ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΠΡΟΕΡΧΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΥΣΗ ΙΑΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Χ. Βάββα[1,*], Θ. Λυμπεροπούλου[1], Κ. Μαγουλάς[1], Ε. Βουτσάς[1]

[1]Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα

(*cvavva@central.ntua.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένα από τα βασικά προβλήματα που προκύπτουν από τη λειτουργία των σύγχρονων μονάδων καύσης αποβλήτων είναι η διαχείριση της παραγόμενης ιπτάμενης τέφρας, για την οποία απαιτούνται υψηλές δαπάνες αλλά και προσεκτική αξιολόγηση των μεθόδων που θα επιλεγούν, λόγω της υψηλής τοξικότητάς της. Επιπλέον, τα ιδιαίτερα αυστηρά όρια που έχει θεσπίσει η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) τα τελευταία χρόνια για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων καθιστούν απαραίτητη την επεξεργασία της ιπτάμενης τέφρας πριν την ταφή της.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη μεθόδου επεξεργασίας της ιπτάμενης τέφρας προερχόμενης από την καύση Ιατρικών Αποβλήτων (ΙΑ) με στόχο τον περιορισμό της απελευθέρωσης ρύπων και τη συμμόρφωση με τα όρια των χώρων υγειονομικής ταφής μη επικίνδυνων αποβλήτων. Η τέφρα ΙΑ που μελετήθηκε προέρχεται από τη μοναδική μονάδα καύσης της Ελλάδας (μονάδα αποτέφρωσης ΙΑ του ΕΔΣΝΑ, Λιόσια Αττικής), οι παραγόμενες ποσότητες της οποίας αποθηκεύονται και εξάγονται μέχρι να βρεθεί κατάλληλη μέθοδος διαχείρισης. Αρχικά διεξήχθη ο φυσικοχημικός χαρακτηρισμός της ιπτάμενης τέφρας και η εφαρμογή της πρότυπης δοκιμής έκπλυσης EN 12457/2 για την αξιολόγηση της εκπλυσιμότητας των στοιχείων της. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά εντοπίστηκε το πρόβλημα της υψηλής εκπλυσιμότητας του Pb και των διαλυτών αλάτων. Για τη μείωση της εκπλυσιμότητας του Pb επιλέχθηκε ως τεχνική επεξεργασίας η χημική σταθεροποίηση με φωσφορικά, ενώ για την απομάκρυνση των αλάτων επιλέχθηκε η τεχνική της έκπλυσης με νερό. Μετά από την επεξεργασία κάθε δείγμα ελέγχθηκε με τη δοκιμή EN 12457/2 και το έκπλυμα αναλύθηκε προς αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου επεξεργασίας. Επιπλέον, αναλύθηκε το υγρό απόβλητο που παράγεται από κάθε μέθοδο επεξεργασίας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, ο Pb σταθεροποιείται επιτυχώς με τελική συγκέντρωση στο έκπλυμα, πολύ χαμηλότερη από το νόμιμο όριο. Οι συγκεντρώσεις των υπόλοιπων μετάλλων παραμένουν χαμηλές και κάτω από τις οριακές τιμές. Η συγκέντρωση των αλάτων (Total Dissolved Solids – TDS) στο έκπλυμα μειώνεται σημαντικά και είναι κάτω από το νόμιμο όριο.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η μέθοδος μπορεί να σταθεροποιήσει με επιτυχία την ιπτάμενη τέφρα ΙΑ, προκειμένου να διατεθεί σε χώρο υγειονομικής ταφής για μη επικίνδυνα απόβλητα. Η επιπλέον χρήση φωσφορικού κατά την επεξεργασία αποδείχθηκε ότι οδηγεί στα ίδια αποτελέσματα εκπλυσιμότητας των μετάλλων και δεν οδηγεί σε περαιτέρω βελτίωση της ποιότητας του παραγόμενου υγρού αποβλήτου.

