

Κ. Γ. Τσάιμου

Αρχαιολόγος, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του Ε.Μ.Π.

## Ο ρόλος του συνδυασμού επιπέδων και ελικοειδούς πλυντηρίου στο οικονομικό αποτέλεσμα της τήξης του αργυρίτη

ΤΑ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΑ που εκμεταλλεύτηκαν οι αρχαίοι στο Λαύριο «η αργυρίτης γη» όπως τα ονόμαζαν, είναι μεταλλεύματα αργυρούχου μολύβδου. Δηλ. ο γαληνίτης, θειούχος μολύβδος (PbS) με μαύρο χρώμα, και ο κερουσίτης, οξειδωμένος μολύβδος (PbCO<sub>3</sub>) με χρώμα κιτρινωπό.

Οι περιεκτικότητες σε μολύβδο στα μεταλλεύματα αυτά κυμαίνονται από υψηλές περιεκτικότητες μέχρι χαμηλές περιεκτικότητες. Ο γαληνίτης έχει περιεκτικότητα σε μολύβδο 86,6% και ο κερουσίτης 77,5%.

Τα περισσότερα όμως μεταλλεύματα είχαν μικρές περιεκτικότητες σε μολύβδο από 10-35%. Όταν μιλάμε για περιεκτικότητα του μεταλλεύματος μιλάμε για περιεκτικότητα σε μολύβδο και όχι περιεκτικότητα σε άργυρο. Πρέπει να ξέρουμε ότι ο άργυρος συνοδεύει το μολύβδο.

Μέσα στο μολύβδο του μεταλλεύματος υπάρχει και ένα ποσοστό αργύρου από 1 μέχρι 3 κιλά ανά τόνο μολύβδου.

Στο Λαύριο η περιεκτικότητα σε μολύβδο εκφράζεται συνήθως σε κιλά ανά τόνο περιεχομένου μολύβδου και δίνεται με το σύμβολο Ag/Pb. Είναι ο λόγος βάρους αργύρου προς βάρος μολύβδου μέσα στο μετάλλευμα.

Αν σε ένα τόνο μεταλλεύματος έχουμε περιεκτικότητα σε άργυρο 0,04% και σε μολύβδο 20%, ο λόγος Ag/Pb θα είναι  $0,04/20=0,2\%$ . Έχουμε δηλ. 2 Kg/Ag ανά τόνο περιεχομένου μολύβδου. Πρέπει να σημειώσουμε ότι συναντάμε την ίδια περιεκτικότητα στο συμπύκνωμα κατά τον εμπλουτισμό, με αυτή που υπάρχει στον αργυρούχο μολύβδο κατά την τήξη.

Το φαινόμενο έχει την εξής εξήγηση. Στον εμπλουτισμό τα άτομα του αργύρου είναι μέσα στο πλέγμα των ατόμων του μολύβδου.

Κατά την τήξη ο άργυρος διαλύεται ευκολότερα μέσα στο μολύβδο λόγω της μεγάλης φυσικοχημικής συγγένειας που έχει προς το μολύβδο. Έτσι ο άργυρος ακολουθεί το μολύβδο στον εμπλουτισμό, τον ακολουθεί και στην τήξη.

Ο αργυρούχος μόλυβδος περιέχει όλο τον άργυρο εκτός βέβαια από τις απώλειές του στο απόρριμμα κατά τον εμπλουτισμό, στη σκουριά και στους καπνούς της καμίνου κατά την τήξη.

Οι μεταλλευτές προσπαθούσαν να βρουν μεταλλεύματα με υψηλή περιεκτικότητα σε μόλυβδο αφού μέσα στο μόλυβδο ήταν και ο άργυρος.

Η συνήθης περιεκτικότητα του αργύρου σε κιλά ανά τόνο περιεχομένου μολύβδου που δούλευαν οι αρχαίοι κατά τον 5ο αιώνα π.Χ. έφθανε σε 3,4 κιλά ακόμη και μέχρι 6 Kg. Στην εποχή μας ο λόγος Ag/Pb είναι 1 Kg.

