

Η παρούσα περιβαλλοντική κατάσταση στο Λαύριο και οι προοπτικές εξυγίανσης

Α. ΚΟΝΤΟΠΟΥΛΟΣ, Κ. ΚΟΜΝΙΤΣΑΣ, Α. ΞΕΝΙΔΗΣ, Ν. ΠΑΠΑΣΙΩΠΗ

Περίληψη

Λόγω της εντατικής μεταλλευτικής και μεταλλουργικής δραστηριότητας των τελευταίων 100 ετών στο Λαύριο, δημιουργήθηκαν εκτεταμένοι σωροί απορριμμάτων εκμετάλλευσης και εμπλουτισμού, καθώς και σκωριών της μεταλλουργίας μολύβδου. Υπό την επίδραση του ανέμου, του ύδατος, του ατμοσφαιρικού οξυγόνου και των θειοοξειδωτικών βακτηριδίων, τοξικά στοιχεία διαλυτοποιούνται, μέσω διαφόρων μηχανισμών, και μεταφέρονται στη γύρω περιοχή, επιμολύνοντας τα εδάφη καθώς και τα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα. Το Εργαστήριο Μεταλλουργίας του Ε.Μ.Π. δραστηριοποιείται έντονα τα τελευταία χρόνια στην περιοχή του Λαυρίου με σκοπό τον πλήρη περιβαλλοντικό χαρακτηρισμό των απορριμμάτων, την εκτίμηση του περιβαλλοντικού κινδύνου και την ανάπτυξη μεθόδων αντιμετώπισης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων με αντίστοιχες πιλοτικές εφαρμογές.

Τα κυριότερα απορρίμματα στο Λαύριο διακρίνονται σε θειούχα (από την επίπλευση) και σε οξειδωμένα (από τον υδρομηχανικό εμπλουτισμό). Για τον περιβαλλοντικό χαρακτηρισμό τους ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία: Στη μάζα των απορριμμάτων έγιναν γεωτρήσεις και στα δείγματα που ελήφθησαν έγινε χημικός και ορυκτολογικός χαρακτηρισμός. Επιπλέον, με χρήση στατικών δοκιμών, προσδιορίστηκε το ολικό δυναμικό εξουδετέρωσης των δειγμάτων, ενώ η τοξικότητά τους προσδιορίστηκε με βάση τη δοκιμή EPA TCLP. Η κατανομή των τοξικών στοιχείων προσδιορίστηκε σε επιλεγμένα δείγματα με την τεχνική των εκχυλίσεων σε διαδοχικά στάδια, ενώ το βιοδιαθέσιμο κλάσμα (κλάσμα το οποίο δύναται να μεταφερθεί στην τροφική αλυσίδα) των τοξικών στοιχείων προσδιορίστηκε με εκχύλιση με EDTA. Μερικά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των απορριμμάτων, όπως η πυκνότητα και η διαπερατότητα, προσδιορίστηκαν με δοκιμές πεδίου. Επιπλέον, εγκαταστάθηκαν εντός των γεωτρήσεων πιεζόμετρα για τον έλεγχο της ποιότητας και της στάθμης του νερού των πόρων.

Όλες οι παραπάνω πληροφορίες αναλύθηκαν και αξιολογήθηκαν διεξοδικά, με σκοπό την επιλογή και το σχεδιασμό της βέλτιστης τεχνικής αποκατάστασης. Η πρώτη εφαρμογή με-

θόδου εξυγίανσης, πρωτοποριακή για την Ελλάδα, έγινε σε έκταση 25 στρεμμάτων του φράγματος απόθεσης εντός του χώρου του Τεχνολογικού Πολιτιστικού Πάρκου Λαυρίου και ολοκληρώθηκε στο τέλος Απριλίου.

1. Εισαγωγή

Στην ευρύτερη περιοχή Λαυρίου εντοπίζονται τρεις κατηγορίες απορριμμάτων (σχ. 1):

- θειούχα απορρίμματα επίπλευσης (θέσεις Α, Β, Γ, Δ) με συνολικό όγκο που εκτιμάται σε 800 000 m³.
- οξειδωμένα απορρίμματα υδρομηχανικού διαχωρισμού (θέσεις Ε, Ζ), όγκου 5 000 000 m³.
- μεταλλουργικές σκωρίες (θέσεις Η, Θ, Ι) σε ποσότητες που εκτιμώνται σε 3-4 000 000 t.

Στο παρόν άρθρο χαρακτηρίζονται περιβαλλοντικά τα απορρίμματα, αναπτύσσονται οι μηχανισμοί επιμόλυνσης και επιβάρυνσης του περιβάλλοντος και προτείνονται λύσεις για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν ελληνικές και διεθνείς προδιαγραφές όσον αφορά την τοξικότητα των υλικών, την ποιότητα των υδάτων και τις επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις των τοξικών στοιχείων στα εδάφη.

2. Περιβαλλοντικός χαρακτηρισμός

2.1. Θειούχα απορρίμματα

Τα θειούχα απορρίμματα είναι εκτεταμένα και αποτελούν τους βασικούς συντελεστές επιμόλυνσης του περιβάλλοντος. Ευρίσκονται σε τρεις απορριμματικούς σωρούς: Σωρός Α (Καβόδόκανος), σωρός Β (φράγμα απορριμμάτων) και σωρός Δ (πυρίτες Μποδοσάκη στον όρμο Θορικού).

