



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Διπλωματική Εργασία

«Διαχείριση υγρών αποβλήτων από βιομηχανική μονάδα
παραγωγής εκρηκτικών υλών»

ΚΟΚΛΑΣ ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ

Α.Μ. : 147208

Τελική ΜΔΕ

Επιβλέπων Καθηγητής (Α): **ΚΑΛΑΒΡΟΥΖΙΩΤΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**

Επιβλέπων Καθηγητής (Β): **ΚΑΡΑΠΑΝΑΓΙΩΤΗ ΧΡΥΣΗ ΚΑΣΣΙΑΝΗ**

ΕΑΠ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



Ευχαριστίες & Αφιέρωση

Η παρούσα διπλωματική εργασία δεν είχε στόχο την απόκτηση ενός ακόμη τίτλου σπουδών ή ενός εφοδίου για μια προσωπική επαγγελματική καταξίωση ή άλλο οικονομικό όφελος.

Εν τούτοις, το συγκεκριμένο πόνημα έλαβε το ενδιαφέρον και τη φροντίδα του συγγραφέα γιατί αφενός ενσαρκώνει την αέναη πίστη ότι ο άνθρωπος συνεχίζει να μαθαίνει όσο ζει, και αφετέρου επιβεβαιώνει ότι αποτελεί κόκκο άμμου στην απεραντοσύνη των γνώσεων που ο άνθρωπος έχει κατακτήσει στην προσπάθειά του να βελτιώσει τη θέση του στον κόσμο και στην ιστορία.

Βασικό σε τούτη την τεράστια εξέλιξη είναι να ακολουθούνται οι θεμελιώδεις αρχές και αξίες που μας καταξιώνουν σαν ανθρώπινο είδος, γιατί διαφορετικά, η δύναμη της γνώσης και τα θαύματα της τεχνολογίας μπορεί να αποβούν μοιραία για το μέλλον της ανθρωπότητας.

Στο όμορφο ταξίδι της προσωπικής μου «Ιθάκης» θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές του ΕΑΠ για την επιστημονική συμβολή και βοήθειά τους, την οικογένειά μου που με στήριξε σε αυτή την πολυετή διαδρομή και το Θεό που μου επέτρεψε να ζήσω μια ακόμη δημιουργική και διδακτική ενασχόληση.

Στην Νάνσυ, την Δήμητρα και τον Νικόλα



Περίληψη

Το νερό είναι ένας από τους ζωτικούς φυσικούς πόρους. Είναι απαραίτητο για τη διατήρηση της ζωής στο ζωικό και φυτικό κόσμο. Παίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της ισορροπίας στο οικοσύστημα. Η ρύπανση των υδάτων αποτελεί μια σημαντική απειλή που αντιμετωπίζει ο κόσμος. Τα βιομηχανικά απόβλητα αποτελούν την κύρια πηγή περιβαλλοντικής ρύπανσης. Οι βιομηχανίες εκρηκτικών υλών και προϊόντων αυτών απελευθερώνουν τεράστιες ποσότητες λυμάτων στα υδάτινα σώματα.

Η παραγωγή και η χρήση των εκρηκτικών υλών περιλαμβάνουν διαδικασίες οι οποίες συντελούν στη ρύπανση του περιβάλλοντος με υψηλές ποσότητες νιτρικών ενώσεων, όπως νιτροοργανικών, ανόργανων νιτρικών και νιτρωδών, η τοξικότητα των οποίων είναι παγκοίμως γνωστή. 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.

Στόχος αυτής της ΔΕ είναι να εξετάσει την υποβάθμιση, τα χαρακτηριστικά και τη μετανάστευση των εκρηκτικών, να αναδείξει την τοξικότητα των πρωτογενών ενώσεων και των γνωστών προϊόντων αποδόμησής τους.

Να εξεταστούν οι διαθέσιμες τεχνολογίες αποκατάστασης για μολυσμένους χώρους με εκρηκτικά και να εντοπιστούν οι κατάλληλες τεχνολογίες επεξεργασίας εκρηκτικών σε μολυσμένα ύδατα.

Ο σκοπός είναι 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

«Liquid waste management from an industrial explosives production unit»

KOKLAS EFSTATHIOS

Abstract

Water is one of the vital natural resources.

It is essential for the maintenance of life in the animal and plant world. It plays an important role in maintaining the balance in the ecosystem. Water pollution is a major threat facing the world. Industrial waste is the main source of environmental pollution. The explosives industry releases huge amounts of wastewater into water bodies. The production and use of explosives involve processes that contribute to environmental pollution in high quantities of nitrate compounds, such as organic nitrates, inorganic nitrates and nitrites, the toxicity of which is high and widely known. Relevant waste treatment technology or contaminated site remediation technology is closely linked to the characteristics of waste and the location for which it is intended to serve. The objective of this essay is to examine the degradation, characteristics and migration of explosives, to present their toxicity of primary compounds and their known degradation products.

To examine appropriate remediation technologies for explosives contaminated sites and to identify appropriate technologies for the treatment of explosives in contaminated waters.

The purpose is to evaluate the potential for the use of available synergistic methods in water projects as part of wastewater treatment practices and environmental protection.

Keywords

Explosives, Wastes, Bioremediation, biodegradation, bioremediation, ammunition, constructed wetlands.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες & Αφιέρωση	iii
Περίληψη.....	iv
Abstract	v
Περιεχόμενα	vi
Κατάλογος Εικόνων	vii
Κατάλογος Σχημάτων	vii
Κατάλογος Πινάκων	viii
Κατάλογος Εξισώσεων	ix
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια.....	ix
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Δομή Διπλωματικής Εργασίας	1
1.2 Μεθοδολογία	3
1.3 Περιγραφή στοιχείου καινοτομίας	4
1.4 Ιστορικό και ιδιαιτερότητες των εκρηκτικών υλών	4
1.5 Βιομηχανικές τεχνικές παραγωγής & αποστρατικοποίησης	9
1.6 Κατάσταση βιομηχανικών μονάδων παραγωγής	15
1.7 Κατάσταση βιομηχανικών μονάδων αποστρατικοποίησης.....	21
2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΑΜΥΝΤΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ.....	24
2.1 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά αποβλήτων	25
2.2 Ποσοτικά χαρακτηριστικά αποβλήτων	27
2.3 Σημεία παραγωγής αποβλήτων & Τεχνικές περιορισμού	30
2.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	33
3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ	40
3.1 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά αποβλήτων	41
3.2 Ποσοτικά χαρακτηριστικά αποβλήτων	44
3.3 Σημεία παραγωγής αποβλήτων & Τεχνικές περιορισμού	45
3.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	45
4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΩΝ ΑΜΥΝΤΙΚΟΥ & ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ.....	49
4.1 Μέθοδοι επεξεργασίας	50
4.2 Φυσικοχημικές μέθοδοι.....	51
4.3 Βιολογικές μέθοδοι.....	59
4.4 Τεχνητοί υγρότοποι	64
4.5 Συνδυασμός μεθόδων	67
4.6 Επαναχρησιμοποίηση – αξιοποίηση επεξεργασμένων αποβλήτων	69
4.7 Επιλογή μεθόδου επεξεργασίας.....	70
5 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΠΥΡΟΜΑΧΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΑΜΥΝΤΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ.....	73
5.1 Διαθέσιμες τεχνικές.....	73
5.2 Βασικά χαρακτηριστικά παραγωγής	77
5.3 Βασικά χαρακτηριστικά αποβλήτων	78
5.4 Υφιστάμενη μέθοδος επεξεργασίας	80
5.5 Πρόταση βελτιστοποίησης	84
5.6 Ανάλυση πλεονεκτημάτων-μειονεκτημάτων πρότασης.....	87
6 ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	90
7 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	98
Βιβλιογραφία.....	102

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Μεγαλύτερες αμυντικές βιομηχανίες στην Ευρώπη και παγκοσμίως.....	20
Εικόνα 2, Σχηματική πρόσληψη και απέκκριση TNT από ένα πλατύψαρο.....	38
Εικόνα 3. Ακατέργαστη ιπτάμενη τέφρα από ΑΣΑ.	44
Εικόνα 4. Φωτο SEM (α) ακατέργαστης ΑΣΑ (x50) & (β) επεξεργασμένης ιπτάμενης τέφρας (x200).....	44
Εικόνα 5. Συγκριτική περιβαλλοντική τύχη των εκρηκτικών σε έδαφος και νερό.	47
Εικόνα 6. Πιθανή οδός βιοαποικοδόμησης TNT υπό αερόβιες συνθήκες (JOANNA AALTO, 2016).	63
Εικόνα 7. Πιθανή οδός βιοαποικοδόμησης TNT υπό αναερόβιες συνθήκες (JOANNA AALTO, 2016).....	63
Εικόνα 8. Προτεινόμενος Τεχνητός Υγρότοπος για βιομηχανία αμυντικού τομέα.....	71
Εικόνα 9. Φλοιός Πεύκου.....	86
Εικόνα 10. Σχηματική αναπαράσταση Τεχνητών Υγροτόπων για βιομηχανίες τομές (Luís Madeira et. al., 2021).....	87
Εικόνα 11. WERK TANNE ΥΓΡΟΤΟΠΟΙ ΣΕ ΠΡΩΗΝ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ ΕΚΡΗΚΤΙΚΩΝ (Leibniz University Hanover, 2020) σε 687 στρέμματα.....	88