Η παρούσα μελέτη οδήγησε στην ανάδειξη μίας απλής και χαμηλού κόστους τεχνικής που επιτυγχάνει τη σταθεροποίηση της τέφρας ΙΑ, σύμφωνα με τα νόμιμα όρια της ΕΕ, και μπορεί να αποτελέσει μία λύση στο πρόβλημα της διαχείρισής της.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ΙΑ κατά το μεγαλύτερο μέρος τους (75-90%) είναι παρόμοια με τα οικιακά και κατατάσσονται στα μη επικίνδυνα απόβλητα. Το υπόλοιπο 10-25% των ΙΑ κατατάσσεται στα επικίνδυνα απόβλητα και μπορεί, χωρίς την κατάλληλη διαχείριση, να αποτελέσει κίνδυνο για το περιβάλλον και την υγεία [1]. Διεθνώς, υπάρχουν διάφορες μέθοδοι επεξεργασίας ΙΑ, όπως η πυρόλυση, αεριοποίηση/υαλοποίηση με πλάσμα, αλλά οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες μέθοδοι σήμερα

είναι η αποτέφρωση και η αποστείρωση. Η αποτέφρωση ή καύση μπορεί να οδηγήσει σε έως και 90% ελάττωση του όγκου των αποβλήτων [2]. Τα στερεά υπολείμματα της καύσης, που αποτελούν περίπου το 10% του αρχικού όγκου των αποβλήτων, περιέχουν επικίνδυνες ουσίες και χρήζουν ειδικής διαχείρισης. Το κύριο περιβαλλοντικό πρόβλημα αφορά στη διαχείριση της ιπτάμενης τέφρας και των υπολειμμάτων του συστήματος ελέγχου αέριας ρύπανσης, καθότι είναι πιθανή η απελευθέρωση στο περιβάλλον ορισμένων ρυπογόνων ουσιών που περιέχουν, όπως βαρέα μέταλλα, άλατα και διοξίνες [3]. Οι ερευνητικές προσπάθειες και η ανάπτυξη τεχνολογιών σχετικά με την επεξεργασία και διαχείριση των υπολειμμάτων αυτών έχουν επικεντρωθεί στην ανάπτυξη και στην αξιολόγηση τεχνικών για τη μείωση της εκπλυσιμότητας των υπολειμμάτων μετά την ταφή τους. Ωστόσο, η σύγκριση μεταξύ των διαφόρων τεχνικών που έχουν αναπτυχθεί είτε σε βιομηχανικές είτε σε πιλοτικές μονάδες, βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε υποθέσεις λόγω της έλλειψης αξιόπιστων και συγκρίσιμων στοιχείων [4].

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν σε συνδυασμό δύο τεχνικές επεξεργασίας της ιπτάμενης τέφρας, η χημική σταθεροποίηση με χρήση φωσφορικών ιόντων και η έκπλυση με νερό. Με τη μέθοδο της χημικής σταθεροποίησης με φωσφορικά μειώνεται η εκπλυσιμότητα του Pb αλλά και άλλων μετάλλων με μία απλή τεχνική και χωρίς να παράγονται υγρά απόβλητα. Η βασική αρχή είναι η δέσμευση των ρύπων σε σταθερές ενώσεις με τα φωσφορικά ιόντα μέσα στη μάζα της τέφρας. Ωστόσο, επειδή δεν πραγματοποιείται έκπλυση με νερό το επεξεργασμένο προϊόν διατηρεί τα άλατα που περιείχε το αρχικό υπόλειμμα. Η τεχνική της έκπλυσης με νερό χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση των διαλυτών αλάτων από τα υπολείμματα. Η έκπλυση με νερό συνήθως χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους. Ένας σημαντικός στόχος για τη μέθοδο είναι να χρησιμοποιηθεί, κατά το δυνατό, ο μικρότερος λόγος υγρού προς στερεό (Liquid/Solid – L/S) και ο μικρότερος χρόνος ανάδευσης. Τέλος, ένα από τα βασικά προβλήματα της έκπλυσης με νερό είναι η διαχείριση του υγρού αποβλήτου που παράγεται, καθώς εκτός από τα εύκολα διαλυτά άλατα απομακρύνονται από τα υπολείμματα και σημαντικές ποσότητες βαρέων μετάλλων.

ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Τα δείγματα ιπτάμενης τέφρας προερχόμενης από την καύση ΙΑ που μελετήθηκαν προήλθαν από τη μονάδα αποτέφρωσης ΙΑ του ΕΔΣΝΑ που βρίσκεται στα Λιόσια Αττικής. Η ιπτάμενη τέφρα κατακρατείται στα φίλτρα του συστήματος επεξεργασίας των απαερίων και συλλέγεται σε μεγάλα σακιά, τα οποία φυλάσσονται για μικρό διάστημα στον ανοικτό χώρο γύρω από τον αποτεφρωτήρα και στη συνέχεια σε κλειστές αποθήκες. Διάφορα δείγματα ελήφθησαν από τα σακιά αυτά σε διάστημα περίπου ενός μήνα.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε ο φυσικοχημικός χαρακτηρισμός των δειγμάτων ιπτάμενης τέφρας ο οποίος περιλαμβάνει μετρήσεις υγρασίας, pH, πυκνότητας, ειδικής επιφάνειας, κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα και με laser, στοιχειακή ανάλυση με φθορισμό Ακτίνων Χ (XRF) και ορυκτολογική ανάλυση με περίθλαση ακτίνων Χ (XRD).

Για την κατηγοριοποίηση της τέφρας εφαρμόστηκε η πρότυπη δοκιμή έκπλυσης EN 12457/2 σύμφωνα με την ευρωπαϊκή νομοθεσία. Οι αναλύσεις των εκπλυμάτων περιλαμβάνουν τη μέτρηση των Ολικών Διαλυμένων Στερεών (TDS), των ιόντων (Cl^-, F^- και SO_4^{2-}) με Ιοντική Χρωματογραφία (IC), και όλων των μετάλλων για τα οποία έχουν θεσπιστεί επιτρεπτά όρια (As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn) με φασματομετρία ατομικής εκπομπής με πηγή επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος (ICP-AES) ή με φασματομετρία μάζας με πηγή επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος (ICP-MS).

Στη συνέχεια μελετήθηκε η επεξεργασία της τέφρας αυτής με σκοπό το έκπλυμά της να μην υπερβαίνει τα όρια των χώρων υγειονομικής ταφής μη επικίνδυνων αποβλήτων. Το περιβαλλοντικό ζήτημα που προκύπτει για την τέφρα των ΙΑ εντοπίζεται στα ίδια προβληματικά σημεία με την τέφρα των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ). Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε μια

μέθοδος επεξεργασίας η οποία αναπτύχθηκε επιτυχώς για την τέφρα των ΑΣΑ [5].Η μέθοδος αυτή συνδυάζει δύο τεχνικές επεξεργασίας, τη χημική σταθεροποίηση με φωσφορικά ιόντα για τη μείωση της εκπλυσιμότητας του Pb και την έκπλυση με νερό για την απομάκρυνση των αλάτων.

Κατά το πρώτο βήμα της μεθόδου, η οποία ονομάζεται για συντομία $S_7W_{2.5}$, φωσφορικό οξύ (7%), μία μικρή ποσότητα νερού (L/S=0.7 l/kg) και τέφρα (150g) αναδεύονται για 15min στα 400rpm. Στη συνέχεια, προστίθεται επιπλέον νερό, ώστε ο συνολικός λόγος υγρού προς στερεό L/S=2 l/kg, και το μίγμα αναδεύεται για επιπλέον 15min. Κατά το πρώτο βήμα, πραγματοποιείται η χημική σταθεροποίηση, ακολουθούμενη από την έκπλυση με νερό κατά το δεύτερο βήμα. Το στερεό υπόλειμμα διαχωρίζεται με διήθηση κατά την οποία μία μικρή επιπλέον ποσότητα νερού χρησιμοποιείται (L/S=0.5 l/kg) με αποτέλεσμα ο συνολικός λόγος L/S να είναι τελικά 2.5 l/kg. Ακολουθεί ανάλυση του υγρού αποβλήτου (διήθημα), ενώ η εκπλυμένη τέφρα ξηραίνεται και στη συνέχεια εξετάζεται ως προς την εκπλυσιμότητά της με τη δοκιμή EN 12457/2.