Κριτική ανάλυση των δεδομένων οδηγεί στην εξαγωγή των ακόλουθων συμπερασμάτων:

1. Από πλευράς συστάσεως, οι πυρίτες Μποδοσάκη έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε S και θειούχα ορυκτά και χαμηλή

σε ανθρακικά ορυκτά. Η κατάσταση είναι αντίστροφη στους πυρίτες του φράγματος απορριμμάτων και ενδιάμεση στους πυρίτες Καβοδοκανού.

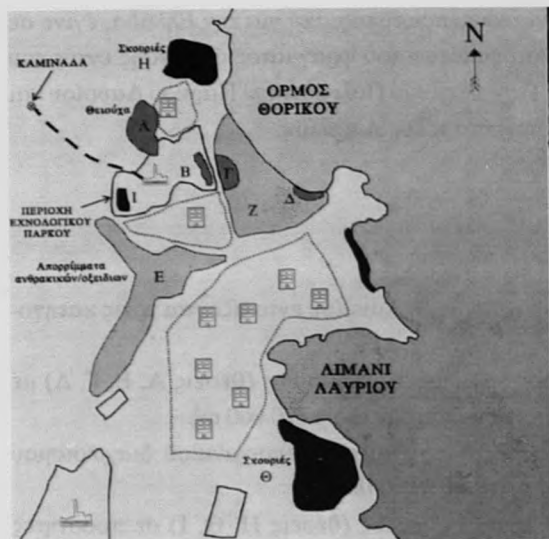
2. Σε συμφωνία με το παραπάνω συμπέρασμα βρίσκεται ο προσδιορισμός του ολικού δυναμικού εξουδετέρωσης, το οποίο είναι πολύ χαμηλό (αρνητικό) στους πυρίτες Μποδοσάκη, υποδεικνύοντας ότι υπάρχει μεγάλο δυναμικό γένεσης οξέος. Το δυναμικό αυτό παραμένει αρνητικό στους πυρίτες Καβοδοκανού, ενώ κυμαίνεται σε ελαφρά αρνητικές έως θετικές τιμές για το φράγμα απορριμμάτων. Το εργαστηριακό αυτό συμπέρασμα επιβεβαιώθηκε με επί τόπου μετρήσεις. Πράγματι, μετά από κάθε βροχή, σχηματίζονται

τών οδηγεί στην εξαγωγή των παρακάτω συμπερασμάτων:

1. Από πλευράς συστάσεως τα εν λόγω απορρίματα είναι κυρίως ανθρακικά και οξυυδροξειδία, και έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε S. Το ολικό δυναμικό γένεσης οξέων είναι θετικό, άρα δεν παρουσιάζεται κίνδυνος παραγωγής οξινων υδάτων. Η ολική περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα είναι υψηλή, μέχρι 3,7% σε Pb και 2,4% σε Zn.

2. Τα απορρίματα χαρακτηρίζονται ως τοξικά σύμφωνα με την πρότυπη δοκιμή τοξικότητας TCLP EPA, επειδή υπάρχει σημαντική υπέρβαση των ορίων τοξικότητας όσον αφορά το Pb και δευτερευόντως το Cd.

3. Τα βιοδιαθέσιμα κλάσματα Pb και Cd είναι πολύ υψηλά.



Σχ. 1. Οι κύριες πηγές ρύπανσης στο Λαύριο.



ΦΩΤ. ΒΑΣΙΛ ΚΥΡΙΑΚΗ

στους πυρίτες Μποδοσάκη και Καβοδοκανού εκτεταμένες λίμνες με εξαιρετικά όξινα και μολυσμένα νερά. Αντιθέτως, στην περιοχή του φράγματος απορριμμάτων δεν παρατηρείται σχηματισμός οξινων νερών.

3. Όλα τα θειούχα απορρίματα χαρακτηρίζονται ως τοξικά σύμφωνα με την πρότυπη δοκιμή τοξικότητας TCLP του EPA διότι γενικώς υπάρχει υπέρβαση των ορίων τοξικότητας για το Pb και το Cd σε όλα τα δείγματα και επιπλέον για το As στους πυρίτες Μποδοσάκη.

4. Πέρα από την ως άνω πρότυπη δοκιμή τοξικότητας, τα απορρίματα χαρακτηρίζονται ως επικίνδυνα διότι περιέχουν υψηλά ποσοστά βιοδιαθέσιμου κλάσματος Pb, Zn καθώς και Cd.

5. Η πολύ χαμηλή ποιότητα του ύδατος των πόρων μπορεί να προκαλέσει ρύπανση του υδροφόρου ορίζοντα.

2.2. Οξειδωμένα απορρίματα

Τα οξειδωμένα απορρίματα καταλαμβάνουν μεγάλες εκτάσεις. Οι δύο κυριότερες είναι στις περιοχές Ζ «Τέματα» με μάζα 760 000 t και Ε «Σαβούρα» με μάζα 6 000 000 t.

