (Εικ.



Εικόνα 9.7.2.1 Ορυκτολογική σύσταση σκωρίας από τη θέση της Μουσθένης, όπως προκύπτει από ακτινογραφική μελέτη (XRD). Ki: Κιρσταϊνίτης, Wu: Βουσίτης, Mt: Μαγνητίτης

9.7.2.2.α-γ). Οι σκαφοειδείς κρύσταλλοι έχουν μήκος από 350 έως 120 μm και πλάτος από 195 έως 80 μm . Οι αλυσιδωτοί κρύσταλλοι έχουν μήκος από 900 έως 700 μm και πλάτος από 150 έως 80 μm . Αυτές οι μορφές κρυστάλλων δείχνουν μία ταχύτητα κρυστάλλωσης από 40 έως 80°C/h (Donaldson, 1976).

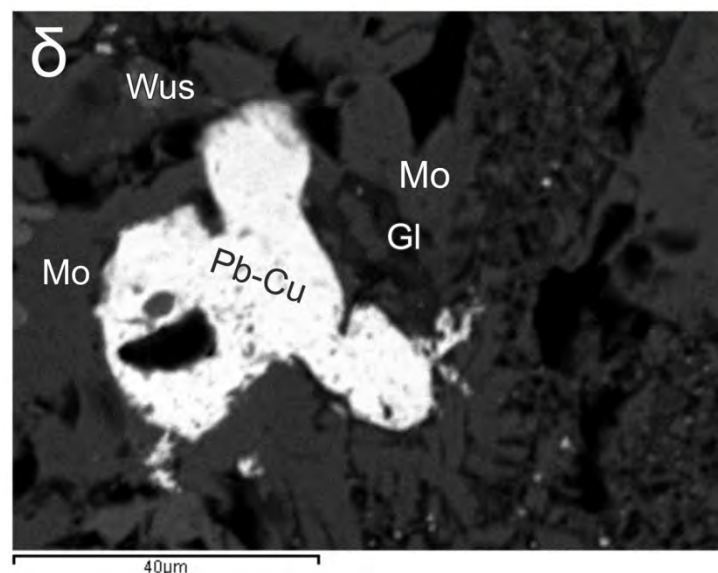
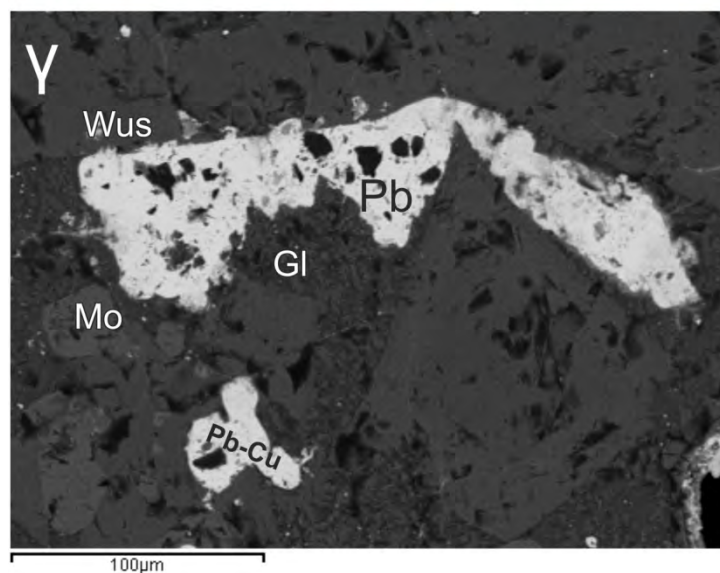
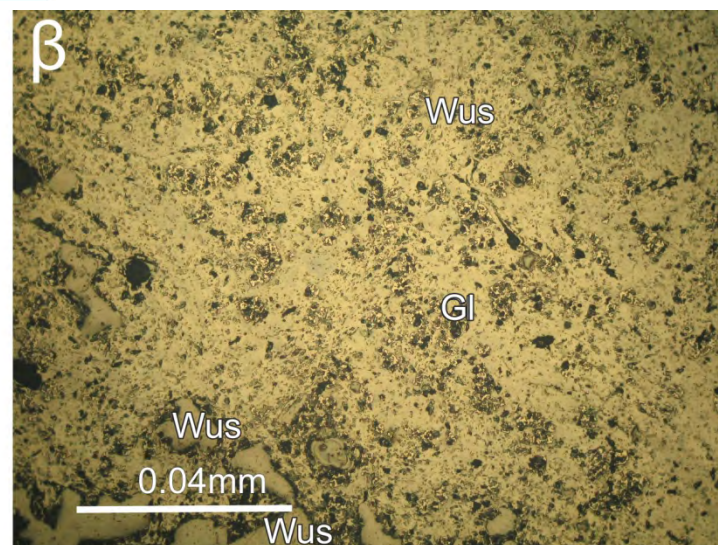
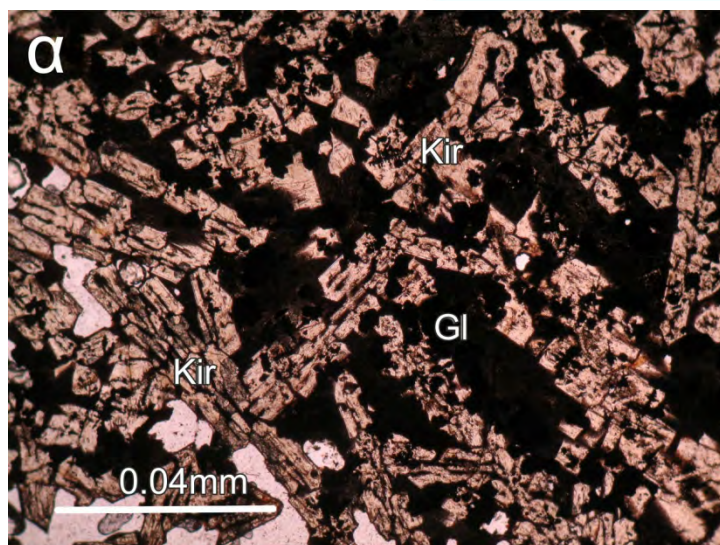
Ο βουσίτης εντοπίζεται ανάμεσα στα κενά των κρυστάλλων του κιρσταϊνίτη, με μικρές περιεκτικότητες σε Al και Ti. Επίσης, διάσπαρτα αναπτύσσονται κρύσταλλοι τιτανιούχου μαγνητίτη.

Τα κοκκία μέσα στη μάζα της σκωρίας περιέχουν Pb από 77,70 έως 99,72 wt %, Cu που κυμαίνεται από 0,75 έως 1,15 wt % και σε ίχνη Sb, As, Fe, Al και Cl. Επίσης εντοπίζονται πολλά κοκκία speiss αποτελούμενα από Fe, As, Sb, Cu (Εικ. 9.7.2.2.δ).

Ο συντελεστής ιξώδους των σκωριών της Πουλιάνας είναι $\nu_i=2,01$ που δείχνει μία αρκετά λεπτόρευστη σκωρία.

Πραγματοποιήθηκαν δύο χημικές αναλύσεις σε μία συμπαγή σκωρία και σε μία σκωρία τύπου speiss (Παράρτημα Γ). Η συμπαγής σκωρία έχει περιεκτικότητα σε Au 0,1 ppm, σε Ag 12,78 ppm και σε Cu 972,14 ppm. Η περιεκτικότητά της σε Fe_2O_3 είναι 40,43 wt %, σε Mn >1,29 wt % και σε Pb 1,6 wt %. Ο Zn στη συμπαγή σκωρία έχει περιεκτικότητα >1 wt % και το As 1855,70 ppm. Από τα ιχνοστοιχεία, το Sb έχει περιεκτικότητα 130,35 ppm.

Η σκωρία τύπου speiss έχει περιεκτικότητα σε Au 1,83 ppm, σε Ag >100,00 ppm και σε Cu 0,7 wt %. Η περιεκτικότητά της σε As είναι >1 wt %, σε Fe_2O_3 >57,19 wt %, σε Mn 0,01 wt % και σε Pb 0,71 wt %. Ο Zn στη σκωρία speiss έχει περιεκτικότητα 207 ppm και σε Sb 1440,68 ppm. Παρατηρείται ότι οι περιεκτικότητες σε Au, Ag και Cu είναι ιδιαίτερα υψηλές στη σκωρία speiss συγκρινόμενες με αυτές της συμπαγούς σκωρίας.

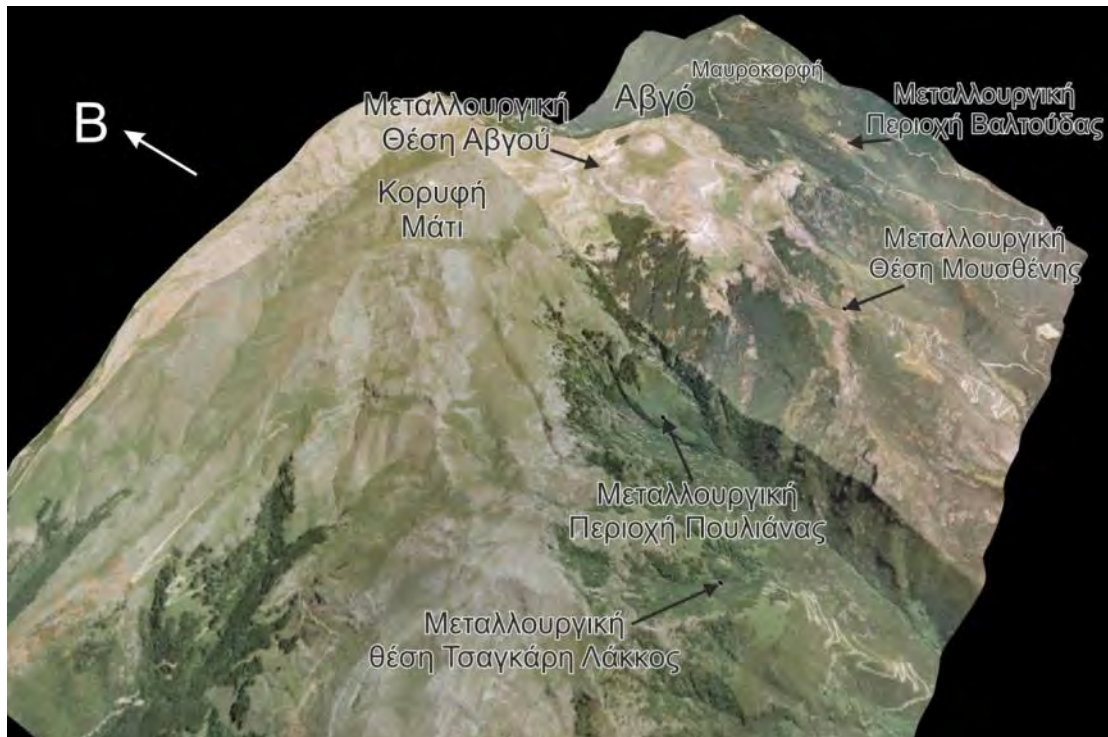


Εικόνα 9.7.2.2 Φωτογραφίες από μεταλλουργικές σκωρίες στην περιοχή Πουλιάνα. α) Κρύσταλλοι κίρσταϊνίτη (Kir) σε ναλώδη μάζα (Gl). Πολωτικό Μικροσκόπιο, //N. β) Η εικόνα 9.7.4β στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο. Διακρίνεται ο βουσιτίτης (Wus), //N. γ) Μεταλλικό κοκκίο Pb-Cu. Διακρίνονται επίσης κρύσταλλοι μοντισελλίτη (Mo), βουσιτίτη (Wus) και η ναλώδης μάζα (Gl). SEM back scattering image. δ) Μεταλλικό κοκκίο Pb-Cu σε κρυστάλλους μοντισελλίτη (Mo) και στην ναλώδη μάζα (Gl) (SEM back scattering image).

9.8 Μεταλλουργική Θέση Αβγού

9.8.1 Περιγραφή Θέσης

Η μεταλλουργική θέση εντοπίζεται στις βορειοδυτικές υπώρειες της κορυφής «Αβγό» του Παγγαίου, σε υψόμετρο 1750 m. Η έκταση των σκωριών καλύπτει μικρή επιφάνεια, περίπου 40 m², χωρίς να σχηματίζεται κάποιος διακριτός σωρός (Εικ. 9.8.1.1-2). Πηγή νερού υπάρχει στο νότιο τμήμα της περιοχής του Αβγού, σε απόσταση 800 m από τη μεταλλουργική θέση.



Εικόνα 9.8.1.1 Η μεταλλουργική θέση στην κορυφή «Αβγό» Παγγαίου. (υπόβαθρο: Basemap Ktimatologio)



Εικόνα 9.8.1.2 Άποψη της μεταλλουργικής θέσης «Αβγό» Παγγαίου.

Διάσπαρτες μεταλλουργικές σκωρίες παρατηρούνται επιφανειακά σε έκταση 5 στρεμμάτων. Οι σκωρίες είναι συμπαγείς και βρίσκονται ανάμεσα σε τεμάχια μεταλλεύματος. Η διάμετρός τους κυμαίνεται μεταξύ 2 και 4 cm. Το μέσο ειδικό βάρος των συλλεχθέντων δειγμάτων είναι 3,7 gr/cm³. Επίσης, εμφανίζουν ασθενή μαγνήτιση.

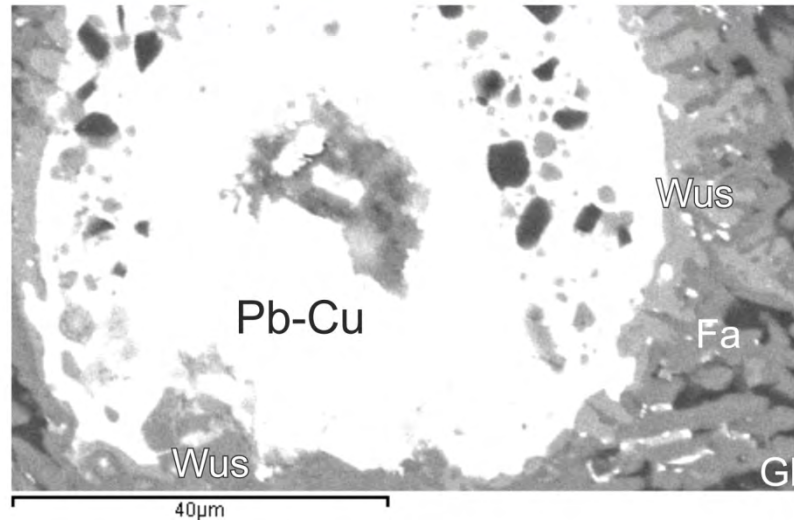
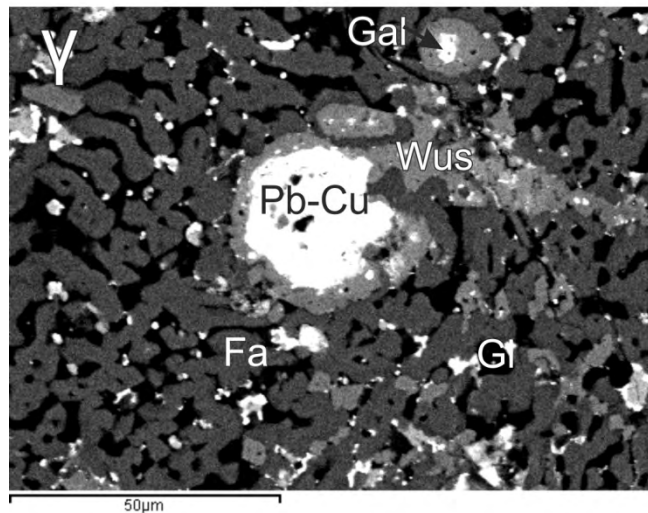
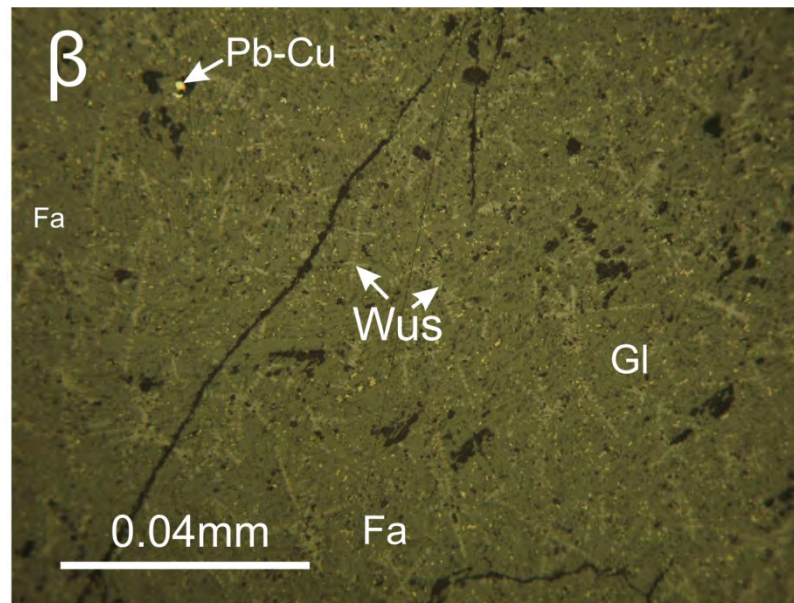
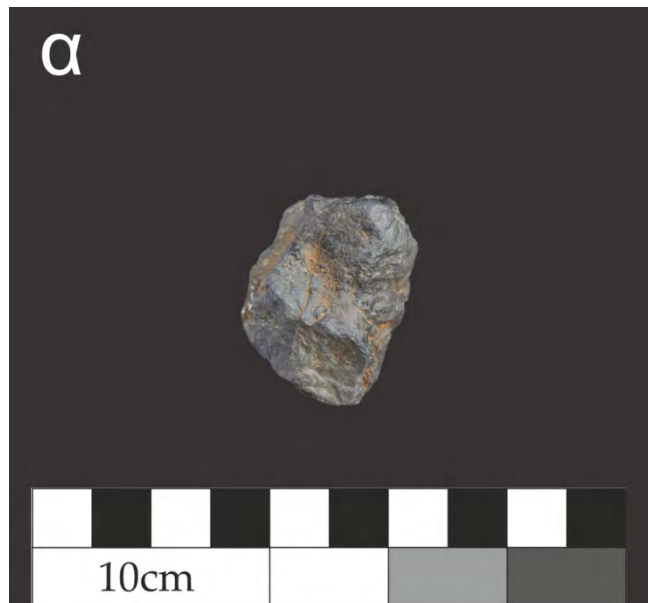
9.8.2 Περιγραφή-Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Μεταλλουργικών Σκωριών

Η ορυκτολογική σύσταση των σκωριών αποτελείται κυρίως από φαυαλίτη και βουσίτη (Εικ. 9.8.2.1.α, β). Η μορφή των κρυστάλλων του φαυαλίτη είναι σκαφοειδής έως μικροσκαφοειδής. Η μορφή αυτή δείχνει ταχύτητα κρυστάλλωσης περίπου 7°C/h (Donaldson, 1976). Οι κρύσταλλοι έχουν διαστάσεις κατά μέσο όρο 20 μm x 10 μm. Ο φαυαλίτης περιέχει ποσοστά Mn, Mg και Ca και σε ορισμένους κρυστάλλους μεταπίπτει σε Mn-Mg-κισταϊνίτη.

Στο βουσίτη παρατηρούνται μικρές περιεκτικότητες σε Mn, Al, Si και Ca. Επίσης η υαλώδης μάζα έχει σύσταση πυροξενιτική. Μέσα στη μάζα του φαυαλίτη-βουσίτη εντοπίζεται μικρός αριθμός κόκκων γαληνίτη ως υπολείμματα από το αρχικό μετάλλευμα. Τα κοκκία μέσα στη μάζα της σκωρίας περιέχουν Pb από 30,78 έως 82,92 wt% και Cu από 3,18 έως 9,44 wt %, ενώ κάποια περιέχουν Sb από 26,53 έως 90,95 wt % (Εικ. 9.8.2.1.γ, δ). Επίσης παρατηρήθηκαν κάποια κοκκία με περιεκτικότητα σε As από 3,58 έως 12,34 wt %, σε Fe από 4,29 έως 22,10 wt % και σε Cr 69,56 wt %.

Ο συντελεστής ιξώδους των σκωριών στη μεταλλουργική θέση του Αβγού είναι $\nu_i=1,88$ δείχνει ότι πρόκειται πιθανότατα για λεπτόρευστη σκωρία με χαμηλό ιξώδες. Ο παράγοντας G έχει τιμή 0,21. Ο παράγοντας S έχει τιμή 1,11.

Η χημική ανάλυση ολικού δείγματος έδειξε περιεκτικότητα σε Au 0,07 ppm και σε Ag 2,60 ppm. Επίσης, η περιεκτικότητα σε Cu είναι 252,60 ppm, σε Fe 33,38 wt %, σε Pb 1,07 wt %, σε Zn 2617,00 ppm, σε As 1211,40 ppm και σε Sb 432,23 ppm. Σχετικά υψηλές περιεκτικότητες παρουσιάζουν τα Sr (187,40 ppm) και V (31,00 ppm).

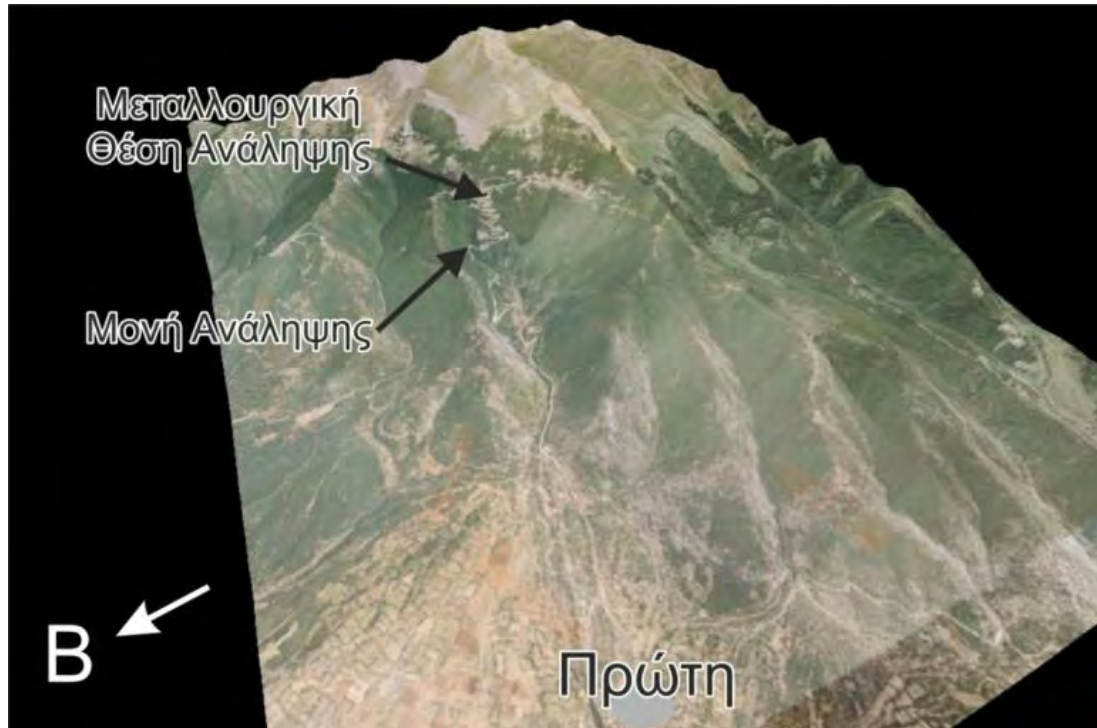


Εικόνα 9.8.2.1 Φωτογραφίες μεταλλουργικών σκωριών από τη θέση Αβγόα) Συμπαγής σκωρία από τη μεταλλουργική θέση του Αβγού β) Κρύσταλλοι βουσίτη (Wus) σε φαυαλίτη (Fa) και ναλώδη μάζα (Gl) Επίσης διακρίνονται μεταλλικά κοκκία Pb-Cu. Μεταλλογραφικό μικροσκόπιο //N. γ) Κοκκίο Pb-Cu σε βουσίτη (Wus) και φαυαλίτη (Fa). Επίσης διακρίνεται στη μάζα της σκωρίας γαληνίτης (Gal). Υαλώδης μάζα (Gl). SEM back scattering image. δ) Κοκκίο Pb-Cu. SEM back scattering image.

9.9 Μεταλλουργική Περιοχή Ανάληψης

9.9.1 Περιγραφή Θέσης

Η μεταλλουργική περιοχή της Ανάληψης εντοπίζεται 250 m νοτιοανατολικά της Μονής Ανάληψης σε υψόμετρο 1040 m (Εικ. 9.9.1.1, 9.9.1.2α), στην περιοχή «Γούρνες». Πολύ κοντά στη μεταλλουργική περιοχή υπάρχει πηγή νερού.

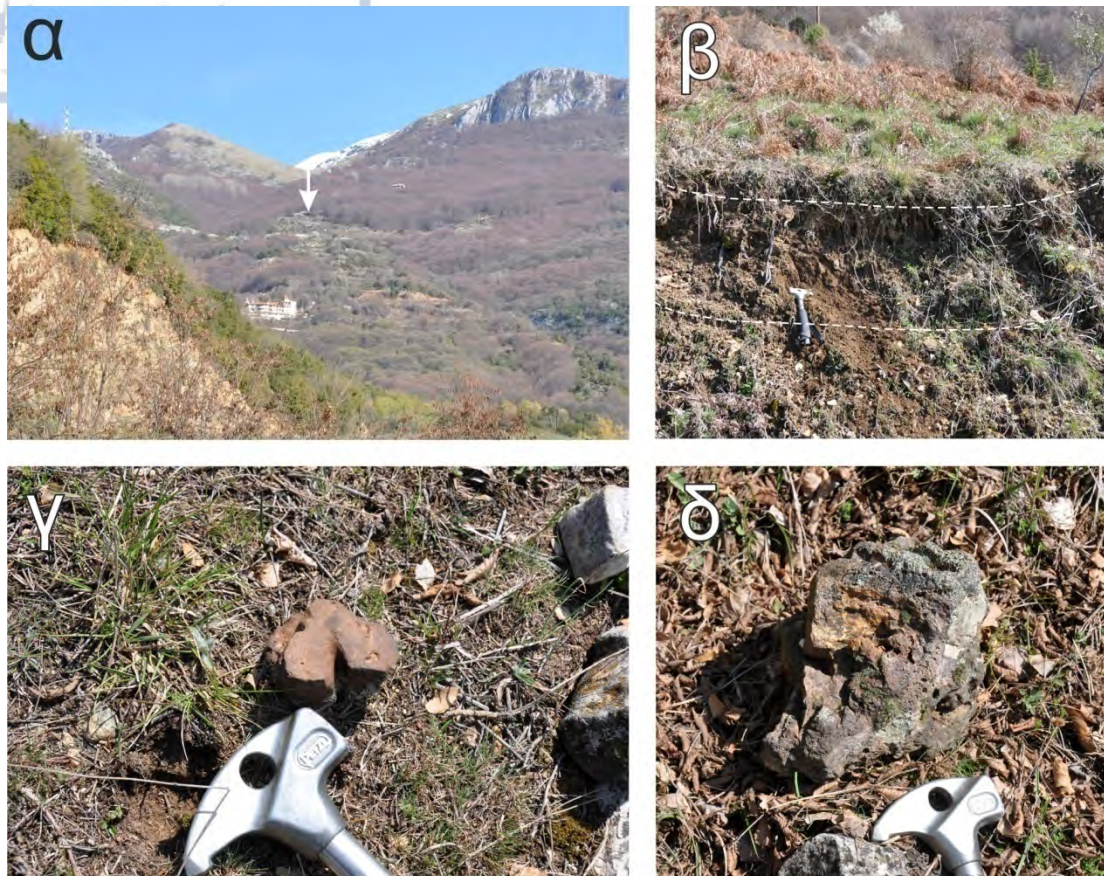


Εικόνα 9.9.1.1 Γεωγραφική τοποθέτηση της μεταλλουργικής περιοχής Ανάληψης. (υπόβαθρο: Basemap Ktimatologio)

Η μεταλλουργική περιοχή καλύπτει έκταση περίπου 1 στρέμματος, ενώ οι σκωρίες εντοπίζονται διάσπαρτες στα κατάντη και καλύπτουν έκταση περίπου 40 στρεμμάτων. Στη θέση αυτή διατηρούνται υπολείμματα μεταλλουργικής διαδικασίας επιφανειακά, αλλά και σε στρώμα πάχους 30-40 cm, το οποίο υπόκειται 10 cm του εδαφικού καλύμματος. Πρόκειται για σκωρίες συμπαγείς, σπογγώδεις ενώ συναντώνται και σκωρίες τύπου spreiss (Εικ. 9.9.1.2.β-γ). Επίσης εντοπίζονται υπολείμματα μεταλλουργικών καμίνων (Εικ. 9.9.1.2.δ).

9.9.2 Περιγραφή-Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Μεταλλουργικών Σκωριών

Οι συμπαγείς σκωρίες έχουν μέσο ειδικό βάρος $3,1 \text{ gr/cm}^3$ και δεν εμφανίζουν μαγνήτιση. Οι σκωρίες spreiss αντιθέτως είναι μαγνητικές με μέσο ειδικό βάρος περίπου $4,5 \text{ gr/cm}^3$.