Τα πλούσια μεταλλεύματα τα περνούσαν κατευθείαν στην κάμινο με μέση περιεκτικότητα κάτω από 50% σε Pb, γιατί η κάμινος δεν λειτουργεί κανονικά με μεγαλύτερη περιεκτικότητα.

Οι αρχαίοι είχαν αντιληφθεί ότι κάτω από μια περιεκτικότητα η τήξη του μεταλλεύματος έδινε αρνητικά οικονομικά αποτελέσματα λόγω του υψηλού κόστους του κάρβουνου. Έπρεπε να ελαττώσουν το βάρος του μεταλλεύματος που θα περνούσαν στην κάμινο. Ο εμπλουτισμός δεν κόστιζε πολύ.

Δίνονται τα έξοδα κατεργασίας ανά τόνο αρχικού μεταλλεύματος σε αττικές δραχμές για τον 5<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. και σε σύγχρονα νομίσματα, δολάρια και δραχμές (κατά Κονοφάγο)<sup>1</sup>.

*Κόστος παραγωγής (ανά τόνο)*

Εξόρυξη M = 10 αττικές δρχ.	$10 \times 30 = 300\$ \times 350$	= 100.000 δρχ.
Εμπλουτισμός E = 4,4 αττ. δρχ.	$4,4 \times 30 = 132\$ \times 350$	= 46.000 δρχ.
Τήξη T = 71 αττ. δρχ.	$71 \times 30 = 2130 \times 350$	= 750.000 δρχ.

*Κόστος παραγωγής (μέση παραχώρηση)*

Εξόρυξη	7.460 αττ. δρχ.	= 78.000.000 δρχ.
Εμπλουτισμός	3.300 αττ. δρχ.	= 23.900.000 δρχ.
Τήξη	13.240 αττ. δρχ.	= 140.000.000 δρχ.

Η τήξη κόστιζε το ίδιο είτε το μέταλλευμα ήταν πλούσιο είτε φτωχό σε μόλυβδο. Με τον εμπλουτισμό αντί να λιώσουν στην κάμινο τήξεως ένα τόνο μεταλλεύματος έλιωναν μόνο το συμπύκνωμα που ήταν το 1/4 του μεταλλεύματος. Έτσι στην τήξη τα έξοδα ήταν το 1/4, δηλ. μόνο  $71/4 = 18$  αττικές δραχμές ανά τόνο μεταλλεύματος και σε σημερινά νομίσματα:

1. Ο Κονοφάγος το έτος 1987 υπολόγισε την 1 αττική δραχμή σε 10 \$, βάσει του ημερομισθίου στην αρχαιότητα. Με τα σημερινά δεδομένα (1999) η ισοτιμία είναι 1 αττική δραχμή = 30 \$.

$18 \times 30 \$ = 540 \$ = 189.000 \text{ δρχ.}$  (Πίν. 1).

Με τον εμπλουτισμό μπορούσαν να τήξουν μεταλλεύματα με περιεκτικότητα χαμηλή μέχρι 12% σε Pb.

Τονίζεται ότι εμπλουτισμός των μεταλλευμάτων γινόταν από τα πρώιμα χρόνια. Η χειροδιαλογή του μεταλλεύματος κατά την εξόρυξη μέσα και έξω του μεταλλείου είναι ένα είδος εμπλουτισμού.

Ο Κονοφάγος στο τελευταίο έργο του με τίτλο *Οι παραχωρήσεις των μεταλλείων της Λαυρεωτικής τον 4ο αιώνα π.Χ.* τονίζει την αναγκαιότητα του εμπλουτισμού των μεταλλευμάτων και δίνει με γραφική παράσταση το κέρδος που θα έχει ένας μεταλλιοκτήτης ανά τόνο εξορυσσομένου μεταλλεύματος με κατευθείαν τήξη στην κάμινο και το κέρδος έπειτα από εμπλουτισμό και τήξη.