Ο περιβαλλοντικός χαρακτηρισμός των απορριμμάτων αυ-

Αυτό αποτελεί πρόβλημα στα εν λόγω απορρίματα, δεδομένου ότι τα εν λόγω κλάσματα των μετάλλων περνούν εύκολα στα φυτά και από εκεί στην τροφική αλυσίδα. Προκαταρκτικές αναλύσεις από το Εργαστήριο Μεταλλουργίας, σταφυλιών και ελαιών που καλλιεργούνται στην περιοχή «Σαβούρα» έδειξαν αυξημένες περιεκτικότητες σε Pb, σε Zn και σε Cd.

4. Το νερό των πόρων είναι ουδέτερο και έχει σχετικά χαμηλές περιεκτικότητες σε βαρέα μέταλλα.

2.3. Σκωρίες

Σκωρίες που προέρχονται από την μεταλλουργία μολύβδου βρίσκονται συσσωρευμένες σε διάφορες περιοχές της πόλης του Λαυρίου αλλά και σε παρακείμενες ακτές. Πρόχειροι υπολογισμοί ανεβάζουν την ποσότητα αυτή των σκωριών σε 3-4 000 000 t. Όλοι οι σωροί των σκωριών έχουν περίπου την ίδια χημική και ορυκτολογική σύσταση και παραπλήσια γεωτεχνικά χαρακτηριστικά.

Οι μεταλλουργικές σκωρίες εθεωρούντο μέχρι πρόσφατα αδρανείς και ακίνδυνες για το περιβάλλον. Τα τελευταία χρόνια όμως, έχουν διατυπωθεί αμφιβολίες και έχει ξεκινή-

σει διεθνώς συστηματική ερευνητική δραστηριότητα για τον λεπτομερή περιβαλλοντικό χαρακτηρισμό τους. Αντίστοιχο ερευνητικό πρόγραμμα βρίσκεται σε εξέλιξη στο Εργαστήριο Μεταλλουργίας.

2.4. Εδάφη

Για τον προσδιορισμό της γεωγραφικής κατανομής της ρύπανσης στα εδάφη του Λαυρίου, ελήφθησαν επιφανειακά δείγματα στα οποία έγινε προσδιορισμός του βιοδιαθέσιμου κλάσματος των Pb, Zn, Cd και As.

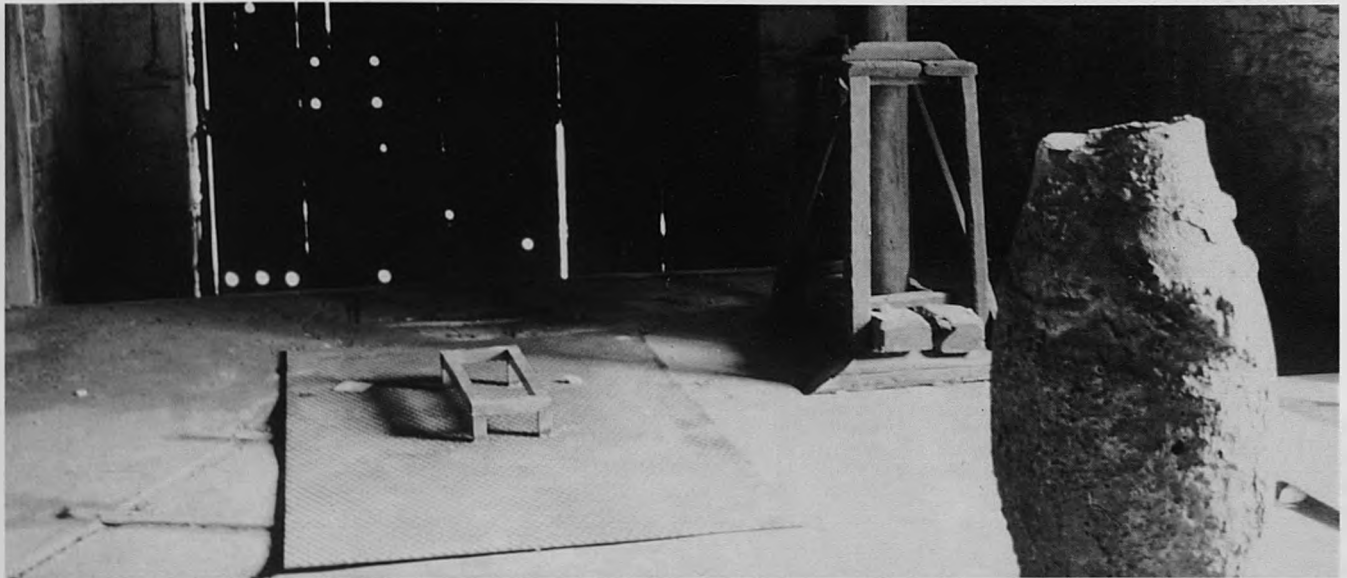
Το βάθος της ρύπανσης στα εδάφη, όπως διαπιστώθηκε από τις γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε επιλεγμένες θέ-

αποτέλεσαν τον κύριο οδηγό για την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας εξυγίανσης των εδαφών.