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. Κατάταξη εκρηκτικών υλών και μιγμάτων.	7
Σχήμα 2. Τα στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος LCA.	9
Σχήμα 3. Διάγραμμα της τεχνολογικής διαδικασίας παραγωγής εκρηκτικών γαλακτώματος.....	10
Σχήμα 4. Διάγραμμα παραγωγής εκρηκτικού RDX.....	12
Σχήμα 5. Διάγραμμα παραγωγής πυρομαχικού 40mmΧ53 βομβίδιο.	12
Σχήμα 6. Ενδεικτική σχηματική διάταξη για την αποστρατικοποίηση ναρκών κατά προσωπικού.	13
Σχήμα 7. Διάγραμμα ροής συστήματος καταστροφής πυρομαχικών (ΕΑΣ-ΑΒΕΕ-ΣΕΛ,, 2019)	13
Σχήμα 8. Μέγεθος της παγκόσμιας αγοράς των εκρηκτικών του Πολιτικού Τομέα.....	17
Σχήμα 9. Παγκόσμιο μερίδιο αγοράς βιομηχανικών εκρηκτικών (%) ανά περιοχή (Coherent Market Insights, 2025).	18
Σχήμα 10. Ευρωπαϊκή αγορά πυρομαχικών (Mondor Intelligence, 2025)	18
Σχήμα 11. Επιλεγμένες χώρες ως Ευρωπαϊκές μονάδες παραγωγής για πυρομαχικά πυροβολικού (International Institute for Strategic Studies (IISS), 2025).	19
Σχήμα 12. Οι δεκαπέντε μεγαλύτεροι κρατικοί προϋπολογισμοί για αμυντικές δαπάνες (International Institute for Strategic Studies (IISS), 2025).	19
Σχήμα 13. Κατασκευαστές όπλων και πυρομαχικών στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 2024, ανά χώρα (STATISTA, 2024).	20
Σχήμα 14. Αποστρατιωτικοποίηση Πυρομαχικών. Καινοτομίες, Προοπτικές & Πρόβλεψη 2026-2034 (INTELMARKET RESEARCH, 2026).	23
Σχήμα 15. Κορυφαίες εταιρείες αποστρατιωτικοποίησης (Mondor Intelligence, 2025).	23
Σχήμα 16. Οι χημικές δομές των κοινών εκρηκτικών και προωθητικών.....	25
Σχήμα 17. Διαταραχές που προκαλούνται από RDX και HMX σε φυτά, ζώα και ανθρώπους.....	36

Σχήμα 18. Αρνητικές επιπτώσεις των νιτροαρωματικών ενώσεων.	48
Σχήμα 19. Διάγραμμα που δείχνει μια ομάδα ολοκληρωμένων μεθόδων επεξεργασίας για τα λύματα της εκρηκτικής βιομηχανίας	50
Σχήμα 20. Επεξεργασία λυμάτων με εκρηκτικά σε ενεργό άνθρακα και συνδυασμό με αλκαλική υδρόλυση (Pallvi Bhanota et. al., 2020).....	53
Σχήμα 21. Βιοχημικές οδοί που εμπλέκονται στον μικροβιακό κύκλο του αζώτου, διευκολύνονται από εγγενή ένζυμα και τους συμπαράγοντές τους (Karabelo M. Moloantoa et. al., 2022).....	62
Σχήμα 22. Ταξινόμηση τεχνητών υγροτόπων για επεξεργασία λυμάτων.....	65
Σχήμα 23. Υγρότοπος ως πράσινη λύση για χαμηλά βιοαποδομήσιμα και υψηλής περιεκτικότητας σε άζωτο λύματα	68
Σχήμα 24. Κάτοψη του Γομωτηρίου στις εγκαταστάσεις της εταιρείας ΕΑΣ ΑΒΕΕ στο Λαύριο.....	73
Σχήμα 25. Βασικά δεδομένα για την εφαρμογή της μηχανής πλήρωσης πυρομαχικών με εξώθηση κοχλία.	74
Σχήμα 26. Κριτήρια για ένα ιδανικό εκρηκτικό που χυτεύεται με τήξη (Qing Ma et. al., 2021).	75
Σχήμα 27. Βελτιστοποιημένη συνθετική οδός για BODN (BOM) (Qing Ma et. al., 2021)..	76
Σχήμα 28. Η μοριακή δομή του BOM (Xiong Yang et. al., 2020).	76
Σχήμα 29. Διάγραμμα ροής προϊόντων Γομωτηρίου M107 155mm HE	77
Σχήμα 30. Διάγραμμα ροής ραδιογραφικού ελέγχου στην παραγωγή πυρομαχικών (διαδικασία γόμωσης).	79
Σχήμα 31. Κύρια δεξαμενή απορροής υγρών αποβλήτων κατά την παραγωγική διαδικασία πυρομαχικών.	80
Σχήμα 32. Τυπική τσιμεντένια δεξαμενή καθίζησης υγρών αποβλήτων (ΕΑΣ-ΑΒΕΕ-ΣΕΛ,, 2019)	81
Σχήμα 33. Στήλες GAC για την επεξεργασία λυμάτων TNT.	85

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Δεξαμενές διαχείρισης υγρών αποβλήτων κατά τη διαδικασία καταστροφής ναρκών	14
Πίνακας 2. Συγκέντρωση εκρηκτικών ουσιών και παραγώγων αποσύνθεσης στα υγρά απόβλητα της διαδικασίας καταστροφής.....	14
Πίνακας 3. Οι φυσικοχημικές ιδιότητες ορισμένων κοινών εκρηκτικών που χρησιμοποιούνται στις στρατιωτικές εφαρμογές (Environmental Protection Agency, 2012).	26
Πίνακας 4. Συγκεντρώσεις εκρηκτικών κοντά σε εργοστάσια και χώρους απόρριψης πυρομαχικών.....	28
Πίνακας 5. Συγκεντρώσεις εκρηκτικών σε χώρους στρατιωτικής εκπαίδευσης και δοκιμών εκρηκτικών.	29
Πίνακας 6. Οριακές τιμές για εκρηκτικές ουσίες στα εδάφη και στο νερό παροχής (USEPA, 2021).....	34
Πίνακας 7. Επιτρεπόμενα όρια RDX και HMX στο πόσιμο νερό.	34
Πίνακας 8. Δεδομένα τοξικότητας και καρκινογένεσης των TNT και DNTs.....	37
Πίνακας 9. Χημικές ιδιότητες του τρινιτροτολουολίου (TNT) και των κύριων μεταβολιτών του.	38

Πίνακας 10. Πειραματικά προσδιορισμένη πρόσληψη TNT μέσω του νερού και κατανομή στο σώμα του ψαριού σε σολομό του Ατλαντικού (<i>S. salar</i>).	39
Πίνακας 11. Φυσικά χαρακτηριστικά της ιπτάμενης τέφρας ΑΣΑ.....	44
Πίνακας 12. Παράμετροι για βιομηχανικά λύματα που απορρίπτονται στο νερό ή στο έδαφος (Gabriela Kamińska et al., 2026).....	45
Πίνακας 13. Φυσικοχημικές προσεγγίσεις αποκατάστασης για τη μείωση των ΗΜΧ...	54
Πίνακας 14. Πρόσληψη TNT από υδρόβια και χερσαία φυτά σε υδροπονική καλλιέργεια (Katarzyna Panz et. al., 2012).....	61
Πίνακας 15. Τεχνολογίες καθαρισμού για TNT	86
Πίνακας 16. Κοινοτική νομοθεσία για τη διαχείριση των επικίνδυνων αποβλήτων	93

Κατάλογος Εξισώσεων

Εξίσωση 1. Υπολογισμός του συντελεστή κατανομής οργανικών ρύπων.	27
Εξίσωση 2. Υπολογισμός του συντελεστή βιοσυγκέντρωσης.	39

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

ΔΕ	Διπλωματική Εργασία
ΕΑΠ	Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο
ΕΑΣ	Ελληνικά Αμυντικά Συστήματα
2-A-4,6-DNBA	2-amino-4,6-dinitro-benzoic acid
ADNTs	Aminodinitrotoluenes
2-ADNT	2-amino-4,6-dinitrotoluene
4-ADNT	4-amino-2,6-dinitrotoluene
2-ANT	2-amino-4-nitrotoluene
AOP	Advanced oxidation processes
ATSDR	Agency for Toxic Substances and Disease Registry
C4	Plastic explosive consisting of 91% RDX and 9% plasticizers
CL-20	2,4,6,8,10,12-Hexanitro-2,4,6,8,10,12-hexaazaisowurtzitane
CMR	Carcinogenic, Mutagenic, or toxic for Reproduction
COD	Chemical oxygen demand
2,4-DANT	2,4-diaminonitrotoluene
2,6-DANT	2,6-diaminonitrotoluene
2,6-DHAT	2,6-dinitro-4-hydroxylaminotoluene
BCF	Bioconcentration Factor
DNAPL	Dense nonaqueous-phase liquid
DNB	1,3-dinitrobenzene
2,4-DNBA	2,4-dinitrobenzoic acid
2,5-DNBA	2,5-dinitrobenzoic acid
3,5-DNP	3,5-dinitrophenol
2,4-DNT	2,4-Dinitrotoluene
2,6-DNT	2,4-Dinitrotoluene
DNX	Hexahydro-1,3-dinitroso-5-nitro-1,3,5-triazine
DOC	Dissolved organic carbon

