Διαχείριση υγρών αποβλήτων από βιομηχανική μονάδα παραγωγής εκρηκτικών υλών.

Ονοματεπώνυμο: Κόκλας Ευστάθιος

Δρ. Χημικός, Μεταπτ. Φοιτητής ΔΙΑ/ΣΘΕΤ, ΕΑΠ

Email: easlavri@otenet.gr , std147208@ac.eap.gr

Ιωάννης Καλαβρουζιώτης

Καθηγητής ΣΘΕΤ ΕΑΠ

Email: ikalabro@eap.gr

Πέτρος Κόκκινος

Αναπλ. Καθηγητής ΣΘΕΤ ΕΑΠ

Email: pkokkin@eap.gr

***Περίληψη* – Το νερό είναι ένας από τους ζωτικούς φυσικούς πόρους. Είναι απαραίτητο για τη διατήρηση της ζωής. Παίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της ισορροπίας στο οικοσύστημα. Η ρύπανση των υδάτων αποτελεί μια σημαντική απειλή που αντιμετωπίζει ο πλανήτης. Τα βιομηχανικά απόβλητα αποτελούν την κύρια πηγή περιβαλλοντικής ρύπανσης. Οι βιομηχανίες εκρηκτικών υλών και προϊόντων αυτών απελευθερώνουν τεράστιες ποσότητες λυμάτων σε υδάτινους αποδέκτες.**

Η παραγωγή και η χρήση των εκρηκτικών υλών περιλαμβάνουν διαδικασίες οι οποίες συντελούν στη ρύπανση του περιβάλλοντος με υψηλές ποσότητες νιτρικών ενώσεων, όπως νιτρο-οργανικών, ανόργανων νιτρικών και νιτρωδών, η τοξικότητα των οποίων είναι παγκοσμίως γνωστή. Η επιλογή για την εφαρμογή μιας τεχνολογίας επεξεργασίας αποβλήτων ή μιας τεχνολογίας αποκατάστασης ρυπασμένων περιοχών, συνδέεται στενά με τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων αλλά και της θέσης για την οποία προορίζεται. Στο πλαίσιο εκπόνησης μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας επιχειρήθηκε η εξέταση της υποβάθμισης, των χαρακτηριστικών και της μετανάστευσης των εκρηκτικών, η ανάδειξη της τοξικότητας των πρωτογενών ενώσεων, καθώς και των γνωστών προϊόντων αποδόμησής τους. Προσεγγίστηκαν οι διαθέσιμες τεχνολογίες αποκατάστασης ρυπασμένων χώρων από εκρηκτικά και εντοπίστηκαν οι κατάλληλες τεχνολογίες επεξεργασίας εκρηκτικών σε ρυπασμένα ύδατα. Ο σκοπός ήταν να αξιολογηθούν οι δυνατότητες χρήσης των βέλτιστων συνδυαστικών μεθόδων σε υδατικά έργα ως μέρος των πρακτικών επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων και της προστασίας του περιβάλλοντος.

Λέξεις-Κλειδιά: εκρηκτικά, απόβλητα, βιο-αποκατάσταση, βιο-αποικοδόμηση, βιο-εξυγίανση, πυρομαχικά, τεχνητοί υγρότοποι.

Ι. Εισαγωγη

Απώτερος στόχος της ΜΔΕ είναι η ανάδειξη των διαθέσιμων τεχνολογιών για την επεξεργασία των αποβλήτων προερχόμενων από την παραγωγή εκρηκτικών υλών και η παρουσίαση μιας ενδεικτικής υβριδικής τεχνολογίας ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη αποδόμηση των επικίνδυνων και τοξικών για το περιβάλλον οργανικών ενώσεων με την απαραίτητη μελέτη οικονομικής και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Προσεγγίστηκε επίσης η μεταφορά της τεχνογνωσίας της προτεινόμενης τεχνολογίας σε ευρεία κλίμακα και οι προοπτικές εφαρμογής της και σε άλλες εγκαταστάσεις παρόμοιας δραστηριότητας.

Εκρηκτικά μείγματα νίτρου, άνθρακα και θείου γνωστά ως «μαύρη πυρίτιδα» χρησιμοποιούνται εδώ και χιλιάδες χρόνια. Οι περισσότεροι θεωρούν ως πατρίδα της μαύρης πυρίτιδας, την Άπω Ανατολή από τον 6ο μ.Χ. αιώνα.

Στα ιστορικά συγγράμματα, η εφεύρεση των εκρηκτικών τοποθετείται χρονικά πολύ νωρίτερα μέχρι τους Αρχαίους Έλληνες. Ο Alfred Nobel, το 1863, δημιούργησε τη δυναμίτιδα, δηλαδή μια εκρηκτική ύλη με βάση τη νιτρογλυκερίνη, η οποία αναμειγνυόμενη με γη διατόμων καθίσταται πολύ λιγότερη επικίνδυνη.

Το 1888 ο Nobel παρασκεύασε την πολεμική άκαπνη πυρίτιδα για τα πυροβόλα (βαλλιστίτιδα). Το 1902 στη Γερμανία το **T**ri**N**itro**T**oluene άρχισε να χρησιμοποιείται ως εκρηκτικό γέμισμα βλημάτων αντικαθιστώντας το πικρικό οξύ, του οποίου η εφαρμογή ήταν επικίνδυνη και δύσκολη. Το 1912, το TNT καθιερώθηκε επίσημα στο Στρατό των ΗΠΑ.

Ανάλογα με τη χρήση, οι εκρηκτικές ύλες διακρίνονται σε εμπορικές εκρηκτικές ύλες (commercial explosives) και στρατιωτικές εκρηκτικές ύλες (military explosives), που χρησιμοποιούνται για πολεμικούς σκοπούς, τόσο ως γομώσεις εκρηκτικών βλημάτων, όσο και ως προωθητικά μέσα αυτών. Οι κύριοι τύποι πολιτικών εκρηκτικών είναι ANFO (νιτρικό αμμώνιο και 5% πετρέλαιο), εκρηκτικά γαλακτώματος και δυναμίτες.

Τα κύρια συστατικά είναι: νιτρικό αμμώνιο, νιτρικό νάτριο, νιτρογλυκερίνη, νιτρογλυκόλη, νιτροκυτταρίνη και δινιτροτολουόλιο.

Η παγκόσμια παραγωγή πολιτικών εκρηκτικών έχει αυξηθεί, κυρίως λόγω της αυξανόμενης ζήτησης εξόρυξης και στις κατασκευαστικές βιομηχανίες. Οι κύριοι χρήστες είναι οι βιομηχανίες εξόρυξης άνθρακα (περίπου 68% της συνολικής ζήτησης), τα λατομεία και η εξόρυξη μη μετάλλων (16%) μαζί με την εξόρυξη μετάλλων και τις κατασκευές (16%).

Στις στρατιωτικές εκρηκτικές ύλες, οι ουσίες που χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον, είναι το TNT, RDX, HMX. Το HMX, επίσης γνωστό ως octogen, είναι από τις ισχυρότερες εκρηκτικές ύλες και χρησιμοποιείται σε δεκάδες εφαρμογές όπως σε ειδικά πλαστικά εκρηκτικά, ως προωθητικό ρουκετών, ως εκρηκτική ύλη εξουδετέρωσης εκρηκτικών μηχανισμών, αλλά κυρίως ως υλικό πυροδότησης πυρηνικών όπλων. Συνήθως, οι προαναφερθείσες εκρηκτικές ύλες δεν χρησιμοποιούνται αυτούσιες, αλλά ως συστατικά σε μίγματα πολεμικών εφαρμογών, τα κυριότερα των οποίων είναι τα διμερή μίγματα εκρηκτικών υλών και οι πλαστικές εκρηκτικές ύλες. Επειδή στην πλειονότητά τους, τόσο οι εμπορικές όσο και οι στρατιωτικές εκρηκτικές ύλες είναι δευτερογενή εκρηκτικά, απαιτείται διέγερση κάνοντας χρήση εναυσματικών μέσων.

Συνήθως χρησιμοποιούνται πυροκροτητές που περιέχουν κάποιες από τις εξής ουσίες: βροντώδης υδράργυρος, υδραζωτικός μόλυβδος, στυφνικός μόλυβδος, και τετρανιτρική πενταερυθριτόλη ή πεντρίτης- PETN.

Σε ότι αφορά την παραγωγή εκρηκτικών στρατιωτικής χρήσης, οι τεχνικές ενσωματώνονται στην παραγωγή πυρομαχικών, όπου έχουν εφαρμογή πλήθος από εκρηκτικές ύλες, καθώς και διεργασίες, αφενός στην παραγωγή των πρώτων υλών πρωτογενών και δευτερογενών εκρηκτικών ουσιών που είναι κατά βάση βαριές χημικές βιομηχανίες, αφετέρου την παραγωγή μεταλλικών κοίλων μερών και τη διαδικασία γόμωσης, αλλά και την ανάγκη της αποστρατικοποίησης των παραχθέντων πυρομαχικών σύμφωνα με διεθνείς συμβάσεις. Η Συνθήκη της Οτάβα αποτελεί σύμβαση για την απαγόρευση των ναρκών κατά προσωπικού που απαγορεύει πλήρως τη χρήση, ανάπτυξη, παραγωγή, αποθήκευση και μεταφορά ναρκών του είδους. Έχει υπογραφεί από περισσότερες από 160 χώρες και προβλέπει την καταστροφή των υπαρχόντων αποθεμάτων και τον καθαρισμό των ναρκοπεδίων.

II. ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ

Στον ελλαδικό χώρο η παρουσία εταιρικών, ιδιωτικών και κρατικών μονάδων είναι περιορισμένη. Η Extraco Α.Ε., αναπτύσσει προϊόντα που χρησιμοποιούνται κυρίως σε λατομεία, μεταλλεία και στην κατασκευή δημοσίων έργων (εκβραχισμοί, λατομεία, σήραγγες, δρόμοι, κλπ.). Πρόκειται για την μεγαλύτερη ελληνική εταιρεία στη χώρα, η οποία κατέχει κυρίαρχη θέση στην αγορά της Βαλκανικής και της Μεσογείου.

Η εταιρεία «ΕΛΤΕΚ» (Ελληνική Τεχνολογία Εκρηκτικών), είναι σήμερα η ταχύτερα αναπτυσσόμενη εταιρεία παραγωγής και εμπορίας εκρηκτικών υλών στη Νοτιοανατολική Ευρώπη. Στην ταχεία εξέλιξη της εταιρείας, έχουν συμβάλλει οι κομβικές συνεργασίες και στρατηγικές συμμαχίες που έχει συνάψει με κορυφαίους πολυεθνικούς Ομίλους. Η πολυεθνική Ελβετική εταιρεία «Societe Suisse des Explosifs» κατέχει περίπου το 22% των μετοχών της εταιρείας. Σήμερα δραστηριοποιείται σε ένα εμπορικό δίκτυο που αυξάνεται διαρκώς, εξυπηρετώντας την Ελλάδα, τα Βαλκάνια, την Κεντρική και την Βόρεια Ευρώπη (Γερμανία, Πολωνία και Σκανδιναβικές χώρες).

Στις παραπάνω κύριες ενεργές εταιρείες του Ελλαδικού χώρου, αξίζει να σημειωθεί ότι υπήρχαν σημαντικές εταιρείες, όπως η «ΕΛΒΙΕΜΕΚ» και η «ΠΥΡΚΑΛ». Η αγορά εκρηκτικών για τον πολιτικό τομέα διαδραματίζει ζωτικό ρόλο σε βιομηχανίες όπως η **εξόρυξη**, οι **κατασκευές**, τα **λατομεία** και η **ανάπτυξη υποδομών**.

Το 2024, η παγκόσμια κατανάλωση εκρηκτικών για πολιτικούς σκοπούς ξεπέρασε τα 9 εκατομμύρια τόνους, με το εκρηκτικό νιτρικού αμμωνίου να αντιπροσωπεύει πάνω από το 60% αυτού του όγκου. Η περιοχή Ασίας-Ειρηνικού συνεχίζει να κυριαρχεί στην αγορά, αντιπροσωπεύοντας πάνω από το 45% της συνολικής ζήτησης, με επικεφαλής τις υψηλές μεταλλευτικές δραστηριότητες στην Κίνα, την Ινδία και την Αυστραλία. Αντίθετα, η Βόρεια Αμερική και η Ευρώπη αντιπροσωπεύουν ώριμες αγορές, καταναλώνοντας συλλογικά πάνω από 2 εκατομμύρια τόνους εκρηκτικών ετησίως. Οι εξελίξεις στα ψηφιακά συστήματα ανατινάξεων και οι τεχνολογίες ακριβούς πυροδότησης ενσωματώνονται όλο και περισσότερο στα προϊόντα πολιτικών εκρηκτικών για τη βελτίωση της ασφάλειας και της απόδοσης.

Με την αυξανόμενη αστικοποίηση και τις κατασκευαστικές δραστηριότητες παγκοσμίως, η αγορά εκρηκτικών εμπορικών σημάτων αναμένεται να βιώσει διαρκή ζήτηση, η οποία θα καθοδηγείται από τις ειδικές ανάγκες του κλάδου για ελεγχόμενους και αποτελεσματικούς εκβραχισμούς (Market Growth Reports, 2026).

Οι καινοτομίες στα εκρηκτικά γαλακτώματος και τα εκρηκτικά νερού-ζελέ έχουν επίσης κερδίσει έδαφος λόγω της βελτιωμένης ασφάλειας και της ενεργειακής τους απόδοσης. Το 2023, περισσότεροι από 300 εκατομμύρια τόνοι βράχου εξορύχθηκαν παγκοσμίως χρησιμοποιώντας εκρηκτικά γαλακτώματος, τα οποία αντιπροσωπεύουν σχεδόν το 20% της παγκόσμιας χρήσης εκρηκτικών. Η εξόρυξη παραμένει το μεγαλύτερο τμήμα τελικής χρήσης, καταναλώνοντας πάνω από 7,2 εκατομμύρια μετρικούς τόνους το 2024. Οι οικολογικές και χαμηλής τοξικότητας συνθέσεις έχουν δει ανάπτυξη, καθώς οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί γίνονται αυστηρότεροι. Το 2024, περισσότερο από το 18% των παραγόμενων εκρηκτικών για πολιτικούς σκοπούς ταξινομήθηκαν σε κατηγορίες μειωμένης τοξικότητας ή χαμηλών εκπομπών. Επιπλέον, οι τεχνολογίες αυτοματισμού και τηλε-πυροδότησης υιοθετούνται ολοένα και περισσότερο για τη βελτίωση της ασφάλειας των εργαζομένων σε περιβάλλοντα υψηλού κινδύνου, με πάνω από το 50% των μεγάλων μεταλλευτικών εταιρειών να εφαρμόζουν τέτοια συστήματα.

ΑΜΥΝΤΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ

Αρκετές χώρες στην Ευρώπη ενισχύουν την παραγωγή πυρομαχικών για να καλύψουν την τρέχουσα ζήτηση, ιδίως για φυσίγγια 155 χιλιοστών, με βασικούς παραγωγούς τις εταιρείες Rheinmetall, Nammo και Nexter Group. Η Γερμανία, η Γαλλία, η Δανία και η Πολωνία είναι μεταξύ των χωρών που επανεκκινούν ενεργά ή επενδύουν στην εγχώρια παραγωγή. Η Ε.Ε. υποστηρίζει επίσης αυτή την προσπάθεια μέσω πρωτοβουλιών όπως το ASAP (Act in Support of Ammunition Production) και το EDIP (European Defence Industry Programme), με στόχο την αύξηση της παραγωγής εκρηκτικών και πυρομαχικών.

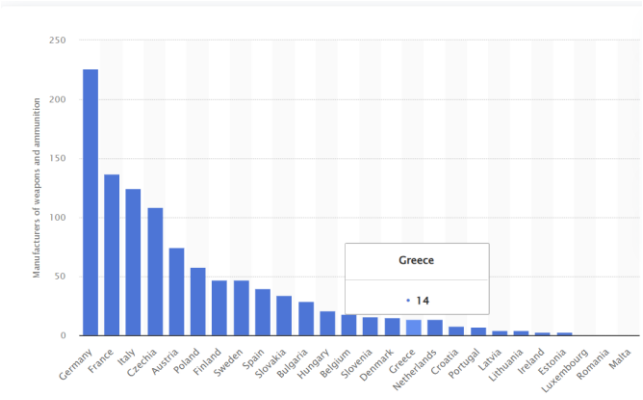


Πυρομαχικό πυροβολικού 155mm M107 (πηγή: ΕΑΣ ΑΒΕΕ)

Με τους πολέμους να μαίνονται στο υπογάστριο αλλά και στη γειτονιά της Ευρώπης, τα παραπάνω προγράμματα αποτελούν κεντρικές πρωτοβουλίες της ΕΕ για την ενίσχυση της ευρωπαϊκής αμυντικής βιομηχανίας και την κάλυψη αναγκών σε εξοπλισμό. Όλα τα πυρομαχικά έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής και σε κάποιο στάδιο θα χρειαστεί είτε να αναλωθούν είτε να απορριφθούν. Η διάθεση μπορεί να περιλαμβάνει απόρριψη, μεταπώληση και αποστρατικοποίηση. Η απόρριψη απαγορεύεται στη θάλασσα ως αποτέλεσμα της Σύμβασης του Λονδίνου και των σχετικών συμφωνιών. Η απόρριψη στο έδαφος περιορίζεται αυστηρά εάν δεν απαγορεύεται. Η μεταπώληση είναι μια ελκυστική επιλογή όσον αφορά την ανάκτηση αξίας από πυρομαχικά. Ωστόσο, τα πυρομαχικά πρέπει να μπορούν να μεταπωληθούν και αυτή η επιλογή περιορίζεται από διακρατικά ζητήματα και θέματα ασφάλειας.

Η αποστρατικοποίηση αποτελεί κύρια μέθοδο διάθεσης. Αποστρατικοποίηση σημαίνει αφαίρεση ή διαφορετικά εξουδετέρωση του ενεργειακού δυναμικού ενός πυρομαχικού. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει ή όχι την καταστροφή των πυρομαχικών, αλλά απαιτεί την καταστροφή ή τη μετατροπή του ενεργητικού-εκρηκτικού υλικού. Το απόθεμα πυρομαχικών για αποστρατικοποίηση στις δυτικές χώρες ανέρχεται πιθανώς σε πάνω από μισό εκατομμύριο τόνους. Το 2002 το απόθεμα των ΗΠΑ ήταν 453.000 τόνοι.

Σημαντικά αποθέματα υπάρχουν σε άλλες χώρες όπου όχι μόνο αποτελούν κίνδυνο για την ασφάλεια, αλλά μπορεί να είναι αποσταθεροποιητικά και να κινδυνεύουν να σφετεριστούν για παράνομες ή τρομοκρατικές δραστηριότητες.
Ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος των τεχνικών βιομηχανικής αποστρατικοποίησης ποικίλλει από τεχνολογία σε τεχνολογία. Ωστόσο, οι τρόποι επίπτωσης είναι παρόμοιοι και στην πραγματικότητα μοιάζουν με εκείνους που συναντώνται στην κατασκευή πυρομαχικών.



Κατασκευαστές όπλων και πυρομαχικών στην Ε.Έ. το 2024, ανά χώρα (STATISTA, 2024).

III. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Οι ενεργητικές χημικές ουσίες (εκρηκτικά και προωθητικά) περιέχουν νιτρο-NO_2 χαρακτηριστικές ομάδες και ανήκουν σε νιτροαρωματικές, νιτραμινικούς ή νιτρικούς εστέρες.
Με υδατοδιαλυτότητα 130 mg/L στους 20ºC, το TNT είναι δυσδιάλυτο σε νερό σύμφωνα με την ταξινόμηση που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Τα RDX και HMX έχουν χαμηλότερες διαλυτότητες (42 mg/l στους 20ºC και 5 mg/l στους 25ºC, αντίστοιχα) και ως εκ τούτου, διαλύονται σε νερό λιγότερο σε σύγκριση με το TNT. Στην ίδια θερμοκρασία 20ºC, η διαλυτότητα του HMX μετρήθηκε στα 3,34 (±0,12) mg/L.
Η μεταφορά μιας ουσίας στα υδατικά συστήματα επηρεάζεται από την υδατοδιαλυτότητα και από τους συντελεστές κατανομής οργανικού άνθρακα – νερού (K_{oc}) και εδάφους-νερού (K_d).
Ο συντελεστής K_{oc} εκφράζει την τάση προσρόφησης των ρύπων στον οργανικό άνθρακα του εδάφους.
Οι οργανικοί ρύποι θεωρείται ότι προσροφώνται αποκλειστικά στον οργανικό άνθρακα και ο συντελεστής κατανομής, K_d, μεταξύ των στερεών σωματιδίων του εδάφους και του νερού υπολογίζεται από το γινόμενο $K_d = K_{oc} \cdot f_{oc}$, όπου f_{oc} είναι το ποσοστό του οργανικού άνθρακα στο έδαφος.
Για τις χημικές βιομηχανίες, τα σημεία παραγωγής αποβλήτων συνοψίζονται στα ακόλουθα.

1. Απόβλητα των διεργασιών στις μονάδες παραγωγής πρώτων υλών, εκρηκτικών και προωθητικών.
2. Απόβλητα κατά τη διαδικασία γόμωσης, επισήμανσης και συσκευασίας των μεταλλικών μερών για τη σύνθεση και συναρμολόγηση των πυρομαχικών.
3. Απόβλητα από τη χρήση του ειδικού βοηθητικού μηχανολογικού εξοπλισμού.

Αρκετές βιβλιογραφικές αναφορές έχουν δείξει ότι περίπου 15 εκατομμύρια στρέμματα εδάφους στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι ρυπασμένα από εκρηκτικά όπως RDX, TNT και HMX. Μεταξύ αυτών, περίπου το 87% του εδάφους συσχετίστηκε με ρύπανση των υπόγειων υδάτων.
Παρόμοια επίπεδα εκρηκτικής ρύπανσης έχουν αναφερθεί σε όλη την Ευρώπη και την Ασία.
Η γερμανική Βαλτική θάλασσα εκτιμάται ότι περιέχει περίπου 300.000 τόνους RDX και άλλων εκρηκτικών ενώσεων που προκύπτουν από ιστορικές απορρίψεις πυρομαχικών. Έχει αναφερθεί ότι σχεδόν το 98% των δειγμάτων θαλάσσιων οργανισμών περιείχαν ανιχνεύσιμα επίπεδα εκρηκτικών ενώσεων όπως RDX, TNT και τους αντίστοιχους μεταβολίτες τους, γεγονός που υποδηλώνει εκτεταμένη βιοσυσσώρευση.
Τα εκρηκτικά θεωρούνται ανησυχητικοί περιβαλλοντικοί ρύποι σε ολόκληρο τον κόσμο, λόγω του αυξανόμενου αριθμού στρατιωτικών εγκαταστάσεων.
Τα επιτρεπόμενα όρια για τις εκρηκτικές ύλες RDX και HMX δεν ρυθμίζονται εξίσου σε όλες τις χώρες και βασίζονται σε μεγάλο βαθμό σε τοπικές οδηγίες και αξιολογήσεις έκθεσης. Οργανισμοί όπως η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (EPA), η Υπηρεσία Μητρώου Τοξικών Ουσιών και Νοσημάτων (ATSDR) και η Health Canada, έχουν προτείνει συμβουλευτικά επίπεδα για αυτές τις ενώσεις στο πόσιμο νερό, με βάση τα τοξικολογικά τους προφίλ και την πιθανή καρκινογένεση. Ωστόσο, πολλές χώρες εξακολουθούν να μην διαθέτουν συγκεκριμένα κανονιστικά πρότυπα για τις RDX και HMX στο περιβάλλον.

Επιτρεπόμενα όρια RDX και HMX στο πόσιμο νερό.
(W. Jabez Osborne et. al., 2026).

Name of the explosive	Permissible limit in drinking water by USEPA	Permissible limit in drinking water by ATSDR
HMX	0.4 mg/L (Sharma et al., 2023)	0.1 mg/L (Abadin et al., 2013)
RDX	0.002 mg/L (Sharma et al., 2023)	0.2 mg/L (Abadin et al., 2013)

Οι ακατάλληλοι τρόποι απόρριψης των εκρηκτικών χημικών ουσιών οδηγούν στην ανάμειξή τους με το έδαφος και τα υπόγεια ύδατα, γεγονός που με τη σειρά του έχει ως αποτέλεσμα αρνητικές επιπτώσεις στους ζωντανούς οργανισμούς (W. Jabez Osborne et. al., 2026).
Όντας τοξικά και καρκινογόνα στη φύση τους, αυτά τα εκρηκτικά, προσβάλλουν το κεντρικό νευρικό σύστημα των ζώων, ιδίως των θηλαστικών, μόλις εισέλθουν στο σώμα τους. Επιπλέον, μπορούν επίσης να μεταβάλουν τη λειτουργία του ήπατος και της καρδιάς, σύμφωνα με εκθέσεις της USEPA.
Όταν ο άνθρωπος εκτίθεται σε εκρηκτικά μέσω διάφορων οδών, όπως το δέρμα, το αναπνευστικό ή το πεπτικό σύστημα, προκαλούνται χρόνιες επιπτώσεις που σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να οδηγήσουν και στο θάνατο. Σύμφωνα με έκθεση της ATSDR (2012), ο πιο συνηθισμένος τρόπος έκθεσης σε ενώσεις πυρομαχικών είναι το ρυπασμένο πόσιμο νερό με RDX και HMX. Η κατάποση RDX για περίπου 90 ημέρες σε ζωικά μοντέλα έχει οδηγήσει σε απώλεια βάρους και μικρή βλάβη στο ήπαρ και τα νεφρά. Όταν η HMX εισέρχεται στο ανθρώπινο σώμα, μπορεί να προκαλέσει επιληψία.
Μαζί με τους ανθρώπους και τα ζώα, τα φυτά βιώνουν επίσης διάφορες αρνητικές επιπτώσεις κατά την έκθεση τους σε εκρηκτικά. Ωστόσο, τα εξαγονικά εκρηκτικά όπως το RDX και τα οκταγονικά εκρηκτικά όπως το HMX δεν ευθύνονται άμεσα για την αναστολή της βλάστησης των σπόρων ή την πρόκληση θανάτου των φυτών. Αντίθετα, προκαλούν αναπτυξιακές ανωμαλίες που μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο τη συνολική υγεία των φυτών.

Οι τοξικές επιδράσεις του TNT περιλαμβάνουν αιματολογικές αλλαγές, κυάνωση, μεθαιμοσφαιριναιμία και τοξική ηπατίτιδα. Η ρύπανση είναι πιθανή μέσω εισπνοής, κατάποσης και απορρόφησης από το δέρμα. Η εξάτμιση του τήγματος TNT και η αιώρηση της σκόνης στον χώρο εργασίας πρέπει να αποφεύγεται. Η TNT είναι μια ισχυρότατη τοξίνη για τα ψάρια.

Υπάρχουν δεδομένα τοξικότητας και καρκινογένεσης των TNT και DNTs. Οι υψηλές συγκεντρώσεις TNT (> 1,0 mg/l στο νερό) μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τα ψάρια σε πολλαπλά βιολογικά επίπεδα.

Ο συντελεστής βιοσυγκέντρωσης (BCF) ορίζεται ως ένα μέτρο που αντικατοπτρίζει την αναλογία της συγκέντρωσης μιας ουσίας σε έναν υδρόβιο οργανισμό προς τη συγκέντρωσή της στο περιβάλλον νερό, επηρεαζόμενη από βιολογικούς παράγοντες όπως το είδος και η αναλογία επιφάνειας προς όγκο του οργανισμού.

$$BCF = \frac{C_f}{C_w} = \frac{k_u}{(k_{ep} + k_m)}$$

Όπου
BCF: συντελεστής βιοσυγκέντρωσης (ml/g)
C_f, συγκέντρωση στο ιστό του ψαριού (mg/g)
C_w, συγκέντρωση στο νερό (mg/ml)
K_u, ο συντελεστής κάθαρσης από το TNT
K_{ep}, συντελεστής αποβολής του TNT
K_{ep}, συντελεστής απώλειας μέσω βιομετασχηματισμού

Τα κυριότερα συνθετικά μίγματα των εκρηκτικών υλών για τις εμπορικές χρήσεις είναι:

1) Αμμωνίτες
2) Γαλακτώματα
3) Δυναμίτιδες
4) Ζελατοδυναμίτιδες και
5) Πετραμμωνίτιδες

Γενικά τα εκρηκτικά μίγματα που περιέχουν νιτρογλυκερίνη (NG) χαρακτηρίζονται δυναμίτιδες. Οι Αμμωνίτιδες είναι κοκκώδεις εκρηκτικές ύλες που επίσης έχουν ως βάση το νιτρικό αμμώνιο. Οι ζελατινοδυναμίτες, όσο και οι αμμωνίτιδες, και το ANFO ανήκουν στην κατηγορία των παραδοσιακών εμπορικών εκρηκτικών.
Τα τελευταία χρόνια έχει κερδίσει σημαντικό έδαφος η χρήση των λεγόμενων εκρηκτικών γαλακτωμάτων. Ο λόγος είναι ότι τα γαλακτώματα είναι πιο ασφαλή σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη εκρηκτικών, διότι κανένα συστατικό τους δεν είναι εκρηκτικό. Επιπροσθέτως, παρουσιάζουν άριστη αντοχή στο νερό και κατά την έκρηξη τους δεν εκλύονται τοξικές ενώσεις.
Τα εκρηκτικά γαλακτώματα παρασκευάζονται από διάλυμα νιτρικού αμμωνίου, αναμεμιγμένου με ελαιώδη συστατικά και γαλακτωματοποιητή.
Τα ποσοτικά χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων του πολιτικού τομέα έχουν αρκετές ομοιότητες με αυτές του αμυντικού τομέα, και αυτό είναι αναμενόμενο με δεδομένο την χρήση των ίδιων βασικών πρώτων υλών.
Η μεγάλη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι η τελική χρήση είναι εντελώς διαφορετική, με αρκετά διαφορετικές συγκεντρώσεις των χημικών ενώσεων. Κάτι τέτοιο διαφοροποιεί σημαντικά τις συγκεντρώσεις των ρυπαντών κατά την παρασκευή των εμπορικών μιγμάτων.