Τα αποτελέσματα της μελέτης είναι σημαντικά. Συμπεραίνει ότι για ένα μέταλλευμα με περιεκτικότητα 30% Pb, αν πάει κατευθείαν για τήξη, το κέρδος ανά τόνο μεταλλεύματος είναι 34 αττικές δραχμές. Ενώ με πλύσιμο και τήξη το κέρδος είναι 48,12 αττικές δραχμές. Το κέρδος των 48 αττικών δραχμών είναι σημαντικό. Είναι 504.000 σημερινές δρχ. ( $48 \times 30 \$ = 1440 \times 350 = 504.000 \text{ δρχ.}$ ) (Πίν. 2). Τονίζει ότι μέταλλευμα με περιεκτικότητα σε μόλυβδο κάτω από 22% αν πάει κατευθείαν στην κάμινο είναι ζημιογόνο.

Δόθηκε η οικονομική σημασία του εμπλουτισμού ώστε ένα μέταλλευμα να αποβεί κερδοφόρο. Τονίζεται ότι όλοι οι ερευνητές έχουν ασχοληθεί με την οικονομική σημασία του εμπλουτισμού κυρίως για τα επίπεδα πλυντήρια. Από τις ανασκαφές μας προκύπτει ότι ο συνδυασμός επιπέδων και ελικοειδούς πλυντηρίου με σκοπό τον εμπλουτισμό των μεταλλευμάτων συμβάλλει οικονομικά για μια αποτελεσματικότερη τήξη του μεταλλεύματος.

Το Ε.Μ.Π. από το έτος 1996 με υπεύθυνη αρχαιολόγο την ομιλούσα διεξάγει συστηματική ανασκαφή στο ελικοειδές πλυντήριο στη θέση Μπερτσέκο Λαυρεωτικής (Πίν. 3).

Είναι η πρώτη συστηματική ανασκαφή που γίνεται σε χώρους γύρω από ελικοειδές πλυντήριο. Οι δύο παλαιότερες ανασκαφές που διεξήχθησαν από τη Βελγική Αρχαιολογική Σχολή σε συνεργασία με τον αείμνηστο Κονοφάγο, στις θέσεις Δημολιάκι και στα Μεγάλα Πεύκα αντίστοιχα, απέβλεπαν κυρίως στην αποκάλυψη των δύο ελικοειδών πλυντηρίων.

Κατά την ανασκαφική έρευνα, εκτός από το ελικοειδές πλυντήριο ήρθαν στο φως και 3 επίπεδα πλυντήρια (Πίν. 4). Καθαρίστηκαν τα δύο.

Το πρώτο επίπεδο πλυντήριο (Π<sub>1</sub>) βρίσκεται Βόρεια-Ανατολικά του ελικοειδούς πλυντηρίου σε μια απόσταση 1.50 m απ' αυτό. Πρόκειται για το καλύτερα διατηρημένο πλυντήριο (Πίν. 5). Το δεύτερο (Π<sub>2</sub>) νότια και απέχει από το ελικοειδές πλυντήριο 7.50 m.

Το μεγαλύτερο μέρος του πλυντηρίου Π<sub>2</sub> είναι κατεστραμμένο. Το τρίτο (Π<sub>3</sub>) βρίσκεται δυτικά του ελικοειδούς σε μια απόσταση 11 m. Δεν αποκαλύφθηκε πλήρως.

Πρόκειται για ένα συγκρότημα εμπλουτισμού μεταλλευμάτων με τα πλυντήρια, τις δεξαμενές νερού, τα τριβεία και με τους διάφορους χώρους.

Στο συγκρότημα αυτό ανάμεσα στα επίπεδα πλυντήρια βρίσκεται το ελικοειδές πλυντήριο.

Στην ανακοίνωση αυτή παρουσιάζονται οι προβληματισμοί που γεννήθηκαν κατά την ανασκαφική έρευνα όσον αφορά τη σχέση του ελικοειδούς με τα επίπεδα πλυντήρια. Η ανασκαφή στην περιοχή είναι σε εξέλιξη. Οι πληροφορίες μας μπορεί να ενισχυθούν ή να τροποποιηθούν.