DWEL	Drinking Water Equivalent Level
ECHA	European Chemicals Agency
Eh	Reduction potential
ERs	Energetic residues
EU	European Union
FDRA	The Finnish Defence Research Agency
fOC	Fraction of soil organic carbon
GAC	Granular activated carbon
HADNT	Hydroxylaminodinitrotoluenes
HMX	Octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine, octogen
HPLC	High-performance liquid chromatography
IARC	International Agency for Research on Cancer
ISCO	In situ chemical oxidation
Kd	Soil distribution coefficient
Kf	Freundlich coefficient
KH	Henry's Law constant
KOC	Organic carbon partitioning coefficient
KOW	Octanol-water partitioning coefficient
LCMS	Liquid chromatography mass spectrophotometry
LHA	Lifetime Health Advisory level
LNAPL	Light nonaqueous-phase liquid
LOLC	Lowest observed lethal concentration
MEDINA	Methylenedinitramine
MNX	Hexahydro-1-nitroso-3,5-dinitro-1,3,5-triazine
NACs	Nitroaromatic compounds
NB	Nitrobenzene
NC	Nitrocellulose
NDAB	4-nitro-2,4-diazabutanal
NG	Nitroglycerin
NOAEL	No-observed-adverse-effect level
NOM	Natural organic matter
NQ	Nitroguanidine
2-OHA	2-hydroxylamino-4,6-dinitrotoluene
Octol	HMX & TNT mixture
4-OHA	4-hydroxylamino-2,6-dinitrotoluene
ONC	Octanitrocubane
PBT	bioaccumulative and toxic (
PRB	Permeable reactive barrier
RDX	hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine
RO	Reverse osmosis
TAT	Triaminotoluene
TNB	Trinitrobenzene

TNBA	Trinitrobenzaldehyde
TNBAlc	2,4,6-trinitrobenzyl alcohol
TNBAlc	2,4,6-trinitrobenzaldehyde
TNT	2,4,6-trinitrotoluene
TNX	Hexahydro-1,3,5-trinitroso-1,3,5-triazine
TOC	Total organic carbon
US	United States
US EPA	United States Environmental Protection Agency
UV	Ultra violet radiation
UXO	Unexploded ordnance
vPvB	very Persistent and very Bioaccumulative
WHO	World Health Organization
ZVI	Zero valent iron

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Απώτερος στόχος της ΜΔΕ είναι η ανάδειξη των διαθέσιμων τεχνολογιών για την επεξεργασία των αποβλήτων προερχόμενων από την παραγωγή εκρηκτικών υλών, και 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. Η μεταφορά της τεχνογνωσίας της προτεινόμενης τεχνολογίας σε ευρεία κλίμακα και προοπτικές εφαρμογής της και σε άλλες εγκαταστάσεις παρόμοιας δραστηριότητας.

1.1 Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Η ΜΔΕ περιλαμβάνει αρχικά ένα εισαγωγικό κεφάλαιο στο οποίο θα γίνει σύντομη αναφορά στο ιστορικό, τη φύση και τοξικότητα των εκρηκτικών υλών με έμφαση στο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό TNT.

Παρουσιάζεται η κατάσταση των βιομηχανιών που δραστηριοποιούνται στην παραγωγή και αποστρατικοποίηση των εκρηκτικών. Στην ανάπτυξη που έχουν τα τελευταία έτη οι τομείς της πολεμικής βιομηχανίας. Η παραγωγική διαδικασία που ακολουθείται και το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο σχετικά με την επεξεργασία των αποβλήτων σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο. Το δεύτερο και τρίτο κεφάλαιο περιγράφουν τα χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων από μονάδες εκρηκτικών για τον αμυντικό και πολιτικό τομέα αντίστοιχα.

Πιο συγκεκριμένα ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα φυσικοχημικά τους χαρακτηριστικά, σε ποσοτικά δεδομένα, στον εντοπισμό των σημείων που αυτά δημιουργούνται κατά την παραγωγική διαδικασία, σε τεχνικές περιορισμού των παραγόμενων ποσοτήτων καθώς και στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις αυτών.

Στην πορεία στο τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο γίνεται λόγος για τις μεθόδους επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων των εκρηκτικών στις μονάδες παραγωγής ή σε Φορείς εξουδετέρωσης-ανακύκλωσης. Φυσικοχημικές μέθοδοι που εφαρμόζονται (π.χ. αποικοδόμηση της TNT από φυσικές διεργασίες (δηλ. ρόφηση σε ενεργό άνθρακα, καταλυτική ρόφηση) σε νερό, αλκαλική υδρόλυση ($T=80^{\circ}\text{C}$, αρχικό pH 14), τεχνικές αποτέφρωσης κ.α.). Οι βιολογικές μέθοδοι, η βιοαποκατάσταση των εκρηκτικών έχει μελετηθεί κυρίως με στόχο την ανακάλυψη μικροοργανισμών που μπορούν να εμβολιαστούν σε βιο-αντιδραστήρα ή απευθείας in situ (βιοαύξηση) προκειμένου να υποβαθμίζουν τον ρύπο. Οι κύριες διεργασίες που αναπτύχθηκαν είναι οι βιο-αντιδραστήρες, σπόροι με λάσπη, κομποστοποίηση και «καλλιέργεια γης».

Τα αερόβια βακτήρια είναι σε θέση να μειώσουν νιτρικές ομάδες (NO_2) αλλά η τρίτη ομάδα απαιτεί αναερόβιες συνθήκες. Αναερόβιες διεργασίες έχουν πιθανά πλεονεκτήματα μιας ταχείας μείωσης σε χαμηλό οξειδοαναγωγό δυναμικό, το οποίο ελαχιστοποιεί τον οξειδωτικό πολυμερισμό των υποστρωμάτων λόγω της απουσίας οξυγόνου. Προηγμένες διεργασίες οξείδωσης (AOPs) ως δυναμικές μεθόδους για την αφαίρεση TNT από μολυσμένο περιβάλλον. Οξείδωση με υπεροξείδιο του υδρογόνου/όζον ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$), οξείδωση με αντιδραστήριο Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) καθώς και φωτοκαταλυτική οξείδωση, όπου όλες αυτές οι μέθοδοι κρίθηκαν αποτελεσματικές για την απομάκρυνση του TNT από τα νερά. Η βασική ιδέα των υγροτόπων υπο-επιφανειακής ροής είναι ότι τα λύματα διοχετεύονται εντός του σώματος του υγροτόπου, το οποίο είναι εδαφικό, όπου και υφίστανται σταδιακή επεξεργασία από τους μικροοργανισμούς που βρίσκονται γύρω από τα ριζώματα των φυτών. Εξετάζονται τεχνητοί υγρότοποι καθώς βέβαια και η δυνατότητα συνδυασμού όλων των ανωτέρω. Επιπλέον, αναφέρονται τρόποι επαναχρησιμοποίησης και αξιοποίησης των επεξεργασμένων αποβλήτων. Θεωρούνται τα βασικότερα κριτήρια για την επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου επεξεργασίας ανά περίπτωση.

Ανάλογη είναι και η προσέγγιση κατά την περιγραφή μεθόδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων από τα εκρηκτικά του εμπορικού τομέα, αν και δεν υφίστανται στον ίδιο βαθμό. Ειδικότερα και για αυτόν τον τομέα παρουσιάζονται οι φυσικοχημικές μέθοδοι επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων, οι βιολογικές μέθοδοι, οι τεχνητοί υγρότοποι, και οι προχωρημένες μέθοδοι οξείδωσης καθώς και η δυνατότητα συνδυασμού αυτών. Επίσης, λόγος γίνεται και πάλι για τους τρόπους επαναχρησιμοποίησης και αξιοποίησης των επεξεργασμένων αποβλήτων, και για το ποια είναι τα κυριότερα κριτήρια επιλογής της πιο ενδεδειγμένης μεθόδου επεξεργασίας κατά περίπτωση. Τα δύο παραπάνω κεφάλαια αναπτύσσονται με στόχο την ανάδειξη των σύγχρονων τάσεων που επικρατούν επιστημονικά κατά την εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων επεξεργασίας.

Στην συνέχεια, το έκτο κεφάλαιο εστιάζει στην παραγωγή της αμυντικής βιομηχανίας και τα συμβατικά πυρομαχικά που συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται στις μέρες μας σε μεγάλες ποσότητες. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα βασικά χαρακτηριστικά της παραγωγικής διαδικασίας και στα παραγόμενα απόβλητα που προκύπτουν από αυτή, καθώς και στην περιγραφή και αξιολόγηση της υφιστάμενης μεθόδου επεξεργασίας υγρών αποβλήτων που εφαρμόζεται, αλλά και σε πιθανές προτάσεις βελτιστοποίησης των διεργασιών τονίζοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της παρέμβασης που προτείνεται. Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν στο πλαίσιο διεξαγωγής της παρούσας ΜΔΕ και μια πιθανή συζήτηση για μελλοντική επιστημονική έρευνα.

1.2 Μεθοδολογία

Η περίπτωση των εκρηκτικών υλών ξεχωρίζει από τις άλλες και δεν μπορεί να ταξινομηθεί σε ένα ευρύτερο σύνολο.

Σε ότι αφορά τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο των αποβλήτων που προκύπτουν από την παραγωγή εκρηκτικών και την αποκατάσταση των ρυπασμένων από αυτά χώρων είναι ιδιαίτερη, «μόνη του είδους» ή «*sui generis*» στα πλαίσια της ελληνικής βιβλιογραφίας.