Με βάση τα αποτελέσματα της μεθόδου $S_7W_{2.5}$, επιλέχθηκε επιπλέον προς αξιολόγηση η μέθοδος $S_{10}W_3$, κατά την οποία χρησιμοποιήθηκε φωσφορικό οξύ σε αναλογία 10% και μικρή επιπλέον ποσότητα νερού (3 l/kg αντί για 2.5 l/kg). Τέλος, εφαρμόστηκε η μέθοδος $S_{12}W_3$, κατά την οποία έγινε χρήση επιπλέον ποσότητας φωσφορικού (12%), για να ελεγχθεί κατά πόσο η επιπλέον ποσότητα φωσφορικού μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα του υγρού αποβλήτου που παράγεται κατά την επεξεργασία.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Η περιεχόμενη υγρασία του δείγματος ιπτάμενης τέφρας ΙΑ που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία έχει υψηλή τιμή (μέση τιμή δειγμάτων 8% κ.β.), πιθανώς λόγω του τρόπου αποθήκευσης σε ανοιχτό χώρο. Η πυκνότητα βρέθηκε ίση με 2.21 g/cm^3 και το pH ίσο με 12.2. Η ειδική επιφάνεια βρέθηκε ίση με 8.012 m^2/g, εντός του εύρους τιμών της βιβλιογραφίας οι οποίες ποικίλουν από 5 έως 66 m^2/g. Όπως παρατηρήθηκε από την κοκκομετρική ανάλυση με κοσκίνιση, η τέφρα των ΙΑ είναι πολύ λεπτόκοκκη με περισσότερο από το 96% (κ.β.) των σωματιδίων να έχουν μέγεθος μικρότερο από 200 μm και περισσότερο από το 90% των σωματιδίων να έχουν μέγεθος μικρότερο από 100 μm. Η ανάλυση του κλάσματος <100 μm με laser έδειξε ότι η μέση διάμετρος των σωματιδίων του κλάσματος αυτού είναι περίπου 20 μm. Αντίστοιχες τιμές πολύ λεπτόκκοκων υλικών αναφέρονται στη βιβλιογραφία για παρόμοια δείγματα.

Σύμφωνα με τη στοιχειακή ανάλυση (ανάλυση XRF), τα περισσότερα στοιχεία του δείγματος ιπτάμενης τέφρας ΙΑ της παρούσας διατριβής εμφανίζουν συγκεντρώσεις εντός του εύρους τιμών της βιβλιογραφίας. Παρατηρήθηκε υψηλή συγκέντρωση του Ca, η οποία οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη χρήση υδρασβέστου κατά τον καθαρισμό των αερίων της καύσης και πριν τη συλλογή της τέφρας ΙΑ στα σακκόφιλτρα.

Η ορυκτολογική σύσταση για την ακατέργαστη τέφρα ΙΑ, για το στερεό υπόλειμμα μετά τη δοκιμή έκπλυσης EN 12457/2 (εκπλυμένη τέφρα) και για τα διαλυμένα άλατα του εκπλύματος EN 12457/2, προσδιορίστηκε με Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD). Η ακατέργαστη τέφρα ΙΑ είναι πλούσια σε πυριτικά άλατα και διαλυτές ενώσεις του Ca, καθώς επίσης και σε άλατα του Na και K. Μερικές πιθανές ενώσεις του Pb, Zn και Cu εντοπίστηκαν επίσης, αν και αυτή η αναγνώριση είναι δύσκολη λόγω της χαμηλής συγκέντρωσής τους. Σημαντική ομοιότητα παρατηρείται στις κρυσταλλικές δομές της ιπτάμενης τέφρας ΙΑ με εκείνη της ιπτάμενης τέφρας ΑΣΑ. Τα διαλυμένα στερεά του εκπλύματος της δοκιμής EN 12457/2 αποτελούνται κυρίως από NaCl, $CaCO_3$ και $CaCl_2(H_2O)_6$. Αντιθέτως, στην εκπλυμένη τέφρα δεν εντοπίστηκε NaCl, λόγω της σημαντικής απομάκρυνσης του στο έκπλυμα. Παρόμοιες δομές για δείγματα ακατέργαστης τέφρας ΙΑ αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