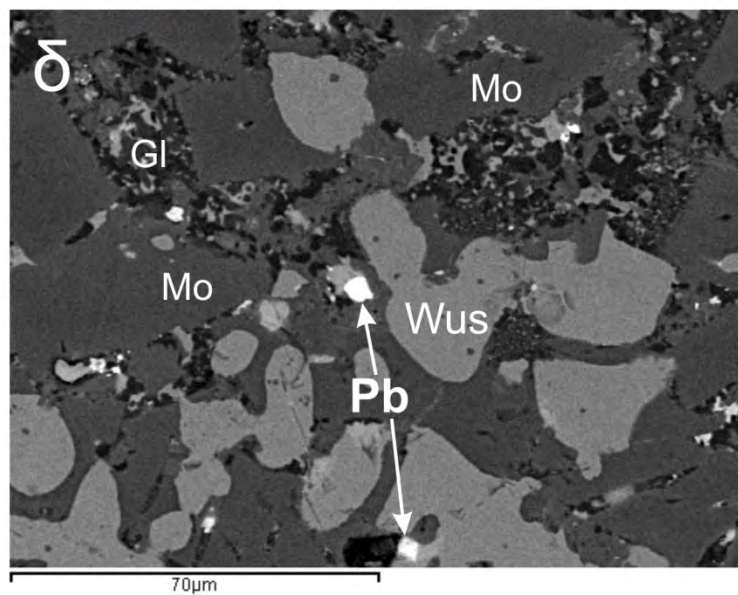
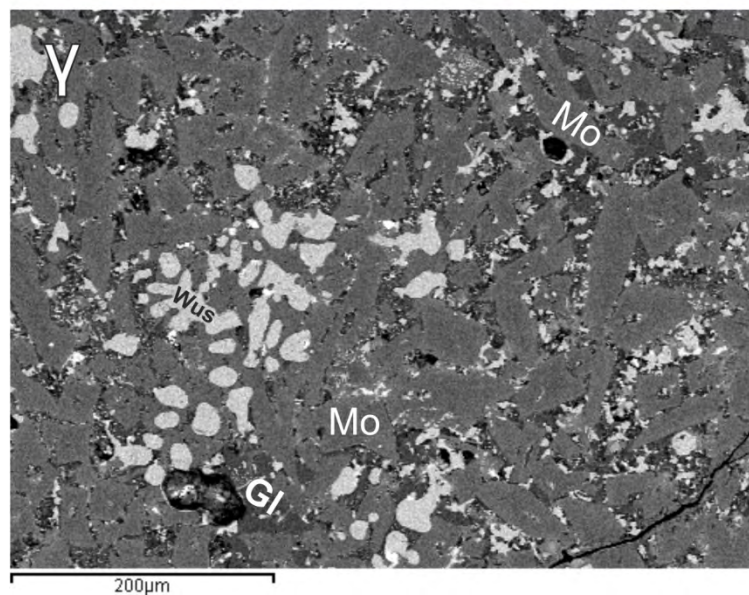
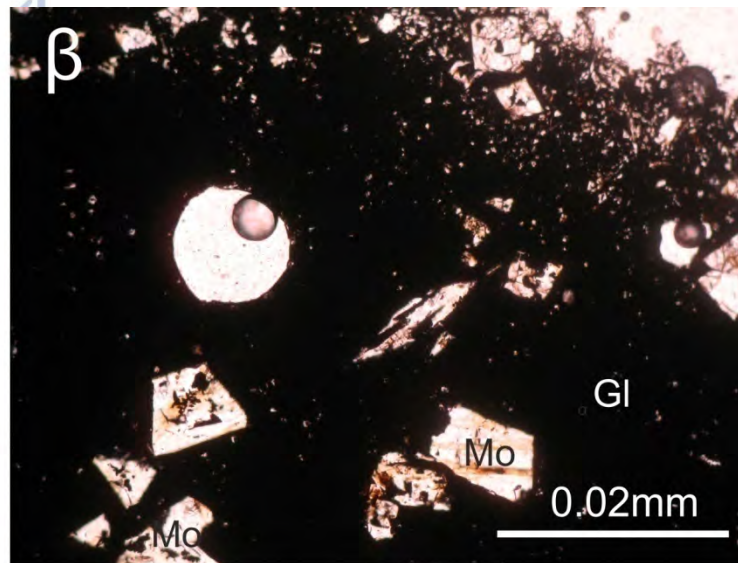
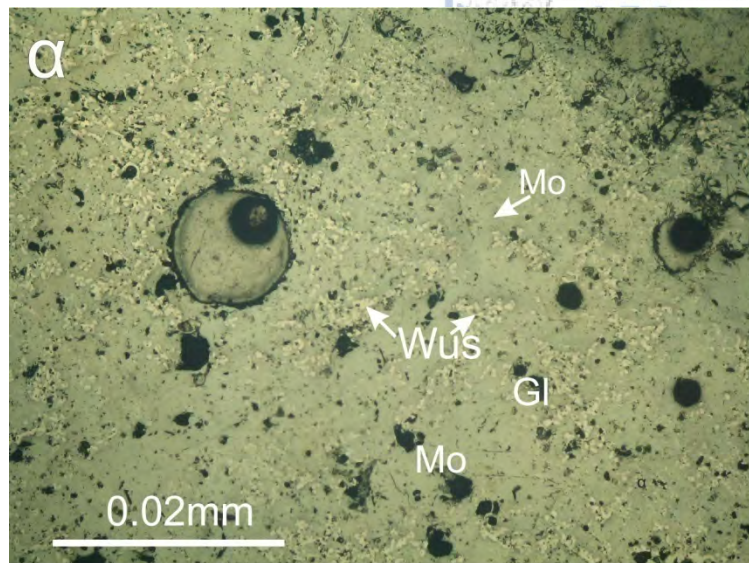


Εικόνα 9.9.1.2 α) Μεταλλουργική περιοχή Ανάληψης (βέλος) πάνω από τη Μονή Αναλήψης. β) Στρώμα με διάσπαρτες μεταλλουργικές σκωρίες. γ) Συμπαγής επιφανειακή σκωρία στη θέση Ανάληψης. δ) Τμήμα γνευσίου με αργιλικό συνδετικό υλικό από τοίχωμα μεταλλουργικής καμίνου.

Η μικροσκοπική παρατήρηση των σκωριών έδειξε ότι αποτελούνται κυρίως από μοντισελίτη, βουσίτη, υαλώδη μάζα (9.9.2.1.α-δ) και κατά θέσεις μαγνητοπυρίτη. Τα κοκκία στη μάζα της σκωρίας αποτελούνται κατά κύριο λόγο από μεταλλικό Pb και σε κάποιες περιπτώσεις από speiss.

Οι κρύσταλλοι του μοντισελίτη παρουσιάζουν σκαφοειδή ως σκελετόμορφη όψη στο μικροσκόπιο. Οι σκελετόμορφοι κρύσταλλοι έχουν μέσες διαστάσεις $180 \times 60 \mu\text{m}$. Οι σκαφοειδείς κρύσταλλοι παρουσιάζονται αραιά στη μάζα της σκωρίας. Έχουν μήκος από 400 έως 30 μm και πλάτος από 40 έως 20 μm . Ο συντελεστής ιξώδους των σκωριών στη μεταλλουργική θέση της Ανάληψης είναι $\eta_i=1,37$ δείχνοντας λεπτόρευστη σκωρία με χαμηλό ιξώδες.

Η χημική ανάλυση ενός δείγματος σκωρίας από την περιοχή της Ανάληψης έδειξε περιεκτικότητα σε Au 0,25 ppm και σε Ag 31 ppm. Ο Cu έχει περιεκτικότητα 994,66 ppm. Η μία σκωρία έχει περιεκτικότητα σε Fe_2O_3 42,88 wt %, σε Pb 1,00 wt %, σε Zn 0,70 wt % και σε As >1,00 wt %. Επίσης, έντονη είναι η παρουσία ιχνοστοιχείων με περιεκτικότητες Sb (576,69 ppm), Ba (413,70), V (42,00 ppm), Sr (313,40 ppm) και Cr (58,50 ppm).



Εικόνα 9.9.2.1 Φωτογραφίες από σκωρίες της περιοχής Ανάληψης. α) Σκωρία με κρυστάλλους βουσίτη (Wus) σε ναλώδη μάζα (Gl) με μοντισελίτη (Mo). Μεταλλογραφικό μικροσκόπιο, //N β) Η φωτογραφία της εικόνας 9.9.4α στο πολώτικο μικροσκόπιο με +N. Διακρίνονται οι κρύσταλλοι του μοντισελίτη (Mo) στην ναλώδη μάζα (Gl). γ) Βουσίτης (Wus) με μοντισελίτη (Mo) σε ναλώδη μάζα (Gl). SEM backscattering image. δ) Κοκκία Pb με βουσίτη (Wus), μοντισελίτη (Mo) σε ναλώδη μάζα (Gl). SEM backscattering image.

9.10 Μεταλλουργική Θέση Δωματίων

9.10.1 Περιγραφή Θέσης

Η μεταλλουργική θέση των Δωματίων βρίσκεται στο νοτιοανατολικό τμήμα του χωριού Δωμάτια (Εικ. 9.10.1.1). Πλήθος σύγχρονων κτηρίων έχει κτιστεί πάνω στις σκωρίες και τα μόνα υπολείμματα της μεταλλουργικής δραστηριότητας εντοπίζονται σε πρανή διανοιγμένων δρόμων (Εικ. 9.10.1.2).



Εικόνα 9.10.1.1 Γεωγραφική τοποθέτηση της μεταλλουργικής θέσης των Δωματίων. (υπόβαθρο: Basemap Klimatologio)



Εικόνα 9.10.1.2 Σκωρίες σε πρανές δρόμου στην περιοχή της μεταλλουργικής θέσης Δωματίων.

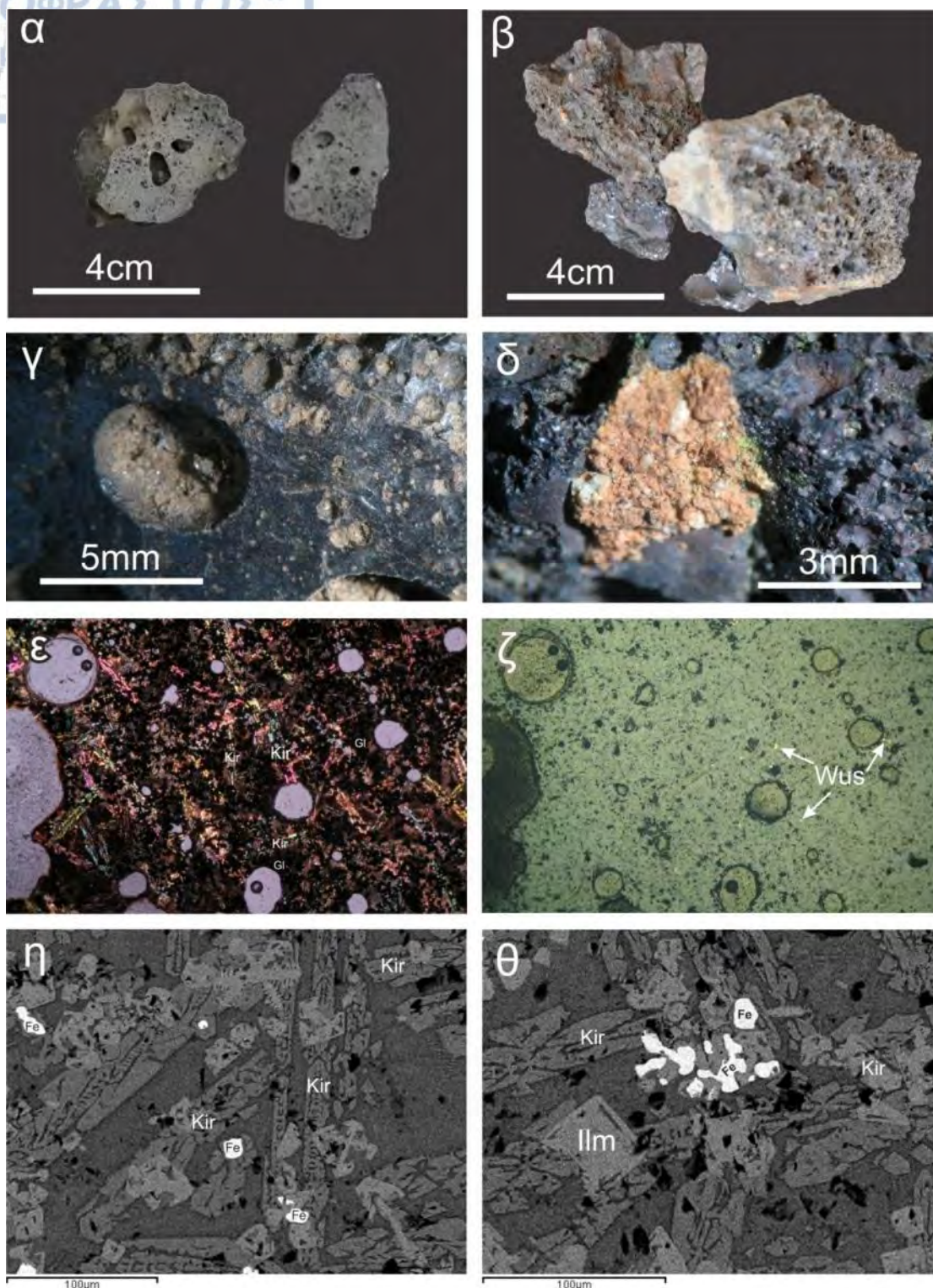
9.10.2 Περιγραφή-Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Μεταλλουργικών Σκωριών

Οι σκωρίες που εντοπίζονται είναι κυρίως σπογγώδεις και με μέσο ειδικό βάρος $3,5 \text{ gr/cm}^3$ (Εικ. 9.10.2.1.α-γ). Ορισμένες σκωρίες παρουσιάζουν υπολείματα του αργιλικού υλικού επένδυσης (Εικ. 9.10.2.1.δ). Οι σκωρίες παρουσιάζουν ασθενή μαγνήτιση. Η μελέτη των σκωριών έδειξε ότι αυτές αποτελούνται από κίρσταϊνίτη, ιλμενίτη, βουσίτη, αυτοφυή Fe και υαλώδη μάζα. Οι κρύσταλλοι του κίρσταϊνίτη έχουν αλυσιδωτή μορφή με μήκος 700-400 μm και πλάτος 40-80 μm . Η μορφή τους αυτή δείχνει εκτιμώμενη ταχύτητα κρυστάλλωσης των σκωριών 80° C/h (Εικ. 9.10.2.1.ε-θ).

Ιδιαίτερης σημασίας αποτελεί το γεγονός ότι στις σκωρίες στη θέση Δωμάτια μετρήθηκε μεγάλο ποσοστό ακτινοβολίας από 0,23 έως 0,67 $\mu\text{Sv/h}$. Αξίζει να αναφερθεί ότι το όριο ακτινοβολιών για τον κοινό πληθυσμό είναι 1 mSv/yr (Κανονισμοί Ακτινοπροστασίας, ΦΕΚ/β/216/6.3.2001).

Ο συντελεστής ιξώδους των σκωριών στη μεταλλουργική θέση των Δωματίων είναι $\nu_i=1,79$ δείχνει ότι πρόκειται πιθανότατα για λεπτόρευστη σκωρία με χαμηλό ιξώδες. Ο παράγοντας G έχει τιμή 0,21. Ο παράγοντας S έχει τιμή 1,04.

Η χημική ανάλυση των σκωριών από τα Δωμάτια (Παράρτημα Γ) έδειξε μηδενική περιεκτικότητα σε Au και σε Ag 0,30-0,69 ppm. Η περιεκτικότητα του Fe_2O_3 είναι από 42,78 έως 52,36 wt %, ενώ χαμηλές περιεκτικότητες έχουν ο Pb (4,90 - 183,50 ppm), ο Zn (30,00-257,10 ppm) και το As (4,40-6,50 ppm) σε σχέση με άλλες σκωρίες στο όρος Παγγαίο. Ιδιαίτερα υψηλές περιεκτικότητες εμφανίζουν το Ce με 0,10 wt %, το Sr 301,50 έως 409,00 ppm, το Th 2716,10 ppm, το U 95,40 έως 129,80 ppm, το V 1103,00 έως 1227,00 ppm, το Zr 857,60 έως 2827,50 ppm, το Y 288,98 έως 433,20 ppm και το La 5773,30 - 6171,10 ppm.



Εικόνα 9.10.2.1 Φωτογραφίες σκωριών από τη μεταλλουργική θέση Δωματίων α) Σκωρίες σε τομή. β) Σπογγώδη συντήγματα. γ) Χαρακτηριστική σπογγώδης υφή σκωρίας. δ) Σπογγώδης σκωρία με υπόλειμμα του αργιλικού υλικού από την εσωτερική επένδυση της καμίνου. ε) Σπογγώδης σκωρία με κρυστάλλους κίρσταϊνίτη (Kir) σε υαλώδη μάζα (Gl). Πολωτικό μικροσκόπιο, +N. ζ) Η εικόνα 9.10.3ε στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο, +N. Βουσίτης (Wus). η) Κοκκία μεταλλικού Fe και κίρσταϊνίτη (Kir) στην υαλώδη μάζα (Gl). SEM back scattering image. θ) Κοκκία μεταλλικού Fe κίρσταϊνίτη (Kir) σε υαλώδη μάζα (Gl). Διακρίνεται κρύσταλλος ιλμενίτη (Ilm). SEM back scattering image.

9.11 Μεταλλουργική Θέση Οφρυνίου

9.11.1 Περιγραφή Θέσης

Η μεταλλουργική θέση Οφρυνίου βρίσκεται 1400 m βόρεια του ομώνυμου χωριού πολύ κοντά σε πηγή νερού. Απέχει 600 m νότια της μεταλλευτικής περιοχής του Οφρυνίου. Πρόκειται για περιοχή με διάσπαρτες σκωρίες, που δεν ξεπερνά σε έκταση το 1 στρέμμα. Οι σκωρίες εντοπίζονται κυρίως στο χωματόδρομο που συνδέει το Οφρύνιο με την Παλαιοκώμη, καθώς και σε έναν παρακείμενο δρόμο (Εικ. 9.11.1-2)..



Εικόνα 9.7.1.1 Άποψη της μεταλλουργικής θέσης του Οφρυνίου. (υπόβαθρο: Basemap Ktimatologio)

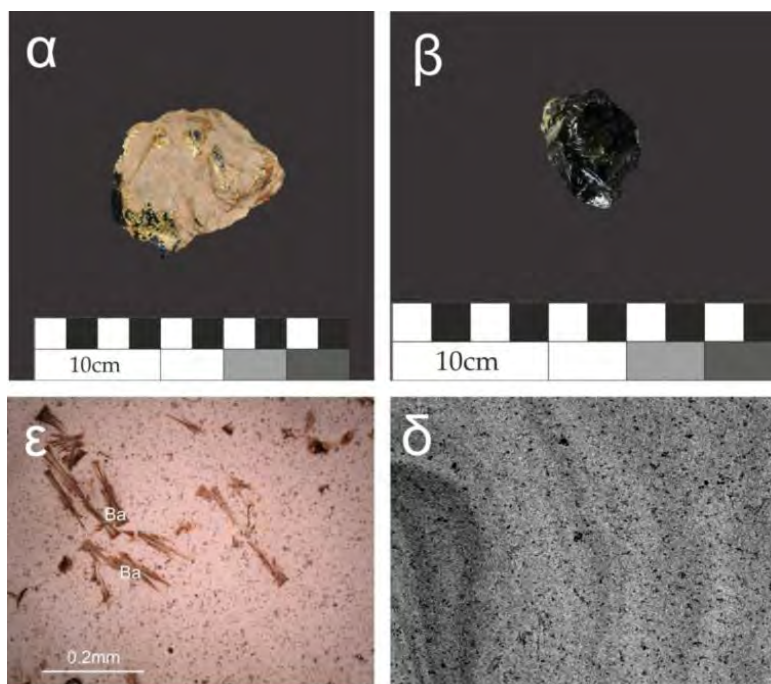


Εικόνα 9.8.1.2 Η μεταλλουργική θέση του Οφρυνίου στο χωματόδρομο Οφρυνίου-Παλαιοκώμης.

9.11.2 Περιγραφή-Ορυκτολογική-Χημική Σύσταση Μεταλλουργικών Σκωριών

Οι σκωρίες έχουν μακροσκοπικά υαλώδη υφή, καθώς και επιφανειακές εξαλλοιώσεις της υάλου. Είναι επίσης χαρακτηριστικός ο κογχώδης θραυσμός τους (Εικ. 9.11.2.1.α-β).

Όπως προκύπτει από τη μικροσκοπική τους παρατήρηση και το XRD, κυριαρχεί το άμορφο SiO_2 (ύαλος), αλλά και κρυσταλλικό υπό μορφή χαλαζία. Στην υαλώδη μάζα εντοπίζονται κόκκοι βαρύτη (Εικ. 9.11.2.1.γ). Η υαλώδης μάζα κατά θέσεις εμφανίζει χαρακτηριστική στρωμάτωση (Εικ. 9.11.2.1.δ). Στην υαλώδη μάζα εντοπίζεται Pb με περιεκτικότητα από 11,58 έως 14,89 wt % (μ.ό. 13,26 wt %) και Zn με περιεκτικότητα από 21,03 έως 23,28 wt % (μ.ό. 22,03 wt %). Σε μικρότερες περιεκτικότητες βρίσκονται επίσης το As 0,07 – 0,58 wt % (μ.ό. 0,26 wt %), το Al 0,97 wt % και το Mg 1,32 -1,80 wt % (μ.ό. 1,62 wt %). Ο συντελεστής ιξώδους των σκωριών στη μεταλλουργική θέση του Οφρυνίου είναι $\nu_i=0,51$ δείχνοντας σκωρία με υψηλό ιξώδες εξαιτίας του υψηλού πυριτικού περιεχομένου.



Εικόνα 9.11.2.1 Σκωρίες στη μεταλλουργική θέση Οφρυνίου. α) Υαλώδης σκωρία. β) Υαλώδης σκωρία σε τομή. γ) Κρύσταλλοι βαρύτη μέσα στην υαλώδη μάζα. Πολωτικό μικροσκόπιο, //N. δ) Στρωμάτωση της υαλώδους μάζας της σκωρίας. SEM back scattering image.

Η χημική ανάλυση δύο σκωριών από το Οφρύνιο (Παράρτημα Γ) έδειξε περιεκτικότητα σε Au 0,01 ppm και σε Ag από 20,3 έως 46,2 ppm. Ο Pb έχει περιεκτικότητα 18692,04 ppm και ο Zn > 10000,00 ppm. Το Ba έχει περιεκτικότητα > 10000,00 ppm το Sr από 365,70 έως 1555,10 ppm (μ.ό. 960,40 ppm). Σε επίσης υψηλή περιεκτικότητα βρίσκεται το Sb από 88,80 έως 1324,00 ppm.

10. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΙΣΟΤΟΠΩΝ ΜΟΛΥΒΔΟΥ

10.1 Γενικά

Μία μεγάλη πρόκληση στην αρχαιομεταλλουργία είναι η σύνδεση των μεταλλευτικών θέσεων και των θέσεων μεταλλουργίας με τα παραγόμενα μεταλλικά αντικείμενα, δηλαδή ο προσδιορισμός (ταυτοποίηση) της πηγής των αρχαιολογικών ευρημάτων. Η συσχέτιση δειγμάτων με βάση μόνο τη χημική σύσταση από την αρχή έδειξε αδυναμία προς την κατεύθυνση αυτή. Τη δεκαετία του 1970 δύο ερευνητικές ομάδες (Brill and Wampler, 1965; Grögler et al, 1966) πρότειναν τη χρήση της ανάλυσης ισοτόπων μολύβδου για τη συσχέτιση μεταλλεύματος και μεταλλικών αντικειμένων. Από τότε μέχρι σήμερα σημαντικά βήματα καταγράφηκαν πάνω σε αυτήν τη μέθοδο και την ακρίβειά της (Gale, 1989; Stos-Gale et al, 1995; Pernicka et al, 1990; Stos-Gale and Gale, 2009), δίνοντας απαντήσεις σε ερωτήματα προέλευσης. Μάλιστα για την καλύτερη επόπτευση και συλλογή πληροφοριών σχετικά με ισοτοπικές αναλύσεις μολύβδου που έχουν γίνει σε μεταλλεύματα και μεταλλικά τέχνηρα υπάρχει αναρτημένη η βάση δεδομένων OXALID (Oxford Archaeological Lead Isotope Database).

10.2 Ισότοπα Μολύβδου σε δείγματα από το όρος Παγγαίο

Ο μολύβδος εμφανίζεται στη φύση με τέσσερα ισότοπα: ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb και ^{208}Pb . Τα τρία τελευταία ισότοπα προέρχονται από τη μεταστοιχείωση των ^{235}U (ημιπερίοδος ζωής 703.8 Myr), ^{238}U (4.468 Gyr), and ^{232}Th (14.01 Gyr) αντίστοιχα, ενώ το ^{204}Pb δεν μεταστοιχειώνεται. Συνεπώς, η ισοτοπική σύσταση του μολύβδου στη γη αποτελεί άθροισμα του μολύβδου που υπήρχε κατά τη δημιουργία της και του μολύβδου που προέρχεται από τη ραδιενεργό διάσπαση άλλων στοιχείων. Η βασική ιδέα της μεθόδου βασίζεται στο γεγονός ότι οι αναλογίες των ισοτόπων μολύβδου των τεχνέργων, αλλά και των μεταλλουργικών καταλοίπων (σκωρίες κ.α.) θα είναι όμοιες με αυτές του προερχόμενου μεταλλεύματος (Stos-Gale and Gale, 2009).

Οι αυξημένες θερμοκρασίες κατά την τήξη του μεταλλεύματος δεν επηρεάζουν τις ισοτοπικές αναλογίες (Stos-Gale and Gale, 2009). Ωστόσο είναι προβληματικά τα αποτελέσματα σε δείγματα με χαμηλό ποσοστό Pb (<100 ppm). Επίσης για περιορισμένες μεταλλευτικές περιοχές αναμένεται οι ισοτοπικές αναλογίες να μην διαφέρουν αρκετά.

Στην παρούσα εργασία κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθεί η ισοτοπική σύσταση του μολύβδου τόσο στο μέταλλευμα, όσο και στις μεταλλουργικές σκωρίες της περιοχής έρευνας. Τα στοιχεία των ισοτοπικών αναλογιών είναι

πιθανό να αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο για το συσχετισμό των μεταλλευτικών και των μεταλλουργικών θέσεων.

Συνολικά ελήφθησαν 5 δείγματα μεταλλεύματος από τις μεταλλευτικές περιοχές του Παγγαίου και 5 δείγματα από μεταλλουργικές σκωρίες από τις περιοχές μεταλλουργίας. Συγκεκριμένα, ένα δείγμα από τη στοά Κοκκινοχώματος (Κοκκινόχωμα-1), ένα από τη στοά της Αγίας Τριάδας (Αγία Τριάδα-1), του Τρικόρφου (Τρίκορφο-3), των Ασημότρυπων (Ασημότρυπα-7) και από τη στοά Οφρύνιο-2 στο Οφρύνιο. Τα δείγματα των μεταλλουργικών σκωριών προέρχονται από τις μεταλλουργικές θέσεις Σίνα, Βαλτούδα, Παλαιοχώρι, Δωμάτια και Οφρύνιο. Οι αναλύσεις ισοτόπων μολύβδου έλαβαν χώρα στο εργαστήριο IsoAnalysis UG στο Βερολίνο.

Στον πίνακα 10.2.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ισοτοπικών αναλύσεων από τα δείγματα στο όρος Παγγαίο. Στα δείγματα μεταλλεύματος η αναλογία $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ κυμαίνεται από 38,771 έως 38,907. Η αναλογία των ισοτόπων $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ έχει τιμές από 15,658 έως 15,677, ενώ η αναλογία των ισοτόπων $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ έχει τιμές από 18,629 έως 18,785. Στα δείγματα από μεταλλουργικές σκωρίες η αναλογία $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ κυμαίνεται από 38,809 έως 38,940. Η αναλογία των ισοτόπων $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ έχει τιμές από 15,650 έως 15,685, ενώ η αναλογία $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ έχει τιμές από 18,696 έως 18,776.

Στο σχήμα 10.2.1 παρουσιάζεται η αναλογία των ισοτόπων $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ προς την αναλογία $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. Το μετάλλευμα από τις επιμέρους μεταλλευτικές

Πίνακας 10.2.1 Αποτελέσματα ισοτοπικών αναλύσεων Pb σε δείγματα μεταλλεύματος και μεταλλουργικών σκωριών από το όρος Παγγαίο.

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
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

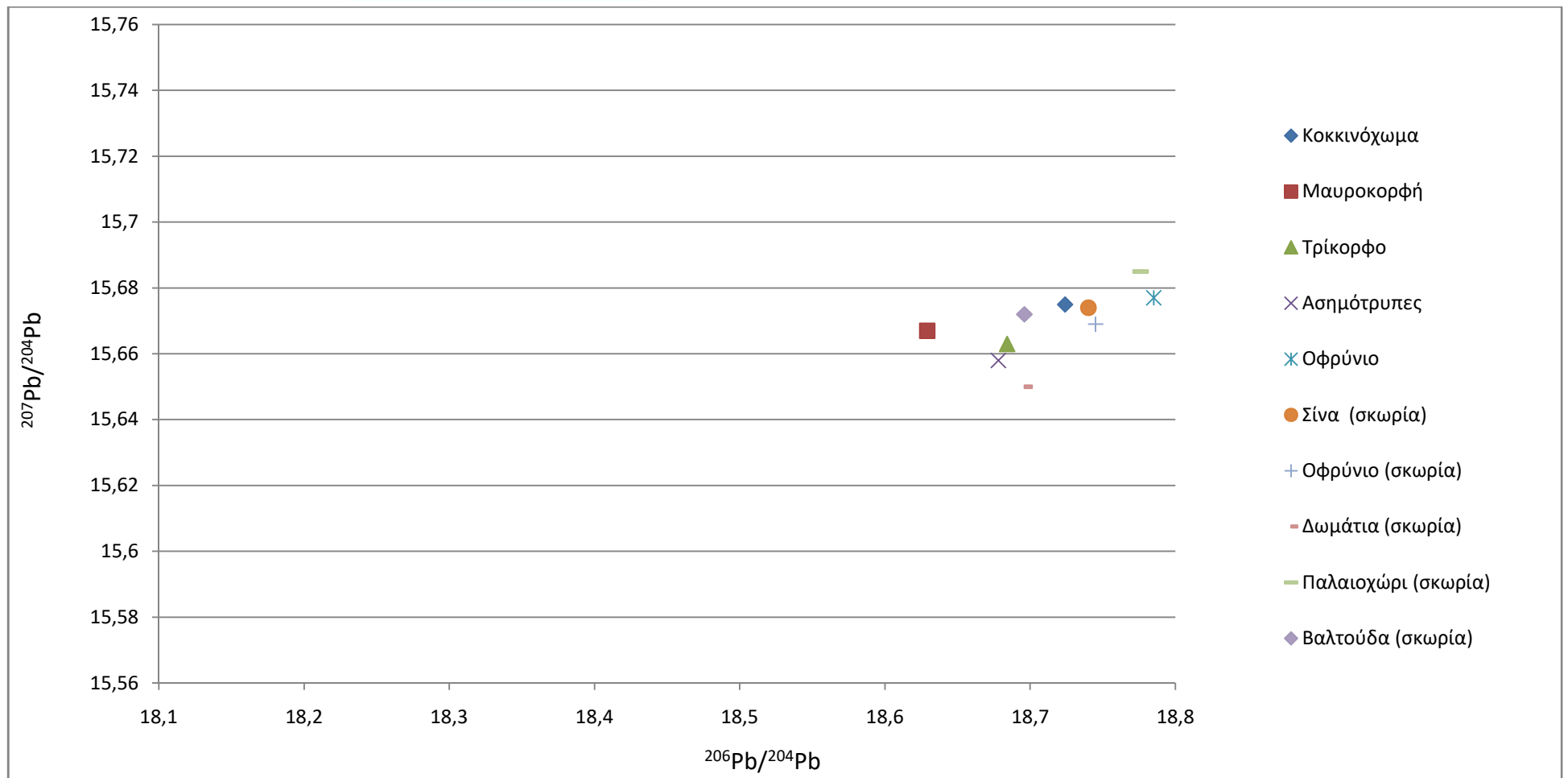
περιοχές του Παγγαίου δείχνει ισοτοπική ομοιότητα με τα δείγματα σκωρίας από διάφορες μεταλλουργικές περιοχές του όρους. Το σύνολο των δειγμάτων συμπεριλαμβάνεται σε ένα κοινό πεδίο.

Στο σχήμα 10.2.2 τοποθετούνται τα ισότοπα $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ προς $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ δειγμάτων από μετάλλευμα και σκωρίες από την περιοχή του Παγγαίου. Οι αναλύσεις που προέρχονται από τη βάση δεδομένων OXALID (Gale et al, 1980; 1988) σημειώνονται ως ομάδα Παγγαίο_1, ενώ η ομάδα που προέρχεται από αναλύσεις στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής σημειώνεται ως Παγγαίο_2. Η σκωρία στη μεταλλουργική περιοχή των Δωματίων βρίσκεται σε σχετικά διαφορετικό πεδίο τιμών από τα υπόλοιπα δείγματα. Αυτό είναι αναμενόμενο μιας και πρόκειται για σκωρία σιδήρου, από μία περιοχή που πιθανώς λειτούργησε κατά τους Οθωμανικούς χρόνους με ανάτηξη διαφόρων σκωριών. Το σύνολο των σκωριών χαρακτηρίζεται από σχετική γραμμική ανάπτυξη.