Στα πλαίσια της διεθνούς βιβλιογραφίας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, δεδομένου ότι «review articles», δηλαδή άρθρα που να ανασκοπούν τα αποτελέσματα της σχετικής έρευνας, δεν ανευρίσκονται εύκολα.

Έγινε αναζήτηση στη βιβλιογραφία μέσω της βάσης δεδομένων Scopus, Direct Science, PubMed με τις λέξεις-κλειδιά «explosives», «remediation», «nitrocellulose», «nitroglycerine», «TNT, HMX, RDX» και «pollution» κ.α.. Έγινε επιλογή από ανασκοπήσεις με ημερομηνία δημοσίευσης τα τελευταία δέκα χρόνια. Τούτο προκύπτει και από τον αριθμό των άρθρων που έχουν δημοσιευτεί κατά καιρούς στην επιστημονική κοινότητα.

Για την ίδια θεματολογία αναζητήθηκαν στοιχεία από ιδρύματα και διεθνείς ιστοσελίδες οργανισμών όπως WMO, WHO, USEPA, USGS, ECHA, FAO, EFSA, USGS, UMSICHT, IMO, NATO-NSPA, EU και UN.

Αν η ελληνική βιβλιογραφία που αφορά την επιστήμη και την τεχνολογία των εκρηκτικών υλών είναι πενιχρή, τα συγγράμματα που αναλύουν τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο της βιομηχανικής παραγωγής εκρηκτικών είναι περιορισμένα. Κατά πάσα πιθανότητα, η έλλειψη συναφών εργασιών συνδέεται με το γεγονός ότι η ελληνική βιομηχανική δραστηριότητα στον τομέα αυτό είναι περιορισμένη. Ωστόσο, σε όμορες της Ελλάδας χώρες πραγματοποιείται παραγωγή εκρηκτικών μιγμάτων ή/και (τοξικών) πρώτων υλών εκρηκτικών. Συνεπώς, πέραν του ιδιαίτερου επιστημονικού ενδιαφέροντος που παρουσιάζει το θέμα, έχει ουσιώδη πρακτική σημασία η αποτύπωση των αποβλήτων που προκύπτουν από τέτοιου είδους μονάδες, η διαχείρισή τους και η πιθανότητα διασυνοριακής μεταφοράς τους, καθώς και οι μέθοδοι αποκατάστασης των ρυπασμένων χώρων. Ως εκ τούτου, η εκπόνηση μιας εργασίας στην οποία επισκοπούνται τα πρόσφατα αποτελέσματα της συναφούς ερευνητικής δραστηριότητας, έχει ιδιαίτερη αξία καθότι τέτοιου είδους πονήματα δεν απαντώνται ευρέως (τουναντίον, μάλιστα) ακόμη και στη διεθνή βιβλιογραφία.

1.3 Περιγραφή στοιχείου καινοτομίας

Το καίριο ερώτημα που ακόμη παραμένει αναπάντητο και που καταδεικνύει την περιβαλλοντική διάσταση του προβλήματος, είναι σε πιο βαθμό οι μέθοδοι επεξεργασίας και απολύμανσης αδρανοποιούν τα ανθεκτικά βακτήρια. Τα παραπροϊόντα που προκύπτουν μετά από την επεξεργασία των λυμάτων, παραμένουν μεταβολικά ενεργά με ποικίλες αλλαγές και μεταλλάξεις στο γενετικό τους υλικό, οι οποίες ενδέχεται να υποδηλώνουν διαφορετικά επίπεδα ανθεκτικότητας σε ξενοβιοτικές ενώσεις. Η αναζήτηση για καινούργιες, πιο οικονομικές και in-situ μεθόδους επεξεργασίας επικίνδυνων αποβλήτων είχε σαν αποτέλεσμα το ενδιαφέρον να εστιαστεί στη συνδυαστική εφαρμογή δύο ή περισσότερων μεθόδων επεξεργασίας για τη πιθανότητα ταυτόχρονης αποδόμησης και διάσπασης των ξενοβιοτικών ενώσεων, προσφέροντας έτσι μια ολοκληρωμένη λύση για την αποτελεσματική μετά-δευτεροβάθμια βιολογική επεξεργασία. Τα συστήματα κατασκευασμένου υγροτόπου παρουσιάζουν μια σειρά πλεονεκτημάτων που τα καθιστούν επιλέξιμα έναντι των υπολοίπων φυσικών συστημάτων για την επεξεργασία λυμάτων

1.4 Ιστορικό και ιδιαιτερότητες των εκρηκτικών υλών

Το γεγονός ότι τα μείγματα από νίτρο, άνθρακα και θειάφι, στοιχεία που αποτελούν βασικά συστατικά της μαύρης πυρίτιδας, μπορούν να παράξουν μηχανικό έργο, αποτελεί μια από τις σημαντικότερες ανακαλύψεις όλων των εποχών, και μάλιστα ήταν γνωστό στον ελληνικό χώρο ήδη από την αρχαιότητα. Οι αρχαίοι Έλληνες είχαν σε αφθονία τις εν λόγω πρώτες ύλες, δηλαδή τον ξυλάνθρακα και το θείο, που χρησιμοποιούνταν ευρέως για πλήθος εφαρμογών, αλλά και το νίτρο, εξόρυξη του οποίου γινόταν τουλάχιστον στα κοιτάσματα της Σάμου. Επιπλέον, κατείχαν την τεχνολογία για την ανάμειξη και την συνάλεση των πρώτων υλών, η οποία βεβαίως είναι σχετικά απλή συγκρινόμενη με εκείνες της μεταλλευτικής και της μεταλλουργίας.

Με βάση τη μελέτη του Καθηγητή Εμμ. Μ. Καμπούρη (Κοίλιαρης Π., 2017), στη μυθολογία των Τιτανομαχιών αναφέρεται ευρέως η χρήση του κεραυνού.

Οι Κύκλωπες ήταν τερατόμορφες θεότητες και σύμφωνα με το επικό ποίημα του Ησίοδου «Θεογονία», ήταν τα τρία παιδιά του Ουρανού και της Γαίας: ο Στερόπη, ο Βρόντης και ο Άργης (ΜΗΧΑΝΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ, 2025).

Κατά τη διάρκεια της Τιτανομαχίας, ο Δίας και οι Ολύμπιοι θεοί τους απελευθέρωσαν. Για να ανταποδώσουν τη βοήθεια του Δία που τους ελευθέρωσε από τα Τάρταρα, οι Κύκλωπες έφτιαξαν τον κεραυνό, τη βροντή και την αστραπή, με τα οποία οι θεοί νίκησαν

τους Τιτάνες. Τα φαινόμενα που συνόδευαν τη χρήση του κεραυνού, όπως πχ. στα ομηρικά έπη, αναφέρονται πάντοτε τα καταστροφικά αποτελέσματά του, δηλαδή ο ισχυρός βρόντος, η εμφάνιση φλόγας, η ανάπτυξη νέφους και η διάχυτη οσμή θείου, δηλαδή τυπικά γνωρίσματα της έκρηξης εκρηκτικής ύλης που περιέχει νίτρο-θείο-άνθρακα, και όχι ενός κεραυνού. Αυτά τα αποτελέσματα συμπίπτουν με τα αποτελέσματα μίας εκρηκτικής ύλης που συντίθεται από νίτρο, άνθρακα και θείο (ΣΚΑΡΤΣΗΣ Ν., 2017).

Στα ιστορικά συγγράμματα του καθηγητή Καμπούρη, η ανακάλυψη των εκρηκτικών τοποθετείται χρονικά πολύ νωρίτερα από εκεί που την τοποθετεί η παλιότερη αναφορά σε εκρηκτικά μείγματα νίτρου, ξυλάνθρακα και θείου στην Άπω Ανατολή, που οι περισσότεροι θεωρούν ως πατρίδα της μαύρης πυρίτιδας, τον 6ο μ.Χ. αιώνα, την εποχή της δυναστείας των Τσαγκ, που χρησιμοποιούσαν όμως για πυροτεχνήματα.

Στον ελληνικό χώρο περί το έτος 680 μ.Χ. αναφέρεται η χρήση του υγρού πυρός, ανακάλυψης του Καλλίνικου, που είχε ανάλογη σύνθεση με τη μαύρη πυρίτιδα. Στη Βόρεια Ευρώπη, εκρηκτικές ύλες εμφανίζονται περίπου το 12ο αιώνα μ.Χ. (ανακάλυψη από τον μοναχό Roger Bacon), που γρήγορα προωθήθηκαν στις πολεμικές εφαρμογές. Υπάρχει και η άποψη είναι ότι η μαύρη πυρίτιδα ανακαλύφθηκε από τους Άραβες γύρω στο 1300 μ.Χ. Οι Άραβες είχαν αναπτύξει ένα είδος τουφεκιού, που αποτελούνταν από έναν σωλήνα από μπαμπού, ενισχυμένο με σίδηρο, το οποίο τροφοδοτούνταν με μπαρούτι, και η ανάφλεξη του προκαλούσε την εκτόξευση ενός βέλους.