3. Προοπτικές εξυγίανσης - Επιλογή τεχνολογίας

Η περιβαλλοντική αποκατάσταση της περιοχής του Λαυρίου προϋποθέτει την ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης στρατηγικής που θα περιλαμβάνει:

- α) Έργα αντιμετώπισης των όξινων νερών που δημιουργούνται από τους θειούχους απορριμματικούς σωρούς
- β) Έργα αδρανοποίησης των πηγών ρύπανσης



ΦΩΤ. ΒΑΣΩ ΚΥΡΙΑΚΗ

σεις, ποικίλλει από 30 cm μέχρι και 3 m κατά θέσεις. Στην διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ότι η ρύπανση των εδαφών περιορίζεται συνήθως στα πρώτα 10-30 cm του εδάφους όσον αφορά τον Pb, λόγω της χαμηλής κινητικότητας του συγκεκριμένου ρύπου (μικρή διαλυτότητα, ισχυρή τάση προσρόφησης στα συστατικά του εδάφους). Το μεγάλο βάθος ρύπανσης στο Λαύριο οφείλεται κυρίως σε ανθρωπογενείς παρεμβάσεις: τα υλικά των απορριμμάτων έχουν χρησιμοποιηθεί συστηματικά στο παρελθόν σε χωματοουργικές εργασίες. Από την επισκόπηση των αποτελεσμάτων αυτών προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

1. Το βιοδιαθέσιμο κλάσμα του Pb είναι εξαιρετικά υψηλό με τιμές που κυμαίνονται μέχρι 6 000 ppm. Ποσοστό μεγαλύτερο από 75% της εξετασθείσας περιοχής χρειάζεται εξυγίανση.
2. Η επιβάρυνση σε Zn και Cd είναι μικρότερη. Τα εδάφη που υπερβαίνουν τις διεθνείς προδιαγραφές ως προς τα δύο αυτά μέταλλα (Zn=3000 ppm, Cd=20 ppm) αντιστοιχούν στο 25% περίπου της εξετασθείσας περιοχής.
3. Βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων, ο κρίσιμος ρύπος στο Λαύριο είναι ο Pb. Οι φυσικοχημικές ιδιότητες του Pb

γ) Έργα εξυγίανσης των μολυσμένων εδαφών

Η αντιμετώπιση των όξινων νερών που δημιουργούνται από τους θειούχους απορριμματικούς σωρούς πριν την ενδεχόμενη εξυγίανσή τους είναι ένα θέμα άμεσης προτεραιότητας, δεδομένου ότι τα νερά αυτά είναι εξαιρετικά μολυσμένα και επιρυπαίνουν τα εδάφη, τα επιφανειακά και υπόγεια νερά και τη θάλασσα. Η αντιμετώπιση μπορεί να γίνει είτε με τεχνικές εξουδετέρωσης είτε με παθητικά συστήματα.

Οι τεχνολογίες αποκατάστασης μεταλλευτικών απορριμμάτων, σκωριών και εδαφών πρέπει να επιλεγούν μετά από λεπτομερή ανάλυση κόστους και οφέλους και εφόσον πληρούν τα παρακάτω κριτήρια:

- Προστασία της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος
- Αποδοχή από την πολιτεία και την τοπική κοινωνία
- Μείωση του όγκου και της τοξικότητας
- Άμεση αποτελεσματικότητα
- Μακροπρόθεσμη αποτελεσματικότητα και διάρκεια
- Εφαρμοσιμότητα
- Αποδεκτό κόστος

Οι δράσεις αποκατάστασης μπορούν να ομαδοποιηθούν σε

τέσσερις βασικές κατηγορίες, ανάλογα με την μεθοδολογία αντιμετώπισης των περιβαλλοντικών κινδύνων:

Απομάκρυνση απορριμμάτων/μολυσμένων εδαφών από την περιοχή και ελεγχόμενη απόθεση σε άλλη θέση. Με την δράση αυτή τα τοξικά υλικά, απορρίμματα ή εδάφη, απομακρύνονται από την προς εξυγίανση περιοχή και μεταφέρονται σε άλλη θέση, όπου αποτίθενται ελεγχόμενα σε φράγμα κατάλληλα προετοιμασμένο με αδιαπέρατο πυθμένα και τοιχώματα. Το μεγαλύτερο πρόβλημα για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου σχετίζεται με την ανεύρεση κατάλληλης περιοχής απόθεσης, την ασφαλή στεγανοποίησή της και το υψηλό κόστος.



ΦΩΤ. ΣΟΦΙΑ ΘΡΑΪΚΟΥΛΗ

Τεχνικές απομόνωσης. Περιλαμβάνουν την επιφανειακή ή και πλήρη απομόνωση των τοξικών απορριμμάτων από το φυσικό περιβάλλον. Με την χρήση αδιαπέρατων επιφανειακών καλυμμάτων επιτυγχάνεται η απομόνωση των επικίνδυνων υλικών από τον ατμοσφαιρικό αέρα και τα επιφανειακά νερά, ενώ για την παράλληλη προστασία των υπόγειων νερών κατασκευάζονται κατακόρυφα τοιχεία γύρω από την μάζα του σωρού.

Τεχνικές σταθεροποίησης των ρύπων. Οι τεχνικές αυτές αποβλέπουν στην μείωση ή πλήρη καταστολή της κινητικότητας των ρύπων και περιλαμβάνουν δύο παραλλαγές: στερεοποίηση και χημική σταθεροποίηση. Οι τεχνικές στερεοποίησης (π.χ. τσιμεντοποίηση, υαλοποίηση), μετατρέπουν τα φυσικά κυρίως χαρακτηριστικά του απορρίμματος/εδάφους, εγκλωβίζοντας τους ρύπους σε μία αδρανή στερεοποιημένη μήτρα. Οι τεχνικές χημικής σταθεροποίησης μετατρέπουν τις ευδιάλυτες και συνεπώς βιοδιαθέσιμες μορφές των ρύπων σε αδιάλυτες, χημικώς αδρανείς ενώσεις με μηχανισμούς καταβύθισης, οξειδοαναγωγής, προσρόφησης, κλπ.