Από την ανασκαφή διαφαίνεται ότι το ελικοειδές πλυντήριο δεν αποτελεί ένα ανεξάρτητο συγκρότημα εμπλουτισμού, αλλά εντάσσεται μέσα σε ένα συγκρότημα επιπέδων πλυντηρίων. Αποτελεί μέρος ενός τυπικού συγκροτήματος εμπλουτισμού μεταλλεύματος.

Το ελικοειδές πλυντήριο κατασκευάστηκε σε χώρο του συγκροτήματος καταστρέφοντας παλαιότερο τοίχο της κλασικής εποχής (Πίν. 6).

Διαφαίνεται ότι η νέα κατασκευή, πιθανότατα προς αποφυγή του υψηλού κόστους της κατασκευής των δεξαμενών ύδατος και των υπολοίπων τεχνικών χώρων, κατασκευάζεται μέσα σε παλαιότερο συγκρότημα εμπλουτισμού επιπέδων πλυντηρίων. Το ελικοειδές πλυντήριο χρονολογικά τοποθετείται στην εποχή που σημειώνεται πτώση της παραγωγής. Την εποχή αυτή τα πλούσια μεταλλεύματα έχουν ελαττωθεί και οι Αθηναίοι αναγκάζονται να εκμεταλλευθούν τα φτωχότερα.

Το ελικοειδές πλυντήριο ουσιαστικά είναι ένα ρείθρο μεγάλου μήκους. Έχει μικρότερη δυναμικότητα σε σχέση με το επίπεδο πλυντήριο.

Η δυναμικότητα του ελικοειδούς πλυντηρίου είναι 2,1 t για 12 ώρες εργασίας, δηλαδή 175 Kg την ώρα. Το ελικοειδές πλυντήριο είναι ένα κατασκεύασμα από τεχνικής άποψης πολύ ανώτερο από το ευθύγραμμο ρείθρο. Η φυγόκεντρος δύναμη που αναπτύσσεται κατά τη ροή του νερού στο ελικοειδές πλυντήριο βοηθά κατά πολύ στον καλλίτερο εμπλουτισμό.

Το μεγάλο μήκος, το σχήμα του, δηλαδή ο έλικας, συνηγορούν ότι είναι ένα ειδικό πλυντήριο εμπλουτισμού μικρής παραγωγής αλλά καλής μεταλλικής απόδοσης. Κατάλληλο για δύσκολα υλικά, όπως είναι τα φτωχά λεπτόκοκκα μεταλλεύματα.

Η νεότερη και καλύτερη από τεχνικής άποψης κατασκευή πιθανόν γίνεται αργός του παλαιότερου επιπέδου πλυντηρίου με το ευθύγραμμο ρείθρο των 2 m περίπου. Η ύπαρξη του ελικοειδούς πλυντηρίου ανάμεσα στα επίπεδα πλυντήρια και σε μικρή απόσταση από αυτά, η τελειότητά του από τεχνικής άποψης οδηγούν στην σκέψη ότι οι αρχαίοι Αθηναίοι στο ελικοειδές πλυντήριο, εμπλούτιζαν προϊόντα εμπλουτισμού προερχόμενα από τα επίπεδα πλυντήρια με απώτερο και κύριο στόχο ένα καλύτερο οικονομικό αποτέλεσμα στην τήξη του μεταλλεύματος (Πίν. 7).

Ο Κονοφάγος στο βιβλίο του *Οι παραχωρήσεις των μεταλλείων* στο κεφάλαιο με τίτλο “Το οικονομικό αποτέλεσμα από το συνδυασμό εμπλουτισμού και τήξεως του αργυρίτη” γράφει ότι μεταλλεύματα με περιεκτικότητα μικρότερη του 12% σε Pb δεν συνέφερε οικονομικά να εμπλουτιστούν σε επίπεδο πλυντήριο.

Ο συνδυασμός επιπέδων πλυντηρίων και ελικοειδούς, όπως δείχνει η ανασκαφή, μας οδηγεί στην άποψη ότι μεταλλεύματα με περιεκτικότητα κάτω του 12% σε Pb ήταν δυνατόν με διαδοχικό ταυτόχρονο εμπλουτισμό σε επίπεδα και ελικοειδές πλυντήριο να δώσουν πλουσιότερο εμπλούτισμα ικανό να διοχετευθεί στις καμίνους τήξεως.