Το 13ο αιώνα ένας μοναχός και λόγιος, ο Berthold Schwarz, εφηύρε ένα όπλο για την εκτόξευση λίθων με τη βοήθεια της μαύρης πυρίτιδας. Η συγκεκριμένη ανακάλυψη της χρήσης μαύρης πυρίτιδας για την παραγωγή μηχανικού έργου, θεωρείται η πραγματική αρχή της εξέλιξης των εκρηκτικών υλών. Η μαύρη πυρίτιδα παρέμεινε ως η κύρια εκρηκτική ύλη στο μεγαλύτερο μέρος του 19ου αιώνα. Το 1838 ο Ιούλιος Θεόφιλος Pelouze, παρασκεύασε την νιτροκυτταρίνη με τη νίτρωση του χαρτιού. Το 1846 ο Ascanio Sobrero, παρασκεύασε την νιτρογλυκερίνη αλλά παράλληλα προειδοποιούσε για τις εκρηκτικές της ιδιότητες, οι οποίες οδήγησαν σε καταστρεπτικές εκρήξεις και ατυχήματα, που σημειώθηκαν κατά την παραγωγή, αποθήκευση και χρήση αυτής της ουσίας και οδήγησαν στην επιβράδυνση της εξέλιξής της (ΣΚΑΡΤΣΗΣ Ν., 2017).

Ο Alfred Nobel, το 1863 δημιούργησε τη δυναμίτιδα, δηλαδή μια εκρηκτική ύλη με βάση τη νιτρογλυκερίνη, η οποία αναμειγνύομενη με γη διατόμων καθίσταται πολύ λιγότερη επικίνδυνη από την καθαρή νιτρογλυκερίνη, που ανακαλύφθηκε το 1846 από τον Ασκάνιο Σομπρέρο και δεν προσφέρεται για πρακτική χρήση επειδή είναι ασταθής και εκρήγνυται πολύ εύκολα (Κοίλιαρης Π., 2017).

Η γη διατόμων (Kieselguhr) είναι ένα ορυκτό που προέρχεται από ένα μονοκύτταρο φυτό, το οποίο έχει μικροσκοπικό μέγεθος. Σχηματίζεται από τη συσσώρευση ενός τεράστιου αριθμού απολιθωμένων διατόμων. Το μίγμα ήταν πολύ πιο ασφαλές στη μεταφορά του, ενώ παράλληλα διατηρούσε τις ισχυρές εκρηκτικές του ιδιότητες που ενεργοποιούνταν όμως με την βούληση των χρηστών του. Ο Nobel το ονόμασε δυναμίτιδα από την ελληνική λέξη «δύναμη». Ουσιαστικά εισήγαγε στις χημικές εκρηκτικές ύλες τον παράγοντα του «σταθεροποιητή» αυτών. Κατόπιν παρασκεύασε τις δυναμίτιδες ενεργού βάσης (1869), καθώς και τα μίγματα νιτρογλυκερίνης – νιτροκυτταρίνης, γνωστά ως ζελατινοδυναμίτες και εκρηκτικές ζελατίνες. (ΣΚΑΡΤΣΗΣ Ν., 2017).

Το 1888 ο Nobel παρασκεύασε την πολεμική άκαπνη πυρίτιδα για πυροβόλα (βαλλιστίτιδα). Το 1902 στη Γερμανία το TriNitroToluene 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 Η.Π.Α. ως εκρηκτικό γέμισμα των βλημάτων του πυροβολικού. Στις επόμενες δεκαετίες και με αιτία τους δύο παγκόσμιους πολέμους εντατικοποιήθηκε η έρευνα στην περιοχή των ισχυρών εκρηκτικών υλών και αναπτύχθηκαν εκρηκτικές ύλες για διάφορες εφαρμογές όπως ο RDX (κυκλο-τριμεθυλενο-τρινιτραμίνη ή κυκλωνίτης) και PETN (Νιτρικός πενταερυθρίτης - Pentaerythritol tetranitrate), ο βροντώδης υδράργυρος (Mercury Fulminate-($\text{Hg}(\text{CNO})_2$), ο στυφνικός μόλυβδος (lead styphnate-($\text{C}_6\text{HN}_3\text{O}_8\text{Pb}$) κ.α.

Με την άρση των περιορισμών στην παραγωγή TNT, λόγω της βελτίωσης των μεθόδων παρασκευής μεθυλοβενζολίου (τολοουλίου), αναπτύχθηκαν πολυάριθμα εκρηκτικά μίγματα, όπως ο πεντολίτης, οκτόλη. Ακόμη αναπτύχθηκαν και πλαστικά εκρηκτικά με σπουδαιότερα εκείνα της σειράς «C1 έως C4».

Πρόσφατη επίσης ανακάλυψη να είναι εκείνη των εκρηκτικών γαλακτωμάτων, τα οποία αποτελούν προς το παρόν τις φιλικότερες προς το χρήστη και προς το περιβάλλον εκρηκτικές ύλες.

Η κατάταξη των εκρηκτικών υλών και των μιγμάτων αυτών γίνεται σε κατηγορίες με κριτήρια ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά τους.

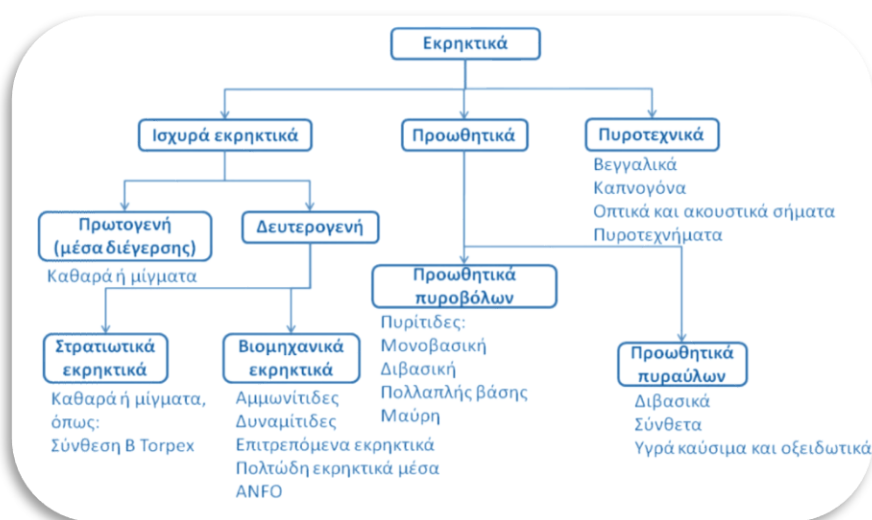
Μια ενδεικτική κατηγοριοποίηση – όχι η μοναδική – δίνεται στο ακόλουθο σχήμα 1.

Πάντοτε ο απώτερος στόχος μιας κατηγοριοποίησης είναι η αποφυγή συγχύσεων μεταξύ της πληθώρας εκρηκτικών υλών που υπάρχουν.

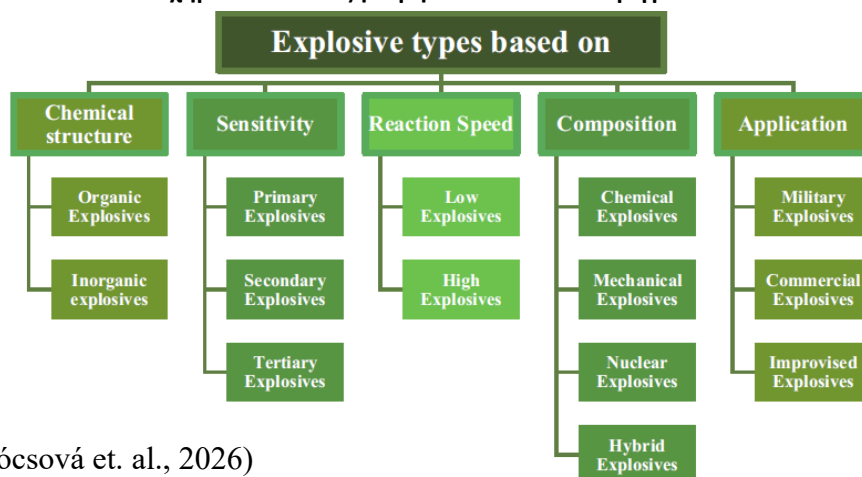
Οι εκρηκτικές ύλες με βάση τη χημική σύσταση είναι η μεγαλύτερη κατηγορία των εκρηκτικών υλών και αυτή με την οποία απασχολείται κυρίως η βιομηχανία παρασκευής εκρηκτικών υλών.

Διακρίνονται σε

1. Ρηκτικές ή ισχυρές εκρηκτικές ύλες με ψηλούς ρυθμούς αντίδρασης (ταχύτητα αντίδρασης και έκρηξης) και πιέσεων έκρηξης. Κύρια έχουν εφαρμογή σε καταστροφές και εξορύξεις. Ανάλογα με τις απαιτήσεις διέγερσης μπορούν περαιτέρω να διαχωριστούν σε
 - α. Πρωτογενή εκρηκτική ύλη, η οποία μπορεί σχεδόν πάντα να εκραγεί με απλή ή ασθενή διέγερση, όπως ο σπινθήρας, η κρούση, η τριβή, ακόμη και η επαφή (Το **ιωδιούχο άζωτο** (NI_3) είναι μια ανόργανη χημική ένωση γνωστή ως ένα από τα πιο ευαίσθητα εκρηκτικά επαφής).
 - β. Δευτερογενή εκρηκτική ύλη που δεν εκρήγνυνται συνήθως με απλή διέγερση αλλά απαιτεί ισχυρή διέγερση. Συνήθως η ισχυρή διέγερση επιτυγχάνεται με έκρηξη ποσότητας ισχυρής εκρηκτικής ύλης πρωτογενούς έκρηξης.
2. Ωστικές ή ασθενείς με χαμηλούς ρυθμούς αντίδρασης και συνήθως εφαρμόζονται ως μέσα προώθησης, τα οποία διακρίνονται σε δύο κατηγορίες
 - α. υγρά προωθητικά: μονοπροωθητικά, διπροωθητικά.
 - β. στερεά προωθητικά: πυρίτιδες (μονοβασικές, διβασικές, τριβασικές), ομοιογενείς συνθέσεις, ετερογενείς συνθέσεις, μκτές συνθέσεις.