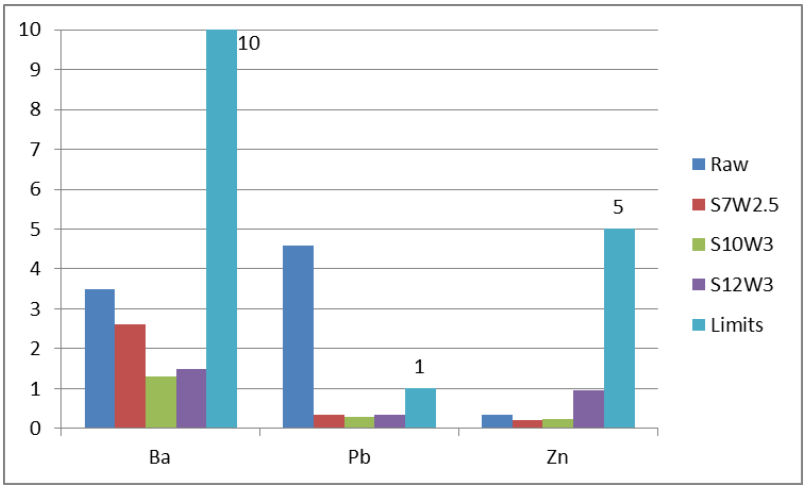
Τα αποτελέσματα της δοκιμής έκπλυσης EN 12457/2 για την ακατέργαστη τέφρα δείχνουν ότι η συγκέντρωση του Pb, των TDS, των ιόντων χλωρίου και φθορίου στο έκπλυμα της τέφρας ΙΑ υπερβαίνουν τα νόμιμα όρια για τους χώρους υγειονομικής ταφής μη επικίνδυνων αποβλήτων

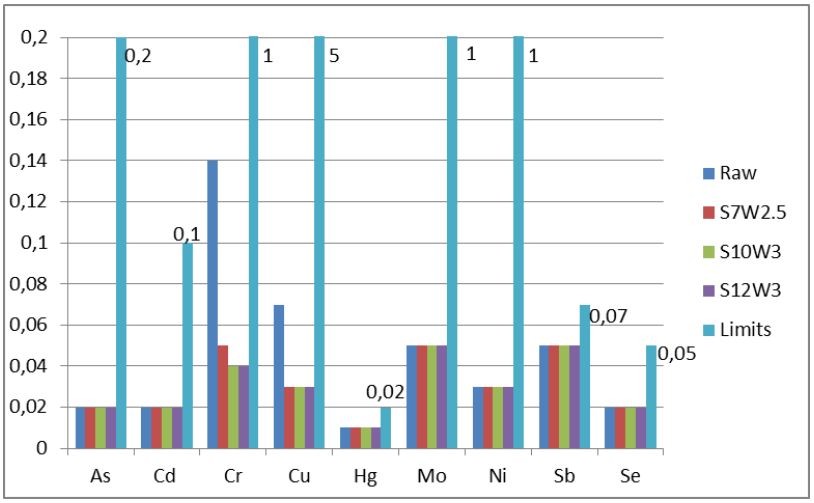
και, ως εκ τούτου, σύμφωνα με την απόφαση του Συμβουλίου (2003/33/ΕΚ), η τέφρα αυτή αποτελεί ένα επικίνδυνο απόβλητο που θα πρέπει να εναποτεθεί σε χώρο υγειονομικής ταφής για επικίνδυνα απόβλητα ή θα πρέπει να υποστεί κατάλληλη επεξεργασία ώστε να μην υπερβαίνει τα όρια των χώρων υγειονομικής ταφής μη επικίνδυνων αποβλήτων. Μετρήσεις της βιβλιογραφίας με διάφορες δοκιμές έκπλυσης για αντίστοιχα δείγματα εντοπίζουν ως προβληματικά μέταλλα κυρίως το Pb και σε πολλές περιπτώσεις το Cd, Zn και Cu.