Στον πολιτικό τομέα που είναι κατασκευαστικός και σχετίζεται με διαδικασίες εξόρυξης, το σύστημα των εκρηκτικών μετατοπίζεται σε χρήση μέσων και υλικών με λιγότερα μεταλλικά μέρη από ότι στις στρατιωτικές εφαρμογές, με τα ακόλουθα στάδια.

1. Παραγωγή πυροδοτικών μηχανισμών (πυροκροτητές – εναυσματικά καψύλλια)
2. Παραγωγή εκρηκτικών μιγμάτων - γαλακτωμάτων
3. Επισήμανση και συσκευασία εκρηκτικών
4. Μεταφορά και αποθήκευση
5. Δοκιμές σε πεδία δοκιμών

Για τις χημικές βιομηχανίες τα σημεία παραγωγής αποβλήτων συνοψίζονται στα ακόλουθα.

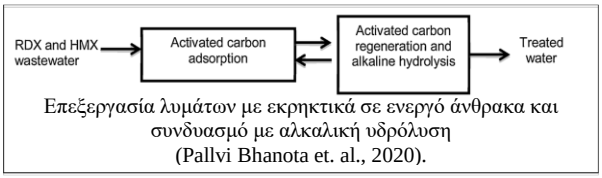
1. Απόβλητα των διεργασιών στις μονάδες παραγωγής εκρηκτικών και γαλακτωμάτων.
2. Απόβλητα κατά τη διαδικασία ανάμιξης, επισήμανσης και συσκευασίας των εμπορικών εκρηκτικών.
3. Απόβλητα από τη χρήση του ειδικού βοηθητικού μηχανολογικού εξοπλισμού.

IV. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Τα εκρηκτικά εισέρχονται στο περιβάλλον μέσω της ροής των υδάτινων αποβλήτων από εγκαταστάσεις κατασκευής πυρομαχικών, διαδικασίες φόρτωσης, συναρμολόγησης και συσκευασίας, εγκαταστάσεις διάθεσης και καταστροφής αποβλήτων, δραστηριότητες πυροδότησης και εκπαίδευσης, κ.λπ..
Γενικά, οι μέθοδοι επεξεργασίας για τα ρυπασμένα υπόγεια ύδατα με εκρηκτικά περιλαμβάνουν βιολογικές, χημικές και φυσικές μεθόδους από τις οποίες άλλες είναι καταστροφικές και άλλες μη καταστροφικές.
Στόχος κάθε βιώσιμης στρατηγικής επεξεργασίας νερού είναι η πλήρης αδρανοποίηση του στοχευμένου ρύπου, με αποτέλεσμα τον εκμηδενισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τις τελικές απορρίψεις.
Οι ολοκληρωμένες διαδικασίες επεξεργασίας που αξιοποιούν τη συνδυασμένη αποτελεσματικότητα των φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών έχουν αποκτήσει τεράστια οικολογική σημασία τελευταία, καθώς ο στόχος της επεξεργασίας νερού μπορεί να επιτευχθεί με τον βέλτιστο συνδυασμό τους. Για την επεξεργασία των συγκεκριμένων βιομηχανικών αποβλήτων εφαρμόζονται τεχνικές, που απομακρύνουν ή τροποποιούν κατάλληλα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους ώστε να εξαλείφονται ή να ελαττώνονται οι δυσμενείς συνέπειες από τη διάθεσή τους στο περιβάλλον.

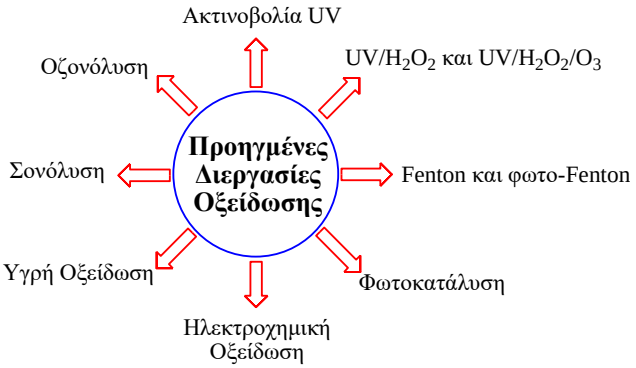
ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Ο ενεργός άνθρακας είναι μια επεξεργασμένη μορφή άνθρακα με μικροπορώδη επιφάνεια που παρέχει θέση προσρόφησης για τους ρύπους. Ο ενεργός άνθρακας σε κοκκώδη μορφή (GAC) είναι πολύ αποτελεσματικός στην απομάκρυνση επικίνδυνων χημικών ουσιών που υπάρχουν στα λύματα. Νιτροαρωματικά και νιτραμινικά λύματα από εργοστάσια πυρομαχικών και ρυπασμένα υπόγεια ύδατα υποβάλλονται σε επεξεργασία με κοκκώδη ενεργό άνθρακα σε αντιδραστήρες σταθερής ή ρευστοποιημένης κλίνης.



Επεξεργασία λυμάτων με εκρηκτικά σε ενεργό άνθρακα και συνδυασμό με αλκαλική υδρόλυση
(Pallvi Bhanota et. al., 2020).

Οι διαδικασίες Fenton (Fe^{2+}/ H_2O_2) και φωτο-Fenton είναι αποτελεσματικές στην καταπολέμηση πολυάριθμων οργανικών ρύπων, συμπεριλαμβανομένων των υπολειμμάτων εκρηκτικών σε υδάτινα σώματα και το έδαφος.



Προηγμένες Διεργασίες Οξείδωσης
(Advanced Oxidation Processes, AOPs)

Πολλές αποτελεσματικές τεχνολογίες βασίζονται σε φυσικοχημικές επεξεργασίες (π.χ. μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης, ανταλλαγή ιόντων, ηλεκτροδιάλυση) για την απομάκρυνση αζωτούχων ενώσεων (Luís Madeira et. al., 2021).

Η αποτέφρωση είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη κυρίως για το ρυπασμένο με εκρηκτικά έδαφος και την ιλύ από τα υγρά απόβλητα. Ενώ η αποτέφρωση είναι αποτελεσματική και καταστροφική μέθοδος, τα κύρια μειονεκτήματα είναι οι εκπομπές αερίων όπως CO_2 και NO_X, η παραγωγή άχρηστης τέφρας και το υψηλό κόστος. Το κόστος της διαδικασίας αποτέφρωσης και η ποσότητα των δυσμενών επιπτώσεων που οφείλονται στις εκπομπές αερίων είναι σαφή, λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος της πραγματικής διαδικασίας αποκατάστασης, όπου η ρυπασμένη περιοχή μπορεί να είναι ιδιαίτερα μεγάλης έκτασης. Για παράδειγμα, στη Νεμπράσκα, στο πρώην στρατιωτικό εργοστάσιο πυρομαχικών, η ποσότητα εδάφους που απαιτούσε αποκατάσταση ήταν 10.000 τόνοι (JOANNA AALTO, 2016).

ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η βιολογική επεξεργασία των λυμάτων περιλαμβάνει τη χρήση μικροοργανισμών για τη διάσπαση ρύπων, κυρίως ενώσεων αζώτου, σε μια διαδικασία που είναι βιώσιμη και λιγότερο δαπανηρή από τις παραδοσιακές χημικές μεθόδους.

Περιλαμβάνει διαδικασίες όπως η νιτροποίηση (βιολογική οξείδωση της αμμωνίας αρχικά σε νιτρώδη και στη συνέχεια σε νιτρικά ιόντα) και η απονιτροποίηση (βιολογική αναγωγή των νιτρικών, μέσω νιτρωδών και άλλων ενδιάμεσων μορφών αζώτου, σε αέριο άζωτο, το οποίο απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα).

Η χρήση ζωντανών οργανισμών για την αποκατάσταση ρυπασμένου νερού (bio-remediation) έχει επικεντρωθεί στην παγκόσμια έρευνα για το νερό, με στόχο την ανάπτυξη ενός περιβάλλοντος με τεχνολογία που χρησιμοποιεί βιολογικούς παράγοντες που παράγουν λιγότερα ή και καθόλου επιβλαβή υποπροϊόντα.