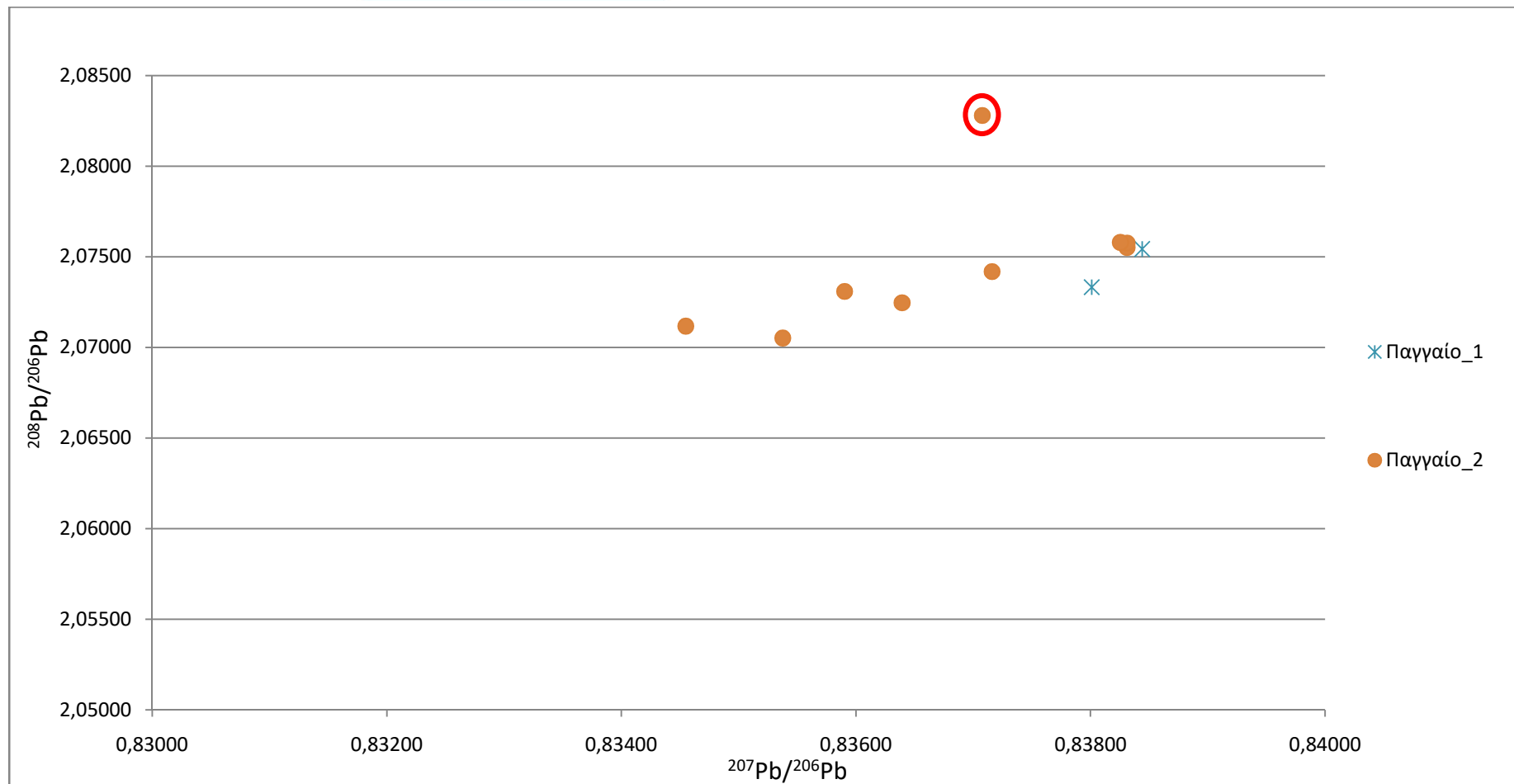
Η ίδια εικόνα παρουσιάζεται και στο σχήμα 10.2.3 (ισοτοπική αναλογία $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ προς $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$), με το δείγμα από τη σκωρία στη μεταλλουργική περιοχή των Δωματίων να βρίσκεται σε σχετικά διαφορετικό πεδίο τιμών από τα υπόλοιπα δείγματα. Το σύνολο των σκωριών χαρακτηρίζεται από σχετική γραμμική ανάπτυξη.

Στο σχήμα 10.2.4 τοποθετούνται τα ισότοπα $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ προς $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ δειγμάτων από μετάλλευμα και σκωρίες από την περιοχή του Λαυρίου, της Σίφνου, της Βορειοανατολικής Χαλκιδικής, της Θάσου και του Παγγαίου. Οι αναλύσεις προέρχονται από τη βάση δεδομένων OXALID (Gale et al, 1980; 1988). Τα ισότοπα Pb Παγγαίο_1 προέρχονται από την προαναφερθείσα βάση δεδομένων, ενώ τα στοιχεία Παγγαίο_2 από αναλύσεις στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Τα ισότοπα μολύβδου του όρους Παγγαίου καλύπτουν ένα ευρύ πεδίο μεταξύ των πεδίων των ισοτόπων Pb από τη Σίφνο και των ισοτόπων από τη ΒΑ Χαλκιδική και τη Θάσο. Η ίδια εικόνα αποτυπώνεται και στο σχήμα 10.2.5.

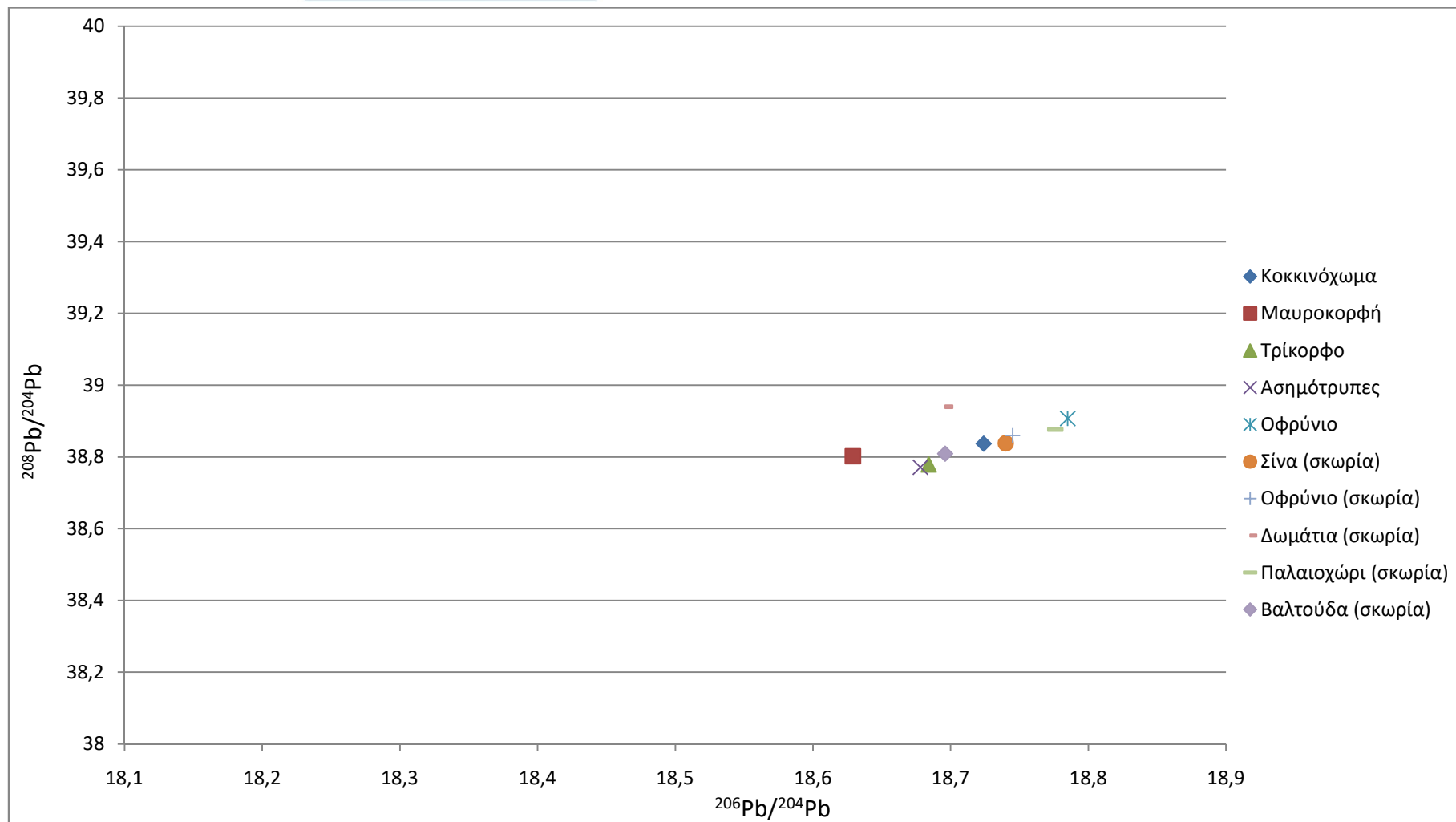
Τέλος στο σχήμα 10.2.6 τοποθετούνται αναλύσεις ισοτόπων Pb από αρχαία νομίσματα που έχουν βρεθεί στη Θάσο και την Αττική σε σχέση με τις ισοτοπικές αναλογίες Pb από μετάλλευμα και σκωρίες από το Λαύριο, τη Σίφνο, τη ΒΑ Χαλκιδική, τη Θάσο και το Παγγαίο. Τα στοιχεία προέρχονται από τη βάση δεδομένων OXALID (Gale et al, 1980; 1988) και αναλύσεις στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής (Παγγαίο_2). Στο σχήμα παρατηρείται ότι ενώ υπάρχει συμφωνία της προέλευσης των αργυρών νομισμάτων της Αττικής με το μετάλλευμα και τις σκωρίες από το Λαύριο, τα αντικείμενα που προέρχονται από τη Θάσο παρουσιάζουν μία ποικιλία προέλευσης. Μάλιστα ορισμένα παρουσιάζουν πολλές πιθανότητες προέλευσης από το μετάλλευμα του Παγγαίου όρους.



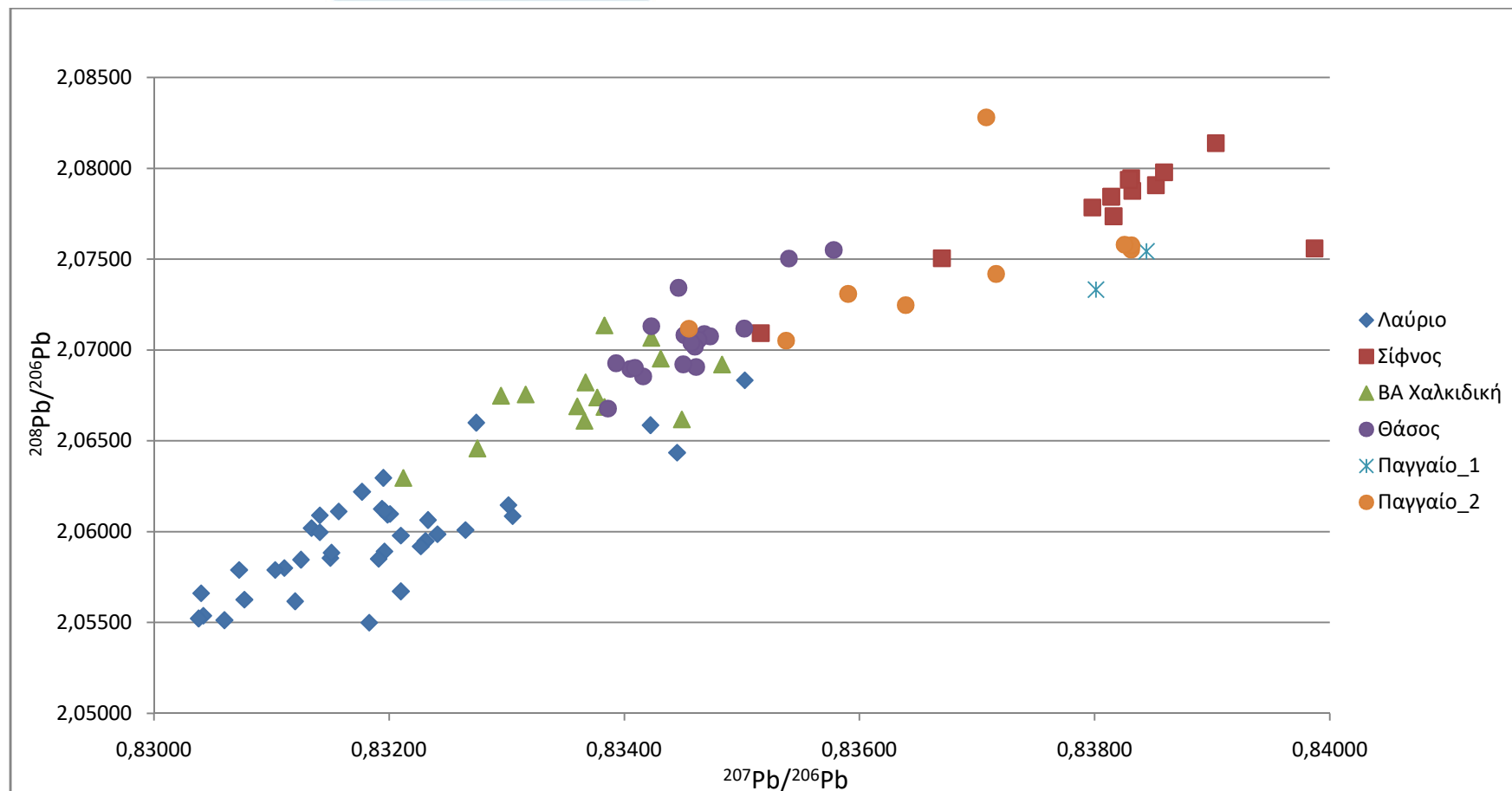
Σχήμα 10.2.1 Ισοτοπικές αναλογίες ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ προς $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) δειγμάτων από μεταλλεία και μεταλλουργικές περιοχές από την ευρύτερη περιοχή του Παγγαίου όρους. Αξιοσημείωτη είναι η σχετικά γραμμική τους ανάπτυξη πλην του δείγματος από τη μεταλλουργική θέση των «Δωματίων».



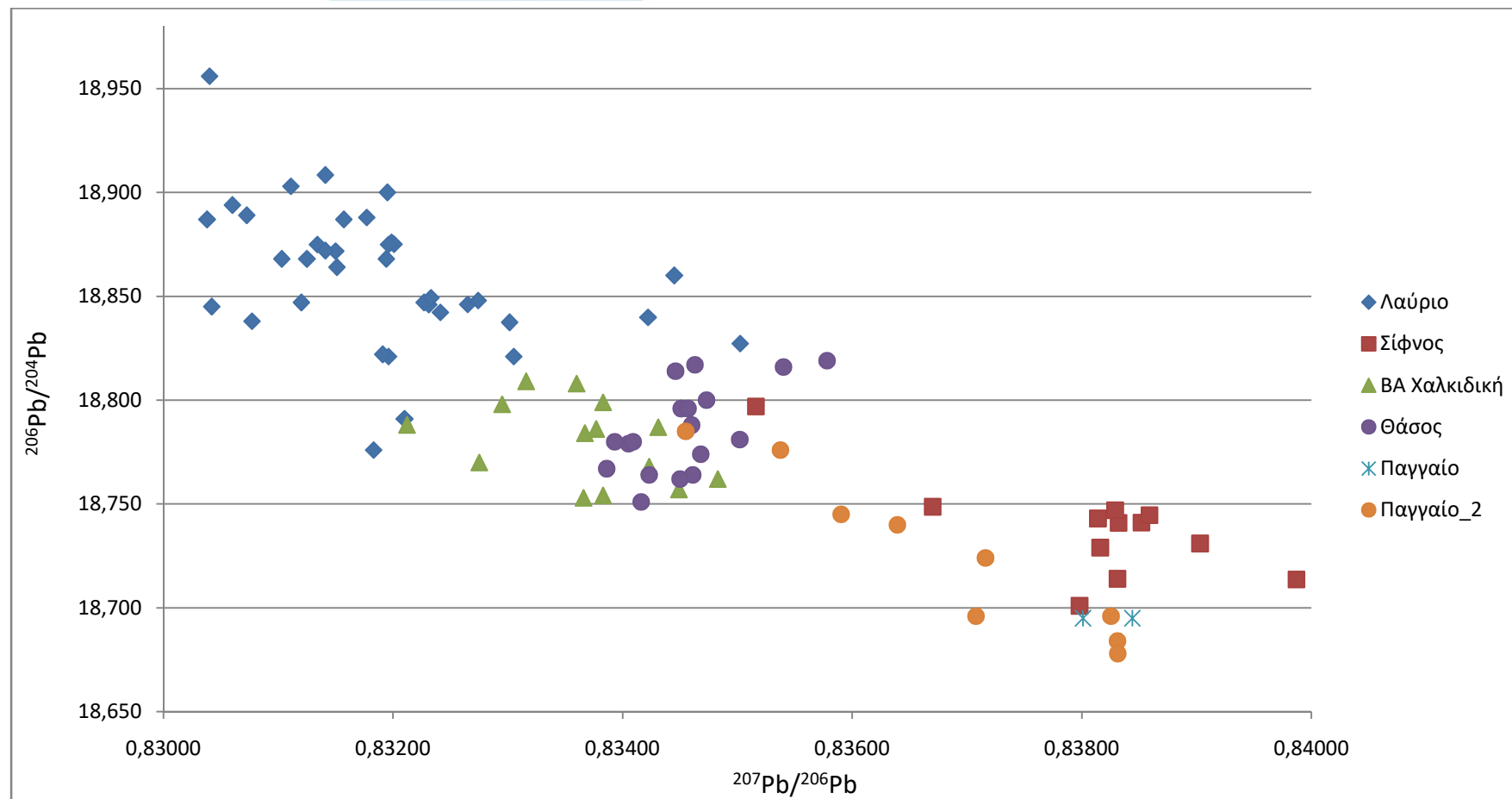
Σχήμα 10.2.2 Ισοτοπικές αναλογίες ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ προς $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) σε μετάλλευμα και σκωρίες από το όρος Παγγαίο. Στην ομάδα Παγγαίο_1 ανήκουν τα δείγματα που προέρχονται από τη βάση δεδομένων OXALID (Gale et al, 1980;1988), ενώ στην ομάδα Παγγαίο_2 από την παρούσα έρευνα. Με κόκκινο κύκλο σημειώνεται η σκωρία από τη μεταλλουργική περιοχή Δωματίων.



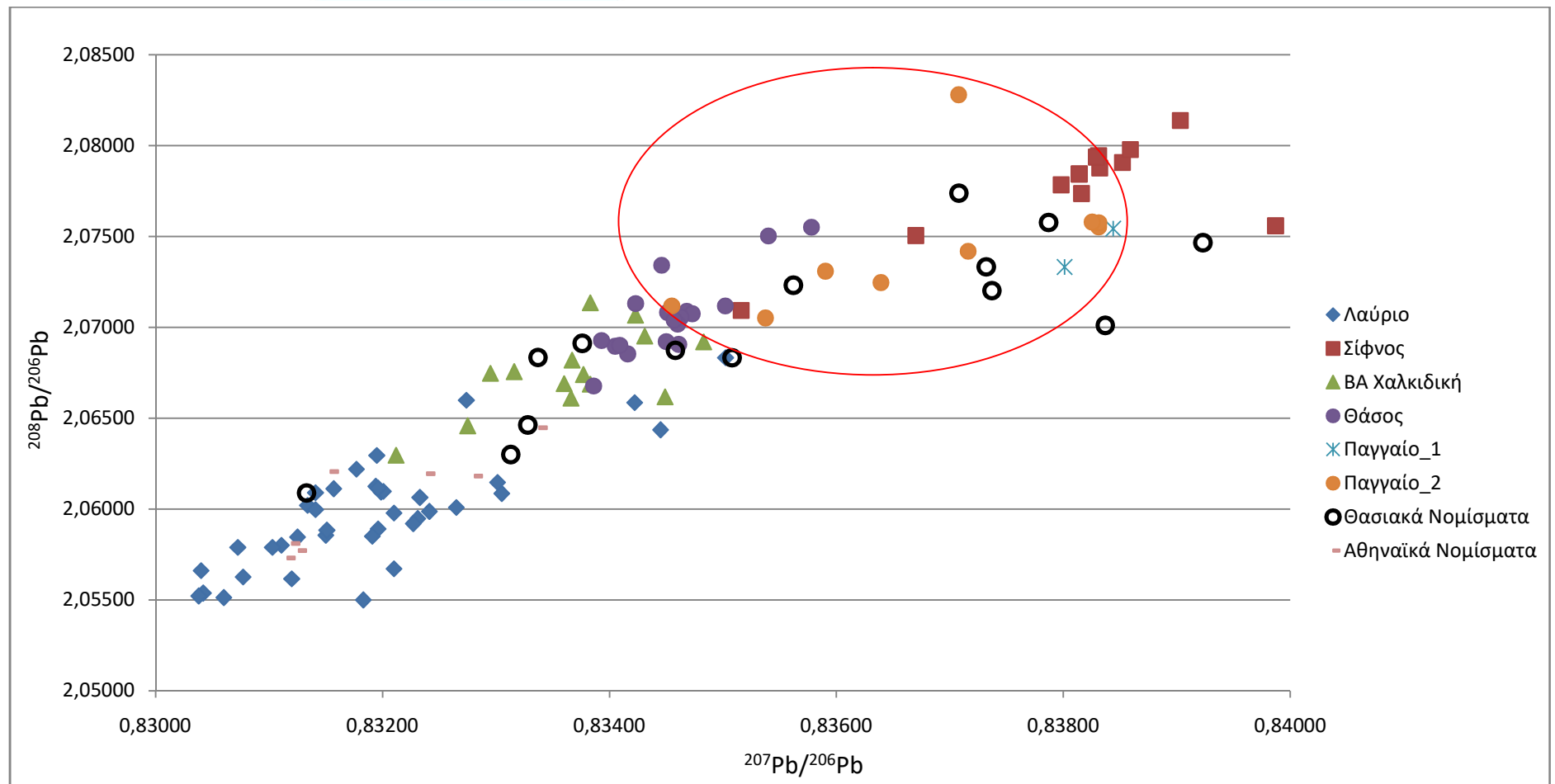
Σχήμα 10.9.3 Ισοτοπικές αναλογίες ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ προς $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) δειγμάτων από μεταλλεία και μεταλλουργικές περιοχές από την ευρύτερη περιοχή του Παγγαίου όρους. Παρατηρείται σχετικά γραμμική ανάπτυξη πλην του δείγματος από τη μεταλλουργική θέση των «Δωματίων».



Σχήμα 10.2.4 Ισοτοπικές αναλογίες ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ προς $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) δειγμάτων από μέταλλευμα και σκωρίες, όπου σημειώνεται με κόκκινο κύκλο η ισοτοπική γειτονία δειγμάτων από το όρος Παγγαίο. Οι αναλύσεις ισοτόπων από το Λαύριο, τη Σίφνο, τη ΒΑ Χαλκιδική, τη Θάσο και το Παγγαίο_1 προέρχονται από τη βάση δεδομένων OXALID (Gale et al, 1980;1988). Οι αναλύσεις ισοτόπων από το Παγγαίο_2 προέρχονται από την παρούσα έρευνα.



Σχήμα 10.2.5 Ισοτοπικές αναλογίες ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ προς $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) δειγμάτων από μετάλλευμα και σκωρίες, όπου σημειώνεται η ισοτοπική γειτονία δειγμάτων από το όρος Παγγαίο. Οι αναλύσεις ισotόπων από το Λαύριο, τη Σίφνο, τη ΒΑ Χαλκιδική, τη Θάσο και το Παγγαίο_1 προέρχονται από τη βάση δεδομένων OXALID (Gale et al, 1980; 1988). Οι αναλύσεις ισotόπων από το Παγγαίο_2 προέρχονται από την παρούσα έρευνα.



Σχήμα 10.2.6 Ισοτοπικές αναλογίες ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ προς $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) δειγμάτων από μετάλλευμα και σκωρίες από το Λαύριο, τη Σίφνο, τη ΒΑ Χαλκιδική, τη Θάσο και το Παγγαίο. Επιπλέον τοποθετούνται και ισοτοπικά δεδομένα από αρχαία νομίσματα από τη νήσο Θάσο και από την Αττική. Οι αναλύσεις των δειγμάτων προέρχονται από τη βάση δεδομένων OXALID (Gale et al, 1980; 1988) εκτός της ομάδας Παγγαίο_2 που προέρχονται από την παρούσα έρευνα. Σημειώνεται το πεδίο ισοτόπων του όρους Παγγαίου, όπου περικλείονται αρκετά νομίσματα από τη νήσο Θάσο.

11. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΕΠΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

11.1 Συζήτηση επί της μεταλλοφορίας του όρους Παγγαίου

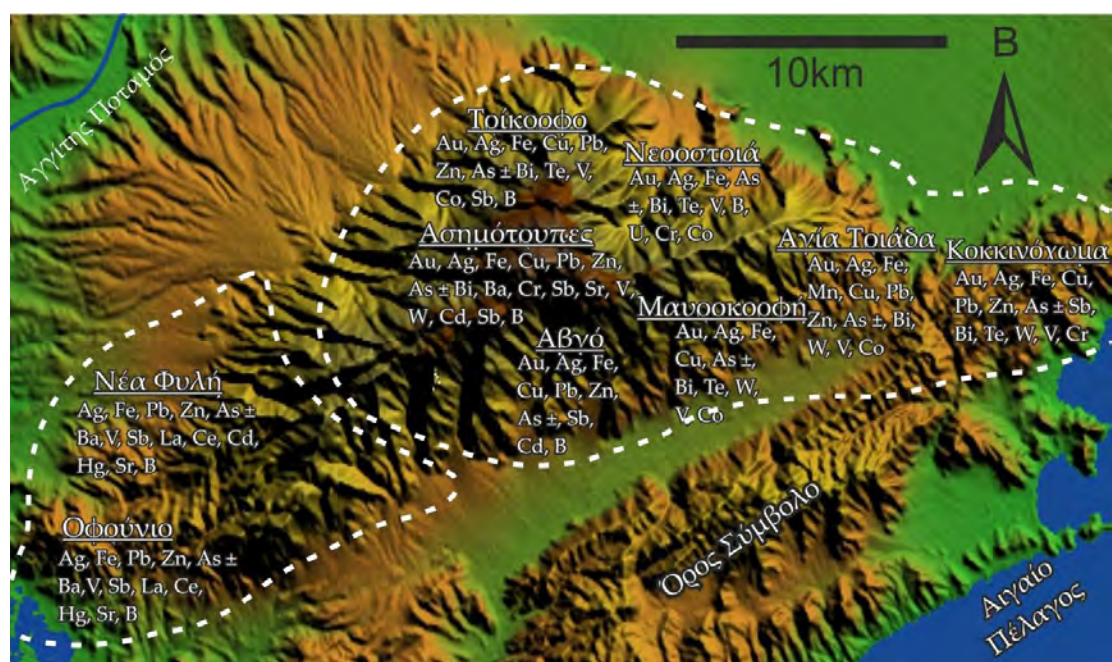
Οι μεταλλοφορίες στο όρος Παγγαίο επισημάνθηκαν και μελετήθηκαν στο παρελθόν από διάφορους μελετητές. Ήδη από τη δεκαετία του '60 ο Mack (1964) περιγράφει αδρομερώς τις μεταλλοφόρες εμφανίσεις αναφέροντας υψηλές περιεκτικότητες σε χρυσό (37 g/t στη ζώνη οξείδωσης -περιοχή του Αβγού). Ο Κρικέλας (1973) εντοπίζει περιοχές μεταλλοφορίας σιδηροπυρίτη-γαληνίτη στην περιοχή της Μαυροκορφής, λειμωνίτη στις Ασημότρυπες και στην περιοχή των κορυφών του Παγγαίου. Ερευνητές του ΙΓΜΕ (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών) τη δεκαετία του '90 επισημαίνουν την πολυμεταλλική μεταλλοφορία σε ζώνες αντικατάστασης κυρίως στα μάρμαρα του όρους και τον προσχωματικό χρυσό στα κατάντι αυτών (Αρβανιτιδής, 1988; Baker et al, 1990; Arvanitidis, 1993). Επισημαίνεται η παρουσία μεταλλοφόρων σωμάτων αντικατάστασης σε κατακόρυφες τεκτονικές ζώνες και ζώνες διάτμησης, ενώ η έρευνα προσχωματικού χρυσού είχε θετικά αποτελέσματα σε διάφορες θέσεις του Παγγαίου (Baker et al, 1991; 1992). Ο Eliopoulos (2000) περιγράφει στην περιοχή Ασημότρυπες Παγγαίου τη μεταλλοφορία, η οποία εντοπίζεται σε ζώνες αντικατάστασης και διάτμησης, με κύρια ορυκτά τον αρσеноπυρίτη, σιδηροπυρίτη και χρυσό. Σύμφωνα τον ίδιο μελετητή πρόκειται για μεσοθερμικό κοίτασμα χρυσού. Ο χρυσός εντοπίζεται κυρίως στον αρσеноπυρίτη και λιγότερο στον αρσενικούχο σιδηροπυρίτη και αυτοφυής στη ζώνη οξείδωσης (Eliopoulos, 2000).

Οι Eliopoulos and Kilias (2011) ορίζουν ως νέο είδος μεσοθερμικού κοιτάσματος, σε ανθρακικά πετρώματα, με υπομικροσκοπικό χρυσό τη πολυμεταλλική μεταλλοφορία με χρυσό που παρατηρείται στις ασυνέχειες των μαρμάρων στην περιοχή Ασημότρυπες. Σώματα αντικατάστασης ελεγχόμενα από τη σχιστότητα των μαρμάρων και χαλαζιακές φλέβες είναι τα κύρια χαρακτηριστικά αυτής της μεταλλοφορίας. Τα μεταλλοφόρα σώματα περιέχουν χρυσό με περιεκτικότητες μέχρι 17 ppm, ενώ το σύστημα φλεβών, φακών περιέχει χρυσό από 4 μέχρι 13 ppm (Eliopoulos and Kilias, 2011). Οι περιεκτικότητες του χρυσού εξαρτώνται από τη γεωμετρία των τεκτονικών ασυνεχειών, αποκαλύπτοντας τη στενή σχέση τους με την κυκλοφορία των υδροθερμικών ρευστών κατά μήκος αυτών. Ο χρυσός εμφανίζεται στον αρσеноπυρίτη και στον αρσενικούχο σιδηροπυρίτη ως υπομικροσκοπικός. Κόκκοι χρυσού παρατηρούνται μόνο στο οξειδωμένο μετάλλευμα που αποτελείται κυρίως από κολλοειδή γκαιτίτη και αιματίτη και λιγότερο από κοβελλίτη, μαλαχίτη, κερουσίτη και χρυσόκολλα (Eliopoulos and Kilias, 2011). Η μικροθερμομετρική και ισοτοπική μελέτη των ρευστών εγκλεισμάτων δείχνει έντονη δράση μετεωρικού νερού προερχόμενο από μεγάλο υψόμετρο. Οι Kilias

and Eliopoulos (2011) υπολογίζουν το βάθος δημιουργίας της μεταλλοφορίας από 6 έως 9 km (Εικ. 11.1.2)

Σύμφωνα με την παρούσα έρευνα οι μεταλλοφόρες εμφανίσεις του όρους Παγγαίου με βάση τη χημική και ορυκτολογική τους σύσταση είναι δυνατό να διαχωριστούν σε δύο ξεχωριστές μεταλλογενετικές ομάδες, του κεντρικού-ανατολικού Παγγαίου και του δυτικού Παγγαίου. Η περιοχή του κεντρικού-ανατολικού Παγγαίου (Εικ. 11.1.1) περιλαμβάνει περιεκτικότητες σε Au και Ag, καθώς και στα βασικά μεταλλικά στοιχεία Fe, Cu, Pb, Zn, As, Mn με τοπικές διακυμάνσεις. Σχετικά υψηλές περιεκτικότητες παρουσιάζουν και τα ιχνοστοιχεία Bi, Te, W, V, Co, B, Sb, Cr και U. Η πρωτογενής μεταλλοφορία στις θέσεις Νεροστριά, Ασημότρυπες και Μαυροκορφή χαρακτηρίζεται από ποικιλία σουλφιδίων, όπως αρσеноπυρίτης, σιδηροπυρίτης, χαλκοπυρίτης, βισμούθινίτης, χαλκοσίνης, μαγνητοπυρίτης. Στη θέση Ασημότρυπες τα κυρίαρχα μεταλλικά ορυκτά είναι ο αρσеноπυρίτης και ο σιδηροπυρίτης σε μάρμαρα και σχιστολίθους, ενώ στη Μαυροκορφή ο σιδηροπυρίτης και ο χαλκοπυρίτης σε μάρμαρα, σχιστολίθους και γνεύσιους. Στην περιοχή της Νεροστριάς μέσα στις κατακλάσεις του σιδηροπυρίτη, παρατηρούνται ορυκτά του Bi-Te. Ο σιδηροπυρίτης εντοπίζεται σε χαλαζιακές φλέβες στη μάζα του πλουτωνίτη και στην επαφή του πλουτωνίτη με τα υπερκείμενα μάρμαρα. Στις υπόλοιπες θέσεις του Παγγαίου η μεταλλοφορία εμφανίζεται οξειδωμένη με σιδηροπυρίτη που αντικαθίσταται από γκαιτίτη.