Τεχνικές κινητοποίησης των ρύπων. Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει όσες τεχνολογίες απομακρύνουν τους ρύπους από

την μήτρα των εδαφών (ή των απορριμμάτων) με την χρήση κατάλληλων φυσικοχημικών μεθόδων. Για την απομάκρυνση των μετάλλων εφαρμόζονται είτε οι κλασσικές μέθοδοι εμπλουτισμού (διαχωρισμός λεπτομερών σωματιδίων, βαρυτομετρικός διαχωρισμός, επίπλευση κλπ.) είτε τεχνικές εκχύλισης με την χρήση οξέων, οξειδοαναγωγικών αντιδραστηριών ή συμπλοκοποιητών.

Η περιπλοκότητα του περιβαλλοντικού προβλήματος στο Λαύριο (ετερογένεια των πηγών ρύπανσης, ανάμιξη φυσικών εδαφών-απορριμμάτων κλπ.) επιβάλλει την χρήση πολλαπλών τεχνικών που να διαφοροποιούνται ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των απορριμμάτων και των εδα-

φών και τους ειδικούς περιβαλλοντικούς κινδύνους που απορρέουν στην κάθε περίπτωση. Για τα θειούχα απορρίμματα καταλληλότερες θεωρούνται οι τεχνικές απομόνωσης και σταθεροποίησης, ενώ στα οξειδωμένα απορρίμματα και εδάφη μπορούν να εφαρμοσθούν τεχνικές σταθεροποίησης ή κινητοποίησης των ρύπων. Στο Εργαστήριο Μεταλλουργίας Ε.Μ.Π. βρίσκεται σε εξέλιξη η εργαστηριακή αξιολόγηση των εναλλακτικών μεθόδων, ενώ παράλληλα έχει ξεκινήσει ο σχεδιασμός των πιλοτικών εφαρμογών στην περιοχή του Λαυρίου. Συνοπτική περιγραφή των μεθόδων δίνεται στην συνέχεια.

Απομάκρυνση και ελεγχόμενη απόθεση των απορριμμάτων

Για την οριστική απομάκρυνση των απορριμμάτων από την αστική περιοχή του Λαυρίου μελετάται η δυνατότητα εναπόθεσής τους στο εκτεταμένο δίκτυο υπόγειων μεταλλευτικών έργων της περιοχής. Τα απορρίμματα θα αναμιχθούν με ποσότητα τσιμέντου και πιθανώς και ασβεστολιθικής άμμου, ώστε να αποκτήσουν θετικό ολικό δυναμικό εξουδετέρωσης και θα αποτεθούν υδραυλικά στα υπόγεια έργα με τις γνωστές τεχνικές λιθογόμωσης.

Επιφανειακή κάλυψη θειούχων απορριμμάτων

Αρχή της μεθόδου

Ο βασικός ρόλος της επιφανειακής κάλυψης στα θειούχα απορρίμματα είναι η καταστολή του μηχανισμού δημιουργίας όξινης απορροής. Με την δημιουργία προστατευτικού καλύμματος στην επιφάνεια του σωρού παρεμποδίζεται η διάσδυση νερού και οξυγόνου μέσα στην μάζα των απορριμμάτων, ώστε να ανασταλούν οι αντιδράσεις διαλυτοποίησης-κινητοποίησης των ρύπων και η δημιουργία όξινων νερών με υψηλά φορτία ρύπων. Με την επιφανειακή κάλυψη αποφεύγεται επίσης η αιολική μεταφορά του υλικού στις γύρω περιοχές.

- Ένα στρώμα φραγμού, πάχους 60 cm και χαμηλής διαπερατότητας, $< 10^{-7}$ cm.s⁻¹, υπερκείμενο της μάζας των απορριμμάτων. Το στρώμα αυτό μπορεί να αποτελείται από άργιλο αναμεμιγμένη με μπεντονίτη.
- Μία συνθετική γεωμεμβράνη, πάχους 1 mm, υπερκείμενη του στρώματος φραγμού.
- Ένα στρώμα πάχους 30 cm και διαπερατότητας 10^{-2} cm.s⁻¹ που θα χρησιμεύει σαν στρώμα απορροής και θα υπέρκειται της γεωμεμβράνης.
- Ένα υπερκείμενο στρώμα άμμου, πάχους 10 cm, που θα λειτουργεί ως φίλτρο.
- Ένα υπερκείμενο στρώμα φυτικής γης, πάχους 60 cm, το



ΦΩΤ. ΣΟΦΙΑ ΦΡΑΓΚΟΥΛΗ

Εργαστηριακή ανάπτυξη και πιλοτική εφαρμογή

Οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν την ικανότητα των στερεών καλυμμάτων είναι η υδραυλική αγωγιμότητα και ο συντελεστής μεταφοράς οξυγόνου. Τα καλύμματα αποτελούνται από διαφορετικά υλικά, όπως εδάφη, άμμο, αργιλικά υλικά και μπεντονίτη σε παράλληλες στρώσεις. Τα φυσικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά τους, όπως το μέγεθος κόκκου, το ποσοστό αργίλου, το πορώδες, η διαπερατότητα και η συγκρατούμενη υγρασία σε σχέση με την πυκνότητά τους, αποτελούν παράγοντες καλής λειτουργίας. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά ενός κατάλληλου καλύμματος πρέπει να είναι:

- Ελάχιστη δίοδος ύδατος εντός της μάζας των απορριμμάτων
- Ελάχιστη μεταφορά οξυγόνου
- Μικρή συντήρηση
- Ικανοποιητική απορροή
- Υψηλή αντίσταση σε φθορές

Ένα κάλυμμα κατάλληλο για θειούχους απορριμματικούς σωρούς με υψηλό δυναμικό γένεσης οξύτητας (π.χ. πυρίτες Μποδοσάκη και Καβοδόκανου) θεωρείται ότι μπορεί να αποτελείται από:

οποίο θα μπορεί να υποστηρίξει βλάστηση.

Παράλληλα, διάφορες παραλλαγές του καλύμματος αυτού (διαφορετική διαδοχή στρωμάτων, υλικών, πάχη κ.λ.π.) αξιολογούνται αυτή την στιγμή εργαστηριακά για την βελτιστοποίηση του σχήματος επιφανειακής κάλυψης στα υλικά των πυριτών Καβοδόκανου (θέση Α στο σχ. 1). Με βάση τα συμπεράσματα των εργαστηριακών δοκιμών η επιφανειακή κάλυψη θα εφαρμοσθεί σε επιφάνεια πυριτών 1600 m².

Αδρανοποίηση θειούχων με ασβεστολιθική άμμο

Αρχή της μεθόδου

Στόχος της δράσης είναι η καταστολή της γένεσης όξινης απορροής μέσω της προσθήκης αλκαλικότητας στα θειούχα απορρίμματα. Η προσθήκη ασβεστολιθικής άμμου συμβάλει στην σταθεροποίηση του υλικού με ένα συνδυασμό φυσικών και χημικών μηχανισμών. Οι μηχανισμοί αυτοί περιλαμβάνουν την προσθήκη δυναμικού εξουδετέρωσης στο σύστημα, την καταστολή της δράσης των οξύφιλων βακτηρίων μέσω της αύξησης του pH και την μείωση του ρυθμού οξειδωσης του σιδηροπυρίτη λόγω της κάλυψης των κόκκων του υλικού με στερεά προϊόντα οξειδωσης. Περαιτέρω, η

δημιουργία ιζημάτων από τα προϊόντα οξείδωσης οδηγούν στην δημιουργία ενός στρώματος με πολύ μικρή διαπερατότητα στο νερό και τον αέρα (hardpan) εμποδίζοντας την διείσδυση νερού και οξυγόνου στα κατώτερα στρώματα του σωρού.

Εργαστηριακή ανάπτυξη και πιλοτική εφαρμογή

Εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μεταλλουργίας σε υλικά ανάλογης σύστασης με τους πυρίτες Μποδοσάκη έδειξαν ότι η προσθήκη ασβεστολίθου σε ποσοστό 7% αναστέλλει αποτελεσματικά την δημιουργία όξινης απορροής και ακινητοποιεί τα τοξικά στοιχεία.



ΦΩΤ. ΣΟΦΙΑ ΦΡΑΓΚΟΥΛΗ

Προβλέπεται δοκιμαστική εφαρμογή της μεθόδου στους πυρίτες Μποδοσάκη (θέση Δ στο σχ. 1). Η υλοποίηση του έργου περιλαμβάνει την εκσκαφή 5000 m³ απορριμμάτων, την ανάμιξη του υλικού με την απαιτούμενη ποσότητα ασβεστολιθικής άμμου και την τοποθέτηση του μίγματος σε κατάλληλα διαμορφωμένη περιοχή για τον συστηματικό έλεγχο της ποιότητας των στραγγισμάτων μετά την κατεργασία.

Εξυγίανση απορριμματικού σωρού φράγματος απόθεσης

Ήδη, το Ε.Μ.Π. μετά από σχετική μελέτη του Εργαστηρίου Μεταλλουργίας, αυτή την περίοδο προχωρεί στην κατασκευή καλύμματος για την εξυγίανση του απορριμματικού σωρού του φράγματος απόθεσης, εντός του χώρου της πρώην Γαλλικής Εταιρείας, το οποίο αναμένεται να ολοκληρωθεί στο τέλος Απριλίου (θέση Β στο σχ. 1).

Το φράγμα έχει σχήμα περίπου ορθογώνιο με μήκος 237 m και πλάτος 107 m και υποδιαιρείται σε δύο τμήματα Α και Β. Το Α είναι πλήρες, ενώ το Β μερικώς πληρωμένο. Το μέσο ύψος του φράγματος είναι 2,7 m το δυτικό και 3,3 m στο ανατολικό άκρο. Η συνολική επιφάνειά του ανέρχεται σε 25 000 m². Το περιεχόμενο απόρριμμα έχει ύψος κατά προσέγγιση

6 m στο τμήμα Α και 2,5 m στο τμήμα Β. Το συνολικό βάρος των απορριμμάτων ανέρχεται σε 150000 t.