Η άποψη αυτή πρέπει να επιβεβαιωθεί και πειραματικά.

### **Συμπέρασμα**

Φτωχά μεταλλεύματα με κατάλληλο διαδοχικό εμπλουτισμό σε επίπεδα και ελικοειδές πλυντήριο μπορούν να γίνουν κερδοφόρα.

Ο συνδυασμός επιπέδων και ελικοειδούς πλυντηρίου απέβλεπε στον εμπλουτισμό φτωχών μεταλλευμάτων για ένα καλύτερο οικονομικό αποτέλεσμα στην τήξη του αργυρίτη.

### **Βιβλιογραφία**

- Κονοφάγος Κ.- Mussche H., «Τα ελικοειδή πλυντήρια των αρχαίων Ελλήνων στο Λαύριο. Μία απωλεσθείσα αρχαία εφεύρεσις», ΠΑΑ, 1970.
- Κονοφάγος Κ., *Το Αρχαίο Λαύριο και η Ελληνική τεχνική παραγωγής του αργύρου*, Αθήνα, 1980.
- Κονοφάγος Κ., *Η δημοκρατία της Αθήνας και οι παραχωρήσεις στους πολίτες της των μεταλλείων αργύρου της Λαυρεωτικής κατά τον 4ο αιώνα π.Χ.*, Αθήνα, Ε.Μ. Πολυτεχνείο, 1997.
- Τσάμμου Κ., «Τα ελικοειδή πλυντήρια της Λαυρεωτικής», *Ορυκτός Πλούτος*, 95, 1995, 29-38.
- Τσάμμου Κ., *Αρχαιογνωσία των Μετάλλων. Αρχαία Μεταλλευτική και Μεταλλουργική Τεχνική*, Αθήνα, 1997.

**ΚΟΣΤΟΣ ΤΗΞΗΣ****ΧΩΡΙΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟ**

71 ΑΤΤΙΚΕΣ ΔΡΧ./ΤΟΝΟ = 2.130 \$/Τ = 746.000 ΔΡΧ./Τ  
 ΜΕΣΗ ΠΑΡΑΧΩΡΗΣΗ = 560.000.000 ΔΡΧ./ΕΤΟΣ

**ΜΕ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟ**

18 ΑΤΤΙΚΕΣ ΔΡΑΧΜΕΣ = 540 \$/Τ = 189.000 ΔΡΧ./Τ  
 ΜΕΣΗ ΠΑΡΑΧΩΡΗΣΗ = 140.000.000 ΔΡΧ./ΕΤΟΣ

Πιν. 1. Κόστος τήξης του μεταλλεύματος ανά έτος χωρίς εμπλουτισμό και με εμπλουτισμό.

**ΕΤΗΣΙΟ ΚΕΡΔΟΣ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΚΤΗΤΗ (30% Pb/T)****ΧΩΡΙΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟ**

34 ΑΤΤΙΚΕΣ ΔΡΧ./ΤΟΝΟ

**ΜΕ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟ**

48 ΑΤΤΙΚΕΣ ΔΡΧ./ΤΟΝΟ

ΜΕΣΗ ΠΑΡΑΧΩΡΗΣΗ = 140.000.000 ΔΡΧ./ΕΤΟΣ

**ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΚΕΡΔΟΣ**

14 ΑΤΤΙΚΕΣ ΔΡΧ. = 420 \$ = 147.000 ΔΡΧ./ΤΟΝΟ

ΜΕΣΗ ΠΑΡΑΧΩΡΗΣΗ = 109.662.000 ΔΡΧ./ΤΟΝΟ

Πιν. 2. Το ετήσιο κέρδος ενός μεταλλειοκτήτη για μέταλλευμα με περιεκτικότητα 30% Pb χωρίς εμπλουτισμό είναι 34 αττικές δρχ./t και με εμπλουτισμό 48 αττικές δρχ./t. Το επιπλέον κέρδος των 14 αττ. δρχ. είναι σημαντικό και ισοδυναμεί με 147.000 δρχ./t.