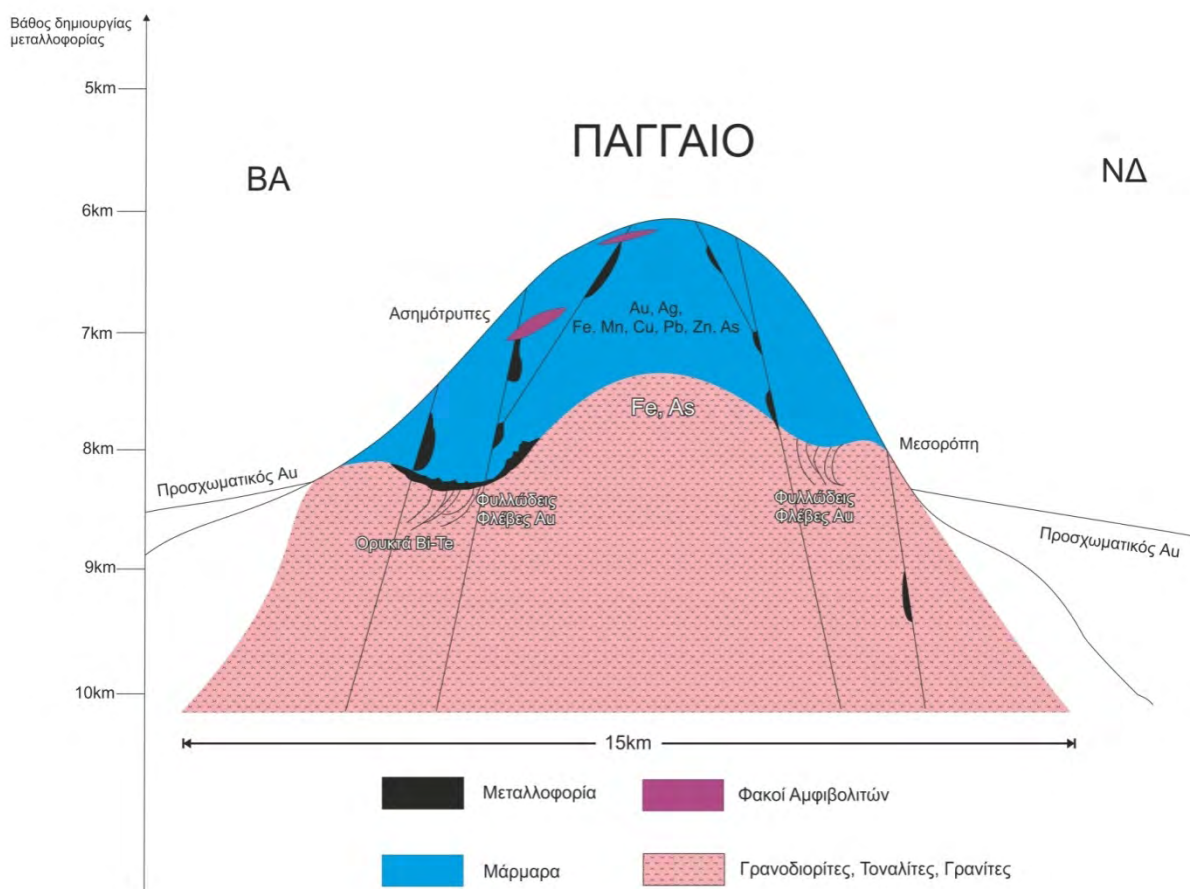
Η μεταλλοφορία αναπτύσσεται κατά μήκος των ασυνεχειών κυρίως των μαρμάρων και λιγότερο των σχιστολίθων και πολλές φορές υπόκεινται των αμφιβολιτικών φακών ή ζωνών διάτμησης. Αυτοί οι σχηματισμοί πιθανότατα έχουν δράσει καταλυτικά, ως στεγανό φράγμα για τα ανερχόμενα υδροθερμικά



Εικόνα 11.10.1 Τα κύρια μεταλλικά στοιχεία και ιχνοστοιχεία των μεταλλευτικών περιοχών του Παγγαίου.

ρευστά διαμέσου των τεκτονικών ρηγμάτων και διακλάσεων για αυτό το λόγο η μεταλλοφορία στις περισσότερες περιπτώσεις εντοπίζεται καρστικά έγκοιλα μαρμάρων υποκείμενα των αμφιβολιτών ή ζωνών διάτμησης (Εικ. 11.1.2).

Τα μαγματικά σώματα στον αντικλινικό πυρήνα του Παγγαίου είναι ασβεσταλκαλικής σύστασης και ανήκουν σε Ι-τύπου γρανίτη (Eleftheriadis and Koroneos, 2003), όπως φαίνεται στις πέντε εμφανίσεις του στο όρος Παγγαίο. Η μεταλλοφορία εντός του πλουτωνίτη στην περιοχή της Νεροστριάς φιλοξενείται μέσα σε χαλαζιακές φλέβες με παράλληλη έως υποπαράλληλη διάταξη. Η ίδια



Εικόνα 11.1.11 Σχηματική αναπαράσταση της μεταλλοφορίας στη μάζα του όρους Παγγαίου. Στοιχεία από τους Baker et al (1992), Elioroulos and Kiliass (2011) και κατά από την εκπόνηση του παρόντος.

διάταξη της μεταλλοφορίας παρατηρείται στην πλουτωνική εμφάνιση της Μεσορόπης. Η μεταλλοφορία εντοπίζεται επιπλέον στην επαφή των υπερκείμενων μαρμάρων και του πλουτωνίτη.

Η περιοχή του ανατολικού Παγγαίου περιλαμβάνει και τις βορειοανατολικές λοφοσειρές του όρους Σύμβολο, όπου παρατηρούνται επίσης μεταλλοφορίες με

περιεκτικότητες σε Au, Ag, Cu, Pb, As, ιδιαίτερα στην περιοχή του Κοκκινοχώματος.

Η περιοχή του δυτικού Παγγαίου χαρακτηρίζεται από μεταλλοφορία με περιεκτικότητες σε Ag μέσα σε υδροθερμικά εξαλλοιωμένα μάρμαρα με βαρύτη. Σε σχετικά υψηλές περιεκτικότητες βρίσκονται τα βασικά μεταλλικά στοιχεία Fe, Pb, Zn και As, όπως και τα ιχνοστοιχεία Ba, V, Sb, La, Ce, Cd, Hg, Sr και B.

Τα ρευστά εγκλείσματα της μεταλλοφορίας στην περιοχή Ασημότρυπες Παγγαίου ομογενοποιούνται σε θερμοκρασίες από 275° έως 310°C, ενώ η προέλευση των υδροθερμικών διαλυμάτων σύμφωνα με τον Eliopoulos (2000) είναι κυρίως μετεωρική.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά οδηγούν στο συμπέρασμα ότι τα μεταλλοφόρα σώματα στο Παγγαίο πιθανότατα συνδέονται με τη διείσδυση του πλουτωνίτη και αποτελούν κοίτασμα συνδεδεμένο με μαγματική διείσδυση (Intrusion Related System). Η περαιτέρω μελέτη κοιτασματολογική και γεωχημική θα δείξει την πιθανή γενετική σχέση του πλουτωνίτη με την κυκλοφορία υδροθερμικών ρευστών.

11.2 Μεταλλευτική δραστηριότητα στο όρος Παγγαίο

Οι ιστορικές αναφορές των αρχαίων συγγραφέων για τη μεταλλευτική δραστηριότητα στο όρος Παγγαίο είναι αρκετές και επικεντρώνονται στο γεγονός της έλευσης των Φοινίκων. Ο μύθος αναφέρει ότι ο Φοίνικας Κάδμος ανακάλυψε το χρυσό στην περιοχή⁴¹. Θα πρέπει να υποθέσουμε ότι από πολύ νωρίς και πριν την έλευση των Φοινίκων στους χείμαρρους του Παγγαίου, της Σκαπτής Ύλης, της Θάσου και αλλού, πιθανώς γινόταν απόληψη προσχωματικού χρυσού. Δεχόμενοι αυτήν την υπόθεση, ο χρυσός και η απόλησή του θα πρέπει να ήταν γνωστά στην ευρύτερη περιοχή πριν από τα αρχαϊκά χρόνια.

Είναι αναγκαίο ίσως να ληφθεί υπόψη και το στοιχείο της φιλολογικής υπερβολής των ιστορικών αναφορών για το όρος Παγγαίο. Για παράδειγμα ο Ηρόδοτος αναφέρεται για το χρυσό και τον άργυρο του Παγγαίου, χωρίς όμως πιθανότατα να έχει επισκεφθεί την ορεινή περιοχή. Μία πηγή του μπορεί να αποτελούσαν οι διηγήσεις άλλων περιηγητών ή εμπόρων που έρχονταν σε επαφή με τους μεταλλευτές της περιοχής. Η ύπαρξη προσχωματικού χρυσού στις κοιλάδες του όρους (Baker et al, 1991, 1992) και η απόλησή του ίσως δημιουργεί τη φήμη του και ίσως αυτή να μεγιστοποιείται όταν σημειώνεται έναρξη εκκαμίνευσης μεταλλεύματος για την απόληψη των ευγενών μετάλλων. Τα

⁴¹ Κλήμης, Στρωματείς I.16.75.8

στοιχεία όμως που διαθέτουμε μέχρι σήμερα είναι περιορισμένα για να υποστηριχθεί αυτή η υπόθεση.

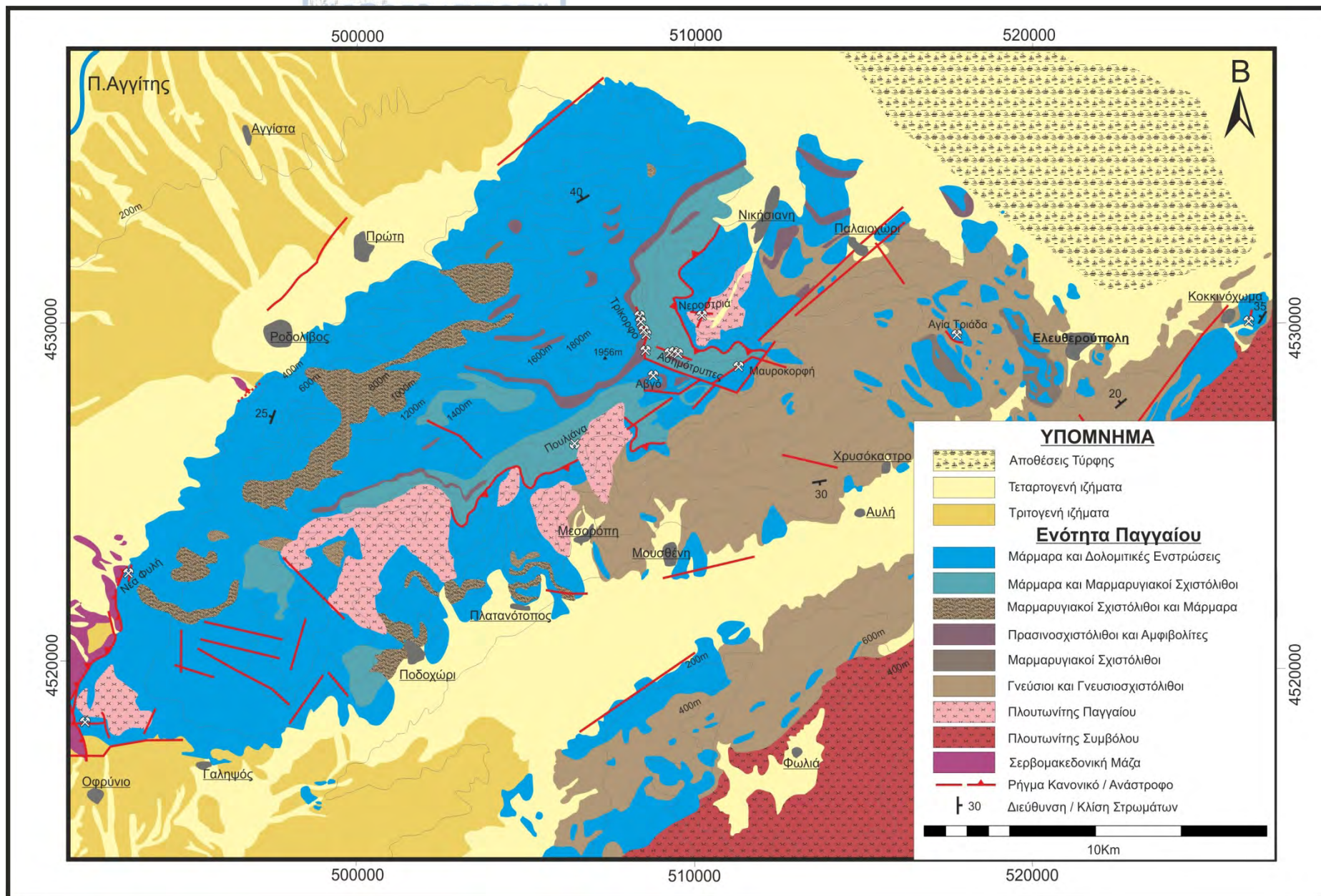
Συνολικά στις 9 μεταλλευτικές περιοχές του Παγγαίου καταγράφηκαν και μελετήθηκαν 23 υπόγεια μεταλλεία, από τα οποία το ένα στην περιοχή του Οφρυνίου που από τη συνεχή εξόρυξη μετατράπηκε σε ανοιχτό όρυγμα (Πίν. 11.2.1). Κατά την καταγραφή παρατηρήθηκαν πιθανές επιφανειακές εκμεταλλεύσεις οι οποίες όμως δεν μπορούν να τεκμηριωθούν με ασφάλεια και σίγουρα δεν μπορούν να χρονολογηθούν. Όλες οι στοές διανοίχθηκαν σε μάγμαρα στις ασυνέχειες των οποίων φιλοξενείται η μεταλλοφορία πλην της στοάς της Νεροστριάς που διανοίχθηκε στον πλουτωνίτη (Εικ. 11.2.1).

Με βάση την επιτόπια έρευνα προκύπτει το συμπέρασμα ότι σε όλες τις μεταλλευτικές περιοχές του όρους η εκμετάλλευση προσανατολίζεται στην εξόρυξη της οξειδωμένης (δευτερογενούς) μεταλλοφορίας, ενώ η πρωτογενής ή η μερικώς οξειδωμένη δεν εξορύσσεται. Η εκμετάλλευση ακολουθεί κυρίως τις τεκτονικές ασυνέχειες στις οποίες εντοπίζεται η μεταλλοφορία.

Οι παλαιότερες στοές έχουν μικρές διαστάσεις με μέση διατομή 100 cm x 120 cm (πλάτος x ύψος), ενώ οι νεότερες φάσεις εκμετάλλευσης τις διευρύνουν. Η Ασημότρυπα-6 (Πίν. 11.2.1) αποτελεί το μεγαλύτερο μεταλλείο του Παγγαίου με υπολογισμένο εξορυγμένο όγκο τα 688,3 m³. Γενικότερα όμως στην περιοχή Ασημότρυπες Παγγαίου παρατηρείται η πιο έντονη μεταλλευτική δραστηριότητα, η οποία συνεχίζεται σύμφωνα με την επιφανειακή κεραμική από τους αρχαίους χρόνους μέχρι τη Βυζαντινή και Οθωμανική εποχή. Στην ίδια περιοχή βέβαια καταγράφεται και η σύγχρονη εκμετάλλευση από τη μεταλλευτική εταιρία Ηλιόπουλος τη δεκαετία του 1970. Επίσης στην περιοχή του Κοκκινοχώματος η στοά Κοκκινόχωμα-1 αποτελεί τη δεύτερη μεγαλύτερη μεταλλευτική στοά που ερευνήθηκε με συνολικό όγκο της υπόγειας εξόρυξης 527 m³. Η επιφανειακή κεραμική στην περιοχή του Κοκκινοχώματος χρονολογείται στη Ρωμαϊκή εποχή.

Τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για τη διάνοιξη όπως έδειξε η μελέτη των εκμαγείων είναι το μεταλλευτικό σφυρί και ο συνδυασμός σφυριού-καλεμιού (Πίν. 11.2.1). Σε ορισμένες θέσεις όπου το μετάλλευμα είναι μαλακό παρατηρείται χρήση τσάπας, ενώ στη στοά Νεροστριά-1 καταγράφεται χρήση σφήνας.

Σε πολλές περιπτώσεις όπως στη στοά Κόψης, στις Ασημότρυπες-1 και 6, αλλά και στη Μαυροκορφή-1 και στο Κοκκινόχωμα-1 το στείρο υλικό τοποθετείται για τη στήριξη της οροφής. Επίσης, σε πολλές περιπτώσεις το στείρο υλικό χρησιμοποιείται για την πλήρωση παλαιότερων φάσεων μίας στοάς, όπως στη στοά Κοκκινόχωμα-1.



Εικόνα 11.2.1 Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής του όρους Παγγαίου όπου σημειώνονται οι θέσεις μεταλλευτικής δραστηριότητας (από Kronberg, 1972; Kronberg and Schenck, 1974; Ξυδά, 1978 και παρατηρήσεις από την παρούσα μελέτη).

Πίνακας 11.2.1 Τα χαρακτηριστικά των εκμεταλλεύσεων που εντοπίστηκαν και καταγράφηκαν.

Εκμετάλλευση	Τύπος	Πέτρωμα	Όγκος (m ³) εκμετάλλευσης	Γενική κατεύθυνση	Κεραμική	Εργαλεία
Κοκκινόχωμα-1	Υπόγειο	Μάρμαρο	527	BBA	Ρωμαϊκών Χρόνων	Σφυρί, καλέμι
Αγία Τριάδα-1	Υπόγειο	Μάρμαρο	134	BA	Υστεροβυζαντινών Χρόνων	Σφυρί, καλέμι
Μαυροκορφή-1	Υπόγειο	Μάρμαρο- Σχιστόλιθος, Αμφιβολίτης	368	NNA	Ρωμαϊκών - Οθωμανικών Χρόνων	Σφυρί, καλέμι
Αβγό-1	Υπόγειο	Μάρμαρο	2,1	NA	Ρωμαϊκών Χρόνων	Σφυρί, καλέμι
Κόψης	Υπόγειο	Μάρμαρο- Αμφιβολίτης	346,4	NNA	Ρωμαϊκών, Βυζαντινών, Οθωμ. Χρόνων	Σφυρί, καλέμι
Τρίκορφο-1	Υπόγειο	Μάρμαρο	14,7	NA	-	Σφυρί, καλέμι
Τρίκορφο-2	Υπόγειο	Μάρμαρο	8,6	NNA	-	Σφυρί, καλέμι
Τρίκορφο-3	Υπόγειο	Μάρμαρο	18,7	Δ	-	Σφυρί, καλέμι
Τρίκορφο-4	Υπόγειο	Μάρμαρο	67	NA	Ρωμαϊκών, Βυζ., Υστεροβυζαντ. Οθωμ. Χρόνων	Σφυρί, καλέμι
Ασημότρυπα-1	Υπόγειο	Μάρμαρο- Γνεύσιος	303,7	BΔ	Ρωμαϊκών - Οθωμανικών Χρόνων	Σφυρί, καλέμι, τσάπα
Ασημότρυπα-2	Υπόγειο	Μάρμαρο	-	BΔ	-	Σφυρί, καλέμι
Ασημότρυπα-3	Υπόγειο	Μάρμαρο	-	BΔ	-	Σφυρί, καλέμι
Ασημότρυπα-4	Υπόγειο	Μάρμαρο	47,4	BΔ	-	Σφυρί, καλέμι
Ασημότρυπα-5	Υπόγειο	Μάρμαρο	399,2	BΔ	-	Σφυρί, καλέμι,
Ασημότρυπα-6	Υπόγειο	Μάρμαρο	688,3	NNA	-	Σφυρί, καλέμι
Ασημότρυπα-7	Υπόγειο	Μάρμαρο	3,5	NA	-	Σφυρί, καλέμι
Ασημότρυπα-8	Υπόγειο	Μάρμαρο	-	NA	-	-
Νεροστριά-1	Υπόγειο	Γρανίτης	100,1	BA	Ρωμαϊκών -Οθωμ. Χρόνων	Σφυρί, καλέμι, σφήνα
Νέα Φυλή-1	Υπόγειο/ Επιφανειακό	Μάρμαρο	9,1/80	A-N	Ρωμαϊκών Χρόνων	Σφυρί, καλέμι
Οφρύνιο-1	Υπόγειο	Μάρμαρο	15	N	Ρωμαϊκών Χρόνων	Σφυρί, καλέμι
Οφρύνιο-2	Υπόγειο	Μάρμαρο	174	ANA	Ρωμαϊκών Χρόνων	Σφυρί, καλέμι
Οφρύνιο-3	Υπόγειο	Μάρμαρο	182,4	A	Ρωμαϊκών Χρόνων	Σφυρί, καλέμι

Οι ερευνηθείσες μεταλλευτικές στοές στο Παγγαίο δεν μπορούν να χρονολογηθούν με ακρίβεια. Με βάση την επιφανειακή κεραμική αυτές χρονολογούνται από την ελληνιστική και ρωμαϊκή εποχή μέχρι και τους Βυζαντινούς και Οθωμανικούς χρόνους. Κεραμική ή άλλα ίχνη παλαιότερων ιστορικών ή προϊστορικών φάσεων δεν εντοπίστηκαν. Η πιο διαδεδομένη κεραμική που εντοπίζεται τόσο στις μεταλλευτικές όσο και στις μεταλλουργικές περιοχές είναι ρωμαϊκών χρόνων. Αυτό δείχνει μία εντατικοποίηση της μεταλλευτικής και ταυτόχρονα της μεταλλουργίας αυτήν την περίοδο. Τα νεότερα στάδια εκμετάλλευσης είναι σίγουρο ότι κατά μεγάλο μέρος έχουν καταστρέψει τα ίχνη αρχαιότερων εκμεταλλεύσεων. Η διεύρυνση για παράδειγμα της στοάς Μαυροκορφή-1, πιθανότατα κατά τους Οθωμανικούς χρόνους, έχει καταστρέψει τα στοιχεία της παλαιότερης Ρωμαϊκής φάσης εκμετάλλευσης.

Επίσης πολλές αρχαίες στοές έχουν καταστραφεί από σύγχρονες παρεμβάσεις, όπως ερευνητικές μεταλλευτικές εργασίες, διάνοιξη δρόμων και κατασκευή χιονοδρομικού κέντρου. Σε αυτούς τους παράγοντες προστίθεται και ο φυσικός ρυθμός διάβρωσης των πρηνών που καλύπτει τις αρχαίες εισόδους των μεταλλείων.

Παρόλα αυτά ο συνολικός αριθμός των μεταλλευτικών περιοχών που εντοπίστηκαν και μελετήθηκαν φαίνεται ότι το Παγγαίο δεν ανταποκρίνεται στην ένδοξη φήμη του όπως προκύπτει από τα αρχαία και τα νεότερα κείμενα. Κρίνεται αναγκαίο να ληφθεί υπόψη και η υπερβολή των συγγραφέων της αρχαιότητας, οι οποίοι δεν είχαν επισκεφθεί τον εν λόγω τόπο και επιπλέον κάποιοι από αυτούς συγγράφουν αιώνες μετά την ακμή της μεταλλευτικής δραστηριότητας στον εν λόγω χώρο (Στράβων, Πλίνιος, Κλήμης). Σε κάθε περίπτωση οι σημαντικότερες μεταλλουργικές περιοχές που εντοπίστηκαν και μελετήθηκαν δείχνουν σίγουρα ένα αξιόλογο κέντρο μεταλλευτικής και μεταλλουργίας.

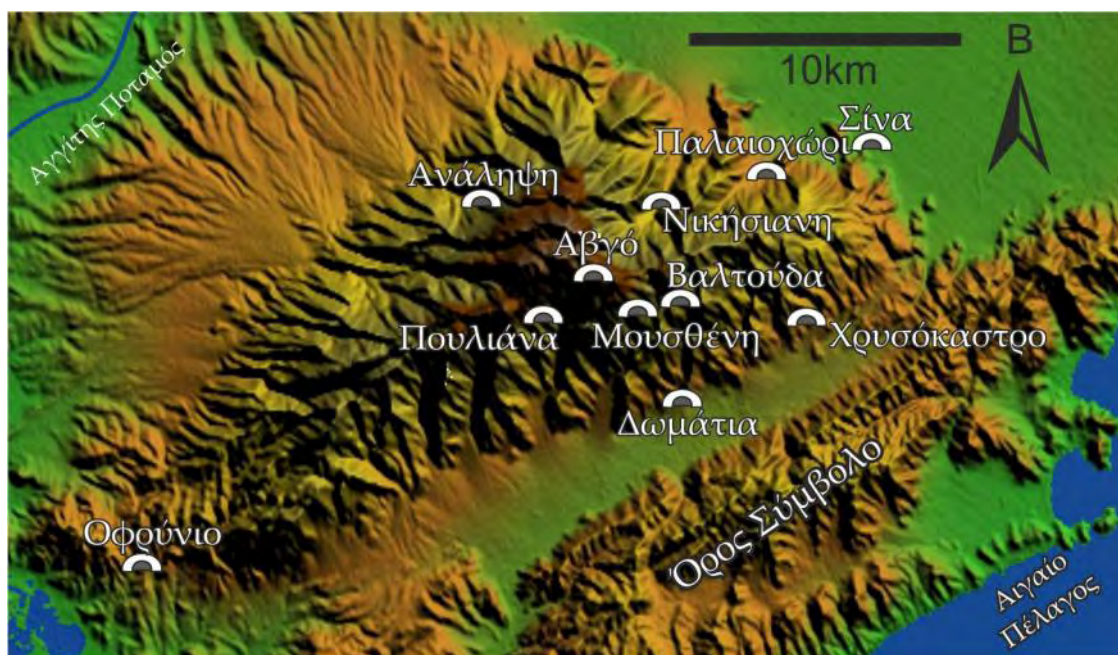
11.3 Μεταλλουργική δραστηριότητα στο όρος Παγγαίο

Στο όρος Παγγαίο καταγράφηκαν και μελετήθηκαν συνολικά 11 μεταλλουργικές περιοχές. Αυτές εντοπίζονται στην περιοχή Σίνα, στο Χρυσόκαστρο, στο Παλαιοχώρι, στη Νικήσιανη, στη Βαλτούδα, βόρεια της Μουσθένης, στην Πουλιάνα Μεσορόπης, στην Ανάληψη, στα Δωμάτια και στο Οφρύνιο (Πίν. 11.3.1). Στην περιοχή Σίνα και στην επιφάνεια του ομώνυμου λόφου εντοπίζονται διάσπαρτες συμπαγείς σκωρίες και σκωρίες τύπου spreiss, καθώς και τμήματα τριβείων και υπολείμματα καμίνων. Στην περιοχή του Χρυσόκαστρου εντοπίζεται περιορισμένος αριθμός συμπαγών σκωριών και τύπου spreiss. Στο Παλαιοχώρι δύο σωροί αποτελούνται κυρίως από συμπαγείς έως ημισυμπαγείς σκωρίες με τμήματα spreiss. Η πιο εκτεταμένη μεταλλουργική

περιοχή είναι αυτή της Νικήσιανης με αρκετούς σωρούς συμπαγών, ημισυμπαγών σκωριών και τύπου spreiss σε όλη την έκταση της περιοχής «Λειβάδια». Στη Βαλτούδα εντοπίζεται αριθμός σκωριών και υπολειμμάτων καμίνων, καθώς και τριβεία. Μικρής έκτασης θέσεις σκωριών αποτελούν αυτές του Αβγού και της Μουσθένης. Στην Πουλιάνα Μεσορόπης και πλησίον του χείμαρρου της Βοσκοβρύσης εντοπίζονται επιφανειακά σκωρίες συμπαγείς, ημισυμπαγείς, σκωριώδεις και τύπου spreiss. Νοτίως της Μονής Ανάληψης εντοπίζεται μία θέση με επιφανειακές σκωρίες και υπολείμματα καμίνων. Στα Δωμάτια είναι έντονη η παρουσία σκωριών με συμπαγή και σκωριώδη υφή. Τέλος στο Οφρύνιο μικρές ποσότητες υαλωδών σκωριών καταγράφονται πλησίον της ομώνυμης μεταλλευτικής περιοχής.

Οι 11 μεταλλουργικές περιοχές και θέσεις στο όρος Παγγαίο (Εικ. 11.3.1) παρουσιάζουν μία σχετική ομοιομορφία στη διαδικασία, αν εξαιρέσουμε τη μεταλλουργική θέση των Δωματίων, όπου έχουμε παραγωγή σιδήρου, και του Οφρυνίου, όπου συναντώνται σκωρίες υαλώδους υφής. Όλες οι περιοχές εντοπίζονται σε θέσεις κοντά σε τροφοδοσία νερού που είναι είτε κάποια πηγή είτε κάποιος χείμαρρος, στοιχείο καταλυτικό για τον καθαρισμό (εμπλουτισμό) του μεταλλεύματος (Craddock, 1995; Hoover and Hoover, 1950; Βαβελίδης και Μέλφος, 2012).

Μία προκαταρκτική επεξεργασία του μεταλλεύματος (διαχωρισμός μεταλλεύματος και στείρου υλικού) πιθανότατα γινόταν στο εσωτερικό του μεταλλείου ή στη μεταλλουργική περιοχή (Εικ. 11.3.2). Στη συνέχεια το μέταλλευμα πιθανώς να οδηγούνταν σε φρύξη για την αναγωγή των σουλφιδίων του μεταλλεύματος. Πάντως η επιλεκτική συλλογή του οξειδωμένου μεταλλεύματος και όχι του μερικώς οξειδωμένου ή της πρωτογενούς μεταλλοφορίας δείχνει πιθανώς την προσπάθεια αποφυγής μιας οικονομικά

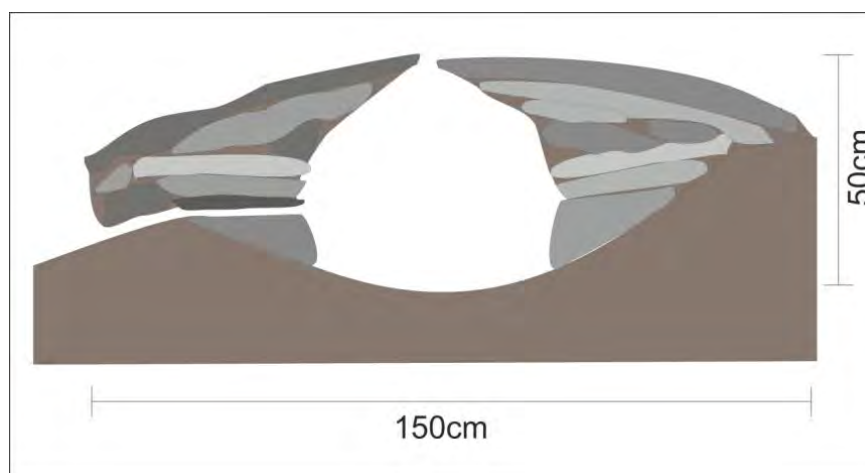


Εικόνα 11.3.1 Οι περιοχές με υπολείμματα αρχαίας μεταλλουργίας στο όρος Παγγαίο.