Η βιολογική αποκατάσταση του NO_3^- και άλλων ρύπων με βάση το άζωτο (N) έχει αποδειχθεί ότι παράγει N_2, το οποίο είναι φιλικό προς το περιβάλλον υποπροϊόν που ανακυκλώνεται πίσω στην ατμόσφαιρα. Έχει αποδειχθεί ότι διαφορετικοί βιολογικοί οργανισμοί, τόσο ευκαρυωτικοί (φυτά, μύκητες και φύκη) όσο και προκαρυωτικοί (βακτήρια και αρχαία), διαθέτουν μεταβολικές οδούς του αζώτου μέσω των οποίων προσλαμβάνουν νιτρικά ιόντα (NO_3^-) από το περιβάλλον και τα μετατρέπουν σε διάφορες αζωτούχες ενώσεις. Η αναγωγή από διαφορετικές βιολογικές οντότητες μπορεί να δώσει διαφορετικά υποπροϊόντα N, όπως NO_2, NH_3, NO, N_2O, και N_2, ανάλογα με τους οργανισμούς και τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η φυτοαποκατάσταση είναι μια από τις τεχνικές της πράσινης χημείας που εφαρμόζεται για την απομάκρυνση διαλυμένων ρύπων που μπορούν να απορροφηθούν από διαφορετικά φυτά σε στάσιμα ή αργής ροής ρεύματα.

Υδρόβια φυτά όπως ο υάκινθος του νερού (*Eichhornia crassipes*), το μαρούλι του νερού (*Pistia stratiotes*) και το σπανάκι του νερού (*Ipomoea aquatica*), τα οποία απαιτούν υψηλές συγκεντρώσεις N, μπορούν να απορροφήσουν έως και 50 mg/L, εξ' ου και η συνιστώμενη καλλιέργειά τους σε χώρους φυτοαποκατάστασης για την απομάκρυνση της νιτρικής ρίζας NO_3^-.

ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΓΡΟΤΟΠΟΙ

Οι βιολογικές μέθοδοι απομάκρυνσης αζώτου από τα υγρά απόβλητα, όπως η τροποποιημένη διεργασία της ενεργού ιλύος, οι οποίες βασίζονται στη δράση εξειδικευμένων μικροοργανισμών που μετασχηματίζουν τις αζωτούχες ενώσεις μέσω διεργασιών όπως η νιτροποίηση και η απονιτροποίηση, είναι πολύ πιο φιλικές προς το περιβάλλον και οικονομικά αποδοτικές. Σε αυτή την κατεύθυνση, οι τεχνητοί υγρότοποι (ΤΥ) αποτελούν μια εναλλακτική λύση στις συμβατικές επεξεργασίες για την απομάκρυνση αζώτου και οργανικής ύλης.

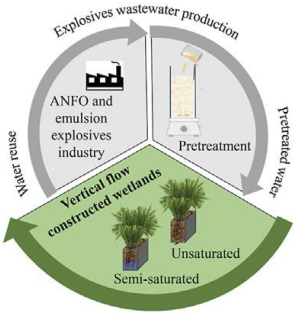
Στους ΤΥ, μπορούν να εμφανιστούν μηχανισμοί απομάκρυνσης και μετασχηματισμού, όπως διήθηση, καθίζηση, προσρόφηση, χημική καθίζηση, εξάτμιση, βακτηριακός μεταβολισμός (π.χ. απονιτροποίηση) και φυτοαποκατάσταση (φυτοεκχύλιση, φυτοαποικοδόμηση, φυτοσταθεροποίηση, φυτοεξάτμιση, ριζοαποικοδόμηση και ριζοδιήθηση).

Η απομάκρυνση των αζωτούχων ενώσεων (αμμωνιακού και νιτρικού αζώτου) στα τεχνητά υγροτοπικά συστήματα (ΤΥ) εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το υδρολογικό καθεστώς και το υπόστρωμα πλήρωσης, ο σχεδιασμός και η διαμόρφωση του συστήματος, το βάθος της κλίνης, καθώς και οι εφαρμοζόμενες λειτουργικές παράμετροι. Στις τελευταίες περιλαμβάνονται το υδραυλικό φορτίο (HL), τα οργανικά και αζωτούχα φορτία, ο λόγος άνθρακα προς άζωτο (C/N), το καθεστώς τροφοδοσίας και η στάθμη κατάκλυσης της κλίνης. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι κλιματικές συνθήκες, και ιδιαίτερα η θερμοκρασία. Μικρής κλίμακας τεχνητοί υγρότοποι επιφανειακής ροής (Free Water Surface – FWS), φυτεμένοι με το είδος *Typha angustifolia* (στενόφυλλη ψαθιά), χρησιμοποιήθηκαν για την αποκατάσταση επιφανειακών και υπόγειων υδάτων που είχαν ρυπανθεί από εκρηκτικές ουσίες. Η εφαρμογή πραγματοποιήθηκε στο εργοστάσιο πυρομαχικών του Στρατού στο Τενεσί των ΗΠΑ, όπου γινόταν παραγωγή εκρηκτικών κατά την περίοδο 1942–

1978 (Vymazal, 2014). Οι υγρότοποι ήταν αρκετά αποτελεσματικοί και η απομάκρυνση TNT (2,4,6-τρινιτροτολουόλιο), 2,4DNT (2,4-δινιτροτολουόλιο) και 2,6DNT (2,6-δινιτροτολουόλιο) ανήλθε σε 79%, 58% και 61%, αντίστοιχα. Η απόδοση απομάκρυνσης ήταν σημαντικά υψηλότερη σε σύγκριση με τις μη φυτεμένες μονάδες στις οποίες οι αντίστοιχες αποδόσεις απομάκρυνσης ήταν μόνο 57%, 3% και 53%.

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΜΕΘΟΔΩΝ

Οι δραστικές χημικές ενώσεις, λόγω της χημικής τους σταθερότητας και της ανθεκτικότητάς τους στη φυσική και βιολογική αποδόμηση, μπορούν να παραμένουν στο περιβάλλον για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Οι συμβατικές μέθοδοι επεξεργασίας, είτε φυσικές είτε χημικές είτε βιολογικές, παρουσιάζουν περιορισμένη αποτελεσματικότητα όταν εφαρμόζονται μεμονωμένα, καθώς δεν διασφαλίζουν την πλήρη απομάκρυνση ή αποδόμηση των συγκεκριμένων ρύπων. Η αποτελεσματική επεξεργασία μπορεί να επιτευχθεί μόνο με την ενσωμάτωση δύο ή περισσότερων μεθόδων επεξεργασίας.
Οι φυσικές μέθοδοι επεξεργασίας, όπως η αντίστροφη ώσμωση, η διήθηση και η προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα, είναι σκόπιμο να συνδυάζονται με βιολογικές διεργασίες επεξεργασίας. Ο συνδυασμός αυτός αποσκοπεί στον περιορισμό της μεταφοράς των ρύπων από τη μία φάση στην άλλη, στη διασφάλιση της αποδόμησης και, όπου είναι εφικτό, της πλήρους καταστροφής τους, καθώς και στην ανάπτυξη μιας οικονομικά αποδοτικής λύσης επεξεργασίας.
Οι διεργασίες Photo-Fenton και Electro-Fenton μπορούν να εφαρμοστούν για την επεξεργασία όξινων υγρών αποβλήτων, όπως εκείνων που ενδέχεται να προκύπτουν από τη βιομηχανία παραγωγής πυρομαχικών, καθώς λειτουργούν αποτελεσματικά υπό συνθήκες χαμηλού pH. Το όξινο περιβάλλον (χαμηλό pH) ευνοεί τη λειτουργία των διεργασιών Fenton, συμβάλλοντας στη βελτιστοποίηση των αντιδράσεων μεταξύ των αντιδραστηρίων και, κατά συνέπεια, στην αποτελεσματική παραγωγή ριζών υδροξυλίου (•OH), οι οποίες αποτελούν ισχυρά οξειδωτικά μέσα. Όπως προκύπτει από τη σχετική βιβλιογραφία, οι συγκεκριμένες διεργασίες συμβάλλουν στη σημαντική μείωση του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD) και του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD), ενώ παράλληλα ενισχύουν τη βιοδιασπασιμότητα των υγρών αποβλήτων.



Υγρότοπος ως πράσινη λύση για χαμηλά βιοαποδομήσιμα και υψηλής περιεκτικότητας σε άζωτο λύματα (Luís Madeira et. al., 2021).

Η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου και αποτελεσματικού συστήματος διαχείρισης πρέπει να έχει ως θεμελιώδεις στόχους:

1. τη διασφάλιση της παραγωγής,
2. την ανάκτηση/ανακύκλωση σε ικανό ποσοστό για την επαναχρησιμοποίηση των αποβλήτων ως δευτερογενείς πρώτες ύλες, και
3. την ασφαλή διάθεση των αποβλήτων για όσα δεν είναι εφικτό να αξιοποιηθούν.

Κατά τη βιομηχανική παραγωγή εμπορικών εκρηκτικών παράγονται σχετικά μικρές ποσότητες υγρών αποβλήτων, σε αντίθεση με τη φάση της χρήσης τους, κατά την οποία προκύπτουν μεγαλύτερες ποσότητες υγρών αποβλήτων.
Τα λύματα από τις διεργασίες μπορεί να περιέχουν αμμωνία και νιτρικά άλατα, τα οποία είναι ρύποι που μπορούν να ρυπάνουν τα επιφανειακά και τα υπόγεια ύδατα εάν δεν διαχειρίζονται σωστά.
Η εφαρμογή συστημάτων τεχνητών υγροτόπων για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, τα οποία τα καθιστούν ανταγωνιστική και βιώσιμη λύση σε σύγκριση με άλλες φυσικές τεχνολογίες επεξεργασίας:

i. Ελαχιστοποίηση απαίτησης χρήσης μηχανολογικού εξοπλισμού
ii. Απλότητα λειτουργίας
iii. Μικρή απαίτηση συντήρησης
iv. Ελάχιστη ως μηδενική απαίτηση ενέργειας
v. Σημαντική μείωση της ποσότητας της παραγόμενης λάσπης.