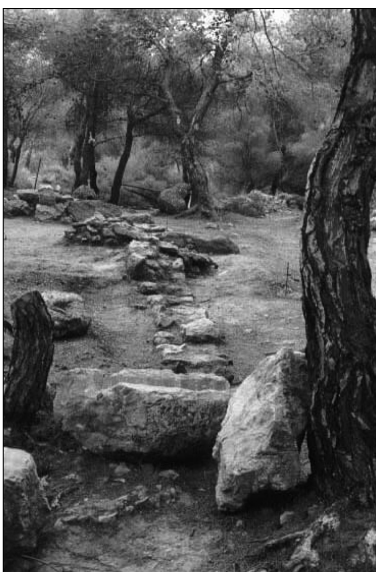
Πίν. 3. Το ελικοειδές πλυντήριο στο Μπερτσέκο. Ανασκαφή Ε.Μ. Πολυτεχνείου.



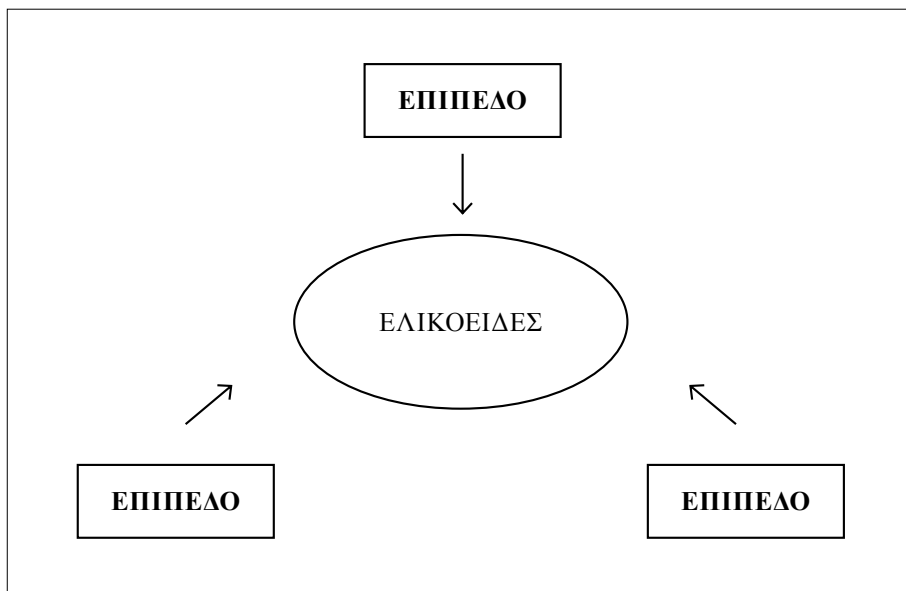
Πίν. 4. Συγκρότημα εμπλουτισμού μεταλλευμάτων στο Μπερτσέκο. Το ελικοειδές βρίσκεται ανάμεσα στα επίπεδα πλυντήρια Π<sub>1</sub>, Π<sub>2</sub> και Π<sub>3</sub>.



Πίν. 5. Στο πρώτο επίπεδο το πλυντήριο Π<sub>1</sub>. Στο δεύτερο το ελικοειδές.



Πίν. 6. Το ελικοειδές πλυντήριο κατασκευάστηκε καταστρέφοντας παλαιότερο τοίχο του συγκροτήματος κλασικής εποχής.



Πίν. 7. Η ύπαρξη του πλυντηρίου ανάμεσα στα επίπεδα και σε μικρή απόσταση από αυτά, οδηγεί στη σκέψη ότι οι αρχαίοι στο ελικοειδές εμπλούτιζαν προϊόντα προερχόμενα από τα επίπεδα πλυντήρια με στόχο ένα καλύτερο οικονομικό αποτέλεσμα στην τήξη. Σχηματική αναπαράσταση.