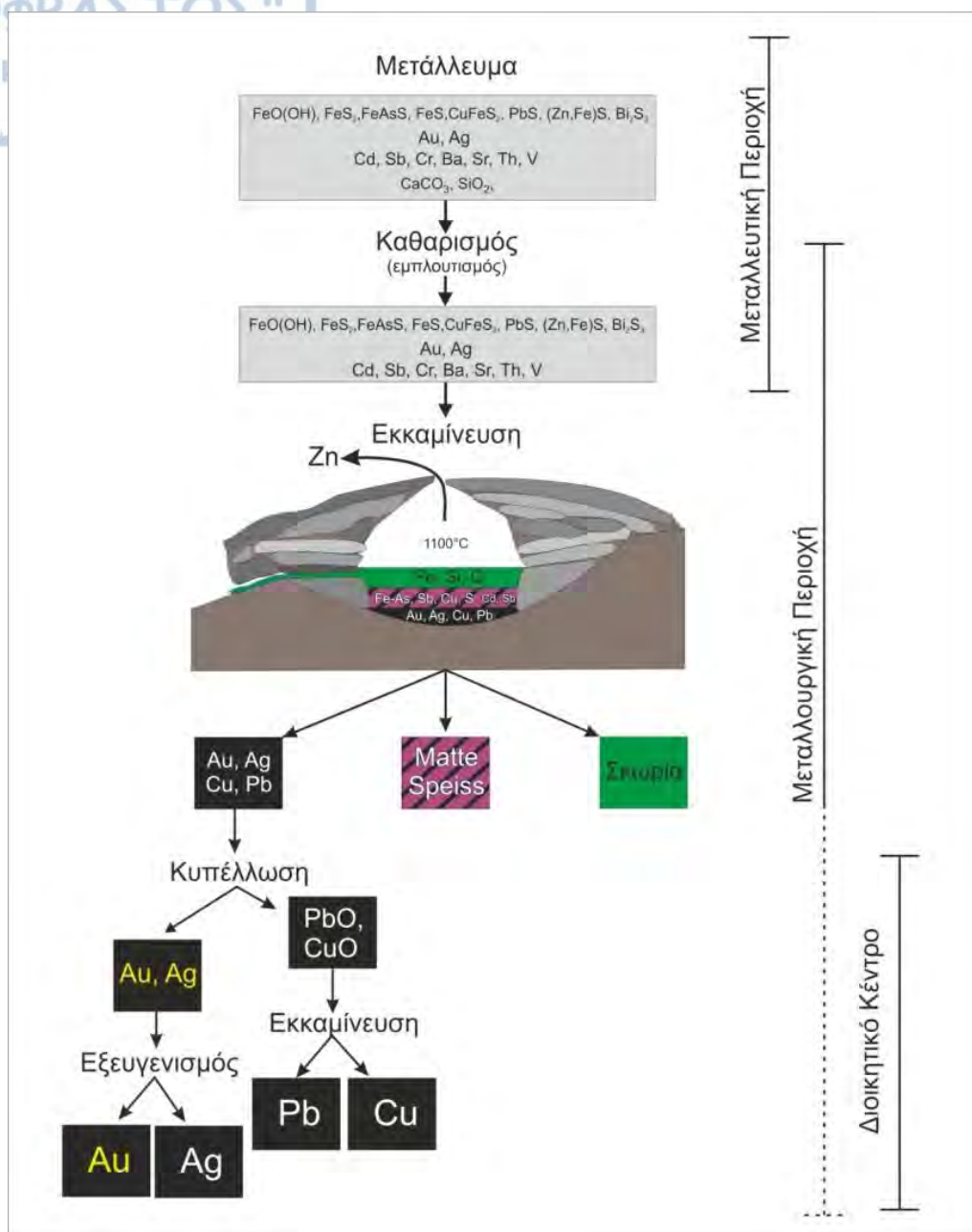
ασύμφορης διαδικασίας αναγωγής των σουλφιδίων, όπως αυτή της φρύξης (Tylecote et al, 1977; Bachmann, 1982). Πιθανότατα αυτή η διαδικασία να περιλαμβάνεται στην κύρια εκκαμίνευση.

Η εκκαμίνευση λαμβάνει χώρα σε κοιλότητες χτισμένες με λατύπες γνευσίου, οι οποίες συνδέονται με αργιλικό υλικό. Με το ίδιο υλικό επενδύεται το εσωτερικό της μεταλλουργικής καμίνου. Η εύρεση τεμαχών από τα τοιχώματα της μεταλλουργικής καμίνου, κυρίως στην περιοχή της Βαλτούδας δίνει τη δυνατότητα ανασύνθεσης όλης της κατασκευής (Εικ. 11.3.2).

Αξιο λόγου είναι ότι χρησιμοποιούνται μόνο τεμάχια από γνεύσιο. Όπως παρατηρεί και ο Agricola η τοποθέτηση στα τοιχώματα της καμίνου τεμαχών μαρμάρου θα οδηγούσε σε ρήξη τους λόγω της διάσπασης που αθσυνέβαινε στο μάρμαρο σε θερμοκρασία $\sim 800^{\circ}\text{C}$, καθόσον οι επικρατούσες θερμοκρασίες στη μεταλλουργική κάμινο ανέρχονταν στους $\sim 1100-1300^{\circ}\text{C}$. Ο γνεύσιος δεν παρουσιάζει τέτοια προβλήματα για αυτό και προτιμάται ως υλικό δόμησης των τοιχωμάτων καμίνων. Τα τεμάχια των γνευσίων συνδέονται με αργιλικό υλικό. Πιθανότατα με το ίδιο αργιλικό υλικό επενδύεται εσωτερικά και εξωτερικά η μεταλλουργική κάμινο. Μέσα στην κάμινο παράγεται η κυρίως φαύλιτική σκωρία η οποία συλλέγει το Fe και το Si για να τα οδηγήσει έξω από την κάμινο με τη διαδικασία της έκχυσης από οπή. Κάτω από το στρώμα της σκωρίας βρίσκεται το στρώμα spreiss στο οποίο έχει συγκεντρωθεί το As και ο Fe, με ίχνη από Sb, Cu, S και Cd (Εικ. 11.3.3). Στο κοίλο δάπεδο της καμίνου συγκεντρώνεται ο Pb και ο Cu, μαζί με τον Au και τον Ag. Στα υπολείμματα καμίνων από τις μεταλλουργικές θέσεις δεν βρέθηκε κάποιο στοιχείο οπής από όπου να εξέρχεται επιλεκτικά ο Pb. Σύμφωνα με τον Tylecote (1962) σε τέτοιες περιπτώσεις το υλικό αυτό μόλις τελειώσει η διαδικασία της εκκαμίνευσης και πήξει συλλέγεται πιθανώς με τη μορφή ταλάντου. Αυτό με τη διαδικασία της κυπέλλωσης διαχωρίζεται στα ευγενή μέταλλα, και στα οξείδια του Cu και του Pb. Με περεταίρω εκκαμίνευση αυτών συλλέγεται μεταλλικός Cu και Pb αντίστοιχα. Τα ευγενή μέταλλα διαχωρίζονται με ανάλογη διαδικασία εξευγενισμού.



Εικόνα 11.3.2 Αναπαράσταση μεταλλουργικής καμίνου με βάση τα ευρεθέντα τεμάχια κυρίως από την περιοχή της Βαλτούδας Παγγαίου.



Εικόνα 11.3.3 Γενικευμένη σχηματική αναπαράσταση της πιθανής αλυσίδας παραγωγής για τις κυριότερες μεταλλουργικές θέσεις στο Παγγαίο. Πρέπει ωστόσο να επισημανθεί ότι απλούστερες διαδικασίες θα ίσχυαν για την απόληψη μεμονωμένων μετάλλων, π.χ. μόνο χαλκού, μόνο σιδήρου. Μάλιστα η παρουσία των speises ίσως να παραπέμπει σε μεταγενέστερες, χρονικώς, περιόδους.

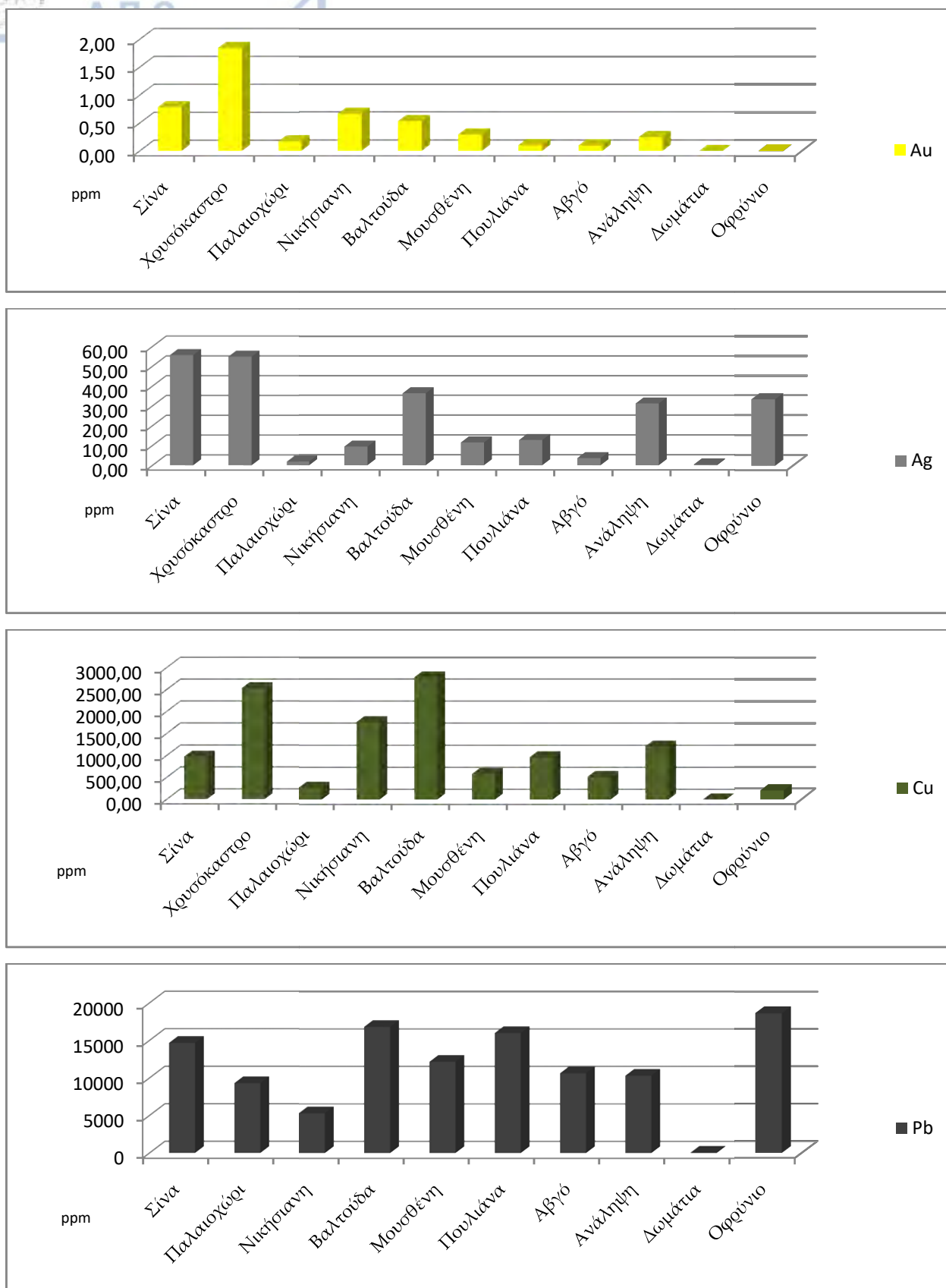
Στην περίπτωση της Βαλτούδας και δεδομένου ότι κατά τη Ρωμαϊκή περίοδο για δέκα χρόνια απαγορεύτηκε η απόληψη χρυσού και αργύρου, πιθανών παραγόταν χαλκός πλούσιος σε Au και Ag.

Οι περισσότερες μεταλλουργικές σκωρίες δείχνουν σύμφωνα με το τριγωνικό διάγραμμα ($\text{SiO}_2\text{-FeO-Al}_2\text{O}_3$) θερμοκρασίες μεταξύ 1100 και 1200°C (Εικ. 11.3.4). Μόνο η σκωρία από την περιοχή των Δωματίων προσεγγίζει τους 1200°C, αναμενόμενο για τις υψηλές θερμοκρασίες που απαιτεί η μεταλλουργία του σιδήρου. Ερωτηματικό αποτελεί η σύσταση και η τοποθέτηση στο τριγωνικό διάγραμμα της σκωρίας από τη μεταλλουργική θέση στο Οφρύνιο. Η

Η ίδια εικόνα παρατηρείται και στη μεταλλουργική περιοχή του λόφου Σίνα, στη Βαλτούδα και λιγότερο στην Ανάληψη. Μπορούμε να υποθέσουμε ότι σε αυτές τις περιοχές έχουμε παραγωγή Cu και παράλληλη απόληψη Au και Ag, μιας και οι περιεκτικότητες σε Pb είναι υψηλές. Η μεταλλουργική περιοχή της Νικήσιανης αν και παρουσιάζει ομοιότητες στις περιεκτικότητες Au, Ag και Cu, τα υψηλά ποσοστά του Pb οδηγούν στο συμπέρασμα ότι πραγματοποιείται απόληψη ευγενών μετάλλων με πιθανή προσθήκη μάλιστα επιπλέον Pb υπό μορφή γαληνίτη για τη συλλογή των ευγενών μετάλλων. Πρόκειται λοιπόν πιθανότατα για εκμετάλλευση μολύβδου-αργύρου.

Εικόνα 11.3.4 Τριγωνικό διάγραμμα ($\text{SiO}_2\text{-FeO-Al}_2\text{O}_3$) των δειγμάτων σκωριών από το όρος Παγγαίο.

Εικόνα 11.3.5 Σχηματική κατανομή των Au, Ag, Cu και Pb στις μεταλλουργικές σκωρίες του Παγγαίου.



Πίνακας 11.3.1 Τα χαρακτηριστικά των μεταλλουργικών θέσεων του Παγγαίου (Wus: Βουσίτις, Fa: Φαϊαλίτης, Ki: Κισοταίνιτης, Mo: Μοντισελίτης, Mag: Μαγνητίτης, Me: Μελανοτεκίτης, Gal: Γαληνίτης, Ba: Βαρύτης, At: Ατακαμίτης, Po: Μαγνητοπυρίτης) (Καμ: Υπολείμματα καμίνου, Τριβ: Τριβεία).

Μεταλλουργ. Θέση/Περιοχή	Τύποι Σκωριών	Κοκκία (Prills)	Ορυκτά	Au ppm	Ag ppm	Cu %	Pb %	Υπολειμμάτ α	v.i.	G	Προέλευση Μεταλλεύματ.
Σίνα	Συμπαγ. Speiss	Pb-Cu, Speiss	Wus, Ki	0,55	>100,00	0,10	1,40	Καμ.	2,72	0,15	Ανατ. Παγγαίο
Χρυσόκαστρο	Συμπαγ. Speiss	Pb-Cu, Speiss	Wus, Ki, Fa	4,85	>100,00	0,6	0,70	-	-	-	Αγία Τριάδα
Παλαιοχώρι	Συμπαγ. Ημισυμπ. Speiss	Pb, Speiss	Wus, Fa, Mo, Mag, Ki, Po	0,17	1,96	0,02	0,90	-	1,95	0,20	Ανατ. Παγγαίο
Νικήσιανη	Συμπαγ. Ημισυμπ. Speiss	Pb, Speiss	Wus, Fa, Mo, Me	0,66	9,45	0,2	0,50	Καμ. Τριβ.	2,15	0,26	Ασημότρυπες, Ανατ. Παγγαίο
Βαλτούδα	Συμπαγ., Ημισυμπ. Σπογγώδ. Speiss	Cu, Pb, Speiss	Wus, Mn- Wus, Fa, Ki, Mo, Gal, At	0,10- 0,90	2,60- 65,20	0,02- 0,20	1,00- 1,70	Καμ. Τριβ.	1,21- 2,65	0,02- 1,45	Ανατ. Παγγαίο
Μουσθένη	Συμπαγ. Ημισυμπ. Speiss	Pb, Speiss	Wus, Fa, Mo, Gal, At	0,29	11,50	0,06	1,22	-	1,42	0,30	Ανατ. Παγγαίο
Πουλιάνα	Συμπαγ. Ημισυμπ. Σπογγώδ. Speiss	Pb, Speiss	Wus, Mn-Ki, Fa, Mo, Mag,	0,10	12,78	0,06	1,60	Καμ.	2,01	-	Ανατ. Παγγαίο
Αβγό	Συμπαγ.	Pb-Cu, Speiss	Wus, Fa, Ki, Gal	0,07	2,60	0,02	1%	-	1,88	0,21	Ανατ. Παγγαίο
Ανάληψη	Συμπαγ. Ημισυμπ. Σπογγώδ. Speiss	Pb-Cu, Speiss	Wus, Mo, Po	0,25	31,19	0,09	1,00	Καμ.	1,37	-	Ανατ. Παγγαίο
Δωμάτια	Συμπαγ. Ημισυμπ. Σπογγώδ.	Fe	Wus, Ilm, Ki	0,00	0,45	0,01	0,00	-	1,79	0,21	-
Οφρύνιο	Υαλώδεις	-	Ba	0,00	33,25	0,02	1,8	-	0,51	-	Δυτικό Παγγαίο

11.4 Μοντέλο παραγωγικής διαδικασίας

Ο Raber (1987) στο πλαίσιο της παραγωγικής διαδικασίας χαλκού στους αρχαίους χρόνους μέχρι και το Μεσαίωνα προτείνει τρία διακριτά μοντέλα που ακολουθούνται στη μεταλλευτική-μεταλλουργική παραγωγική διαδικασία:

1. Εκτεταμένη παραγωγή υπό τον έλεγχο του κράτους

- Σε αυτό το μοντέλο παραγωγής η εξόρυξη γίνεται σε μεγάλη έκταση και οδηγεί στην παραγωγή εκατοντάδων ή χιλιάδων τόνων ετησίως.
- Η εξόρυξη και η εκκαμίνευση των μετάλλων γίνεται αδιαλείπτως από ειδικευμένο προσωπικό.
- Τα παραγωγικά κέντρα είναι λίγα και μεγάλα, και δομημένα έτσι ώστε να μετριάζεται το κόστος παραγωγής από τη μεταφορά του μεταλλεύματος και των μετάλλων. Κυριαρχείται από την ύπαρξη πυρήνων παραγωγής και διανομής.
- Το εργατικό δυναμικό είναι πολυάριθμο και εξειδικευμένο. Περιλαμβάνει ειδικευμένους τεχνίτες πλήρους απασχόλησης, διοικητικό προσωπικό και μεγάλο αριθμό από ανειδίκευτους ή μερικώς ειδικευμένους εργάτες. Στους ελληνιστικούς και ρωμαϊκούς χρόνους οι εργάτες αποτελούνται κυρίως από σκλάβους.
- Υπάρχει κεντρικά δομημένο σύστημα υποστήριξης που περιλαμβάνει την προμήθεια της καύσιμης ύλης, αποθηκευτικές εγκαταστάσεις, δρόμους και γενικά δίκτυο μεταφορών.

Τα αρχαιολογικά χαρακτηριστικά αυτής της βιομηχανικής παραγωγής είναι τα εξής:

1. Τα αρχαιολογικά ευρήματα εντοπίζονται σε λίγες περιοχές ευρείας έκτασης κοντά στις πηγές του μεταλλεύματος και της καύσιμης ύλης που έχει επιλεγεί με βάση την ευκολία μεταφοράς. Στο ευρύ χώρο της βιομηχανικής αυτής παραγωγής υπάρχουν κτήρια ειδικών λειτουργιών, ευρείες μεταλλευτικές περιοχές, σωροί εκβολάδων, κάμινοι κ.α.
2. Τα κτήρια με ειδικές λειτουργίες αφορούν κυρίως στην απόθήκευση, στη μεταλλουργία, στη στέγαση των μεταλλουργών και των μεταλλευτών, μόνιμες εγκαταστάσεις εκκαμίνευσης (μόνιμοι κάμινοι) και εξοπλισμός (χωνευτήρια, φυσστήρες κ.α.).
3. Χαρακτηριστικό της εντατικής εκμετάλλευσης είναι η απογύμνωση περιοχών από την υλοτομία για την παραγωγή ξυλοκάρβουνου, εκτεταμένοι μεταλλευτικοί χώροι κ.α.

2. Τοπικής κλίμακας παραγωγή με περιοδικό χαρακτήρα

- Σε αυτό το μοντέλο παραγωγής η παραγωγή είναι περιορισμένη σε τόνους αλλά και εποχιακά.

- Τα παραγωγικά κέντρα είναι μικρά και διασκορπισμένα και δεν σχετίζονται με κάποιο οικισμό εξειδικευμένου προσωπικού, αλλά με κάποιο ήδη υπάρχον χωριό ή πόλισμα.
- Το εργατικό δυναμικό δεν είναι πολυάριθμο και απαρτίζεται από εξειδικευμένους τεχνίτες και εργάτες μερικής απασχόλησης στη μεταλλουργία και στη μεταλλευτική δραστηριότητα.
- Υπάρχουν λίγες μεγάλες ή μόνιμες εγκαταστάσεις. Συνήθως οι εγκαταστάσεις είναι μικρές με υλικά που είναι διαθέσιμα σε τοπική κλίμακα.
- Ένα τοπικό σύστημα προμηθειών καλύπτει τις ανάγκες της παραγωγής, όπως στέγαση, αποθήκευση υλικού και μεταφορές.
- Η παραγωγή αφορά μόνο στην τοπική κατανάλωση. Προσανατολίζεται στην κάλυψη των τοπικών αναγκών και της ανάγκης επιβίωσης. Για το λόγο αυτό είναι εποχιακή και περιστασιακή.

Τα αρχαιολογικά χαρακτηριστικά αυτού του τύπου παραγωγής είναι:

- 1) Πολλά και μικρά κέντρα παραγωγής για την εξόρυξη τοπικών μεταλλοφοριών σε γειτνίαση με κάποιο χωριό ή πόλη.
- 2) Δεν υπάρχουν αποδείξεις για μεγάλα κτήρια ή μεταλλουργικές εγκαταστάσεις. Οι κάμινοι είναι μικροί και απλοί σε τεχνοτροπία. Επίσης μπορεί να μην είναι εμφανείς διότι οι αρχαίοι κάμινοι μετά τη λειτουργία τους κατεδαφίζονταν ή ενσωματώνονταν στις νεότερες κατασκευές.
- 3) Μικρές ποσότητες σκωριών, στείρου υλικού και άλλων υπολειμμάτων της μεταλλουργικής διαδικασίας που καταδεικνύουν ισχυρή παραγωγή.
- 4) Η διάθεση του παραγόμενου μετάλλου δείχνει κυρίως τοπική κατανάλωση.

3) Ενδιάμεσο μοντέλο μεταβατικής παραγωγής τοπικού χαρακτήρα

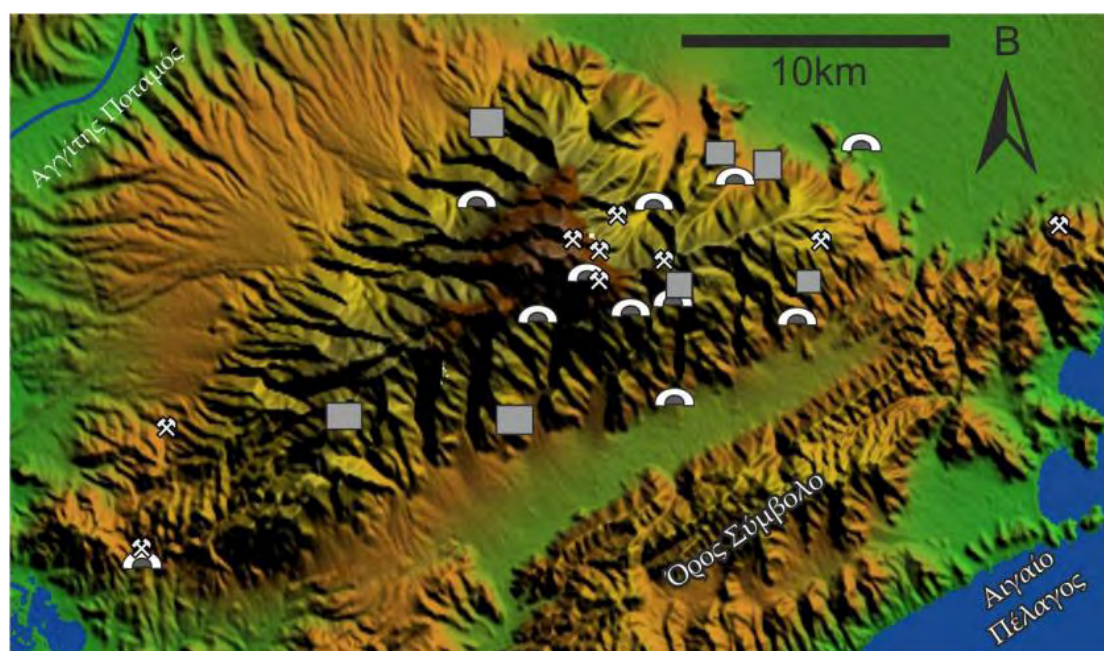
- Αυτό το μοντέλο παραγωγής είναι κατά κόρον τοπικό, πραγματοποιεί τοπικού χαρακτήρα εκμεταλλεύσεις και εξαρτάται από ένα τοπικό σύστημα προμηθειών, που εντάσσεται σε ένα μεγαλύτερο σύστημα ελέγχου, ζήτησης, συναλλαγών και διανομής υλικού.
- Η παραγωγή είναι πλήρους ή μερικής απασχόλησης, ανάλογα με τη ζήτηση.
- Υπάρχουν πολλά και διάχυτα μικρά κέντρα παραγωγής, σε άμεση γειτνίαση με τις πηγές μεταλλεύματος και καύσιμης ύλης, ανάλογα με αυτά του μοντέλου τοπικής κλίμακας με περιοδικό χαρακτήρα.
- Το εργατικό δυναμικό είναι εξειδικευμένο και απασχολείται μόνιμα ή περιστασιακά ανάλογα με τη ζήτηση σε μέταλλα.
- Το πιο αξιόλογο χαρακτηριστικό είναι η σύνδεσή του με ένα μεγαλύτερο σύστημα. Η βάση των πόρων του είναι τοπικής κλίμακας, αλλά ο έλεγχος

και η διανομή του παραγόμενου μετάλλου εξαρτάται από ένα πιο ευρύ οικονομικό και διοικητικό σύστημα.

Οι αρχαιολογικές ενδείξεις για αυτό το μοντέλο παραγωγής είναι:

- 1) Οι αρκετοί χώροι μεταλλουργίας διάχυτοι, όπως στο μοντέλο της τοπικής παραγωγής.
- 2) Οι μεταλλουργικές εγκαταστάσεις δείχνουν επίσης τοπικού χαρακτήρα παραγωγή. Ένα σχετικά μικρό σε αριθμό εργατικό δυναμικό διαμένει σε γειτονικά χωριά και πολίσματα. Δεν υπάρχουν ενδείξεις για ειδικές εγκαταστάσεις μεταλλουργίας ή διαμονής του εργατικού προσωπικού. Όλες οι εγκαταστάσεις είναι μικρές σε έκταση.
- 3) Τα υπολείμματα της μεταλλευτικής και μεταλλουργικής διαδικασίας δείχνουν ένα μεταβατικό τύπο μεταξύ της παραγωγής τοπικού χαρακτήρα και της εκτεταμένης παραγωγής υπό τον έλεγχο του κράτους.
- 4) Η αποψίλωση δεν είναι εκτεταμένη. Η εκμετάλλευση όμως είναι καλά σχεδιασμένη, χωρίς να δείχνει ευκαιριακές εκμεταλλεύσεις.
- 5) Το παραγόμενο μέταλλο διανέμεται ευρέως, χωρίς όμως να υπάρχουν πάντα σαφείς αποδείξεις.

Με τα μέχρι σήμερα αρχαιολογικά και γεωλογικά δεδομένα η περιοχή του Παγγαίου όρους σίγουρα δεν μπορεί να χαρακτηριστεί από εκτεταμένη παραγωγική διαδικασία με μόνιμο χαρακτήρα. Από την άλλη η πλειάδα μεταλλουργικών θέσεων και η πιθανή φύλαξή τους περιμετρικά από στρατιωτικές εγκαταστάσεις (Εικ. 11.4.1) τοποθετεί την παραγωγή σε ένα επίπεδο παραπάνω από το μοντέλο παραγωγής σε τοπική κλίμακα και με περιοδικό χαρακτήρα. Άρα, κάλλιστα θα μπορούσαμε να τοποθετήσουμε τη μεταλλευτική και μεταλλουργική περιοχή του Παγγαίου στο ενδιάμεσο μοντέλο



Εικόνα 11.4.1 Οι κύριες μεταλλευτικές και μεταλλουργικές περιοχές του Παγγαίου και οι οχυρωματικές θέσεις (τετράγωνα) για πιθανή προστασία τους.



μεταβατικής παραγωγής τοπικού χαρακτήρα.

Χαρακτηρίζεται από μικρές σχετικά μεταλλευτικές και μεταλλουργικές περιοχές και διάσπαρτες στη μάζα του βουνού. Το μοντέλο παραγωγής μετάλλων στην περιοχή του Παγγαίου πιθανότατα εντάσσεται σε ένα μεγαλύτερο σύστημα ελέγχου, ζήτησης, συναλλαγών και διανομής υλικού. Η βάση των πόρων του είναι τοπικής κλίμακας, αλλά ο έλεγχος και η διανομή του παραγόμενου μετάλλου εξαρτάται από ένα πιο ευρύ οικονομικό και διοικητικό σύστημα. Αν όχι στους αρχαϊκούς και κλασικούς χρόνους, πιθανότερα στους Ελληνιστικούς και σίγουρα στους ρωμαϊκούς χρόνους αυτή η τοπικού χαρακτήρα παραγωγή εντάσσεται στο εμπορικό, οικονομικό σύστημα ενός ευρύτερου κρατικού μηχανισμού.

12. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η περιοχή του όρους Παγγαίου αναμφισβήτητα αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές μεταλλευτικές και μεταλλουργικές περιοχές της αρχαίας Ελλάδας. Συνολικά καταγράφονται 9 μεταλλευτικές θέσεις με υπόγεια και επιφανειακή εκμετάλλευση. Οι περισσότερες εντοπίζονται στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα του Παγγαίου μέχρι και την περιοχή του Κοκκινοχώματος στις υπώρειες του όρους Συμβόλου. Παράλληλα καταγράφονται 11 θέσεις μεταλλουργίας.

- Οι μεταλλευτικές περιοχές που ερευνήθηκαν στο πλαίσιο του παρόντος στο κεντρικό-ανατολικό τμήμα του Παγγαίου όρους χαρακτηρίζονται από την παρουσία μεταλλοφοριών με Au, Ag, Fe, Cu, Pb, Zn, As, Mn, καθώς και με περιεκτικότητες σε Bi, Te, W, V, Co, B, Sb, Cr και U. Οι μεταλλοφορίες συνδέονται με την παρουσία των ορυκτών σιδηροπυρίτης, αρσενοπυρίτης, χαλκοπυρίτης, γαληνίτης, σφαλερίτης, καθώς και των βισμούθινίτης, τετραεδρίτης, μαλαχίτης, αζουρίτης, γκαιτίτης και ρουτίλιο.

- Η μεταλλοφορία στις μεταλλευτικές περιοχές στο δυτικό τμήμα τους όρους περιλαμβάνει τα μεταλλικά στοιχεία Ag, Pb, Zn, Fe, Mn, As, Cu, καθώς και τα Ba, V, Sb, La, Ce, Cd, Hg, Sr και B. Τα ορυκτά που ανευρίσκονται σε αυτό τον τύπο μεταλλοφορίας είναι ο σιδηροπυρίτης, γκαιτίτης και βαρύτης.

- Τα χαρακτηριστικά των μεταλλοφοριών στη μάζα του Παγγαίου οδηγούν στο συμπέρασμα ότι τα μεταλλοφόρα σώματα συνδέονται με τη διείσδυση του πλουτωνίτη και αποτελούν κοίτασμα συνδεόμενο με μαγματική διείσδυση (Intrusion Related System).

- Η μεταλλοφορία αναπτύσσεται σε ασυνέχειες των μαρμάρων και λιγότερο των σχιστολίθων και των αμφιβολιτών. Οι ασυνέχειες είναι κατά κύριο λόγο τεκτονικές διακλάσεις μεγάλης κλίσης, ενώ μεταλλοφορία παρατηρείται στα κενά της σχιστότητας.

- Η εξόρυξη απέβλεπε στην απόληψη της οξειδωμένης μεταλλοφορίας πλούσιας σε Au, Ag, Cu, Pb, Fe. Η πρωτογενής μεταλλοφορία (πρακτικώς θειούχος) και η μερικώς οξειδωμένη δεν εξορύσσεται. Η παρατήρηση αυτή εναρμονίζεται με ανάλογη τάση των ιστορικών χρόνων που επικρατεί σε

μεταλλουργικές πρακτικές και της υπόλοιπης Ελλάδας, δηλαδή απόληψη μετάλλων από δευτερογενή μεταλλεύματα, όχι πρωτογενή (σουλφίδια).

- Η διάνοιξη των υπόγειων στοών ακολουθεί τη διεύθυνση της μεταλλοφορίας. Παλαιότερες φάσεις εξόρυξης πληρώνονται με υλικό εξόρυξης. Τα βασικά μεταλλευτικά εργαλεία αποτελούν το σφυρί και το καλέμι. Σε σημεία που μετάλλευμα είναι μαλακό καταγράφεται χρήση της τσάπας.