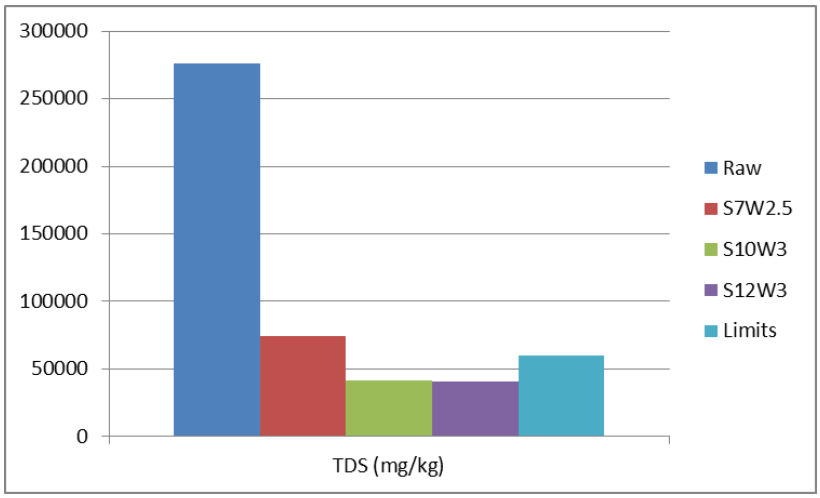
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης των εκπλυμάτων και για τις τρεις μεθόδους επεξεργασίας που εξετάστηκαν παρουσιάζονται στο Σχήμα 1. Επιπλέον, το υγρό απόβλητο που παράγεται από κάθε μέθοδο επεξεργασίας αναλύθηκε και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.

Παρατηρείται ότι η χρήση φωσφορικού σε αναλογία 7% (φωσφορικό/τέφρα) σταθεροποιεί αποτελεσματικά τα μέταλλα, ενώ η χρήση νερού σε αναλογία L/S=3 l/kg απομακρύνει επιτυχώς τα άλατα. Η μέθοδος, λοιπόν, αποδείχτηκε επιτυχής για την επεξεργασία της τέφρας ΙΑ, η οποία μετά την επεξεργασία μπορεί να εναποτεθεί σε χώρο ταφής μη επικίνδυνων αποβλήτων. Επιπλέον, η χρήση φωσφορικού σε αναλογία 10% οδηγεί σε λίγο καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά στην έκπλυση του Ba και σε ένα λίγο πιο καθαρό υγρό απόβλητο με ελάχιστα μικρότερες συγκεντρώσεις Pb και Ba. Τέλος, η χρήση φωσφορικού σε αναλογία 12% οδηγεί στα ίδια αποτελέσματα εκπλυσιμότητας των μετάλλων και δεν οδηγεί σε περαιτέρω βελτίωση της ποιότητας του υγρού αποβλήτου.