Σχήμα 1. Κατάταξη εκρηκτικών υλών και μιγμάτων.



(Tamara Pócsová et. al., 2026)

Με βάση τον κίνδυνο χειρισμού και μεταφοράς, όπως εκφράζεται από την ευαισθησία τους σε κρούση (ελεύθερη πτώση πρότυπης σφαίρας από συγκεκριμένο ύψος), προκύπτουν τρεις κατηγορίες:

1. εκρηκτικές ύλες μεγάλης ευαισθησίας,
2. εκρηκτικές ύλες μέσης ευαισθησίας, και
3. ασφαλείς εκρηκτικές ύλες.

Ταξινόμηση μπορεί να γίνει και βάσει της σύνθεσής τους.

Στην περίπτωση αυτή, διακρίνονται πάλι τρεις ομάδες.

1. Η πρώτη ομάδα αποτελείται από απλές χημικές ενώσεις άνευ προσθέτων.
Η ενέργεια που εκλύεται κατά την έκρηξή τους οφείλεται στη διάσπασή τους κυρίως προς αέρια προϊόντα ή στερεά.
2. Η δεύτερη ομάδα αποτελεί τα εκρηκτικά μίγματα. Μίγματα ουσιών που συνήθως δεν είναι οι ίδιες εκρηκτικά ή είναι εκρηκτικά με μικρή ευαισθησία. Είναι στην πλειονότητά τους συστήματα ενός οξειδωτικού (oxidizer) και ενός καυσίμου (fuel).
3. Τρίτη ομάδα είναι εκείνη των σύνθετων εκρηκτικών υλών, η οποία αποτελείται κατά κανόνα από μίγματα εκρηκτικών υλών, ή μίγματα εκρηκτικών και οξειδοαναγωγικών συστημάτων (Κοίλιαρης Π., 2017).

Ανάλογα με τη χρήση, οι εκρηκτικές ύλες διακρίνονται σε

1. εμπορικές εκρηκτικές ύλες (commercial explosives), που χρησιμοποιούνται στην εξόρυξη των πετρωμάτων, προσφέροντας μεγάλη ασφάλεια χειρισμών, δυνατότητα ελέγχου του ωφέλιμου έργου, και μικρό κόστος.
2. στρατιωτικές εκρηκτικές ύλες (military explosives), που χρησιμοποιούνται για πολεμικούς σκοπούς τόσο ως γομώσεις εκρηκτικών βλημάτων όσο και ως προωθητικά μέσα αυτών. Πρέπει να διαθέτουν το μέγιστο δυνατό ωφέλιμο έργο ανά μονάδα βάρους, ελάχιστο δυνατό βάρος ανά μονάδα ωφέλιμου έργου, μεγάλη ταχύτητα έκρηξης, μεγάλη σταθερότητα σε ακραίες συνθήκες αποθήκευσης, και μικρή ευαισθησία έναντι απλών διεγέρσεων.

Τα εκρηκτικά αποτελούν καύσιμες ύλες σε συνδυασμό με οξειδωτικά μέσα.

Τα μοριακά εκρηκτικά περιέχουν και τα δύο είδη μέσα στο ίδιο μόριο (π.χ. RDX και NG), ενώ στα σύνθετα εκρηκτικά η καύσιμη ύλη και το οξειδωτικό συναποτελούν διαφορετικά μόρια (π.χ. πετρέλαιο με νιτρικό αμμώνιο στο ANFO).

1.5 Βιομηχανικές τεχνικές παραγωγής & αποστρατικοποίησης

Στη βιβλιογραφία ως εκρηκτικό υλικό ορίζεται η χημική ένωση ή μίγμα στην οποία μπορεί να συμβεί εξώθερμη αντίδραση από εξωτερικό αίτιο ή ερέθισμα, και η αντίδραση αυτή συνοδεύεται από απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων αέριων προϊόντων (Andrzej Harat, 2019).

Σήμερα, τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα εκρηκτικά υλικά είναι δυναμίτες και γαλακτώματα.

Η τεχνολογική διαδικασία παραγωγής δυναμίτη περιλαμβάνει ανάμειξη των ενώσεων που περιέχονται στο λεγόμενο μείγμα δυναμίτη.

Τα κύρια συστατικά του είναι: νιτρικό αμμώνιο, νιτρικό νάτριο, νιτρογλυκερίνη, νιτρογλυκόλη, νιτροκυτταρίνη και δινιτροτολουόλιο (Andrzej Harat, 2019).

Η παγκόσμια παραγωγή πολιτικών εκρηκτικών έχει αυξηθεί, κυρίως λόγω της αυξανόμενης ζήτησης εξόρυξης και στις κατασκευαστικές βιομηχανίες. Μια παγκόσμια παραγωγή 11 εκατομμυρίων τόνων πολιτικών εκρηκτικών εκτιμήθηκε για το έτος 2012 (Fausto Freire et al., 2015), η οποία αυξήθηκε σε περίπου 16 εκατομμύρια τόνους το 2018.

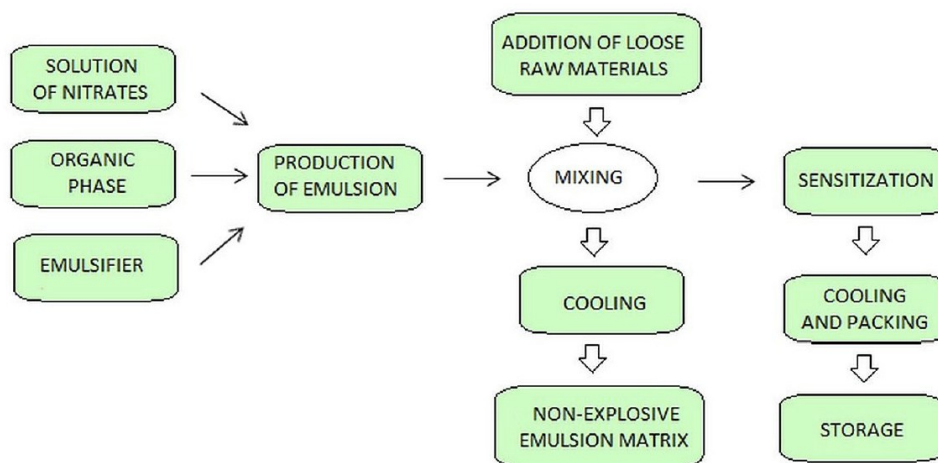
Οι κύριοι χρήστες είναι η εξόρυξη άνθρακα (περίπου 68% της συνολικής ζήτησης), λατομεία και εξόρυξη μη μετάλλων (16%) μαζί με την εξόρυξη μετάλλων και τις κατασκευές (16%).

Οι κύριοι τύποι πολιτικών εκρηκτικών είναι ANFO (νιτρικό αμμώνιο και 5% πετρέλαιο), εκρηκτικά γαλακτώματος και δυναμίτες. Για πολλά χρόνια, η ανησυχία για την παραγωγή εμπορικών εκρηκτικών επικεντρώθηκε σχετικά με την εκτίμηση κινδύνου. Πιο πρόσφατα, λόγω της αυξανόμενης περιβαλλοντικής απαιτήσεως, εταιρείες παραγωγής πολιτικών εκρηκτικών έχουν αρχίσει να εφαρμόζουν πρακτικές περιβαλλοντικής διαχείρισης. Ωστόσο, για να μειωθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής εκρηκτικών για πολιτικούς σκοπούς, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν και να ποσοτικοποιηθούν οι επιπτώσεις υιοθετώντας μια προοπτική κύκλου ζωής (LC), η οποία μπορεί να επιτευχθεί με την υποστήριξη της μεθοδολογίας Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής (LCA) (ISO 14040).



Σχήμα 2. Τα στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος LCA.

Η παραγωγή γαλακτώματος μπορεί να χωριστεί στα ακόλουθα στάδια: προετοιμασία πρώτων υλών (οργανική φάση, γαλακτωματοποιητής, διάλυμα νιτρικών), παραγωγή γαλακτώματος, ανάμειξη, διαδικασία ευαισθητοποίησης, ψύξη και συσκευασία. Όπως φαίνεται από τα δεδομένα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 1, μετά τον σχηματισμό του γαλακτώματος, η τεχνολογική διαδικασία μπορεί να ακολουθήσει μία από τις δύο κατευθύνσεις. Μπορεί να οδηγήσει στον σχηματισμό μιας μήτρας γαλακτώματος που δεν έχει εκρηκτικές ιδιότητες ή να οδηγήσει στον σχηματισμό ενός έτοιμου εκρηκτικού υλικού λόγω των διαδικασιών ευαισθητοποίησης (με την προσθήκη ενός εκρηκτικού υλικού υψηλής ενέργειας ή τον σχηματισμό φυσαλίδων αερίου), την πλήρωση φυσιγγίου, την ψύξη και τη συσκευασία. Στην πρώτη περίπτωση, η μήτρα που σχηματίζεται ευαισθητοποιείται στον τόπο όπου εκτελούνται οι εργασίες.



Σχήμα 3. Διάγραμμα της τεχνολογικής διαδικασίας παραγωγής εκρηκτικών γαλακτώματος.