Στο πλαίσιο αυτό, προτείνεται μια υβριδική μέθοδος επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, η οποία αξιοποιεί τις συνέργειες μεταξύ φυσικών διεργασιών (καθίζηση και διαχωρισμός) και χημικών διεργασιών οξείδωσης, όπως η διεργασία Fenton, με στόχο την αποτελεσματικότερη απομάκρυνση των οργανικών ενώσεων. Η εφαρμογή χημικών διεργασιών οξείδωσης αποσκοπεί στη διάσπαση των τοξικών οργανικών ενώσεων και στη μετατροπή τους σε απλούστερα και λιγότερο επιβλαβή προϊόντα, όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το νερό (H_2O) και ανόργανα ιόντα.

V. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

Α. Γενικά Στοιχεία

Η μελέτη περίπτωσης αφορά γενικά τις αμυντικές χημικές βιομηχανίες, με αναφορές στην εγκατάσταση του συγκροτήματος εργοστασίου Λαυρίου (ΣΕΛ).
Το Λαύριο είναι κωμόπολη, έδρα του δήμου Λαυρεωτικής, της περιφέρειας Αττικής, με πληθυσμό 9.611 κατοίκους (απογραφή 2011). Βρίσκεται σε υψόμετρο 10m, στα νοτιοανατολικά παράλια της Λαυρεωτικής χερσονήσου, στον μυχό του λιμανιού του Λαυρίου, απέναντι από τη Μακρόνησο. Το λιμάνι του Λαυρίου, με μικρή εμπορική αλλά μεγάλη τουριστική κίνηση, χρησιμοποιείται κατά την τελευταία εικοσαετία κυρίως για την αποσυμφόρηση του λιμένα του Πειραιά στις επιβατικές συγκοινωνίες με τα γειτονικά νησιά των Κυκλάδων. Στην ενδοχώρα της Λαυρεωτικής δυτικά της πόλης του Λαυρίου, από την Πλάκα μέχρι το Σούνιο και τα Λεγρενά εκτείνεται ο Εθνικός Δρυμός Σουνίου, ο οποίος έχει έκταση 35.000 στρέμματα από τα οποία τα 7.500 αποτελούν τον πυρήνα του.
Η βλάστηση της περιοχής χαρακτηρίζεται κυρίως από είδη της μεσογειακής μακίας και των πευκοδασών, όπως η χαλέπιος πεύκη (*Pinus halepensis*), το πουρνάρι (*Quercus*

coccifera), η κουμαριά (*Arbutus unedo*), το σχίνο (*Pistacia lentiscus*), το ρείκι (*Erica spp.*), η κοκορεβυθιά (*Pistacia terebinthus*) και ο κυπαρισσοκέδρος (*Juniperus spp.*). Επίσης πάρα πολλά μικρά φυτά και αρκετά αγριολούλουδα από τα οποία ένα ενδημικό και αρκετά σπάνια. Η πανίδα της περιοχής αποτελείται κυρίως από αλεπούδες, γεράκια, λαγούς, τσαλαπετεινούς, κοράκια, κορυδαλλούς και κουκουβάγιες.
Το ΣΕΛ της ΕΑΣ ΑΒΕΕ εκτείνεται σε μια δασώδη πευκόφυτη περιοχή 3.500 στρεμμάτων στα δυτικά της πόλης του Λαυρίου και στα όρια του εθνικού δρυμού του Σουνίου. Στην περιοχή αυτή εντοπίζονται σημαντικά αρχαιολογικά ευρήματα αρχαίων μεταλλείων της κλασικής εποχής, όπως και άλλα ίχνη της αρχαίας τεχνολογίας κατεργασίας των μεταλλικών ορυκτών («πλυντήρια»), αρχαίοι τάφοι, κλπ.

Το ΕΑΣ/ΣΕΛ είναι πιστοποιημένο κατά EN ISO 9001:2015 για τις εξής δραστηριότητες:

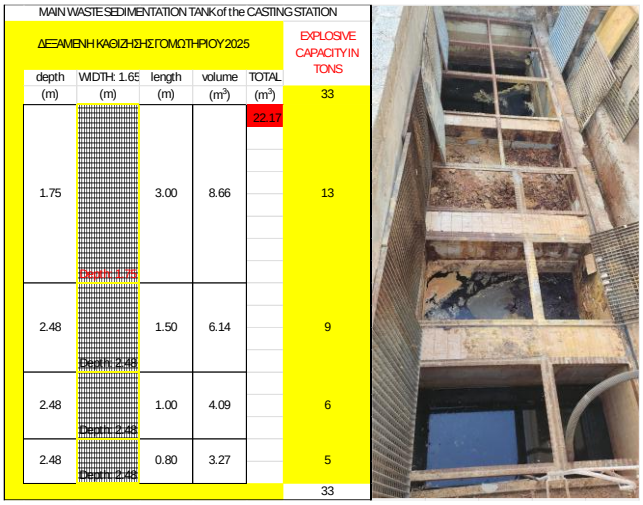
1. Παραγωγή και συντήρηση πυραυλικών συστημάτων μικρού και μεσαίου βεληνεκούς.
2. Σχεδιασμός και παραγωγή πυρίτιδων, προωθητικών γεμισμάτων, πυρομαχικών μικρών, μεσαίων και μεγάλων διαμετρημάτων, ρουκετών, εκρηκτικών κεφαλών πυραύλων.

Οι παραπάνω γραμμές παραγωγής υποστηρίζονται από εξειδικευμένο προσωπικό συντήρησης για τις ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις και από κατάλληλα μεταφορικά μέσα (φορτηγά, περονοφόρα ανυψωτικά μηχανήματα, κλπ.), για τη διακίνηση τόσο των πρώτων υλών, όσο και των έτοιμων προϊόντων.

Β. Υφιστάμενη Διαχείριση Υγρών Αποβλήτων

Η λογική με την οποία αντιμετωπίστηκε το πρόβλημα της διαχείρισης των υγρών αποβλήτων της μονάδας του γομωτηρίου κατά την εποχή της κατασκευής της μονάδας (1981-1982) προέβλεπε την καθίζηση των αδιάλυτων ποσοτήτων εκρηκτικής ύλης στον πυθμένα των δεξαμενών και τη διάθεση των υπερκείμενων υγρών σε φυσικούς αποδέκτες εντός των ορίων του συγκροτήματος, χωρίς κάποια άλλη περαιτέρω επεξεργασία, δεδομένου ότι:

1. καλύπτουν τις απαιτήσεις της περιβαλλοντικής νομοθεσίας όσον αφορά τους δείκτες BOD, COD, ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS), pH, χρώμα, κλπ, των βιομηχανικών υγρών αποβλήτων,
2. η περιεκτικότητά τους σε εκρηκτικές και τοξικές ουσίες κρινόταν ως αμελητέα και ως μη επιβαρύνουσα το φυσικό και ανθρώπινο περιβάλλον.



Βασική Δεξαμενή απορροής αποβλήτων κύριας διεργασίας (Πηγή: ΕΑΣ ΑΒΕΕ).

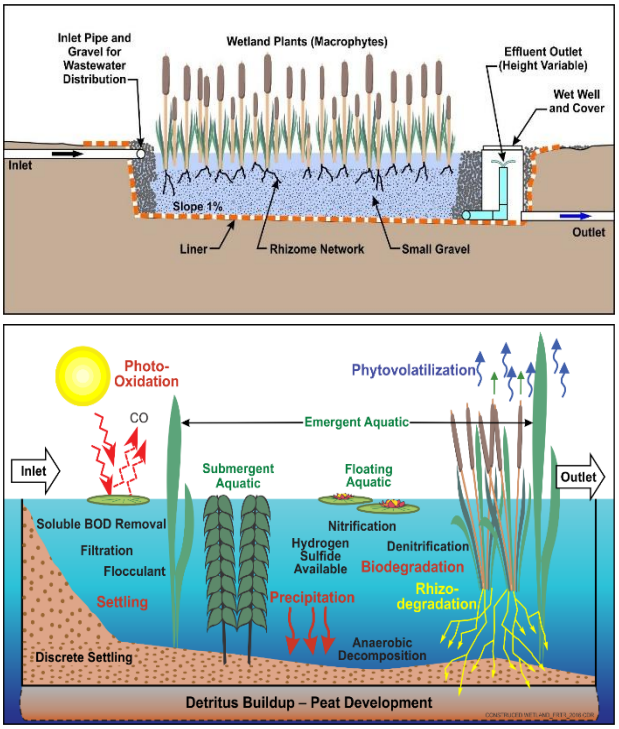
Ο ανωτέρω τρόπος χειρισμού – διάθεσης των αποβλήτων γομωτηρίου δεν είναι πλέον επαρκής γιατί γενικά, τα υγρά απόβλητα των εγκαταστάσεων δραστηριότητας “LAP”, ακόμα και μετά από την καθίζηση των μικροποσοτήτων εκρηκτικών ή άλλων επικίνδυνων ουσιών εξακολουθούν να περιέχουν ίχνη αυτών των ουσιών σε περιεκτικότητες που κυμαίνονται από τα 50 ppm (50 mg/lt λυμάτων) έως τα 300 ppm (0,3 g/lt λυμάτων).
Σύμφωνα με τις σχετικές αναλύσεις δειγμάτων των αποβλήτων αυτών από το Χημείο του ΣΕΛ, τα διαλυτά σε ακετόνη οργανικά συστατικά των λυμάτων των δεξαμενών του γομωτηρίου (κατά τεκμήριο TNT) είναι της τάξεως των 100 mg/lt.
Τα δεδομένα αυτά συμφωνούν και με τα στοιχεία της βιβλιογραφίας που ορίζουν τη διαλυτότητα του TNT στο νερό να κυμαίνεται στα όρια των 120 – 200 mg/lt.
Οι συγκεκριμένες συγκεντρώσεις θεωρούνται ιδιαίτερα υψηλές και ενδέχεται να προκαλέσουν σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως ρύπανση του εδάφους και των φυσικών υδάτινων αποδεκτών. Για τον λόγο αυτό, η ανεξέλεγκτη διάθεση των συγκεκριμένων αποβλήτων στο φυσικό περιβάλλον δεν επιτρέπεται και καθίσταται απαραίτητη η προηγούμενη κατάλληλη επεξεργασία τους.