- Τα μεταλλεύματα μεταφέρονται πιθανότατα από τα μεταλλευτικά κέντρα στις θέσεις μεταλλουργίας όπου ελάμβανε χώρα καθαρισμός με τη χρήση νερού. Στις μεταλλουργικές θέσεις εντοπίστηκαν λίθινα τριβεία για την κονιοποίηση του μεταλλεύματος. Μετά τον καθαρισμό (εμπλουτισμό) ακολουθούσε η εκκαμίνευση του μεταλλεύματος. Η κάμινος χτιζόταν με λίθους από γνεύσιο και επενδύονταν με αργιλικό υλικό.

- Το παραγόμενο τήγμα Pb-Cu είναι εμπλουτισμένο σε Au και Ag. Στις μεταλλουργικές θέσεις δεν εντοπίστηκαν σαφή ίχνη κυπέλλωσης πέτρα από τα υψηλά ποσοστά μολύβδου στις σκωρίες.

- Με τα μέχρι σήμερα αρχαιολογικά και γεωλογικά δεδομένα και ευρήματα η περιοχή του Παγγαίου όρους ανήκει στο ενδιάμεσο μοντέλο μεταβατικής παραγωγής τοπικού χαρακτήρα. Χαρακτηρίζεται από τις μικρές σχετικά μεταλλευτικές και μεταλλουργικές περιοχές και διάσπαρτες στη μάζα του όρους. Το μοντέλο παραγωγής μετάλλων στην περιοχή του Παγγαίου πιθανότατα εντάσσεται σε ένα μεγαλύτερο σύστημα ελέγχου, ζήτησης, συναλλαγών και διάθεσης του υλικού που ανήκει πιθανότατα σε ένα διοικητικό κέντρο όπως είναι η Αμφίπολη ή οι Φίλιπποι.

- Η μεταλλευτική και η μεταλλουργία δείχνει ιδιαίτερη ακμή κατά τους ρωμαϊκούς και τους υστεροβυζαντινούς, οθωμανικούς χρόνους. Παλαιότερες φάσεις εκμετάλλευσης είναι δύσκολο να χρονολογηθούν με ακρίβεια.

- Επειδή για τις μεταλλουργικές σκωρίες, που αποτελούν το σπουδαιότερο μεταλλουργικό κατάλοιπο, δεν υφίσταται πλήρως αξιόπιστη και τεκμηριωμένη μεθοδολογία χρονολόγησης, είναι δυνατό να υπεισέρχονται ορισμένες αβεβαιότητες στις προτεινόμενες, εδώ, τεχνολογικές ερμηνείες, καθώς σκωρίες (και speises) διαφορετικών/μεταγενέστερων εποχών είναι δυνατό να αντιστοιχούν σε διαφορετικές τεχνολογικές προσεγγίσεις.

13. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anguilano, L. (2012) Roman lead silver smelting at Rio Tinto. The case study of Corta Lago. PhD Thesis in Archaeology. University College London, pp. 311.
- Anhegger, R. (1943) Beitrage zur Geschichte des Bergbaus im Osmanischen Reich. I.Europaeische Türkei, Bd. 1-2, Istanbuler Schriften Nr.2, Nr. 4, Istanbul.
- Anufriyev, Y. N., Stupakov, G. P., Moskafyuk, A.A. (1974) Characteristics of quartz of Kochkar gold deposit. International Geology Review, V.16, Issue 4, pp. 405-416.
- Αποστολοπούλου-Κακαβογιάννη, Ο. (2000) Βίος και πολιτισμός στην Λαυρεωτική κατά τους προϊστορικούς χρόνους. Πρακτικά Θ' Επιστημονικής Συνάντησης ΝΑ Αττικής. Εταιρεία Μελετών ΝΑ Αττικής, Καλύβια Θορικού Αττικής.
- Αρβανιτιδής, Ν. (1988) Ενημερωτικό κείμενο για την πορεία των ερευνητικών εργασιών των προγραμμάτων Νικήσιανης, Μεσολακιάς (Παγγαίο), Ξυλαγανής και Σπάνιων Γαιών στα πλαίσια της ΥΒΚΕ. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Παράρτημα Ξάνθης (Υπηρεσιακό Σημείωμα), Ξάνθη.
- Arvanitidis, N., Constantinides, D., Dimadis, E., Favas, N., Nikolaou, S., Romanidis, I., Iliev, I., Katzkov, N., Manev, D., Milev, D., Yanev, V. (1989) Greek-Bulgarian joint project on the geology, metallogeny and prospecting of the Thermes ore-field, Northern Greece. Special Volume, IGME-BULGARGEOMIN, Xanthi, p. 116.
- Arvanitidis, N., Epitropou, N., Nimfopoulos, M. Dimadis, E. (1989) Geological and ore explorational approach of the broad region of Palaea Kavala. IGME, internal report, Xanthi, p. 21 (in Greek).
- Arvanitidis, D. N. (1993) Regional ore geologic studies setting controls and distribution of metallic deposit types in the Serbo Macedonian and western Rhodope zone. Final Report. EEC Project Carbonate hosted precious and base metal mineralization in Greece development of new exploration strategies. Thessaloniki. Pp. 1-99.
- Βαβάλιου, Μ. (2014) Αρχαιολογική, ορυκτολογική και γεωχημική μελέτη των αρχαίων λατομείων βασάλτη στις Μικροθήβες Μαγνησίας. Ανάλυση αρχαιολογικού υλικού από βασάλτη στην ευρύτερη περιοχή. Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης. Διατμηματικό Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών «Προστασία, συντήρηση, αποκατάσταση μνημείων πολιτισμού», Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- 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., Γιαλόγλου, Γ., Τρώντσιος, Γ., Μέλφος, Β., Weisgerber, G. (2001) «Ένα αρχαίο μεταλλείο ώχρας και μολύβδου-αργύρου στην περιοχή Ελιά της Θάσου», στο Ι. Μπασιάκος, Ε. Αλούπη, Γ. Φακορέλλης (επιμ.), Αρχαιομετρικές Μελέτες για την Ελληνική Προϊστορία και Αρχαιότητα, Ελληνική Αρχαιομετρική Εταιρεία, Εταιρεία Μεσσηνιακών Αρχαιολογικών Σπουδών, Αθήνα, σ. 633-644.
- Βαβελίδης, Μ. (2007) Κοιτάσματα χρυσού και αρχαία μεταλλευτική δραστηριότητα στη Μακεδονία και Θράκη- Αρχαιομεταλλουργικές έρευνες. Στο: Ο χρυσός των Μακεδόνων. Γραμμένος, Δ. Εκδόσεις Ζήτρος, Θεσσαλονίκη.

- Βαβελίδης, Μ. (2009) Η μεταλλευτική και μεταλλουργική δραστηριότητα στη Μακεδονία και Θράκη, με αναφορά στη λατομική δραστηριότητα, από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα. Στο: Μεταλλεία –Τόποι- Πόλεμοι. Αναγνώσεις χαρτών από το αρχείο της Επιθεώρησης Μεταλλείων Β. Ελλάδος του Υπουργείου Ανάπτυξης. ΕΚΕΠΠ – ΕΚΕΧΧΑΚ – Εθνική Χαρτοθήκη.
- Βαβελίδης, Μ. (2010) Βορειοανατολική Χαλκιδική: Ένα σημαντικό μεταλλευτικό και μεταλλουργικό κέντρο κατά την αρχαιότητα. Το αρχαιολογικό έργο στη Μακεδονία και στη Θράκη, 2010.
- Βαβελίδης, Μ., Μέλφος, Β. (2012) Αρχαιομεταλλουργική έρευνα στην περιοχή Κηπουρίστρα Ολυμπιάδας (Αρχαία Στάγειρα), ΒΑ Χαλκιδική. Επιστημονική Επετηρίδα του Τμήματος Γεωλογίας της Σχολής Θετικών Επιστημών Α.Π.Θ., Ειδικός Τόμος 101, 9-16.
- Bachmann, H. (1982) The identification of slags from archaeological sites, Institute of Archaeology Occasional Publication 6, Institute of Archaeology, London.
- Βακαλόπουλος, Α. (1992) Ιστορία της Μακεδονίας 1354-1833 Εκδόσεις Βανιάς, Θεσσαλονίκη.
- Baker, J.H., Arvanitides, N., Eliopoulos, D. (1991) The Pangeon mountains: Ancient prospects to modern prospecting. Programme EEC, MAM2M-0015-CT90.
- Baker, J.H., Arvanitides, N., Eliopoulos, D., De Groot, P. (1992) Vein type mineralizations, N. Greece: Examples from Pangeon, Palea Kavala and Symvoulon. Progress report to IGME and DGXII.
- Baker, J.H., Eliopoulos, D.G., Arvanitides, N.D., Chatzipanagis, J. (1990) Carbonate-hosted precious and base metal mineralizations in Greece: development of new exploration strategies. Fertile lineaments and regional variations of metallic elements. 3.4 The Pangeon - Symvolon regions: EEC Project MA2M-CT90-0015, Final Report, IGME, Athens, p.42-48.
- Baker, T. (2002) Emplacement depth and carbon dioxide-rich fluid inclusions in intrusion-related gold deposits. *Economic Geology* 97, 1111–1117.
- Bar-Yosef Mayer, D.E., Porat, N. (2008) Green stone beads at the dawn of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105, 8548e8551.
- Bassiakos, Y. (1988) Decay and protection of the ancient Greek mining heritage. In: P. Marinos, G. Koukis (eds) "The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites, vol 1, 1747-1757, Balkema, Rotterdam.
- Bassiakos, Y., Philaniotou, O. (2007) Early copper production on Kythnos: Archaeological evidence and analytical approaches to the reconstruction of the metallurgical process. In: *Metallurgy in the Early Bronze Age Aegean. Sheffield Studies in Aegean Archaeology* 7. Day, P.M., Doonan, R.C.P. eds., Oxford, pp.19-56.
- Bayliss, P. (1989) Crystal chemistry and crystallography of some minerals within the pyrite group. *American Mineralogist*. V. 74, p. 1168-1 176.
- Belon, P. (1553) Les observations de plusieurs singularitez et choses memorables trouvées en Grèce, Asie, Judée, Egypte, Arabie et autres pays étrangers. Redigees en trios livres, chez Guillaume Cavellat, Paris.

- Betancourt, P.P. (ed.), (2006) The Chrysokamino metallurgy workshop and its territory, Hesperia Supplement 36, ASCSA Publications, Princeton, NJ.
- Bird, J. B. (1979) The "Copper Man": A prehistoric miner and his tools from northern Chile. In: Pre-Columbian Metallurgy of South America, ed. E.P. Benson, pp. 105-32. Dumbarton Oaks.
- Brill, R.H, Wampler, J.M. (1965) Isotope studies of ancient lead. American Journal of Archaeology 69:165–166.
- Brun, J.P., Sokoutis, D. (2007) Kinematics of the southern Rhodope Core Complex (North Greece). Int. J. Earth Sci. 96, 1079–1099.
- Burg, J.-P. (2012) Rhodope: From Mesozoic convergence to Cenozoic extension. Review of petro-structural data in the geochronological frame. Journal of the Virtual Explorer 01/2012; 42. In: (Eds) Skourtsos, E., Lister, G.S., The geology of Greece.
- Burchfiel, B. C. (1980) Eastern European Alpine system and the Carpathian orocline as an example of collision tectonics: Tectonophysics, v. 63, p. 31–61.
- Γραμμένος, Β.Δ. (1997) Νεολιθική Μακεδονία. ΥΠ.ΠΟ. Δημοσιεύματα Α.Δ. Αρ. 56. Ταμεία Αρχαιολογικών Πόρων και Απαλλοτριώσεων, Αθήνα.
- Catapotis, M. Bassiakos, Y. (2007) Copper smelting at the Early Minoan site of Chrysokamino on Crete, in P.M. Day, R.C.P. Doonan (eds.) Metallurgy in the Early Bronze Age Aegean, Sheffield Studies in Aegean Archaeology 7, Oxford: Oxbow Books, 68-83.
- 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.
- Chatzipanagis, I. (1990) Geology and stratigraphy of Falacron Mountains area (West Rhodopes). Geol. Rhodopica 2, 89–99.
- Cleuziou, S. Berthoud, T. (1982) Early tin in the near east. Expedition 25.1, 14–19.
- Charles, J.A. (1967) Early arsenical bronzes – a metallurgical review. American Journal of Archaeology, 71 (1), 21-26.
- Charlton, M. (2007) Ironworking in Northwest Wales: an evolutionary analysis. PhD thesis. University College London.
- Chernykh, E.N. (1978) Gornoe delo i Metallurgiya v dreivneishei Bolgarii. Bolgarskoi Akademiii Nauk, Sofia.
- Chiotis, E., Koukouzas, C., Papadimitriou, G. (1996) Old mining and metallurgical activities in Angistrion-Serres-Macedonia, Proceedings of the 2nd Symposium of the Hellenic Archaeometric Society, Thessaloniki, 77-89.
- Christofides, G. (1996) Tertiary magmatism in the Greek Rhodope Massif, Northern Greece: Granitic plutons. Terranes of Serbia, pp. 155-160, Belgrade.
- Christofides, G., Soldatos, T., Eleftheriadis, G., Koroneos, A. (1998). Chemical and isotopic evidence for source contamination and crustal assimilation in the Hellenic Rhodope plutonic rocks. Acta Vulcanologica, 10, 2, 305-318.
- Craddock, P.T. (1995) Early Metal Mining and Production. Edinburgh University Press, Edinburgh.

- Craddock, P.T (2000) Early history of amalgamation process. In: Ramage, A., Craddock, P. King Croesus' Gold: Excavations at Sardis and the History of Gold Refining. Archaeological Exploration of Sardis, 11. Cambridge, MA: Harvard University Art Museums, in association with British Museum Press, p. 233-237.
- Craddock, B.R., Cartwright, C. R., Craddock P.T., Wray, W.B. (2003) Hafted stone mining hammer from Chuquicamata, Chile. In: Mining and metal production, pp. 52-68. Eds: Craddock, P.T., Lang, J. British Museum Press.
- Cramb, W.A., (2012) A short history of metals. Department of Materials Science and Engineering, Carnegie Mellon University.
- Dahmen, K. (2010) The numismatic evidence. In: Roisman, J., Worthington, I. (2010) A companion to ancient Macedonia. Blackwell Publishing Ltd.
- Davies, O. (1932) Ancient Mines in Southern Macedonia, Journal of the Royal Anthropological Institute, 62, 145-162.
- Davies, O. (1935) Roman Mines in Europe, Oxford at the Clarendon Press.
- Davey, C., Edwards, W.I. (2007) Crucibles from the Bronze Age of Egypt and Mesopotamia. Proceedings of the Royal Society of Victoria 120(1): 146–154.
- Δημακοπούλου, Κ. (1998) Κοσμήματα της Ελληνικής Προϊστορίας: Ο νεολιθικός θησαυρός, αρ. 60, Αθήνα.
- Dimopoulou-Rethemiotaki, N., Wilson, D. E., Day, P. M. (2007) The earlier Prepalatial settlement of Poros-Katsambas: craft production and exchange at the harbour town of Knossos. Metallurgy in the Early Bronze Age Aegean, 7, 84.
- Dinter, D.A., Royden, L. (1993) Late Cenozoic extension in northeastern Greece: Strymon valley detachment system and Rhodope metamorphic core complex. Geology 21, 45–48.
- Dinter, D.A. (1998) Late Cenozoic extension of the Alpine collisional orogen, northeastern Greece: origin of the north Aegean basin. Geol. Soc. Am. Bull. 110, 1208–1230.
- Donaldson, C.H. (1976) An experimental investigation of olivine morphology. Contributions to Mineralogy and Petrology 57, 187-213.
- Eaton, E.R., McKerrell, R. (1976) Near-Eastern alloying and some textual evidence for the early use of arsenical copper. World Arch. 8 (2), 169-91.
- Economou, G., Perdikatsis, V., Eliopoulos, D. (1989) Mineralogy and mineral chemistry of plumbojarosite of Fe-Mn gossan of Palea Kavala area (East Macedonia). Bull. Geol. Soc. Greece, Vol. XXIII/2, p. 305-312.
- Ettler, V., Cervinka, R., Johan, Z. (2009) Mineralogy of Medieval Slags from Lead and Silver Smelting (Bohutín, Příbram district, Czech Republic): Towards Estimation of Historical Smelting Conditions Archaeometry, 51, 6, 987-1007.
- Eleftheriadis, G., Frank, W., Petrakakis, K. (2001) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Pangeon granitoids, Rhodope Unit (northern Greece). Beih. Z. Eur. J. Mineral. 11:62.
- Eleftheriadis, G., Koroneos, A. (2003) Geochemistry and Petrogenesis of Post-Collision Pangeon Granitoids in Central Macedonia, Northern Greece. Chem. Erde, 63/4, 364-389.

- Eleftheriadis, G., Pe-Piper, G., Chrisotfides (1995) Petrology of the Philippi granitoid rocks and their microgranular enclaves (East Macedonia, North. Greece). Geol. Soc. Greece, Spec. Publ.: 512-517.
- Ellis, J.R., Walbank, F.W. (1992) Ακμή και τέλος του Μακεδονικού Βασιλείου. Πολιτική ιστορία. Στο: Σακελλαρίου, Μ.Β. (1992) Μακεδονία. 4000 χρόνια ελληνικής ιστορίας και πολιτισμού. Εκδοτική Αθηνών, Αθήνα
- Els, G., Eriksson, P. (2006). Placer formation and placer minerals; Preface. Ore Geol. Rev, 28, 373–375.
- Elster, S.E., Renfrew, C. (2003) Prehistoric Sitagroi: Excavations in Northeast Greece, 1968-1970. Vol. 2: the final report, Monumenta Archaeologica 20, Cotsen Institute of Archeology at UCLA, Los Angeles.
- Eluère, C. (1989a) La naissance de l' Orfèvrerie, Dossiers Histoire et Archéologie 137, pp.18-37.
- Eluère, C. (1989b) Le premier or de l' humanité en Bulgarie. Catalogue de l' exposition à Saint-Germaine-en-Laye. Paris: Réunion des Musées Nationaux.
- Eluère, C., Raub, J., C. (1991) New investigations on early gold foil manufacturing. In archeometry 90- (Birkhäuser), , Basel, Boston and Berlin, pp.243-259.
- Επιτρόπου, Ν. (1993) Έκθεση για τις κοιτασματολογικές έρευνες για πρωτογενή χρυσό στο ΝΔ Παγγαίο. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Παράρτημα Ξάνθης (εσωτερική έκθεση, Ε1618/553-495 Ν.ΚΑΒ), Ξάνθη.
- Ευαγγέλου, Ε. (1995) Ετήσια έκθεση των ερευνητικών εργασιών στο Σύμβολο και την ΝΑ περιοχή του Παγγαίου. Ερ. Περιοχή Φ6-1-164/845/22/13-1-1992 Έργο Δ.Ε. Εσωτερική έκθεση Ι.Γ.Μ.Ε. Παράρτημα Ξάνθης.
- Ζάχος, Κ. (1996) Μεταλλικά Κοσμήματα. Στο: Νεολιθικός πολιτισμός στην Ελλάδα. Παπαθανασόπουλος, 227, σελ. 41-43 Γ. Ίδρυμα Ν.Π. Γουλανδρή - Μουσείο Κυκλαδικής Τέχνης, Αθήνα 1996.
- Forbes, R. J. (1964) Studies in ancient technology Vol 8 Brill, Leiden.
- Fornadel, A.P., Paul, G.S., 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.
- Freyssinet, P., Butt, C.R.M., Morris, R.C. (2005). Ore-forming processes related to lateritic weathering. Econ. Geol., 100th Anniversary Volume, 681-722.
- Gale, N.H. (1989) Lead isotope analyses applied to provenance studies. A brief review. In: Maniatis, Y. (Ed.) Archeometry, Proceedings of the 25th International Symposium, Elsevier Science Ltd, Amsterdam, 469-502.
- Gale, N.H., Gentner, W., Wagner, G.A. (1980) Mineralogical and Geographical Silver Sources of Archaic Greek Coinage. In D.M. Metcalf, (ed.) Roy. Num. Soc. Special Publication No.13, Metallurgy in Numismatics I, London, 3-50.
- Gale, N.H., Picard, O., Barrandon, N. (1988) The archaic Thasian silver coinage. In G.A. Wagner, G. Weisgerber eds. Antike Edel- und Buntmetallgewinnung auf Thasos. Der Abschnitt Beiheft 6, Deutschen Bergbau-Museums, Bochum. 212-223.
- Garnett, R.H.T., Bassett, N.C. (2005). Placer deposits. Econ. Geol., 100th Anniversary Volume, 813-843.

- Gautier, P., Brun, J.-P. (1994) Ductile crust exhumation and extensional detachments in the central Aegean (Cyclades and Evvia Islands). *Geodin. Acta* 7, 57–85.
- Gautier, P., Brun, J.-P., Moriceau, R., Sokoutis, D., Martinod, J., Jolivet, L. (1999) Timing, kinematics and cause of Aegean extension: a scenario based on a comparison with simple analogue experiments. *Tectonophysics* 315, 31–72.
- Georgakopoulou, M., Bassiakos, Y., Philaniotou, O. (2011) Seriphos surfaces: a study of copper slag heaps and copper sources in the context of Early Bronze Age Aegean metal production. *Archaeometry*, 53(1), 123-145.
- Georgakopoulou, M. (2005) Technology and organization of early Cycladic metallurgy: copper on Seriphos and Keros, Greece. Ph.D. thesis, University of London, p.419.
- Georgiev, N.J., Pleuger, N., Froitzheim, S., Sarov, S., Jahn-Awe, Nagel, T.J. (2010), Separate Eocene-Early Oligocene and Miocene stages of extension and core complex formation in the western Rhodopes, Mesta Basin, and Pirin Mountains (Bulgaria), *Tectonophysics*, 487, 59–84, doi:10.1016/j.tecto.2010.03.009.
- Giordano, D. Mangiacapra, A. Potuzak, M. Russell, J.K. Romano, G. Dingwell D.B., Di Mauro, A. (2006) An expanded non-Arrhenian model for silicate melt viscosity: a treatment for metaluminous, peraluminous and peralkaline liquids. *Chemical Geology*, 229, 42-56.
- Glumac, P.D. (1988) Copper mineral finds from Divostin. In McPherron, A., Srejavic, D., (eds.) *Divostin and the Neolithic of Central Serbia*. pp 457-462. Pittsburgh: Dept. of Anthropology, University of Pittsburgh.
- Glumac, P.D., Todd, J.A. (1991) Early metallurgy in South-East Europe: the evidence of production. In P.D. Glumac, (ed.), *Recent Trends in Archaeometallurgical research*, pp 8-19. Masca Research Papers in Science and Archaeology 8. Philadelphia: University Museum.
- Grögler, N., Geiss, J., Grünenfelder, M., Houtermans, F.G. (1966) Isotopenuntersuchungen zur Bestimmung der Herkunft römischer Bleirohre und Bleibarren. *Zeitschrift für Naturforschung* 21a:1167–72.
- Hagemann, S.G., Brown, P.E. (2000) Gold in 2000: an introduction in *Society of Economic Geologists Reviews in Economic Geology* 13, 1-7.
- Hammond, N. G. L., Griffith, G. T. (1995) *Ιστορία της Μακεδονίας. Τόμος Β΄, (550-336π.Χ.)*. Oxford University Press, Μαλλιάρης-Παιδεία Α.Ε. Θεσσαλονίκη.
- Healy, J.F. (1978) *Mining and Metallurgy in the Greek and Roman World*. Thames and Hudson, London.
- Hellingwerf, R. H. (1989) Notes and comments on the mineralogy and geochemistry of the basement, transitional zone rocks, and marbles, and their relationship to Mn mineralizations in the W. Rhodope massif Greece E.E.C IGME project internal Regional Geology group progress report. \
- Hoover, H.C., Hoover, L.H. (1950) *Georgius Agricola's: De Re Metallica*, Translated from the first Latin edition of 1556, Dover Publications Inc, New York.
- Θεοχαρίδου, Κ. (1985) Εγκατάσταση βυζαντινού ορυχείου στην Περιοχή Θεσσαλονίκης. 5ο Συμπόσιο Βυζαντινής και Μεταβυζαντινής αρχαιολογίας και τέχνης. Χριστιανική Αρχαιολογική Εταιρεία, Θεσσαλονίκη 7-9 Ιουνίου 1985, Αθήνα.

- Ivanov, Z., Moskovski, S., Kolcheva, K., Dimov, D., Klain, L. (1984) Geological structure of the Central Rhodopes. I. Lithostratigraphic subdivision and features of the section of metamorphic rocks in the northern parts of central Rhodopes. Geol. Balc. 14, 3–42 (in Bulgarian with English abstract).
- Ivanov, Z. (1988) Aperçu general sur l'évolution géologique et structurale du massif des Rhodopes dans lae cadre des Balkanides. Bull. Soc. Géol. France 8, IV, 2, 227–240.
- Ivanov, Z. (1989) Structure and tectonic evolution of the central parts of the Rhodope massif. In: Ivanov, Z. (Ed.), Guide to Excursion E-3, CBGA-XIV congress, S. Bulg. 126 pp.
- Jahn-Awe, S., Froitzheim, N., Nagel, T.J., Frei, D., Georgiev, N., Pleuger, J., 2010. Structural and geochronological evidence for Paleogene thrusting in the western Rhodopes, SW Bulgaria: elements for a new tectonic model of the Rhodope Metamorphic Province. Tectonics 29 (3), TC3008.
- Jovanović, B. (1971) Metallurgy in the Eneolithic Period in Yugoslavia. Archaeological Institute, Belgrade.
- Jones, R.T. (2005) An overview of Southern African PGM smelting. In: Nickel and Cobalt 2005: Challenges in Extraction and Production, 44th Annual Conference of Metallurgists, Calgary, Alberta, Canada, 21-24 August 2005, pp.147-178.
- Καραγιαννόπουλος, Ι., Βακαλόπουλος, Α., Διαμαντούρος, Ι. (1992) Από το 1204 ως την άλωση της Θεσσαλονίκης από τους Τούρκους. Πολιτική Ιστορία. Στο: Σακελλαρίου, Μ.Β. (1992) Μακεδονία. 4000 χρόνια ελληνικής ιστορίας και πολιτισμού. Εκδοτική Αθηνών, Αθήνα.
- Κακαβογιάννης, Ε. (2005) Μέταλλα εργάσιμα και συγκεχωρημένα. Η οργάνωση της εκμετάλλευσης του ορυκτού πλούτου της Λαυρεωτικής από την Αθηναϊκή Δημοκρατία. ΥΠΠΟ Δημοσιεύματα του Αρχαιολ. Δελτίου, Αθήνα.
- Kakavogianni, O., Douni, K., Nezeri, F. (2004) In: Aegean Metallurgy in the Bronze Age. Ed. Tzachili, I. Proc. Of Int. Symposium, Crete, Rethymnon.
- Khakhutaishvili, D.A. (2009) The manufacture of Iron in Ancient Colchis. BAR International Series Oxford, 1905.
- Kilias, A., Falalakis, G., Mountrakis, D. (1999) Cretaceous–Tertiary structures and kinematics of the Serbomacedonian metamorphic rocks and their relation to the exhumation of the Hellenic hinterland (Macedonia, Greece). Int. J. Earth Sci. 88, 513–531.
- Kilias, A., Mountrakis, D. (1990) Kinematics of the crystalline sequences in the western Rhodope Massif. Geologica Rhodopica, vol. 2. Pp. 100-116.
- Kesler, S.E., (1994) Mineral Resources, Economics and the Environment : Macmillan, New York, 394 p.
- Klemm, D., Klemm, R., Murr, A. (2001) Gold of the Pharaohs – 6000 years of gold mining in Egypt and Nubia. African Earth Sciences 33 (2001) 643–659.
- Knauth, P. and the Editors of Time-Life books (1974) The Metalsmiths. Time-Life International, Nederland, B.V.
- Kokkinakis, A. (1980a) Zum faltenbau des Symvolongebirges und des gebietes von Kavala (Griechisch-Ostmakedonien): Annales Géologiques des Pays Helléniques, v. 30, p. 398–420.

- Kokkinakis, A. (1980b) Altersbeziehungen zwischen Metamorphosen, mechanischen Deformationen und Intrusionen am Südrand des Rhodope-Massivs (Makedonien, Grieschenland): Geologische Rundschau, v. 69, p. 726–744.
- Kolocotroni, C., Dixon, J.E. (1991) The origin and emplacement of the Vrontou granite, Serres, N.E. Greece. Bull. Geol. Soc. Greece, XXV/1, 469-483.
- Κονοφάγος, Κ. (1997) Η δημοκρατία της Αθήνας και οι παραχωρήσεις στους πολίτες της των μεταλλείων αργύρου της Λαυρεωτικής κατά τον 4ο αιώνα π.χ. Ο βασικός ρόλος του αργύρου του Λαυρίου στην ισχύ και τον πολιτισμό της Αθήνας. Εκδόσεις Εθνικού Μετσοβείου Πολυτεχνείου. Σελ. 1-142.
- Κονοφάγος, Κ. (1980) Το Αρχαίο Λαύριο και η Ελληνική Τεχνική Παραγωγής Αργύρου. Εκδοτική Ελλάδος Α.Ε., Αθήνα, 459 σελ.
- Κοτοπούλη, Ν. Κ. (1981) Οι Εμφάνσεις των Μαγματικών Πετρωμάτων Σκαλωτής-Παρανεστίου (Ελληνική Ροδόπη)». Πανεπιστήμιο Πατρών, 255 σελ.
- Κουκούλη-Χρυσανθάκη, Χ. (1990) Τα μέταλλα της Θασιακής Περαίας, Μνήμη Δ. Λαζαρίδη: Πόλις και Χώρα στην αρχαία Μακεδονία και Θράκη, Πρακτικά Αρχαιολογικού Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη, σ. 493-514.
- Kozhoukharov, D. (1984) Lithostratigraphy of the Precambrian metamorphites from the Rhodope Supergroup in the Central Rhodopes. Geol. Balc. 14, 43–48 (in Russian with English abstract).
- Kozhoukharov, D. (1988) Precambrian in the Rhodope massif, lithostratigraphy. In: Zoubek, V., Cogne, J., Kozhoukharov, D., Krautner, H. (Eds.), Precambrian in Younger Fold Belts. J. Wiley and Sons, pp. 726–745.
- Koukouli-Chrysanthaki, C., Weisgerber, G., Gialoglou, G., Vavelidis, M. (1988) Praehistorischer und junger Bergbau auf Eisenpigmente auf Thasos." In: Wagner, G.A., Weisgerber, G. 1988, Antike Edel- und Buntmetallgewinnung auf Thasos." Der Anschnitt: Beiheft. Bochum 1988. 241-244.
- Κουκούλη-Χρυσανθάκη, Χ. (1992) Πρωτοϊστορική Θάσος II. Τα νεκροταφεία του οικισμού Καστρί, Δημοσιεύματα του Αρχαιολογικού Δελτίου, 45, Αθήνα
- Κουκούλη-Χρυσανθάκη, Χ., Weisgerber, G. (1993) Προϊστορικά ορυχεία ώχρας στη Θάσο. Το αρχαιολογικό έργο στη Μακεδονία και στη Θράκη 7.
- Koukouli-Chrysanthaki, C. Bassiakos, Y. (2002) Non-slagging copper production of the 5th millennium: The evidence from the Neolithic settlement of Promachon-Topolnica (Eastern Macedonia, Greece), 8th EAA Annual Meeting, Thessaloniki, Hellas, 193-194
- Koukouli-Chrysanthaki, C. Weisgerber, G. (1999) Prehistoric Ochre Mines on Thasos. In C. Koukouli-Chrysanthaki, A. Müller, S. Papadopoulos (Eds.), Thasos: Matières Premières et Technologie de la Préhistoire à nos jours (pp. 129-144). Paris: De Boccard.
- Koukouli-Chrysanthaki, Ch., Weisgerber, G., Gialoglou, G., Vavelidis, M. (1988) «Praehistorischer und junger Bergbau auf Eisenpigmente auf Thasos», Anschnitt 6, p. 241-244.
- Κρικέλας, Ο. (1973) Έκθεσις επί της ερέυνης δια πρωτογενή και προσχωματικών χρυσών εις Ανατολικήν Μακεδονίαν κατά το έτος 1972. Γενική Εταιρεία Μελετών Ερευνών και Εκμεταλλεύσεων Α.Ε, 2371, Αθήνα.