Αναφορικά με τις στρατιωτικές εκρηκτικές ύλες, οι ουσίες που χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον είναι το TNT, RDX, HMX. Το TNT όπως προαναφέρθηκε χρησιμοποιείται και στην παραγωγή εμπορικών εκρηκτικών, όπως ή αμμωνίτιδα. Το RDX αποτελεί επίσης βασικό συστατικό πολλών σύνθετων εκρηκτικών υλών τόσο εμπορικών όσο και πολεμικών. Παρασκευάζεται μέσω πορείας νίτρωσης της νιτρικής εξαμεθυλονοτετραμίνης, η οποία με τη σειρά της λαμβάνεται από την αντίδραση φορμαλδεΰδης και αμμωνίας. Από το RDX, και πιο συγκεκριμένα με τη μέθοδο της νιτρόλυνσης του RDX μπορεί να παρασκευαστεί 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 (Κοΐλιαρης Π., 2017).

Βεβαίως, συνήθως οι προαναφερθείσες εκρηκτικές ύλες δεν χρησιμοποιούνται αυτούσιες αλλά ως συστατικά σε μίγματα πολεμικών εφαρμογών, τα κυριότερα των οποίων είναι τα

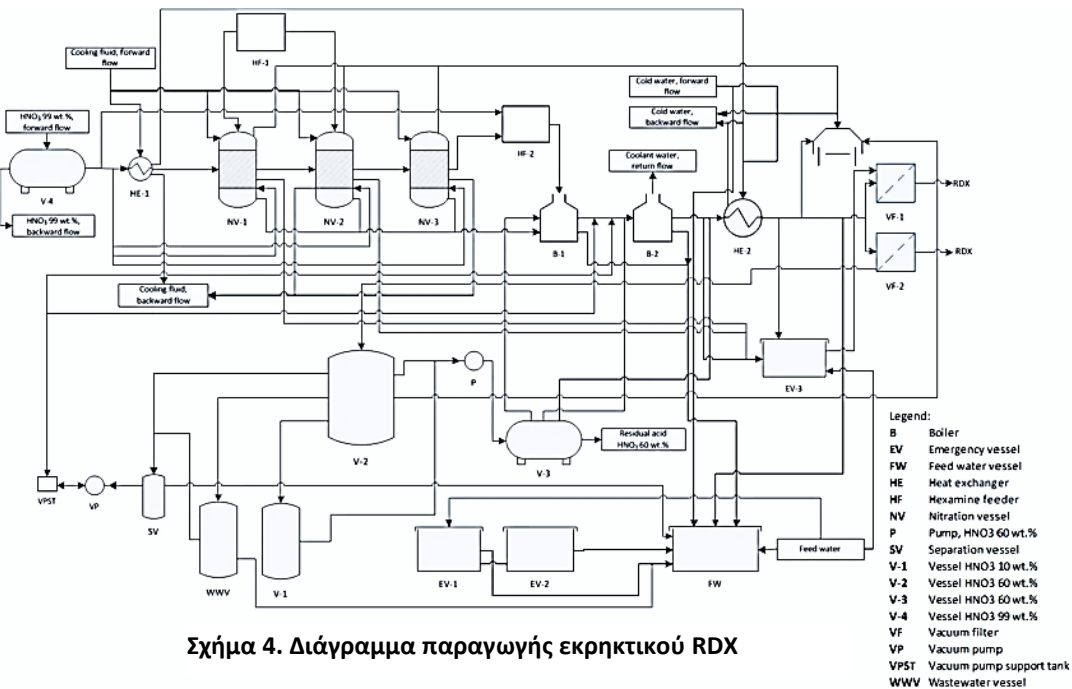
διμερή μίγματα εκρηκτικών υλών και οι πλαστικές εκρηκτικές ύλες. Τα κυριότερα από τα διμερή μίγματα έχουν ως συστατικό το TNT και διακρίνονται σε στρατιωτικούς δυναμίτες (οι οποίοι είναι συνθέσεις ζελατινοδυναμίτη, όπως αναφέρθηκε ανωτέρω), οι αματόλες που είναι μίγματα νιτρικού αμμωνίου και TNT, οι κυκλοτόλες συνίστανται από TNT και RDX, οι πεντολίτες που αποτελούνται από PETN και TNT, οι πικρατόλες που είναι διμερή μίγματα πικρικού αμμωνίου με TNT, και οι τετρυτόλες που προκύπτουν από την ανάμιξη τετρύλης με TNT. Ως πλαστικές εκρηκτικές ύλες χαρακτηρίζονται εκείνες που έχουν όμοια σύσταση με εκείνη μίας εύπλαστης μάζας. Αποτελούνται συνήθως από τη βασική εκρηκτική ύλη και πρόσθετα που εξασφαλίζουν την πλαστικότητα της μάζας. Τυπικές πλαστικές εκρηκτικές ύλες είναι: οι ύλες σύνθεσης Α που συνιστούν μάζες πλαστικοποιημένου κυκλονίτη (91%), οι εκρηκτικές ύλες σύνθεσης C που επίσης αποτελούνται από κυκλονίτη αλλά σε μικρότερο ποσοστό και τον πλαστικοποιητή αποτελούν άλλες εκρηκτικές ουσίες (όπως πχ. το DNT, TNT και η νιτροκυταρρίνη), οι εκρηκτικές ύλες με σύνθεση HMX, και το SEMTEX που είναι πλαστική εκρηκτική ύλη που κατασκευάσθηκε τη δεκαετία το 1950 με σύνθεση 28% PETN και 58% RDX.

Πάντως, τόσο για τις εμπορικές όσο και τις στρατιωτικές εκρηκτικές ύλες επειδή στην πλειονότητά τους είναι δευτερογενή εκρηκτικά, απαιτείται διέγερση κάνοντας χρήση εναυματικών μέσων. Συνήθως χρησιμοποιούνται πυροκροτητές που περιέχουν κάποιες από τις εξής ουσίες: βροντώδης υδράργυρος (άλας του βροντώδους οξέος, η παραγωγή του οποίου γίνεται μέσω αντίδρασης μεταξύ νιτρικού υδραργύρου, αιθυλικής αλκοόλης και νιτρικού οξέος), υδραζωτικός μόλυβδος (άλας του υδραζωτικού οξέος, η παραγωγή του οποίου βασίζεται στη μέθοδο της νατραμίδης), στυφνικός μόλυβδος (άλας στυφνικού οξέος, που παράγεται από στυφνικό μαγνήσιο), και τετρανιτρική πενταερυθριτόλη ή πεντρίτης-PETN (που παράγεται μέσω νίτρωσης της πενταερυθρυτόλης). Για τη διέγερση των παραδοσιακών κοινών καψυλλίων, χρησιμοποιείται κυρίως η λεγόμενη βραδύκαυστη θρυαλλίδα, βασικό συστατικό της οποίας είναι η μαύρη πυρίτιδα.

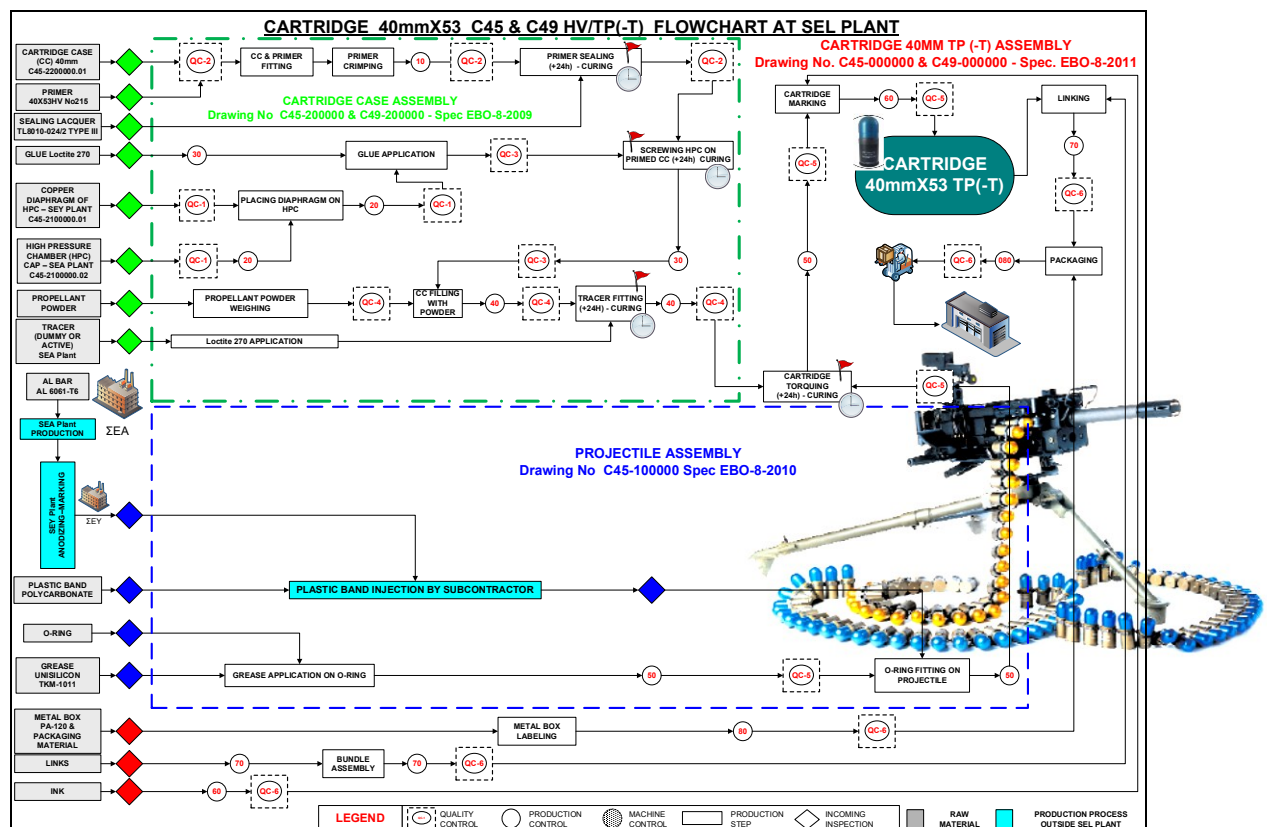
Σε ότι αφορά την παραγωγή εκρηκτικών στρατιωτικής χρήσης, οι τεχνικές ενσωματώνονται στην παραγωγή πυρομαχικών, όπου έχουν εφαρμογή πλήθος από εκρηκτικές ύλες καθώς και διεργασίες, αφενός στην παραγωγή των πρώτων υλών πρωτογενών και δευτερογενών εκρηκτικών ουσιών που είναι κατά βάση βαριές χημικές βιομηχανίες, 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