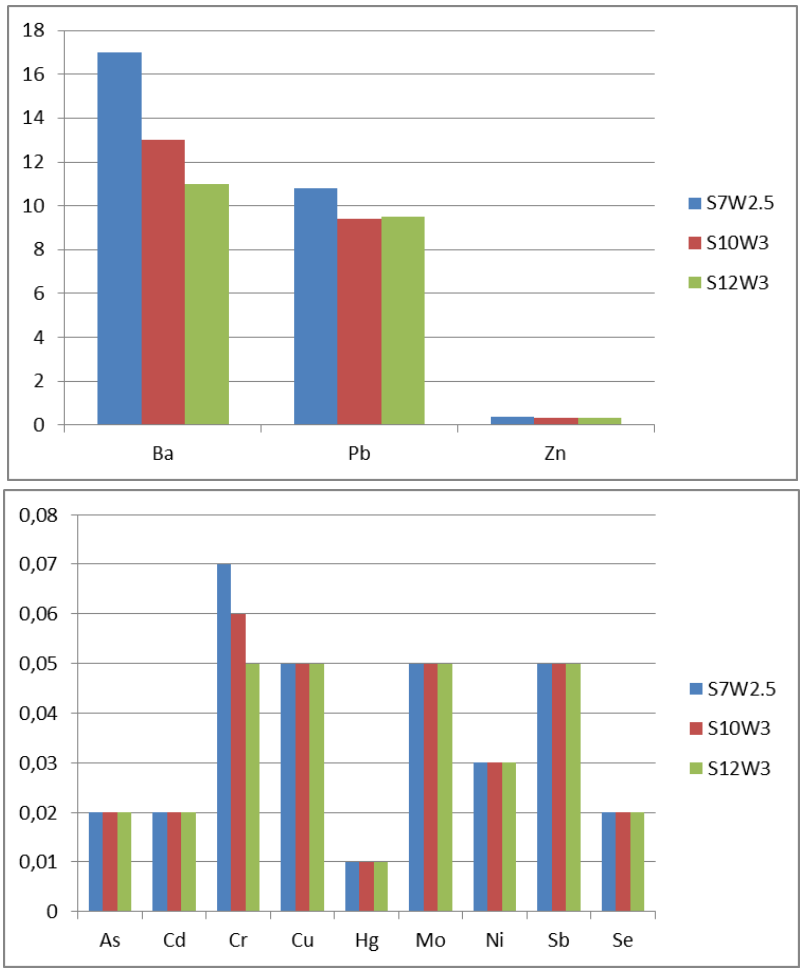
Σύμφωνα με την ορυκτολογική ανάλυση, η σταθεροποιημένη τέφρα ΙΑ εξακολουθεί να είναι πλούσια σε πυριτικά άλατα και ενώσεις του Ca, ενώ οι συγκεντρώσεις του NaCl και KCl είναι πολύ χαμηλές καθώς ένα μεγάλο μέρος τους έχει απομακρυνθεί στο υγρό απόβλητο της διεργασίας. Ο φώσφορος που προστέθηκε κατά την επεξεργασία εντοπίζεται κυρίως σε σταθερές ενώσεις με το Ca, Pb, Zn, Mg, Cu και Al.

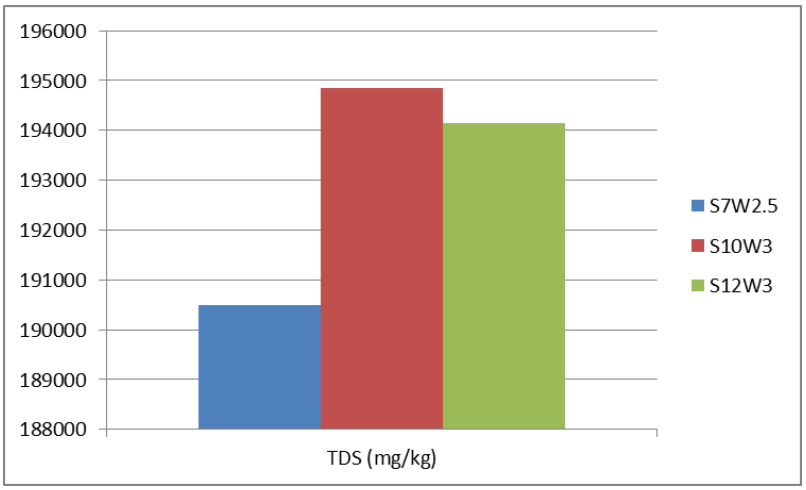






Σχήμα 1. *Αποτελέσματα της δοκιμής έκπλυσης EN 12457/2 σύμφωνα με 2003/33/ΕΚ για την ακατέργαστη ιπτάμενη τέφρα ΙΑ (Raw) και την επεξεργασμένη με τις μεθόδους $S_7W_{2.5}$, $S_{10}W_3$ και $S_{12}W_3$ (σε mg/l)*