Γ. Πρόταση Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων

Οι δεξαμενές καθίζησης αποτελούν τον κύριο τρόπο διαχείρισης υγρών αποβλήτων.


Τυπική τσιμεντένια δεξαμενή καθίζησης υγρών αποβλήτων (ΕΑΣ-ΑΒΕΕ-ΣΕΛ, 2019).

Μια εναλλακτική προσέγγιση για την ολοκληρωμένη διαχείριση των συγκεκριμένων αποβλήτων είναι η εφαρμογή ενός υβριδικού συστήματος τεχνητού υγροτόπου, στο οποίο θα διοχετεύονται τα υγρά απόβλητα που προκύπτουν από τις παραγωγικές διεργασίες ενός γομωτηρίου ή/και μιας μονάδας παραγωγής εκρηκτικών υλών. Το προτεινόμενο σύστημα θα συνδυάζει χημικές διεργασίες οξειδοαναγωγής, με στόχο τη μετατροπή των τοξικών οργανικών ενώσεων σε λιγότερο επιβλαβή και περισσότερο βιοαποδομήσιμα προϊόντα, με επακόλουθα στάδια βιολογικής επεξεργασίας, κατά τα οποία θα επιτυγχάνεται η περαιτέρω αποδόμησή τους μέσω της μικροβιακής και ενζυμικής δραστηριότητας.



Σχηματική αναπαράσταση Τεχνητών Υγροτόπων για βιομηχανίες (Luís Madeira et. al., 2021)

Στα μειονεκτήματα της πρότασης συγκαταλέγονται:

1. Κόστος κατασκευής τεχνητού υγροτόπου
2. Κόστος αναλωσίμων χημικών
3. Συντήρηση του εξοπλισμού

Στα πλεονεκτήματα συμπεριλαμβάνονται:

1. Μόνιμη λύση διαχείρισης επικίνδυνων αποβλήτων
2. Διαχείριση μεγάλου όγκου υγρών αποβλήτων
3. Αύξηση της παραγωγικότητας της μονάδας
4. Προστασία του περιβάλλοντος, της υγείας και ασφάλειας των εργαζομένων
5. Αυτονομία και αποφυγή δαπανών προς τρίτο μέρος για την περιβαλλοντική διαχείριση
6. Συμμόρφωση με την κείμενη νομοθεσία

Δ. Εφαρμογή Περίπτωσης

Η τοποθεσία Werk Tanne είναι ένα πρώην εργοστάσιο εκρηκτικών όπου παράγονταν εκρηκτικά (κυρίως TNT) κατά τη διάρκεια του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου στη Γερμανία (Leibniz University Hanover, 2020).

Το σύστημα αποτελείται από μια λεκάνη συγκράτησης όμβριων υδάτων (15.000 m^3), μια λεκάνη αντίδρασης με σιδηρούχο χαλίκι (36 m^3) με δοσολογία μελάσας, τον τεχνητό υγρότοπο (3.630 m^2), μια λεκάνη καθίζησης (229 m^2) και έναν καταρράκτη καθαρού νερού στην εκροή, ο οποίος τέθηκε σε δοκιμαστική λειτουργία στα τέλη του 2020. Τα ρυπασμένα στραγγίσματα συλλέγονται και προστίθενται στη λεκάνη συγκράτησης όμβριων υδάτων με όγκο 15.000 m^3.

Δημιουργείται υπόγεια οριζόντια ροή. Υπάρχει λεκάνη συγκράτησης ανάντη και λεκάνη αντίδρασης με δοσολογία σιδηρούχου χαλικιού και μελάσας. Η αποικοδόμηση των ρυπαντών σε ολόκληρη τη μονάδα επεξεργασίας εκτιμάται σε περίπου 98%. Η μονάδα τέθηκε σε δοκιμαστική λειτουργία στα τέλη του 2020. Η κατασκευή μιας δεύτερης, πανομοιότυπης μονάδας το 2023 διπλασίασε τη δυναμικότητα καθαρισμού σε 18 m^3/h. Η ροή του νερού καθοδηγείται αποκλειστικά από τη βαρύτητα και προστίθεται μόνο μελάσα μέσω αντλίας, έτσι ώστε το λειτουργικό κόστος να είναι σχετικά χαμηλό.



WERK TANNE ΥΓΡΟΤΟΠΟΙ ΣΕ ΠΡΩΗΝ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ ΕΚΡΗΚΤΙΚΩΝ (Leibniz University Hanover, 2020) σε 687 στρέμματα.

VI. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

-1. Η ρύπανση από εκρηκτικά είναι ευρέως διαδεδομένη σε όλες σχεδόν τις ηπείρους του πλανήτη

Η ανθρώπινη επίδραση έχει προκαλέσει σημαντικές επιβαρύνσεις με τη χρήση των εκρηκτικών σε μια σειρά από δραστηριότητες, κατασκευαστικών και μεταποιητικών βιομηχανιών, στρατιωτικών επιχειρήσεων, δραστηριοτήτων εκπαίδευσης των ενόπλων δυνάμεων, απόρριψης πυρομαχικών, κλπ..

Προκαλούν σοβαρή ανησυχία για το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία, καθώς παράγονται και χρησιμοποιούνται σε σημαντικές ποσότητες.

-2. Οι εκρηκτικές ύλες που έχουν νιτροομάδες (-NO_2) αποτελούν τις κυρίαρχες χημικές ενώσεις.

DNT, TNT, NG, PETN, RDX, HMX.

Το νιτρικό αμμώνιο (NH_4NO_3) είναι ένα ισχυρό οξειδωτικό ικανό να υποστηρίξει την καύση και χρησιμοποιείται περισσότερο, στην παραγωγή εκρηκτικών μιγμάτων.

Η χρήση των εκρηκτικών υλών περιλαμβάνει διαδικασίες οι οποίες συντελούν στη ρύπανση του περιβάλλοντος με υψηλές ποσότητες νιτρικών ενώσεων, ανόργανων νιτρικών και νιτρωδών αλλά και νιτρο-οργανικών, η τοξικότητα των οποίων είναι δεδομένη και υψηλή.

Τοξικότητα μπορεί να εμφανίζουν όχι μόνο τα απόβλητα των πρώτων υλών των εκρηκτικών αλλά και τα προϊόντα της

αποσύνθεσής τους. Αρωματικές αμίνες, οι αρωματικές υδροξυλαμίνες και τα προϊόντα συμπύκνωσης όπως αζω- ή αζωξυ-ενώσεις, είναι εξίσου ή και περισσότερα τοξικά από τις αρχικές νιτροαρωματικές ενώσεις.

-3. Οι εκρηκτικές ύλες αποικοδομούνται με βιολογικές, χημικές και αβιοτικές διεργασίες.

Το TNT είναι εξαιρετικά ανθεκτικό στην αποικοδόμηση από βιολογικές διεργασίες και μετατρέπεται σε άμινο παράγωγα, αλλά όχι ανοργανοποιημένα. Αντίθετα, τα RDX και HMX βιομετασχηματίζονται σε ενδιάμεσα, τα οποία μπορούν να υποβαθμιστούν και να αδρανοποιηθούν περαιτέρω. Διεργασίες χημικής και αβιοτικής αποικοδόμησης είναι η υδρόλυση, η φωτόλυση, η χημική αναγωγή και οι διεργασίες οξείδωσης. Η φωτολυτική αποικοδόμηση είναι σημαντικός μηχανισμός μετασχηματισμού στο περιβάλλον, ενώ η υδρόλυση δεν είναι σημαντική διαδικασία υπό περιβαλλοντικές συνθήκες για οποιαδήποτε από τις εξεταζόμενες ενώσεις.
Αβιοτικές διαδικασίες μείωσης είναι παρόμοιες με τη βιολογική αναγωγή. Το TNT ανάγεται σε αμινοπαράγωγα και το RDX σε τριαζίνες, αλλά η αβιοτική μείωση δεν είναι σημαντική για το HMX. Η αβιοτική οξείδωση είναι σχετική για το TNT, το RDX είναι πιο ανθεκτικό και το HMX δεν αποικοδομείται στις διαδικασίες οξείδωσης.
Η διαλυτότητα και η προσρόφηση είναι τα πιο σημαντικά φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη μετανάστευση των εκρηκτικών. Ωστόσο, ενώ η διαλυτότητα των καθαρών ενώσεων είναι απλή, η διάλυση εκρηκτικών από στερεά σωματίδια είναι πιο σύνθετη υπό περιβαλλοντικές συνθήκες.
Οι ιδιότητες προσρόφησης παραμένουν ακόμη πιο αβέβαιες παρά τις εκτεταμένες έρευνες για το θέμα.
Οι εκρηκτικές ενώσεις TNT, RDX και HMX έχουν ανιχνευθεί σε υπόγεια ύδατα, με το RDX να αποτελεί τη συχνότερα ανιχνευόμενη ένωση.