Για την εξυγίανση του φράγματος απόθεσης επελέγη μία πρωτότυπη και χαμηλού κόστους λύση που περιλαμβάνει συνδυασμό αδρανοποίησης με ασβεστολιθική άμμο και εφαρμογή εδαφικού καλύμματος. Συγκεκριμένα, μετά τις αρχικές εργασίες διαμόρφωσης του χώρου σε ένα επίπεδο, τα απορρίμματα αναμίχθηκαν σε βάθος 80 cm με ασβεστολιθική άμμο σε αναλογία 4:1, στη συνέχεια τοποθετήθηκε στρώμα από υλικό λατομείου 3Α σε πάχος 10 cm, ενώ τα δύο υπερκείμενα στρώματα αποτελούνται από 40 cm υγιούς χώματος και 30 cm φυτικής γης. Μετά το πέρας της κατασκευής

του εδαφικού καλύμματος θα λάβουν χώρα εργασίες καλλωπισμού του χώρου.

Σταθεροποίηση με φωσφορικά

Αρχή της μεθόδου

Στόχος της δράσης είναι η μείωση του ευδιάλυτου/βιοδιαθέσιμου κλάσματος των τοξικών στοιχείων μέσω της δέσμευσης των μεταλλικών ρύπων στην μορφή δυσδιάλυτων φωσφορικών ενώσεων. Τα φωσφορικά προτείνονται από πολλούς ερευνητές ως το αποτελεσματικότερο μέσο σταθεροποίησης του Pb, λόγω της εξαιρετικά χαμηλής διαλυτότητας των αντίστοιχων φωσφορικών ενώσεων.

Η κατεργασία με φωσφορικά μπορεί να εφαρμοστεί σε εδάφη ή οξειδωμένα απορρίμματα, στα οποία παρατηρείται υψηλή κινητικότητα του Pb με βάση τις πρώτες δοκιμές εκχύλισης (τοξικότητα κατά ΕΡΑ, εκχύλιση με EDTA, σταδιακές εκχύλισεις). Η αναμενόμενη μείωση του φυτοδιαθέσιμου κλάσματος είναι ιδιαίτερα σημαντική σε περιοχές που χρησιμοποιούνται για συστηματική καλλιέργεια όπως π.χ. τα απορρίμματα Σαβούρας (θέση Ε στο σχ. 1).

Εργαστηριακή ανάπτυξη και πιλοτική εφαρμογή

Η σταθεροποίηση με φωσφορικά δοκιμάστηκε σε εργαστηριακή κλίμακα με κριτήριο την μείωση της εκχυλισιμότητας των ρύπων σε EDTA (φυτοδιαθέσιμο κλάσμα). Διαπιστώθηκε ότι με την προσθήκη $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ σε αναλογία 10% κατά βάρος επιτυγχάνεται μείωση του φυτοδιαθέσιμου κλάσματος κατά 50% περίπου για τον Pb και το Cd και 25% για τον Zn. Προβλέπεται δοκιμαστική εφαρμογή της κατεργασίας σε επιφάνεια 900 m^2 πάνω στα απορρίμματα της Σαβούρας (θέση E στο σχ. 1) με ταυτόχρονη φύτευση της επιφάνειας για άμεση μέτρηση της απορρόφησης των ρύπων από τα φυτά. Παράλληλη φύτευση γειτονικής επιφάνειας, μη σταθεροποιημένης, θα χρησιμοποιηθεί για έλεγχο της αποτελεσματικότητας της μεθόδου.

οξειδωμένα απορρίμματα και εδάφη. Η επιλογή των αντιδραστηρίων εκχύλισης βασίσθηκε στην ιδιότητα του Pb να σχηματίζει ισχυρά υδατοδιαλυτά σύμπλοκα με οργανικά οξέα (π.χ. οξικό οξύ, κιτρικό οξύ, ΕΣΤΑ) ή χλωροσύμπλοκα σε διαλύματα με υψηλή περίσσεια χλωριόντων (π.χ. CaCl_2). Στις εργαστηριακές δοκιμές που έγιναν στο Εργαστήριο Μεταλλουργίας του Ε.Μ.Π. τα υψηλότερα ποσοστά εκχύλισης επιτεύχθηκαν με ισχυρώς όξινα διαλύματα χλωριόντων ($\text{CaCl}_2 = 1\text{M}$, $\text{HCl} = 2\text{M}$), μέχρι 98% για τον Pb και 100% για τον Zn και τον Cd. Παρατηρήθηκε όμως, ταυτόχρονη σημαντική διαλυτοποίηση των βασικών συστατικών του εδάφους, όπως CaCO_3 .



ΦΩΤ. ΒΑΣΟ ΚΥΡΙΑΚΗ

Εκχύλιση-απομάκρυνση των ρύπων

Αρχή της μεθόδου

Η ριζικότερη αντιμετώπιση του περιβαλλοντικού προβλήματος επιτυγχάνεται με την οριστική απομάκρυνση των ρύπων από τα τοξικά απορρίμματα ή τα μολυσμένα εδάφη. Με την χρήση κατάλληλων οξέων και συμπλοκοποιητών είναι εφικτή η απομάκρυνση των τοξικών μετάλλων από μολυσμένα εδάφη και απορρίμματα κατά σημαντικό ποσοστό.