- Krohe, A., Mposkos, E. (2002) Multiple generations of extensional detachments in the Rhodope Mountains (Northern Greece): evidence of episodic exhumation of high-pressure rocks. In: Blundel, D.J., Neubauer, F., von Quadt, A. (Eds.), The Timing and Location of Major Ore Deposits in an Evolving Orogen: Geol. Soc. London Spec. Publ., vol. 204, pp. 151–178.
- Kronberg, P. (1969) Gliederung, Petrographie und Tectogenese des Rhodopen-Kristallins im Tsal-Dag, Simvolon und Ost-Pangäon (Griechisch-Makedonien): Geotektonische Forschungen, v. 31, p. 1–49.
- Kronberg, P. (1972) Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος. Φύλλο Καβάλα. Κλίμακα 1:50.000. Εθνικό Ίδρυμα Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών.
- Kronberg, P., Schenck, P.F. (1974) Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος. Φύλλο Νικήσιανη-Λουτρά Ελευθερών. Κλίμακα 1:50.000. Εθνικό Ίδρυμα Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών.
- Λαζαρίδης, Δ. (1972) Αμφίπολις και Άργιλος. Αρχαίες Ελληνικές πόλεις, 13, Αθηναϊκός Τεχνολογικός Όμιλος, Αθήνα.
- Lang, J.R., Baker, T., Hart, C.J.R., Mortenson, J.K. (2000) An exploration model for intrusion-related gold systems. Society of Economic Geologists Newsletter 40 (1), 6–15.
- Macdonald, E. (2007) Handbook of gold exploration and evaluation, Woodhead Publishing, Cornwall, England.
- Mack, E. (1983) Auriferous mineralization in northern Greece: history, exploration and evaluation. In: Scheider, H.J. (ed), Mineral deposits of the Alps and of the Alpine epoch in Europe. Springer, Berlin, Heidelberg, New York: 375-384.
- Maddin, R., Muhly, J.D., Stech, T., 1999. Early metalworking at Çayönü. In: Hauptmann, A., Pernicka, E., Rehren, Th., Yalçın, Ü. (Eds.), The Beginnings of Metallurgy. Deutsches Bergbau-Museum, Bochum, pp. 37e44. Makkay, J. (1991) The most ancient gold and silver in Central and South-East Europe. In C. Eluère and J.P. Mohen (eds) Découverte du métal, pp 119-130. Paris: Picard.
- Manev, D., Katzkov, N., Milev, V., Malinov, O., Arvanitidis, N., Constantinides, D., Dimadis, E., Romaidis, I., Favas, N. (1989) Comparison of Madan (Bulgaria) and Thermes (Greece) ore fields: Geology and metallogeny, 2nd Hellenic Bulgarian Symposium on Rhodope, Univ. of Thessaloniki. Geol. Rhodopica, p. 309-325.
- Μαρινάτος, Σ. (1930) Ανασκαφαί εν Κρήτη. Πρακτικά 1997, εικ. 9.
- Marinova, R. (1991) Geological map of Bulgaria on the Scale 1:100000. Sheet Blagoevgrad. Geology and Geophysics Ltd, Sofia.
- Μαυροειδή, Ι., Ανδρέου, Σ., Βαβελίδης, Μ. (2006) Μεταλλικά αντικείμενα και μεταλλοτεχνικές δραστηριότητες κατά την Εποχή του Χαλκού στην Τούμπα Θεσσαλονίκης. Το αρχαιολογικό έργο στη Μακεδονία και στη Θράκη, Θεσσαλονίκη.
- McGeehan, V., Liritzis V. (1996) The role and development of metallurgy in the Late Neolithic and the Early Bronze Age of Greece. Paul Astrom, Jonsered.
- Μέλφος, Β. (1995) Έρευνα των βασικών και ευγενών μετάλλων στην Περιοδοπική Ζώνη της Θράκης. Διδακτορική Διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. 289 σ.

- Melfos, V., Vavelidis, M., Chrostofides, G., Seidel, E. (2002) Origin and evolution of the Tertiary Maronia porphyry copper-molybdenum deposit, Thrace, Greece. *Mineralium Deposita* 37: 648-668.
- Melfos, V., Voudouris, P., Vavelidis, M., Spry, P.G. (2008) Microthermometric results and formation conditions of a new intrusion-related Bi-Te-Pb-Sb±Au mineralization in the Kavala Pluton, Greece. Joint 13th All-Russian Conference on Thermobarogeochemistry/ 4th Asian and Pacific International Fluid Inclusion Society Symposium, Moscow, Abstracts.
- Meyer, W. (1968) Zur Alterstellung des Plutonismus im Südteil der Rila-Rhodope-Masse (Nordgriechenland): *Geologica et Paleontologica*, v. 2, p. 173-192.
- Michael, C. (2004) Epithermal systems and gold mineralization in Western Thrace (North Greece). *Bulletin of the Geological Society of Greece* vol. XXXVI, 2004 Proceedings of the 10th International Congress, Thessaloniki, April 2004.
- Μιχαηλίδης, Κ., Βαβελίδης, Μ., Φιλιππίδης, Α. (2003) Σημειώσεις Κοιτασματολογίας Ι. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, Θεσσαλονίκη.
- Michailidis, K., M., Nimfopoulos, K., Nicholson, A., Chatzikirkou (1995) A hydrothermal manganeseiferous sulphide assemblage associated with pegmatite intrusions in the Sideronero area, Drama, N. Greece. *Proceedings of the XV Congress of the Carpatho-Balkan Geological Association*. Athens, Greece, September 1995, *Geol. Soc. Greece, Spec. Publ.* 4, 783-788.
- Michailidis, K., Vavelidis, M., Christofides, G. (1989) Native gold in the skarn-type mineralization of Kimmeria, NE of Xanthi. *Geol. Rhodopica*, Vol. 1, p. 396-402, Sofia.
- Mercier, J.L., Sorel, D., Vergely, P., Simeakis, K. (1989) Extensional tectonic regimes in the Aegean basins during the Cenozoic, *Basin Fr.*, 28, 287-292. *Res.*, 2, 49-71.
- Meyer, W. (1969) Die Faltenachsen im Rhodopen-Kristallin östlich des Strimon (Nordost-Griechenland): *Geotektonische Forschungen*, v. 31, p. 86-96.
- Mongiatti, A., Rehren, T., Martinon-Torres, M., Cech, B. (2007) Smelting gold and silver ores in renaissance Austria. *Archaeometallurgy in Europe 2007 (AIM: Milan 2009)*, p. 60-67.
- Mongiatti, A., Martinon-Torres, M., Rehren, T. (2009) Testing ores for gold and silver in renaissance Austria: New techniques, new discoveries. *Proceedings ISA 2006*, Eds. Moreau, J.F., Auger, R., Chabot, J., Herzog, A. Quebec.
- Montgomery, H. (1984) Silver, coins and the wealth of a City-State. *OpAth* 10, 123-133.
- Μουντράκης, Δ. (2010) Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας. University Studio Press, σελ. 374, Θεσσαλονίκη.
- Μπασιάκος, Γ. (1993) Η αρχαία ελληνική μεταλλεία και οι σχέσεις της με τις γεωεπιστήμες. *Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Εταιρ.* Τομ. 28, σελ. 475-491.
- Μπελαβίλας, Ν., Παπαστεφανάκης, Α. (2009) Ορυχεία στο Αιγαίο. Βιομηχανική αρχαιολογία στην Ελλάδα. Μέλισσα, Αθήνα.
- Mposkos, E. (1989) High-pressure metamorphism in gneisses and pelitic schists in East Rhodope Zone: *Mineral, and Petrol*, v.1, p.337-351.

- Mposkos, E., Liati, A. (1993) Metamorphic evolution of metapelites in the high-Pressure terrane of the Rhodope zone, Northern Greece. *Canadian Mineralogist*, 31, 401-424.
- Muhly, J. (2002) Early Metallurgy in Greece and Cyprus. In U. Yalçin (ed.) *Anatolian Metal II*, pp 77-82. Der Anschnitt, Beiheft 15. Bochum: Deutsches Bergbau- Museum.
- Nerantzis, N. (2009a) Byzantine and Ottoman Mineral Exploration and Smelting in Eastern Macedonia, Greece and their Implications for Regional Economies. PhD Thesis. Department of Archaeology and Prehistory, University of Sheffield.
- Nerantzis, N. (2009b) Pillars of power: Silver and steel of the Ottoman Empire. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, Vol. 9, No. 2, pp. 71-85.
- Nerantzis, N., Papadopoulos, S. (2013) Reassessment and new data on the diachronic relationship of Thasos Island with its indigenous metal resources: a review, *Archaeological and Anthropological Sciences* 5(3), 183-196.
- Nerantzis, N., Bassiakos, Y., Papadopoulos, S. (2016) Copper metallurgy of the Early Bronze Age in Thassos, north Aegean. *Journal of Archaeological Science: Reports* 7, pp. 574-580.
- Nesbitt, R.W., Billett, M.F., Ashworth, K.L., Deniel, C., Constantinides, D., Demetriades, A., Katirtzoglou, C., Michael, C., Mposkos, E., Zachos, S., Sanderson, D. (1988) The geological setting of base metal mineralisation in the Rhodope region, Northern Hellas. In: Boissonal J., Omenetto, P. (Eds), 1988, *Mineral Deposits within the European Community*. Special Publication No. 6 of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, p.499-514.
- Nimfopoulos, M.K., Patrick, R.A.D. (1991) Mineralogical and textural evolution of the economic manganese mineralisation in western Rhodope massif. N. Greece. *Mineralogical Society Mineralogical Magazine*, September 1991, Vol. 55, pp. 423-434.
- Ευδίας, Σ. (1978) Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδος. Φύλλο Ροδολίβος. Κλίμακα 1:50.000. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών.
- Olbrycht, M.J. (2010) Macedonia and Persia. In: Roisman, J. and Worthington, I. (2010) *A companion to ancient Macedonia*. Blackwell Publishing Ltd.
- Παπάγγελος Ι. Α. (2003) Η Χαλκιδική στους μέσους χρόνους, *Καθημερινή*, Επτά Ημέρες, 1η Ιουνίου 2003, 15-17.
- Παπάγγελος, Ι. Α. (2007) Αγραμάδες και προσχωματικός χρυσός. Στο: Ο χρυσός των Μακεδόνων. Γραμμένος, Δ. Εκδόσεις Ζήτρος, Θεσσαλονίκη.
- Παπαδόπουλος, Δ. (2000) Η φύση του Παγγαίου. Στο: Το χρυσοφόρο Παγγαίο. Επτά Ημέρες. Εφημερίδα Καθημερινή.
- Papadopoulos, S. (2008) Prehistoric years, the first settlements-From Sitagroi to the settlements at Dikili Tash and Kastri, Thassos. In: Papazoglou, G.K. *Eastern Macedonia*. Komotini, 2008.
- Παπαδόπουλος, Σ., Νεράντζης, Ν. (2012) Η παραγωγή σιδήρου στο Νομό Καβάλας και την ευρύτερη περιοχή κατά τα ιστορικά χρόνια. Στο: Ρουδομέτωφ, Β.Ν. (2012) *Η Καβάλα και τα Βαλκάνια. Η Καβάλα και η Θράκη. Πρακτικά Γ' Διεθνούς συνεδρίου βαλκανικών ιστορικών σπουδών*. 17 – 18 Σεπτεμβρίου 2010, Καβάλα, Τόμος Α'.
- Papanikolaou, D., Panagopoulos, A. (1981) On the structural style of Southern Rhodope, Greece. *Geol. Balc*, 11.3, 13-22.

- Παπασταματάκη, Α. (1975) Η εκμετάλλευσις του ορυκτού πλούτου της αρχαίας Ελλάδος. Έρευνα επί της περιεκτικότητας εις χρυσόν και άλλα μέταλλα των σκωριών της αρχαίας ελληνικής μεταλλουργίας. Εθνικόν Ίδρυμα Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήναι.
- Παπασταματάκη, Α. (1985) Οι σκωρίες της αρχαίας Ελληνικής μεταλλουργίας. Πρακτικά 1ου Σεμιναρίου Αρχαιομετρίας. ΙΓΜΕ, Αθήνα, σ. 41-67.
- Papastamataki, A. (1998) Metallourgikes drastiriotites stin Kea kata tin archaeotita, Neotera Stoicheia. In: Mendoni, L.G., Mazarakis-Ainian A. (eds.) Kea-Kythnos: History and Archaeology, Meletimata 27 (Athens), 759-764
- Παπασταματάκη, Α., Ορφανός, Β., Δημητρίου, Δ., Τριαντάφυλλος, Δ., Καραδήμα, Χ. (2001) «Ένα άγνωστο μεταλλείο στη Μαρώνεια Κομοτηνής», στο Ι. Μπασιάκος, Ε. Αλούπη, Γ. Φακορέλλης (επιμ.), Αρχαιομετρικές Μελέτες για την Ελληνική Προϊστορία και Αρχαιότητα, Ελληνική Αρχαιομετρική Εταιρεία, Εταιρεία Μεσσηνιακών Αρχαιολογικών Σπουδών, Αθήνα, σ. 617-631.
- Pavlopoulou, A. (2008) From Amphipolis to Thassos, to Iiona and Draviskos – The classical era. In: Papazoglou, G. (2008) Eastern Macedonia. Anglohellenic –Peltic Publications, S.A., Komotini.
- Pelton, A., Stamatakis, M.G., Kelepertzis, E., Panagou, T. (2014) The Origin and Archaeometallurgy of a Mixed Sulphide Ore for Copper Production on the Island of Kea, Aegean Sea, Greece. Archaeometry, University of Oxford.
- Pernicka, E. (1999) Trace element fingerprinting of ancient Copper: A guide to technology or provenance?. In S. M. M. Young, A. M. Pollard, P. Budd, R. A. Ixer (Eds.), Metals in antiquity. BAR International Series, 792 (pp. 163–171). Oxford:Archaeopress.
- Pernicka, E., Bassiakos, I., Wagner, G. A. (1982). Goldvorkommen und antiker Bergbau auf der Kykladeninsel Siphnos. Naturwissenschaften, 69(1), 39-40.
- Pernicka, E. Begemann, F. Schmitt-Strecker, S., Grimani, A.P. (1990) On the composition and provenance of metal artifacts from Poliochni on Lemnos. Oxford Journal of Archaeology, 9 (3), 263-298.
- Pernicka, E., Begemann, F., Schmitt-Strecker, S., Wagner, G.A. (1993) Eneolithic and Early Bronze Age copper artifacts from the Balkans and their relation to Serbian copper ores. Praehistorische Zeitschrift 68: 1-54.
- Pernicka, E., Gentner W., Wagner, G.A., Vavelidis, M., Gale N.H. (1980) Ancient lead and silver production on Thasos, Rev., Archeomet., III, 217-227.
- Pernicka, E., Lutz, C., Bachmann, H.G., Wagner, G.A., Elitzsch, Chr; Klein, E. (1985) Alte Blei-Silber-Verhüttung auf Sifnos. 185-99 Wagner, G.A., Weisgerber, G. eds, Silber, Blei und Gold auf Sifnos. Der Anschnitt Beiheft 3. Bochum.
- Pernicka, E., Rehren, T., Schmitt-Strecker, S. (1998) Late Uruk silver production by cupellation at Habuba Kabira, Syria, in Th. Rehren, A. Hauptmann, D.J. Muhly (eds) Metallurgica Antiqua, Der Anschnitt Beiheft 8, Bochum, 123-134.
- Philaniotou, O., Bassiakos, Y., Georgakopoulou, M. (2011) Early Bronze Age copper smelting on Seriphos (Cyclades, Greece). Metallurgy: Understanding How, Learning Why, Studies in Honor of James D. Muhly (Prehistory Monographs 29), 157-64.

- Photos, E. (1987) Early Extractive Iron Metallurgy in N. Greece: A Unified Approach to Regional Archaeometallurgy, PhD Dissertation, University of London.
- Photos, E., Koukouli-Chrysanthaki, Ch., Gialoglou G. (1986) Extractive Iron Metallurgy on Thasos and the East Macedonian mainland, In R.E. Jones, H.W. Catling (eds.) Science in Archaeology, Proceedings of a meeting held at the BSA Fitch Lab, Occasional Paper 2, 43-47.
- Photos, E. (1989) The question of meteoritic versus smelted Nickel-Rich Iron: Archaeological evidence and experimental results. World Archaeology, Vol. 20, No. 3, Archaeometallurgy (Feb., 1989), pp. 403-421
- Photos, E., Koukouli-Chrysanthaki, C., Tylecote, R.F., Gialoglou, G. (1989) Precious Metals Extraction in Palaia Kavala, NE Greece, An Archaeometallurgical Attempt to Locate Skapte Hyle, International Old World Archaeometallurgy Conference, Max Plank Institut fur Kern Physik, Heidelberg, 179-190.
- Pleiner, R. (2000) Iron in Archaeology: The European Bloomery Smelters. Praha: Archeologický Ústav Avčr.
- Raber, P. (1987) Early Copper Production in the Polis Region, Western Cyprus. JField 14, 297-313.
- Rădelescu, D., Dimitrescu, R. (1966) Mineralogia Topographica a Romanieri, Bucharest.
- Radivojevic, M., Rehren, Th., Pernicka, E., Sljivar, D., Brauns, M., Boric, D. (2010) On the origins of extractive metallurgy: new evidence from Europe. *Journal of Archaeological Science* 37, 2775-2787.
- Ramage, A., Craddock, P. (2000) King Croesus' Gold: Excavations at Sardis and the History of Gold Refining. Archaeological Exploration of Sardis, 11. Cambridge, MA: Harvard University Art Museums, in association with British Museum Press, p. 272.
- Ramdohr, P. (1980) The ore minerals and their intergrowths. Pergamon Press, Oxford-London-New York. 1205p.
- Ricou, L.-E., Burg, J.-P., Godfriaux, I., Ivanov, Z. (1998) Rhodope and Vardar: the metamorphic and the olistostromic paired belts related to the Cretaceous subduction under Europe. *Geodin. Acta* 11, 285-309.
- Renzi, M., Montero-Ruiz, I., Bode, M. (2009) Non-ferrous metallurgy from the Phoenician site of La Fonteta (Alicante, Spain): a study of provenance. *Journal of Archaeological Science*. Volume 36, Issue 11, November 2009, Pages 2584-2596.
- Repstock, A., Voudouris, P., Kolitsch, U. (2015) New occurrences of watanabeite, colusite, "arsenosulvanite" and "Cu-excess" tetrahedrite-tennantite at the Pefka high-sulfidation epithermal deposit, northeastern Greece. *Neues Jahrbuch fur Mineralogie*. 192/2: 135-149.
- Robert, F., Brommecker, R., Bourne, B. T., Dobak, P. J., McEwan, C. J., Rowe, R. R., Zhou, X. (2007) Models and Exploration Methods for Major Gold Deposit Types. In "Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration" edited by B. Milkereit, 2007, p. 691-711.
- Roberts, B.W. (2009) Metallurgical Networks and Technological Choice: Understanding early metal in Western Europe. *Journal of World Prehistory*, 22: 461-81.

- Roberts, B. W., Thornton, P., Pigott, V.C. (2008) Development of metallurgy in Eurasia. *Antiquity* 83: 1012-1022.
- Σακελλαρίου, Μ.Β. (1992) Μακεδονία. 4000 χρόνια ελληνικής ιστορίας και πολιτισμού. Εκδοτική Αθηνών, Αθήνα.
- Sarov, S., Gerdjikov, I. (2002) Unroofing the central Rhodopian dome from the east—Kanatara extensional shear zone. *C. R. Acad. Sci. Bulg.* 55, 71–74.
- Shimazaki, H., Ozawa, T. (1978) Tsumoite, BiTe, a new mineral from the Tsumo mine, Japan. *Amer Miner* 63:1162–1165.
- Siegelova, J., Tsumoto, H. (2011) Metals and metallurgy in Hittite Anatolia. In: Genz, H. Mielke, D.P. *Insights into Hittite history and archaeology*. Peeters Leuven – Paris – Walpole, MA, 2011. pp. 275-300.
- Sokoutis, D., Brun, J.-P., van den Driessche, J., Pavlides, S. (1993) A major Oligo-Miocene detachment in southern Rhodope controlling north Aegean extension. *J. Geol. Soc. London* 150, 243–246.
- Σολδάτος, Τ. (1985) Πετρολογία και γεωχημεία του πλουτωνίτη της Ελατίας (Κεντρική Ροδόπη). Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Επιστημονική Επετηρίδα της Σχολής Θετικών Επιστημών Α.Π.Θ., παράρτημα 37, 23ος τόμος, 320 σελ.
- Stos-Gale, Z.A., Gale, N.H. (2009) Metal provenancing using isotopes and the Oxford archaeological lead isotope database (OXALID). *Archaeological and Anthropological Sciences*, Volume 1, Number 3, p. 195-213.
- Stos-Gale, Z.A. Gale, N.H. Houghton, J., Speakman, R. (1995) Lead isotope analyses of ores from the western Mediterranean. *Archaeometry* 32 (2), 407-415.
- Sofianska, E., Michailidis, K., Trontsios, G., Kassoli-Fournaraki, A. (2008) Contamination of the Xiropotamos stream sediments (Drama district, Western Rhodope massif, Northern Greece) by mining and manganese ore processing activities. *Review of the Bulgarian Geological Society*, vol. 69, part 1–3, 2008, p. 39–47.
- Solecki, R.S., Solecki, R.L., Agelarakis, A.P. (2004) *The Proto-neolithic Cemetery in Shanidar Cave*. Texas A. and M University Press, Texas.
- Spathi, A., Kouvelos, K., Perdikatsis, V. (1982) The iron-manganese mineralization of the Palaea Kavala area. *Series of mineralogic and petrographic studies, IGME*, 3, p. 111 (in Greek).
- Sprawski, S. (2010) The early Temenid Kings to Alexander I. In: Roisman, J., Worthington, I. (2010) *A companion to ancient Macedonia*. Blackwell Publishing Ltd.
- Srejovic, D. (1972) *Lepenski Vir*. London: Thames and Hudson.
- Στεφανίδου, Α. (2007) Η πόλη - λιμάνι της Καβάλας κατά την περίοδο της Τουρκοκρατίας Πολεοδομική και ιστορική διερεύνηση (1391-1912) Ιστορικό και Λογοτεχνικό Αρχείο Καβάλας Κέντρο Ιστορικών Μελετών και Εκδόσεων Νοτιοανατολικής Ευρώπης και Μεσογείου, Καβάλα.
- Σύρος, Α. (2004) Αναφορά αυτοψίας στο σπήλαιο Αρκουδότρυπα Γαληψού Δήμου Ορφανού Ν. Καβάλας. 14-7-2004 Εσωτερικό έγγραφο, Εφορεία Παλαιο-ανθρωπολογίας-Σπηλαιολογίας Βορ. Ελλάδας, Θεσσαλονίκη.

- Stos-Gale, Z.A., Gale, N.H., Houghton, J., Speakman, R. (1995) Lead isotope analyses of ores from the western Mediterranean. *Archaeometry* 32 (2), 407-415.
- Sutherland, C., H. (1959) *Gold*. London, Thames and Hudson.
- Theodorikas, S. (1982) The mineralogy, petrology and geochemistry of the Serres-Drama granitic complex, Northern Greece. PhD Thesis, Univ. of Keele. In: *Sci. Ann. Phy. Math., Univ. Thessaloniki*, 22, No 28, Thessaloniki 1983, 415pp.
- Todorova, H. (1999) Die Anfänge der Metallurgie an der westlichen Schwarzmeerküste. In Hauptmann, A., Pernicka, E., Rehren, T. and Yalçın, Ü. (eds.), *The Beginnings of Metallurgy. Proceedings of the International Conference, Bochum 1995* (Bochum, Deutsches Bergbau-Museum, Der Anschnitt, Beiheft 9), 237-46.
- Τουράτσογλου, Ι. (1992) Η τέχνη κατά τους ελληνιστικούς χρόνους. Στο: Σακελλαρίου, Μ.Β. (1992) *Μακεδονία. 4000 χρόνια ελληνικής ιστορίας και πολιτισμού*. Εκδοτική Αθηνών, Αθήνα.
- Treister, M.Y. (1996) The role of metals in ancient Greek history. *Mnemosyne. Bibliotheca Classica Batava*. E.J. Brill, Leiden, New York.
- Τσάιμου, Κ. (1997) *Αρχαιογνωσία των μετάλλων. Αρχαία μεταλλευτική και μεταλλουργική τέχνη*. Αθήνα, σελ. 237.
- Turpaud, P. (2006) Characterization of igneous terranes by zircon dating: implications for the UHP relicts occurrences and suture identification in the Central Rhodope, Northern Greece. Unpublished Ph.D. thesis, Johannes-Gutenberg-Universität, Mainz, 107pp.
- Tylecote, R.F. (1962) *Metallurgy in Archaeology. A prehistory of Metallurgy in the British Isles*. Arnold Ltd., London, pp.367.
- Tylecote, R.F. (1976) *A history of Metallurgy*. London.
- Tylecote, R.F. (1987) *The early history of metallurgy in Europe*. Longman, London.
- Tylecote, R.F., Ghaznavi, H.A., Boydell, P.J. (1977) Partitioning of Trace Elements Between the Ores, Fluxes, Slags and Metal During the Smelting of Copper. *Journal of Archaeological Science*, 4, 305-333.
- Unger, H.J., Schütz, E. (1980) *Pangaion. 1: Ein Gebirge und sein Bergbau, Mythos und Wirklichkeit*. Selbstverlag, Landshut.
- Unger, H.J., Schütz, E. (1981) *Pangaion. 2: Wanderungen im Pangaion*. Selbstverlag, Landshut.
- Unger, H.J., Schütz, E. (1982) *Pangaion - Ein Gebirge und sein Bergbau*. In: H. Geißlinger (Red.): *Südosteuropa zwischen 1600 und 1000 v. Chr.* Moreland Ed., Bad Bramstedt, S. 145-172.
- Vavelidis, M. (1984) Neue beobachtungen zur genese der Schichtgebundenen Pb-Zn-(Be-Ba-As-Ag-Cu) und der Au Vorkommen auf Thasos mit einem Beitrag zur Geologie, Petrographie und zum Metamorphosegrad des Gesteinskompleses des Insel. Doktorarbeit Universität Heidelberh.
- Vavelidis, M. (1988) Αρχαία εκμετάλλευση πολύτιμων και βασικών μετάλλων στη Θάσο. In: Wagner, G. A., Weisgerber, G., (eds) (1988) *"Antike Edel- und Buntmetallgewinnung auf Thasos."* Der Anschnitt: Beiheft 6 (Veröffentlichung aus dem Deutschen Bergbau-Museum Nr. 42). Bochum 1988.

- Vavelidis, M. (1997) Gold-bearing quartz veins and placer gold on Sifnos island, Aegean Sea, Greece, In: Mineral Deposits: Research and Exploration Where do They Meet?, Ed: Papunen, 335-338.
- Vavelidis, M., Amstutz, G.C. (1983) Investigations on the Gold occurrences in the Kinyra and Thasos (City) Area on Thasos Island (Greece), In: Schneider, H.J. (ed.), Mineral Deposits of the Alps and of the Alpine Epoch. Soc. Geol. Spec. Publ. 3, Appl. Min. Deposita, Springer, Heidelberg, 385-391.
- Vavelidis, M., Andreou, S. (2008) Gold and gold working in Late Bronze Age Northern Greece. *Naturwissenschaften* (2008) 95:361–366.
- Vavelidis, M., Chatzikirkou, A., Katirtzoglou, K., Tarkian, M., Melfos, V., Nimfopoulos, M. (1995) An ancient gold mine in the Alistrati area, Northern Greece, *Geol. Soc. Greece, Sp. Publ.*, No 4, 860-864.
- Vavelidis, M., Christofides, G., Melfos, V. (1997a) Ancient gold mines near Krinides in Philippoi area (Macedonia, N. Greece). In: *Archaeometrie und Denkmalpflege*. Wien. 84-86.
- Vavelidis, M., Gialoglou, G., Melfos, V., Wagner, G.A. (1996) Gold-grube in Palea Kavala/ Griechenland. *Entdeckung von Skapte lyle, Erzmetal*, H9, 547-554.
- Vavelidis, M., Melfos, V., Eleftheriadis, G. (1997b) Mineralogy and microthermometric investigations in the Au-bearing sulphide mineralization of Palea Kavala (Macedonia, Greece). In: Papunen, H. (Ed.), *Mineral Deposits: Research and Exploration — Where do They Meet?* Balkema, Rotterdam, pp. 343–346.
- Vavelidis, M., Melfos, V., Sklavounos, S. (1995) Bi-Te-Ag mineralization in the Panagia area, Thasos Island (Northern Greece). *Mineral Deposits*, Pasava, Kribek and Zak (eds). Balkema Rotterdam.
- Vavelidis, M., Michailidis, K., Christofides, G., Boboti, I. Tsitlakides, (1990) Geochemical study of placer gold and gold-bearing skarn-type mineralization of Kimmeria area, Xanthi district, NE Greece. *Geol. Rhodopica*, Vol. 2, p. 297-308. Thessaloniki.
- Vavelidis, M., Michailidis, K., Tarkian M., (1988) A new occurrence of placer gold in the Kato, Peristera-Lakkia area, Thessaloniki district, Northern Greece, *N. Jb. Miner.*, 5, 222-230.
- Vavelidis, M., Pernicka, E., Wagner G.A. (1983) Studies in Pb-Ag and Au occurrences in Northeastern Chalkidiki (Greece), *N. Jrb. Miner. Mh*, vol. 61(1), pp.212-213.
- Vavelidis M., Pernicka E., Wagner G.A. (1988) Die Goldvorkommen von Thasos, *Anschnitt*, Bh. 6, 113-124.
- Vavelidis, M., Stamoudi, Ch., Sklavounos, S., Boboti-Tsitlakidou I. (1990) Das Seifengoldvorkommen von Ardas-Fluss, praefektur Evros, Griechisch-Thrazien. *Eur. J. Miner.*, Bh. 2, 270.
- Von Quadt, A., Peytcheva, I., Sarov, S., Naidenov, K., Georgiev, N. (2008) Metamorphic rocks from Dospat area of Western Rhodopes—conventional and in situ U–Pb zircon dating, isotope tracing and correlations. In: *Proceedings of the National Conference Geosciences 2008*, Sofia, pp. 225-228.
- Voudouris, P. (2014) Hydrothermal corundum, topaz, diaspore and alunite supergroup minerals in the advanced argillic alteration lithocap of the Kassiteres-Sapes porphyry-

- epithermal system, western Thrace, Greece. *Neues Jahrbuch fur Mineralogie*. 191/2: 117-136.
- Voudouris, P., Melfos, V., Spry, P.G., Moritz, R., Papavassiliou, K., Falalakis, G. (2011) Mineralogy and geochemical environment of formation of the Perama Hill high-sulfidation epithermal Au-Ag-Te-Se deposit, Petrota Graben, NE Greece. *Mineralogy and Petrology* 103: 79-100.
- Voudouris, P., Papavassiliou, K., Melfos, V. (2005) Silver mineralogy of St. Philippos deposit (NE Greece) and its relationship to a Te-bearing porphyry-Cu-Mo mineralization. In: N. Cook, I. Bonev (eds), *Au-AG-Te-Se deposits, Geochemistry, Mineralogy and Petrology*, 43, Sofia, 1555-160.
- Vryonis Jr, S. (1962) The question of the Byzantine mines, *Speculum* 37, 1-17.
- Wagner, G.A., Pernicka, E., Vavelidis, M., Baranyi, I., Bassiakos, I. (1986) *Archaeometallurgische Untersuchungen auf Chalkidiki*. *Anschnitt*, 38, H5-6, 166-186.
- Wagner, G.A., Pernicka, E., Gentner, W., Vavelidis, M. (1981) Discovery of ancient gold mining on Thasos (Greece), *Rev. Archeomet.*, III, 313-320,
- Wagner G.A., Pernicka E., Gialoglou, G., Vavelidis M. (1981) Ancient gold mines on Thasos, *Naturwiss.*, 68, 263-264, 1981.
- Wagner, G.A., Weisgerber, G. (Hrsg.) (1985) Silber, Blei und Gold auf Sifnos - Prähistorische und antike Metallproduktion. *Der Anschnitt, Beiheft 3* (Veröffentlichungen aus dem Deutschen Bergbau-Museum, Nr. 31), Bochum, Germany, xx pp.
- Wagner, G. A., Weisgerber, G., (eds) (1988) "Antike Edel- und Buntmetallgewinnung auf Thasos." *Der Anschnitt: Beiheft 6* (Veröffentlichung aus dem Deutschen Bergbau-Museum Nr. 42). Bochum 1988.
- Wawrenitz, N., Krohe, A. (1998) Exhumation and doming of Thasos metamorphic core complex (S. Rhodope, Greece): structural and geochronological constraints. *Tectonophysics* 285, 301-332.
- Wilcken, U. (1976) *Αρχαία Ελληνική Ιστορία*, Αθήνα, Εκδ. Παπαζήση.
- Χαριστός, Δ., Γιούρη-Τσοχατζή, Α., Μανουσάκης, Γ. (1993) Γενική και ανόργανη χημεία Γεωλόγων. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Χατζηπαναγής, Ι. και Δημήτρουλα, Μ. (1996) Έκθεση για την έρευνα πρωτογενούς χρυσού στην ευρύτερη περιοχή Παλαιάς Καβάλας. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Παράρτημα Ξάνθης (Εσωτερική Έκθεση), Ξάνθη.
- Χατζηπαναγής, Ι. (1991) Η γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής του όρους Φαλακρού. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών. Τομέας Γεωλογικών Επιστημών, Αθήνα.
- Χατζηπαναγής, Ι., Δημήτρουλα, Μ. (1996) Έκθεση για την έρευνα του πρωτογενούς χρυσού στην ευρύτερη περιοχή Παλαιάς Καβάλας. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών. Παράρτημα Ξάνθης. Έργο: 9161955 ΣΠΑ.
- Yener, K., Ozbal, H., Kaptan, E., Pehlivan, A. N., Goodway, M. (1989) Kestel: an Early Bronze Age source of tin ore in the Taurus Mountains, Turkey. *Science*, 244(4901), 200-203.