-4. Τα εκρηκτικά είναι σταθερά στα υπόγεια ύδατα και μπορεί να παραμείνουν ως ρυπαντές για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Διάφορες μέθοδοι χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση των αποβλήτων των εκρηκτικών υλών όπως είναι η προσρόφηση, οι προχωρημένες διεργασίες οξείδωσης (AOP), η χημική αναγωγή, και η μικροβιακή βιοαποδόμηση. Η καύση αποτελεί επίσης μέθοδο αποκατάστασης των ρυπασμένων εδαφών. Άλλες μέθοδοι είναι η μέθοδος ιλύος και η φυτοεξυγίανση. Ενδιαφέρον έχουν κερδίσει οι βιολογικές μέθοδοι αποκατάστασης λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν, όπως το σχετικά χαμηλό τους κόστος και η απλή στην πράξη εφαρμογή τους. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν προσελκύσει οι μέθοδοι κατά τις οποίες, κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες, υπό τη δράση μικροοργανισμών, τα οργανικά απόβλητα αποικοδομούνται προς μη-τοξικά προϊόντα.

-5. Οι υγρότοποι είναι αρκετά αποτελεσματικοί στην απομάκρυνση TNT και γενικά νιτροπαραγώγων.

Καθώς οι δυνατότητες για λύσεις που βασίζονται στη φύση, όπως οι τεχνητοί υγρότοποι, διευρύνονται, η ζήτηση αυξάνεται. Όλο και περισσότερα υπάρχοντα/συμβατικά συστήματα επεξεργασίας νερού συγκρίνονται με βιολογικές επεξεργασίες, με αποτέλεσμα τη στροφή σε επιλογές που βασίζονται περισσότερο στη φύση για την επεξεργασία λυμάτων ή ρυπασμένου/μολυσμένου νερού. Η ζήτηση αυξάνεται τόσο στις αστικές όσο και στις γεωργικές περιοχές. Σε αστικά έργα, οι τεχνητοί υγρότοποι χρησιμοποιούνται για την τοπική επεξεργασία γκρίζων υδάτων, ενώ σε γεωργικά περιβάλλοντα χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των απορροών από μια περιοχή.
Οι τεχνητοί υγρότοποι είναι σε θέση να προσφέρουν μια αποτελεσματική, οικονομικά προσιτή λύση που έχει μικρότερο αντίκτυπο στο περιβάλλον, καθιστώντας τους μια ελκυστική λύση αποκατάστασης. Για αυτούς τους λόγους, θα συνεχίσει να καταγράφεται η χρήση των τεχνητών υγροτόπων με αυξητικές τάσεις, αντικαθιστώντας ορισμένες από τις υπάρχουσες συμβατικές λύσεις επεξεργασίας νερού.

-6. Στην Ελλάδα, η παρασκευή εκρηκτικών περιορίζεται κυρίως στην παραγωγή εκρηκτικών μιγμάτων, τα οποία προκύπτουν κατά βάση με ανάμιξη των πρώτων υλών.

Το διεθνές εμπόριο αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένων και των αποβλήτων (στερεών και υγρών) των εκρηκτικών, έχει παρουσιάσει σημαντική αύξηση κατά τις τελευταίες δεκαετίες.
Η παγκόσμια μεταφορά αποβλήτων μπορεί να ωφελήσει την επαναχρησιμοποίηση των υλικών και τη διατήρηση φυσικών πόρων, αρκεί να γίνεται με διαφάνεια, κατάλληλο έλεγχο και περιβαλλοντικά βιώσιμες πρακτικές.

-7. Η επιλογή για την εφαρμογή μιας τεχνολογίας επεξεργασίας αποβλήτων ή μιας τεχνολογίας αποκατάστασης ρυπασμένων χώρων, συνδέεται στενά με τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων, αλλά και της θέσης για την οποία προορίζεται.

Η κοινοτική νομοθεσία επί του θέματος είναι ιδιαιτέρως αυστηρή και η συμμόρφωση αναπόφευκτη. Η ενδελεχής μελέτη των τεχνολογιών που μπορούν να εφαρμοστούν στις συγκεκριμένες περιοχές στις οποίες απαντάται το πρόβλημα, έχει πρακτικό ενδιαφέρον πέραν του επιστημονικού, και θα μπορούσε να αποτελέσει το επόμενο βήμα της μελέτης που επιχειρήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.
Οι ευρέως χρησιμοποιούμενες εκρηκτικές ενώσεις παρουσιάζουν υψηλή τοξικότητα για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Παράλληλα, πολλά από τα προϊόντα αποδόμησής τους, καθώς και συναφείς χημικές ουσίες, εμφανίζουν εξίσου επιβαρυμένο τοξικολογικό προφίλ, με επιπτώσεις αντίστοιχου μεγέθους με εκείνες των αρχικών ενώσεων.
Η τοξικότητα των προϊόντων αποικοδόμησης που σχηματίζονται με διαφορετικές μεθόδους αποδόμησης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον σχεδιασμό της αποκατάστασης.
Οι τύποι υπολειμμάτων από τα εκρηκτικά και οι συγκεντρώσεις και οι κατανομές τους ποικίλλουν ανάλογα με διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των περιβαλλοντικών και φυσικών εδαφικών παραγόντων, όπως η τοπογραφία, η κατάσταση του εδάφους, τα υδάτινα σώματα κ.λπ., καθώς και ο τύπος και το εύρος των χρησιμοποιούμενων πυρομαχικών.
Τα εκρηκτικά υφίστανται φυσικούς μετασχηματισμούς, συμπεριλαμβανομένων των μικροβιακών υποβαθμίσεων. Ωστόσο, πολλά προϊόντα αποσύνθεσης (π.χ. DNT, αμινο-DNT) είναι επίσης επικίνδυνα για το περιβάλλον.
Τα χαρακτηριστικά του εδάφους για την εφαρμογή της εξυγίανσης των ρύπων είναι μια άλλη σημαντική πτυχή για

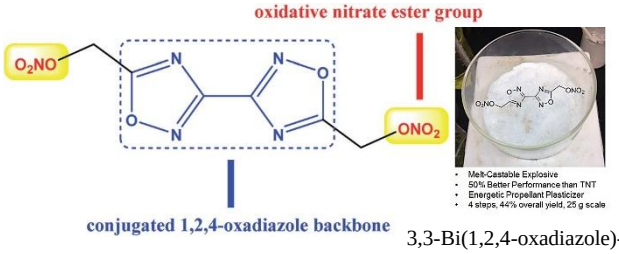
αποτελεσματικό και εκτεταμένο καθαρισμό.

-8. Ο συνδυασμός διεργασιών βιοαποδόμησης (biodegradation) και βιοεξυγίανσης (bioremediation) αποτελεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την απομάκρυνση ή/και την αποδόμηση των ρύπων και την αποκατάσταση περιβαλλοντικά επιβαρυμένων περιοχών

Παρότι η επιλογή των κατάλληλων φυσικών μικροοργανισμών απαιτεί εκτενή βιβλιογραφική διερεύνηση και αξιοποίηση εξειδικευμένων βάσεων δεδομένων, ιδιαίτερη σημασία έχει επίσης η κατανόηση του οικολογικού τους ρόλου και της συμβολής τους στις διεργασίες αποδόμησης των ρύπων. Παράλληλα, η επιλογή των κατάλληλων φυτικών ειδών αποτελεί έναν ακόμη σημαντικό παράγοντα που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Τα φυτά έχουν την εγγενή δυνατότητα να βιομετασχηματίζουν ή/και να απομονώνουν τα ξενοβιοτικά.

-9. Μια νέα χημική ένωση μπορεί να αποτελέσει κατάλληλη αντικατάσταση του TNT και να επιλύσει προβλήματα ρύπανσης και τοξικότητας.

Το νέο μόριο, γνωστό ως BOM ($C_6H_4N_6O_8$) και βασισμένο στη δομή του δις-οξαδιαζολίου, χαρακτηρίζεται από υψηλή ενεργειακή απόδοση, ανώτερη από εκείνη του TNT, και χαμηλή ευαισθησία σε εξωτερικά ερεθίσματα που μπορούν να προκαλέσουν έκρηξη. Επιπλέον, εμφανίζει μειωμένη τοξικότητα και ευνοϊκότερο περιβαλλοντικό προφίλ. Μια νέα χημική ένωση που ανακαλύφθηκε από το Εργαστήριο Λος Άλαμος σε συνεργασία με το Ερευνητικό Εργαστήριο του Αμερικανικού Στρατού, υπόσχεται να αντικαταστήσει άμεσα το TNT με τη είσοδό του σε μαζική παραγωγή.



3,3-Bi(1,2,4-oxadiazole)-5,5-diylbis(methylene) dinitrate (BOM)

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Kalavrouziotis I. K., "Wastewater and Biosolids Management", 3rd edition, ISBN: 978-1-78906-515-2

Xiong Yang et. al. (2020). A promising TNT alternative 3,3-bi(1,2,4-oxadiazole)-5,5-diylbis(methylene) dinitrate (BOM) thermal behaviors and eutectic characteristics. The Royal Society of Chemistry, p. 8.

Joanna Aalto (2016). MANAGEMENT OF THE GROUNDWATER CONTAMINATED BY MILITARY EXPLOSIVES. Tampere University of Technology, Finland - Master of Science thesis.

Luís Madeira et. al. (2021). Vertical flow constructed wetland as a green solution for low biodegradable and high nitrogen wastewater: A case study of explosives industry. Chemosphere, p. 10.

Leibniz University Hanover. (2020). https://data.cwetlandsdata.com/. Clausthal-Zellerfeld.

Alexandros Stefanakis et. al. (2014). Vertical Flow Constructed Wetlands, Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment. Elsevier Science.

Jan Vymazal. (2014). Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A Review. Ecological Engineering, p. 28.

STATISTA.(2024).*www.statista.com* https://www.statista.com/statistics/1293809

Tamara Pócsová et. al. (2026). Current Trends in Analytical Methods for Determination of Explosives in Water. Water Air Soil Pollut, p. 38.

W. Jabez Osborne et. al. (2026). Comprehensive review on deciphering the biodegradation of nitramine explosives RDX and HMX: An insight on the mechanisms, pathways and environmental implication. Journal of Hazardous Materials Advances, p. 18.