Σχήμα 2. *Ανάλυση υγρού αποβλήτου των μεθόδων επεξεργασίας $S_7W_{2.5}$, $S_{10}W_3$ και $S_{12}W_3$ (σε mg/l)*

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ελέγχθηκε η εφαρμογή μεθόδου επεξεργασίας σε δείγμα ιπτάμενης τέφρας από καύση ΙΑ. Η τέφρα ΙΑ που μελετήθηκε προέρχεται από τη μοναδική μονάδα καύσης της Ελλάδας, οι παραγόμενες ποσότητες της οποίας αποθηκεύονται και εξάγονται μέχρι να βρεθεί κατάλληλη μέθοδος διαχείρισης. Αρχικά, ο φυσικοχημικός χαρακτηρισμός της τέφρας ΙΑ έδειξε ότι αποτελεί ένα τυπικό δείγμα ιπτάμενης τέφρας ΙΑ με υψηλή συγκέντρωση Ca. Επιπλέον, τα αποτελέσματα της δοκιμής έκπλυσης EN 12457/2 δείχνουν ότι η συγκέντρωση του Pb, των TDS, των ιόντων χλωρίου και φθορίου για την τέφρα ΙΑ υπερβαίνουν τα νόμιμα όρια για τους χώρους υγειονομικής ταφής μη επικίνδυνων αποβλήτων. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου μετά από μικρές τροποποιήσεις επιβεβαιώθηκε καθώς οδήγησε σε επιτυχή σταθεροποίηση της ιπτάμενης τέφρας ΙΑ. Η παραλλαγή της μεθόδου, απαιτεί την ίδια ποσότητα φωσφορικού οξέος (7%) και χρήση μίας μικρής επιπλέον ποσότητας νερού (3 l/kg αντί 2.5 l/kg). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η μέθοδος αυτή μπορεί να σταθεροποιήσει με επιτυχία την ιπτάμενη τέφρα ΙΑ, προκειμένου να διατεθεί σε χώρο υγειονομικής ταφής για μη επικίνδυνα απόβλητα. Η επιπλέον χρήση φωσφορικού οξέος, σε αναλογία 10%, οδηγεί σε λίγο καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά στην έκπλυση του Ba και σε ένα λίγο πιο καθαρό υγρό απόβλητο με ελάχιστα μικρότερες συγκεντρώσεις Pb και Ba. Τέλος, η χρήση φωσφορικού σε αναλογία 12% οδηγεί στα ίδια αποτελέσματα εκπλυσιμότητας των μετάλλων και δεν οδηγεί σε περαιτέρω βελτίωση της ποιότητας του υγρού αποβλήτου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] WHO. Safe management of wastes from health-care activities. Second edition. World Health Organization (2014).
[2] D. Hoornweg, P. Bhada-Tata. What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management. Urban development series, World Bank (2012).
[3] ISWA Report (International Solid Waste Association Working Group on Thermal Treatment of Waste, Subgroup on APC Residues from W-t-E plants). Management of APC residues from W-t-E Plants - An overview of management options and treatment methods, second edition (2008).
[4] O. Hjelmar, M. Wahlström, M.T. Andersson, J. Laine-Ylijoki, E. Wadstein, T. Rihm. Treatment methods for waste to be landfilled. TemaNord 583, Nordic Council of Ministers, Copenhagen (2009).
[5] C. Vavva, E. Voutsas, K. Magoulas. Chem. Eng. Res. Des. 125, (2017) 57–71.