- Youngson, J.H., Craw, D. (1999) Variation in placer style, gold morphology, and gold particle behavior down gravel bed-load rivers: an example from the Shotover-Arrow-Kawarau-Clutha river system, Otago, New Zealand. *Economic Geology*, vol. 94, p. 615-634.
- Ζάχος, Κ. και Μαράτος Γ. (1965) Επεξηγηματικό Τεύχος Μεταλλογενετικού Χάρτου 1: 1.000.000 ΙΓΜΕ, Αθήναι, 1973.
- Zagorčev, I.S. (1974) On the Precambrian tectonics of Bulgaria. *Precambrian Res.* 1,139–156.
- Zagorchev, I.S. (1998) Pre-Priabonian Paleogene formations in southwest Bulgaria and northern Greece: stratigraphy and tectonic implications. *Geological Magazine* 135, 101–119.
- Zidarov, N., Zagorčev, I., Slavov, I., Shabatov, Y., Nedjalkova, S., Toprakchieva, V., Katseva, L., Vodencharov, J., Gercheva, J., Simeonov, A. (1974) Notes on the metamorphic rocks of Pirin Mountains. *Annuaire du Comité de Géologie, Sofia*, vol. 20, pp. 261–278. in Bulgarian with English abstract.
- Zachos, S., Dimadis, E. (1983) The geotectonic position of the Skaloti-Echinos granite and its relation to the metamorphic formations of the Greek western and central Rhodope. *Geol. Balcan.*, 13, 17-24.
- Zagorčev, I.S. (1994) Structure and tectonic evolution of the Pirin–Pangaion Structural Zone (Rhodope Massif, southern Bulgaria and northern Greece). *Geol. J.* 29, 241–268.
- Zav'yalov, Y.N., Begizov, V.D. (1977) Rucklidgeite, (Bi, Pb)₃Te₄, a new mineral from the Zod and Kochkar gold-ore deposits. *International Geology Review*, V. 19, Issue 12, p.1451-1456.
- Zhou, W. (2012) Distilling Zinc in China: The Technology of Large-Scale Zinc production in Chongqing during the Ming and Qing Dynasties (AD 1368-1911). PhD Thesis. University College London.
- Φαλαλάκης, Γ. (2004) Κινηματική ανάλυση και παραμόρφωση στο όριο των κρυσταλλοσχιστωδών μαζών της Σερβομακεδονικής και της Ροδόπης: (όρη Κερκίνης, Βροντούς-Μακεδονία). Διδακτορική διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Χατζηκύρκου, Α., Δημήτρουλα, Μ., Κατιρτζόγλου, Κ. (1993) Μεταλλοφορίες του ορεινού συγκροτήματος Μενουκίου-Βροντού-Αγκίστρου (Μακεδονία, Β. Ελλάδα) Ι.Γ.Μ.Ε. Παράρτ. Θεσσαλονίκης, Έργο ΔΕ 7661702-ΕΟΚ/ΜΑ2Μ-0015 (εσωτερική έκθεση).



Ηλεκτρονικές Σελίδες

<http://barryyeoman.com/2010/09/the-mines-that-built-empires/>

<https://egyptsites.wordpress.com/2010/09/14/wadi-hammamat/>

<https://el.wikipedia.org/wiki>

http://ganifantis.blogspot.gr/2009_02_01_archive.html

<http://www.mindat.org/chemsearch.php>

<http://www.webmineral.com>

<http://odysseus.culture.gr/>

Γλωσσάρι Μεταλλευτικών και Μεταλλουργικών Όρων

Ακροφύσια (nozzle): τα άκρα του (συνήθως κεραμικής σύστασης) φυσηρού που εισχωρούν στην κοιλότητα εκκαμίνευσης. Τα άκρα τους, κατά κανόνα, είναι μερικώς υαλοποιημένα λόγω των υψηλών θερμοκρασιών $>1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ που επικρατούν στο εσωτερικό της καμίνου.

Αμαλγάμωση (amalgamation): Μέθοδος εξαγωγής του χρυσού και του αργύρου από το μετάλλευμα με τη χρήση υδραργύρου.

Ανδράποδο (slave): το ανθρώπινο δυναμικό στο εσωτερικό των μεταλλείων και στις μεταλλουργικές εγκαταστάσεις (δούλοι).

Δάδα (torch): πυρσός που φτιάχνεται από ξύλο ρετσινόδεντρου και χρησιμεύει ως φωτιστικό μέσο στο εσωτερικό των υπόγειων μεταλλείων.

Διαχωρισμός (parting): Μέθοδος διαχωρισμού δύο μετάλλων (κυρίως χρυσού και αργύρου). Μία τέτοια μέθοδος είναι η πλινθοποίηση

Εκκαμίνευση (smelting): Επεξεργασία μεταλλευμάτων σε κάμινο.

Εκβολάδες (tailings): Τα φτωχά σε περιεκτικότητα τμήματα του μεταλλεύματος που μετά από χειροδιαλογή εγκαταλείπονταν στο εσωτερικό των μεταλλείων ή έξω από τα σημεία εξόρυξης.

Εξευγενισμός (refining): Η αύξηση της περιεκτικότητας σε κάποιο πολύτιμο μέταλλο (χρυσός, άργυρος κ.α.) ενός μεταλλικού τήγματος.

Εξόρυξη (mining): Η απόσπαση του μεταλλεύματος από το έδαφος ή το υπέδαφος.

Ηλεκτρο (electrum): φυσικό κράμα χρυσού και αργύρου. Επίσης ήλεκτρον καλείται και το κεχριμπάρι (ampere).

Θυλακοφόροι: Οι μεταφορείς του μεταλλεύματος (πηροφόροι).

Θύλακες: Οι σάκοι ή τα κοφίνια για τη μεταφορά του μεταλλεύματος κυρίως στο εσωτερικό του μεταλλείου. Ήταν κυρίως από δέρμα ή σχοινί (σάκοι, πήροι).

Κάμινος (furnace): Κατασκευή για τη θερμική επεξεργασία των μεταλλευμάτων.

Κίβδηλις (slag): Σκωρία-απόρριμα μεταλλουργικής εκκαμίνευσης.

Κράμα (alloy): Ομογενές μίγμα από την ένωση δύο ή περισσότερων μετάλλων ή ενός μετάλλου και μιας άλλης ουσίας.

Κρατέρωμα (bronze): Κράμα χαλκού και κασσίτερου, που χρησιμοποιήθηκε ως καλύτερης ποιότητας και αντοχής από το χαλκό.

Κυπέλλωση (cupellation): Η διαδικασία αποχωρισμού με οξείδωση ενός ή περισσότερων στοιχείων από ένα ρευστό μίγμα. Χαρακτηριστική η αφαίρεση του Αργύρου από το μολυβδόχο μετάλλευμα.

Λιθάργυρος (litharge): Οξείδιο του μολύβδου (PbO) που λαμβάνεται ως προϊόν κυπέλλωσης.

Λύχνος (lamp): Μέσο φωτισμού στο εσωτερικό των μεταλλείων.

Μεταλλείο (mine): Ο χώρος εξαγωγής μεταλλευμάτων από τη γη. Διακρίνονται σε υπόγεια και επιφανειακά.

Μεταλλείς-Μεταλλευτές (prospectors/miners): Ερευνητές για την ανεύρεση μεταλλείων/ Άνθρωποι που δουλεύουν στα μεταλλεία (μεταλλωρύχοι)/ Οι ασκούντες μεταλλουργικές μεθόδους.

Μετάλλευμα (ore): Το πέτρωμα που περιέχει στη μάζα του χρήσιμα μεταλλικά ορυκτά για τον άνθρωπο.

Μεταλλευτική (mining): Η διαδικασία ανεύρεσης και εξόρυξης των μεταλλευμάτων.

Μεταλλουργία (metallurgy): Η διαδικασία εξαγωγής μετάλλων από το μετάλλευμα.

Μεταλλοτεχνία (metalwork): Η κατασκευή μεταλλικών αντικειμένων από τα προϊόντα της μεταλλουργίας.

Μυλόπετρα (grinding stone-millstone): Λίθοι για μηχανική άλεση-κονιοποίηση μεταλλεύματος, σιτηρών κ.α.

Μύλος (mill): τριβείο κονιοποίησης του μεταλλεύματος.

Ξοῖς (chisel): Το βελόνι (καλέμι) εξαγωγής του μεταλλεύματος από το πέτρωμα.

Οπτώ (fire): Θερμαίνω μεταλλικά συστατικά σε χωνευτήρι για τον καθαρισμό τους από άλλες προσμίξεις.

Ορείχαλκος (bronze-brass): Μεταλλικό κράμα χαλκού και ψευδαργύρου, κιτρινωπού χρώματος, γνωστός και ως «κίτρινος χαλκός».

Ορύκτης (miner): Άνθρωποι που δουλεύουν στα μεταλλεία (μεταλλωρύχοι).

Πλινθοποίηση (cementation): Μέθοδος διαχωρισμού μετάλλων σε στερεή κατάσταση. Ιδιαίτερη χρήσιμη στο διαχωρισμό του χρυσού από τον άργυρο.

Σκωρία (slag): Απόρριμμα της μεταλλουργικής διαδικασίας.

Συγκραμμάτωση (agglomerate): Συγκόλληση/ ανάμειξη ψηφίδων μετάλλου με θέρμανση.

Σύντηγμα (bloom): Σπογγώδης μάζα που περιέχει σκωρία και εγκλωβισμένα σφαιρίδια σιδήρου. Παράγεται στο εσωτερικό της μεταλλουργικής καμίνου.

Σφαιρίδια (globules): Σφαιρικά υπολειμματικά μεταλλικά σώματα στο εσωτερικό των σκωριών.

Συλλίπασμα (flux): Υλικό που προστίθεται στην εκκαμίνευση για τη βελτίωση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών.

Τυπίς (hammer): Σφυρί λατόμευσης μυτερό και στα δύο του άκρα.

Τύκος (hammer): Σφυρί εξόρυξης μεταλλεύματος μυτερό από τη μία πλευρά και επίπεδο από την άλλη.

Υαλοποίηση (vitrification): Τα αργιλικά υλικά που περιέχουν χαλαζία σε υψηλές θερμοκρασίες τήκονται και όταν πηζουν δημιουργούν στρώματα υάλου.

Φρέαρ (shaft): Κατακόρυφη διάνοιξη σε πέτρωμα κυρίως για μεταλλευτικούς σκοπούς.

Φυσητήρας (blowpipe-tuyère): Αγωγός που μετέφερε τον εμφυσούμενο αέρα από το φυσηρό στην κάμινο (Αυλός).

Φυσηρό (bellow): Ασκός με τον οποίο φυσούσαν αέρα στη μεταλλουργική κάμινο.

Χύτευση (casting): Η τοποθέτηση μετάλλων ή κραμάτων σε υγρή κατάσταση σε μήτρες (εκμαγεία).

Χυτευτός Σίδηρος-Χυτοσίδηρος (cast iron): Κράμα σιδήρου και άνθρακα.

Χωνευτήρι (crucible): Σκεύος τήξης ή καθαισμού, χοάνη.

14. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Α. Περιγραφή Δειγμάτων από Μεταλλευτικές Περιοχές του Παγγαίου

SKS-1	Μετάλλευμα από συγκέντρωση εξωτερικά του μεταλλείου «Κοκκινόχωμα-1».
SKM-1	Οξειδωμένη μεταλλοφορία από το εσωτερικό του μεταλλείου «Κοκκινόχωμα-1».
SKM-2	Οξειδωμένη μεταλλοφορία από το εσωτερικό του μεταλλείου «Κοκκινόχωμα-1».
SKM-3	Οξειδωμένη μεταλλοφορία από το εσωτερικό του μεταλλείου «Κοκκινόχωμα-1».
PAT-3	Οξειδωμένη μεταλλοφορία από το εσωτερικό του μεταλλείου «Αγία Τριάδα-1». Δείγμα από την οροφή του μεταλλείου.
PAT-4	Οξειδωμένη μεταλλοφορία από το εσωτερικό του μεταλλείου «Αγία Τριάδα-1».
PMM-1	Μερικώς οξειδωμένη μεταλλοφορία από το εσωτερικό του μεταλλείου «Μαυροκορφή-1».
PMM-2	Οξειδωμένη μεταλλοφορία από το εσωτερικό του μεταλλείου «Μαυροκορφή-1».
PAV-5	Οξειδωμένη μεταλλοφορία από την περιοχή της κορυφής «Αβγό».
PKS-2	Οξειδωμένη μεταλλοφορία από το μεταλλείο «Κόψης»
PTM-1	Μερικώς οξειδωμένη μεταλλοφορία από το μεταλλείο «Τρίκορφο-3».
PTM-2	Μερικώς οξειδωμένη μεταλλοφορία από το μεταλλείο «Τρίκορφο-3».
PAM-3	Μερικώς οξειδωμένη μεταλλοφορία με αρσеноπυρίτη, σιδηροπυρίτη σε χαλαζιακή φλέβα. Πάνω από τη σύγχρονη στοά ΑΣΝ-1.
PAM-4	Οξειδωμένη μεταλλοφορία από την Ασημότρυπα-4.
PAM-5	Πρωτογενής μεταλλοφορία με χαλκοπυρίτη, αρσеноπυρίτη, σιδηροπυρίτη, γαληνίτη σε χαλαζιακή φλέβα. 7.Κάτω από την Ασημότρυπα
PNN-1	Οξειδωμένη μεταλλοφορία από το μεταλλείο «Νεροστριά-1»
PFM-1	Οξειδωμένη μεταλλοφορία με βαρύτη από το επιφανειακό μεταλλείο «Νέα Φυλή-1». Δείγμα από την εκβάθυνση στο ανατολικό τμήμα του μεταλλείου.
POF-1	Οξειδωμένη μεταλλοφορία με βαρύτη από το υπόγειο μεταλλείο «Οφρύνιο-2».
POF-3	Οξειδωμένη μεταλλοφορία με βαρύτη από το υπόγειο μεταλλείο «Οφρύνιο-3».

Β. Περιγραφή Δειγμάτων Μεταλλουργικών Σκωριών από περιοχές και θέσεις στο Παγγαίο όρος

PSS-1	Συμπαγής σκωρία από το λόφο Σίνα.
PSS-2	Συμπαγής σκωρία από το λόφο Σίνα.
POS-1	Γαλώδης σκωρία από την περιοχή του Οφρυνίου.
POS-2	Γαλώδης σκωρία από την περιοχή του Οφρυνίου.
PDS-1	Σπογγώδης σκωρία από το χωριό Δωμάτια.
PDS-2	Σπογγώδης σκωρία από το χωριό Δωμάτια.
PAV-6	Συμπαγής σκωρία από το Αβγό.
PNL-1	Συμπαγής σκωρία από τα Λειβάδια Νικήσιανης.
PNL-2	Συμπαγής σκωρία από τα Λειβάδια Νικήσιανης.
PPA-1	Συμπαγής σκωρία από την περιοχή της Μονής Ανάληψης.
PPA-2	Συμπαγής σκωρία από την περιοχή της Μονής Ανάληψης.
PVA-2	Επιφανειακή συμπαγής σκωρία από το λόφο Α της Βαλτούδας.
PVA-3	Συμπαγής σκωρία από το λόφο Α της Βαλτούδας (βάθος εύρεσης 50-70cm).
PVA-4	Συμπαγής σκωρία από το λόφο Α της Βαλτούδας (βάθος εύρεσης 100-130cm).
PVA-8	Συμπαγής σκωρία από το λόφο Α της Βαλτούδας (βάθος εύρεσης 167-180cm).
PVA-9	Σκωρία spreiss από το λόφο Β της Βαλτούδας.
PVA-10	Συμπαγής σκωρία από το λόφο Α της Βαλτούδας.
PPO-1	Συμπαγής σκωρία από την περιοχή Πουλιάνα Μεσορόπης.
PPO-3	Σκωρία spreiss από την περιοχή Πουλιάνα Μεσορόπης.
PPO-4	Συμπαγής σκωρία από την περιοχή Πουλιάνα Μεσορόπης.
PPO-5	Σκωρία spreiss από την περιοχή Πουλιάνα Μεσορόπης.
PMU-2	Συμπαγής σκωρία από τη μεταλλουργική θέση Μουσθένης.
PCH-1	Συμπαγής σκωρία από τη μεταλλουργική θέση Χρυσόκαστρου.
PPS-2	Ημισυμπαγής σκωρία από τη μεταλλουργική περιοχή Παλαιοχωρίου.

Γ. Αποτελέσματα αναλύσεων ICP/MS σε μεταλλουργικές σκωρίες

Περιεκτικότητες των βασικών οξειδίων (wt %) και επιλεγμένων ιχνοστοιχείων (ppm). Ο ολικός σίδηρος εκφράζεται σε Fe₂O₃. (bdl: κάτω του ορίου ανιχνευσιμότητας, na: δεν αναλύθηκε)

	PSS-1	PSS-2	POS-1	POS-2	PDS-1	PDS-2	PAV-6	PNL-1	PPA-1
(wt%)									
SiO ₂	20,46	na	37,32	na	24,66	na	na	na	na
Al ₂ O ₃	3,54	3,67	2,13	1,80	7,57	6,25	2,76	3,29	3,12
Fe ₂ O ₃	61,79	55,10	7,75	3,30	52,36	42,78	33,38	40,09	42,88
MgO	0,79	0,63	2,83	2,47	0,81	0,53	0,55	1,04	2,14
CaO	6,29	6,07	9,37	5,40	8,38	6,60	5,16	8,35	14,08
Na ₂ O	0,36	0,39	0,07	0,14	0,36	0,47	0,32	0,48	0,39
K ₂ O	1,35	1,23	0,69	0,53	0,94	1,13	0,98	1,49	1,07
TiO ₂	0,17	0,13	0,09	0,05	5,37	3,20	0,09	0,10	0,19
P ₂ O ₅	0,42	0,61	0,17	0,20	0,26	0,05	0,26	0,32	0,38
MnO	0,76	0,72	0,20	0,12	0,32	0,29	0,99	0,66	0,61
S	na	0,84	na	0,07	na	0,03	0,84	0,96	0,78
ppm									
Au	1,04	0,06	0,01	0,01	0,00	0,00	0,07	0,66	0,25
Ag	>100,00	1,58	46,20	20,30	0,30	0,69	2,60	9,45	31,19
Cu	1458,00	494,55	207,30	180,63	17,30	4,94	252,76	1625,04	994,66
Pb	>10000,00	14697,79	>10000,00	18692,04	4,90	183,50	10661,94	5364,25	10337,44
Zn	1402,00	2152,50	>10000,00	>10000,00	30,00	257,10	2617,00	4040,10	7252,80
As	7400,10	2359,80	385,80	474,10	4,40	6,50	1211,40	>10000,00	>10000,00
Bi	162,10	5,76	5,10	0,75	bdl	0,02	0,22	2,12	0,48
Ba	259,00	217,00	>50000,00	>10000,00	209,00	273,80	179,80	223,40	413,70
Be	1,00	0,70	1,00	0,70	2,00	1,50	0,60	0,90	0,60
Co	2,00	2,10	11,70	9,50	9,30	2,70	1,90	4,00	2,10
Cr	54,70	68,50	34,21	19,80	95,78	97,90	35,00	22,10	58,50
Cs	1,10	0,98	0,90	0,60	0,60	0,68	0,69	0,93	0,29
Ga	16,00	13,90	7,70	3,70	20,70	20,60	11,40	4,80	8,20
Hf	1,60	0,10	0,80	0,23	76,80	14,25	0,12	0,57	0,65
Nb	4,50	0,16	2,10	0,03	201,30	6,50	0,09	0,36	0,52
Rb	33,80	32,00	19,60	15,50	23,60	26,00	28,80	46,40	15,40
Sn	109,00	58,60	1,00	16,40	10,00	6,30	40,20	10,50	5,00
Sr	182,10	128,90	1555,10	365,70	409,00	301,50	187,40	191,80	313,40
Ta	0,40	bdl	0,50	bdl	20,80	0,11	bdl	bdl	bdl
Th	15,30	3,60	3,60	1,50	2716,10	>2000,00	2,60	6,20	3,10
U	4,00	5,90	3,60	4,10	128,80	95,40	3,70	16,00	6,30
V	21,00	41,00	34,00	22,00	1227,00	1103,00	31,00	32,00	42,00
W	11,60	3,80	4,00	0,70	8,80	1,20	8,30	5,70	1,30
Zr	56,60	9,40	25,30	11,50	2827,50	857,60	9,20	30,30	35,20
Y	8,10	6,49	5,50	4,60	433,20	287,98	6,27	12,75	13,48
La	35,50	9,50	12,40	5,30	6171,10	5773,30	9,60	16,50	11,10
Ce	67,30	18,20	17,20	7,70	10883,90	>2000,00	15,30	26,70	20,20
Mo	2,50	1,44	29,40	2,95	1,60	0,49	3,10	6,31	3,23
Ni	6,90	2,50	15,50	19,40	1,90	1,80	16,00	8,60	5,70
Cd	0,20	0,12	14,10	20,36	0,70	1,02	0,16	2,05	4,35
Sb	>2000,00	>2000,00	88,80	1324,00	bdl	0,90	432,23	412,36	576,69
Hg	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0,23	0,01	0,01	0,01
Te	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0,03	bdl
B	na	21,00	na	15,00	na	44,00	16,00	53,00	46,00
Pd	na	bdl	na	bdl	na	bdl	bdl	bdl	bdl
Ge	na	0,20	na	0,80	na	4,00	0,10	0,20	0,20
Sc	na	2,80	na	1,60	na	13,20	2,70	3,70	5,90
In	na	6,55	na	0,58	na	<0,02	2,68	2,21	2,95
Li	na	12,10	na	5,40	na	5,40	7,60	9,50	5,70

Γ. Αποτελέσματα αναλύσεων ICP/MS σε μεταλλουργικές σκωρίες.

Περιεκτικότητες των βασικών οξειδίων (wt %) και επιλεγμένων ιχνοστοιχείων (ppm). Ο ολικός σίδηρος εκφράζεται σε Fe₂O₃. (bdl: κάτω του ορίου ανιχνευσιμότητας, na: δεν αναλύθηκε)

	PPS-2	PVA-2	PVA-3	PVA-4	PPO-1	PPO-3	PMU-2	PCH-1
(wt%)								
SiO ₂	na	na	na	na	na	na	na	na
Al ₂ O ₃	4,40	1,21	2,59	2,40	2,97	0,09	2,17	0,02
Fe ₂ O ₃	35,27	>57,19	52,17	>57,19	40,43	>57,19	29,75	>57,19
MgO	0,88	0,46	1,01	0,48	1,66	0,03	1,03	bdl
CaO	9,09	2,76	3,95	3,48	6,30	0,18	9,98	0,03
Na ₂ O	0,49	0,17	0,28	0,26	0,24	0,01	0,28	0,00
K ₂ O	1,70	0,45	0,77	0,69	1,04	0,02	0,70	bdl
TiO ₂	0,16	0,04	0,06	0,07	0,09	0,03	0,09	bdl
P ₂ O ₅	0,42	0,11	0,22	0,19	0,54	0,01	0,23	bdl
MnO	>1,29	0,25	>1,29	>1,29	>1,29	0,01	>1,29	0,00
S	0,30	0,68	1,18	0,58	0,23	0,28	0,63	0,48
ppm								
Au	0,17	0,40	0,22	0,96	0,10	1,83	0,29	4,85
Ag	1,96	65,20	23,04	20,84	12,78	>100,00	11,52	>100,00
Cu	124,69	1944,61	1420,80	2619,44	972,14	6681,08	554,85	6537,53
Pb	9327,91	16981,19	16302,76	17331,78	16039,33	7105,74	12199,19	7039,86
Zn	6162,50	>10000,00	>10000,00	8023,10	>10000,00	207,00	5370,80	289,00
As	1229,90	5661,40	6562,90	6099,60	1855,70	>10000,00	2254,00	>10000,00
Bi	1,22	0,71	0,33	2,66	0,34	0,25	0,25	0,24
Ba	417,90	100,70	190,40	144,80	237,90	12,40	196,40	34,70
Be	1,20	0,20	0,50	0,50	0,80	bdl	0,80	bdl
Co	2,30	0,90	1,20	1,70	7,90	4,50	2,50	2,30
Cr	36,80	14,70	11,80	12,70	29,10	0,90	31,00	0,60
Cs	1,24	0,12	0,38	0,38	0,43	0,05	0,35	bdl
Ga	16,30	5,30	5,40	5,30	4,10	0,30	3,30	0,90
Hf	0,02	0,23	0,27	0,24	0,04	bdl	0,47	bdl
Nb	0,07	0,11	0,10	0,10	0,08	0,32	0,12	0,31
Rb	46,30	9,90	20,60	24,50	28,30	1,30	15,20	0,20
Sn	44,80	11,00	5,80	3,60	5,10	7,60	1,90	11,60
Sr	286,90	191,70	104,10	69,90	160,40	4,90	210,30	0,70
Ta	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
Th	5,00	1,30	3,00	2,40	7,50	0,10	2,50	0,10
U	5,40	4,00	3,30	1,40	4,00	0,20	5,80	bdl
V	35,00	39,00	24,00	44,00	67,00	3,00	80,00	5,00
W	6,70	0,90	1,80	2,90	3,90	bdl	9,90	0,10
Zr	2,90	9,40	12,30	11,60	2,80	0,70	20,60	0,10
Y	10,08	2,92	5,14	5,15	11,04	0,28	10,37	0,19
La	17,40	3,70	7,90	7,00	15,60	bdl	11,10	bdl
Ce	30,40	6,40	14,80	13,70	24,80	0,60	20,60	0,20
Mo	3,44	7,64	3,42	5,72	5,44	12,37	6,02	4,14
Ni	3,80	1,50	1,90	1,50	5,40	9,30	0,10	10,70
Cd	0,07	0,70	3,64	2,42	0,17	0,74	0,55	0,15
Sb	107,68	311,42	121,43	308,95	130,35	1440,68	73,50	>2000,00
Hg	0,02	0,01	0,07	0,03	bdl	bdl	bdl	0,02
Te	bdl	bdl	0,03	bdl	bdl	0,49	bdl	0,49
B	50,00	39,00	12,00	9,00	51,00	bdl	10,00	1,00
Pd	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0,11	bdl	0,08
Ge	0,30	0,40	0,30	0,30	0,20	0,30	0,20	0,70
Sc	4,40	1,20	1,60	1,60	3,90	0,30	3,40	bdl
In	1,84	22,45	5,65	6,59	4,94	0,78	1,52	1,90
Li	12,40	5,10	5,50	4,80	8,80	0,20	9,30	bdl

Δ. Αποτελέσματα αναλύσεων XRF σε μεταλλουργικές σκωρίες.

Περιεκτικότητες των βασικών οξειδίων (wt %) και επιλεγμένων ιχνοστοιχείων (ppm). Ο ολικός σίδηρος εκφράζεται σε Fe₂O₃.

	PPA-2	PPS-2	PVA-8	PVA-9	PVA-10	PMU-3	PPO-4	PPO-5	PAV-6	PNL-2
(wt%)										
SiO ₂	27,42	25,90	18,91	0,00	28,49	29,44	24,48	0,00	25,05	22,72
Al ₂ O ₃	6,69	4,09	4,18	0,00	6,58	6,76	4,99	0,00	4,68	4,80
Fe ₂ O ₃	32,30	42,42	46,35	59,29	37,07	41,65	40,96	62,27	48,91	39,12
MnO	1,33	10,02	6,38	0,02	0,67	0,85	0,70	0,02	1,54	12,06
MgO	3,00	0,50	2,10	1,20	0,89	1,48	1,26	1,17	0,56	0,98
CaO	10,27	7,83	9,42	0,07	5,05	8,66	18,27	0,07	7,81	8,68
Na ₂ O	1,54	0,56	0,55	0,06	0,63	0,77	0,70	0,06	0,48	0,61
K ₂ O	1,39	1,43	0,94	0,03	1,90	2,01	1,37	0,03	1,51	1,53
TiO ₂	0,44	0,17	0,14	0,02	0,19	0,21	0,16	0,02	0,19	0,20
P ₂ O ₅	0,18	0,36	0,19	0,02	0,34	0,23	0,29	0,03	0,37	0,27
Sum	84,55	93,28	89,15	60,06	81,80	92,06	93,18	63,21	91,10	90,96
ppm										
Sc	13,00	19,00	7,00	29,00	10,00	12,00	11,00	25,00	19,00	12,00
V	66,00	26,00	26,00	3,00	37,00	47,00	87,00	6,00	49,00	71,00
Cr	27,00	92,00	27,00	1,00	1,00	1,00	7,00	1,00	29,00	108,00
Co	1,00	1,00	1,00	17,00	1,00	1,00	1,00	52,00	1,00	1,00
Ni	8,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	5,00
Cu	1436,00	433,00	5101,00	31245,00	2808,00	624,00	363,00	49154,00	714,00	1900,00
Zn	46776,00	12705,00	17798,00	1465,00	23174,00	24611,00	6068,00	2951,00	6979,00	21648,00
Ga	109,00	120,00	168,00	174,00	241,00	106,00	90,00	174,00	153,00	112,00
As	6171,00	2334,00	8551,00	634931,00	8363,00	5055,00	7799,00	567714,00	2340,00	20792,00
Rb	97,00	104,00	108,00	42,00	198,00	143,00	81,00	46,00	126,00	124,00
Sr	349,00	461,00	251,00	1,00	251,00	234,00	770,00	1,00	443,00	580,00
Y	47,00	38,00	54,00	1,00	91,00	49,00	39,00	1,00	54,00	53,00
Zr	175,00	120,00	146,00	13,00	237,00	140,00	105,00	4,00	145,00	128,00
Nb	10,00	8,00	9,00	6,00	8,00	10,00	7,00	3,00	8,00	8,00
Mo	6,00	15,00	7,00	51,00	8,00	4,00	6,00	74,00	19,00	13,00
Sb	690,00	2974,00	349,00	9055,00	538,00	147,00	80,00	6335,00	3146,00	874,00
Cs	15,00	12,00	5,00	2,00	7,00	9,00	1,00	1,00	6,00	25,00
Ba	293,00	826,00	217,00	16,00	376,00	329,00	250,00	16,00	251,00	572,00
La	75,00	101,00	113,00	107,00	92,00	102,00	113,00	116,00	114,00	105,00
Th	1,00	194,00	1,00	1,00	457,00	1,00	1,00	1,00	457,00	1,00
U	6,00	3,00	1,00	1,00	1,00	3,00	12,00	1,00	1,00	2,00