Οι κατεργασίες εκχύλισης περιλαμβάνουν τα εξής δύο κυρίως στάδια:

1. Ανάμιξη/διαβροχή του εδάφους με το εκχυλιστικό διάλυμα με σκοπό την διαλυτοποίηση των ρύπων.
2. Απομάκρυνση των ρύπων από το εκχυλιστικό διάλυμα και ανακύκλωση του εκχυλιστικού διαλύματος.

Οι μεταλλικοί ρύποι συγκεντρώνονται τελικά σε μία μικρή ποσότητα στερεού υπολείμματος με δυνατότητα ελεγχόμενης απόθεσης σε χώρους υγειονομικής ταφής ή ακόμη και ανάκτησης των μεταλλικών αξιών σε αντίστοιχες μεταλλουργικές μονάδες.

Εργαστηριακή ανάπτυξη και πιλοτική εφαρμογή

Οι μέθοδοι εκχύλισης εφαρμόστηκαν εργαστηριακά σε

Για την κατεργασία των εκχυλιστικών διαλυμάτων μελετώνται:

- α) η χρήση ρητινών για την απομάκρυνση των μετάλλων και την ταυτόχρονη αναγέννηση των οργανικών οξέων
- β) η καταβύθιση των μετάλλων με CaO από τα χλωριούχα διαλύματα με μερική ανακύκλωση του εκχυλιστικού διαλύματος.

Στην τελική επιλογή θα συνεκτιμηθούν οι ακόλουθοι παράγοντες:

- η αποτελεσματικότητα της εκχύλισης των ρύπων
 - η εκλεκτικότητα ως προς τα άλλα βασικά συστατικά του εδάφους
 - η ποιότητα και η σταθερότητα του εδάφους μετά την κατεργασία
 - ποσότητα και ποιότητα των στερεών και υγρών αποβλήτων
 - οικονομικότητα του ολοκληρωμένου σχήματος κατεργασίας.
- Προβλέπεται η δοκιμαστική εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας στα τέλματα Θορικού (θέση Z στο σχ. 1). Το υλικό αυτό χαρακτηρίζεται ως ιδιαίτερα τοξικό λόγω της υψηλής διαλυτότητας του περιεχόμενου Pb, όπως αυτή προσδιορίστηκε στις πρότυπες δοκιμές τοξικότητας. Η έντονη τάση

διαλυτοποίησης των μεταλλικών ρύπων αποτελεί πλεονέκτημα για την εφαρμογή τεχνολογιών εκχύλισης. Η μέθοδος θα εφαρμοσθεί on-site είτε με την τεχνική «εκχύλιση σε σωρό» (heap leaching), είτε με εκχύλιση σε αναδεδυμένους αντιδραστήρες.

4. Συμπεράσματα

Τα μεταλλευτικά και μεταλλουργικά απορρίμματα της περιοχής Λαυρίου, θεωρείται ότι, σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό, αποτελούν μια περιβαλλοντική απειλή για την περιο-

να εφαρμοσθούν τεχνικές σταθεροποίηση ή κινητοποίησης των ρύπων. Στο Εργαστήριο Μεταλλουργίας Ε.Μ.Π. βρίσκεται σε εξέλιξη η εργαστηριακή αξιολόγηση των εναλλακτικών μεθόδων, ενώ παράλληλα έχει ξεκινήσει ο σχεδιασμός των πιλοτικών εφαρμογών στην περιοχή του Λαυρίου. Τα συμπεράσματα από τις εφαρμογές μικρής κλίμακας θα αποτελέσουν τη βάση για την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου σχεδίου περιβαλλοντικής αποκατάστασης της περιοχής που να συνδυάζει την αποτελεσματική προστασία της υγείας των κατοίκων και του φυσικού περιβάλλοντος με ένα ρεαλιστικό κόστος εφαρμογής.



χή. Χαρακτηρίζονται ως τοξικά με βάση τη δοκιμή TCLP EPA, αποδίδουν υψηλό βιοδιαθέσιμο κλάσμα βαρέων μετάλλων και παρουσιάζουν γενικά υψηλό δυναμικό παραγωγής οξύτητας. Επιπλέον, η ποιότητα του ύδατος των πόρων χαρακτηρίζεται στις περισσότερες περιπτώσεις ως άκρως χαμηλή. Η ρύπανση έχει μεταφερθεί στα γύρω εδάφη με μηχανισμούς αιολικής και υδατικής μεταφοράς.

Η περιβαλλοντική αποκατάσταση της περιοχής του Λαυρίου προϋποθέτει την ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης στρατηγικής που θα περιλαμβάνει:

- α) Έργα αδρανιοποίησης των πηγών ρύπανσης και
- β) Έργα εξυγίανσης των μολυσμένων εδαφών.

Η περιπλοκότητα του περιβαλλοντικού προβλήματος (ετερογένεια των πηγών ρύπανσης, ανάμιξη φυσικών εδαφών-απορριμμάτων κλπ.) επιβάλλει την χρήση πολλαπλών τεχνικών που να διαφοροποιούνται ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των απορριμμάτων και των εδαφών και τους ειδικούς περιβαλλοντικούς κινδύνους που απορρέουν στην κάθε περίπτωση. Για τα θειούχα απορρίμματα καταλληλότερες θεωρούνται οι τεχνικές απομόνωσης και σταθεροποίησης, ενώ στα οξειδωμένα απορρίμματα και εδάφη μπορούν