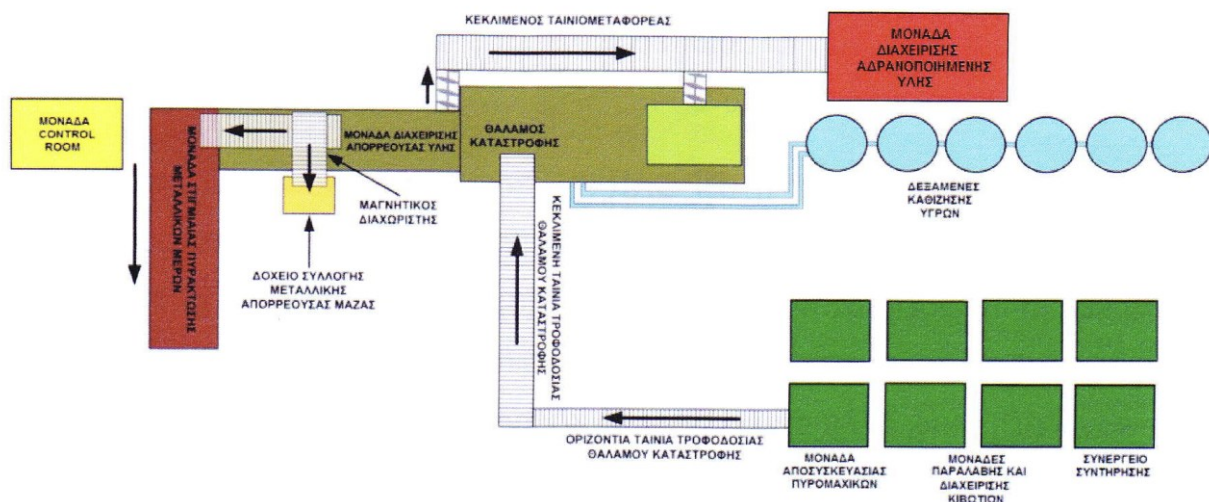
μεταφορά ναρκών του είδους. Έχει υπογραφεί από περισσότερες από 160 χώρες και προβλέπει την καταστροφή των υπαρχόντων αποθεμάτων και τον καθαρισμό των ναρκοπεδίων. Ενδεικτικά δίνονται διαγράμματα παραγωγής RDX εκρηκτικού, διάγραμμα παραγωγής της ΕΑΣ ΑΒΕΕ για το πυρομαχικό 40mmX53 ασκήσεων, και διάγραμμα ενδεικτικής διάταξης καταστροφής ναρκών κατά προσωπικού..



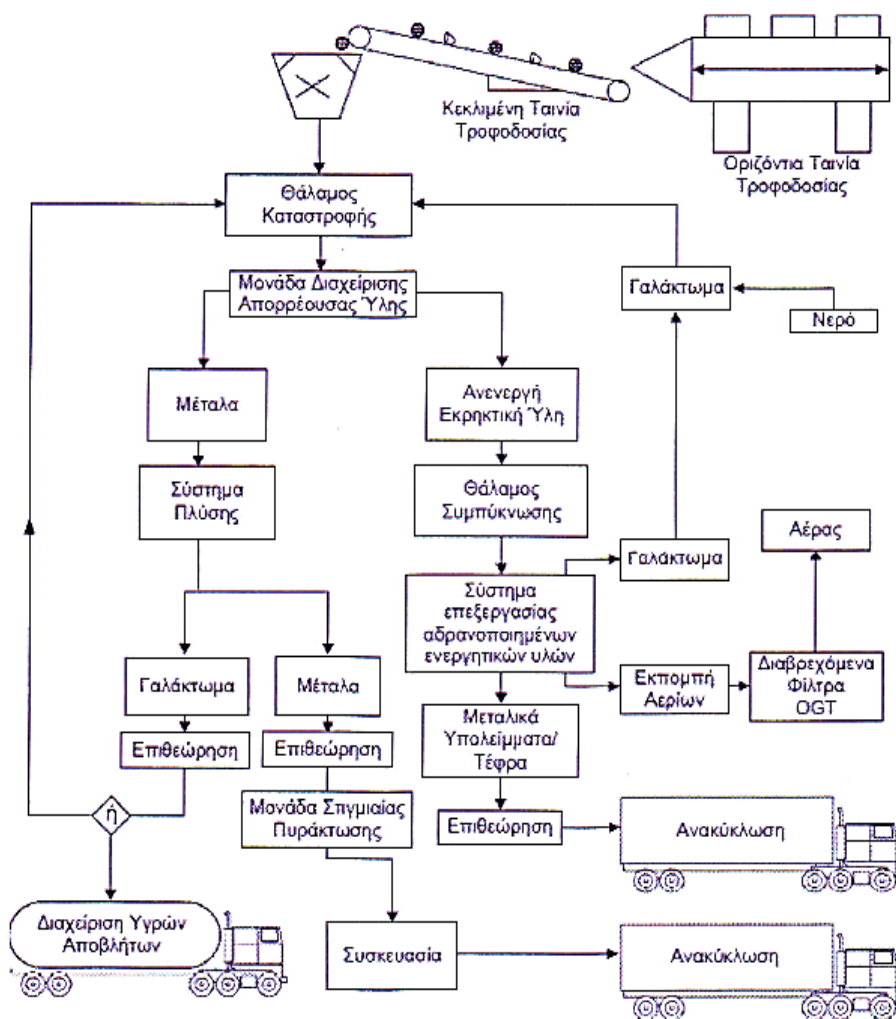
Σχήμα 4. Διάγραμμα παραγωγής εκρηκτικού RDX



Σχήμα 5. Διάγραμμα παραγωγής πυρομαχικού 40mmX53 βομβίδιο.



Σχήμα 6. Ενδεικτική σχηματική διάταξη για την αποστρατικοποίηση ναρκών κατά προσωπικού.



Σχήμα 7. Διάγραμμα ροής συστήματος καταστροφής πυρομαχικών (ΕΑΣ-ΑΒΕΕ-ΣΕΛ,, 2019)

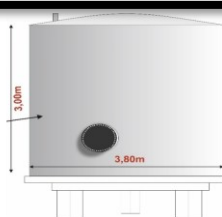
Για τις ανάγκες της διαδικασίας καταστροφής των ναρκών κατά προσωπικού χρησιμοποιήθηκαν οκτώ (8) δεξαμενές όπου αφήνονται σε ηρεμία να καθιζάνουν.

Οι δεξαμενές έχουν διάμετρο που είναι 3,80 μέτρα και ύψος 3,00 μέτρα και εδράζονται σε τσιμεντένιες βάσεις. Ο πυθμένας κάθε δεξαμενής έχει ελαφρά κλίση προς το κέντρο και διαθέτουν ανοξείδωτη βάνα για την εγκατάσταση αντλίας εκκένωσης.

Κατά την λήψη αντιπροσωπευτικών δειγμάτων, μετά από την ολοκλήρωση διαδικασίας καταστροφής 300.000 ναρκών βρέθηκαν να έχουν ύψος ιλύος, υγρασία, πυκνότητα, και συγκεντρώσεις εκρηκτικών ουσιών και παραγώγων αποσύνθεσης (mg/kg dry weight) ως ακολούθως (ΒΕΛΤΙΩΝ Α.Ε. - ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ, 2023):

Πίνακας 1. Δεξαμενές διαχείρισης υγρών αποβλήτων κατά τη διαδικασία καταστροφής ναρκών

Δεξαμενή (Tank)	Ύψος ιλύος	Υγρασία	Πυκνότητα	Όγκος ιλύος σε Κυβικά μέτρα
Δεξαμενή (Tank) 1	1,00 m	40,8%	1,264 g/mL	11,46 m ³
Δεξαμενή (Tank) 2	1,00m	55,0%	1,264 g/mL	11,46 m ³
Δεξαμενή (Tank) 3	0,93m	59,8%	1,258 g/mL	5,55 m ³
Δεξαμενή (Tank) 4	0,80m	31,8%	1,264 g/mL	4,77 m ³
Δεξαμενή (Tank) 5	0,93m	36,7%	1,264 g/mL	5,55 m ³
Δεξαμενή (Tank) 6	0,96m	62,6%	1,264 g/mL	5,73 m ³
Δεξαμενή (Tank) 7	0,81m	40,6%	1,258 g/mL	4,83 m ³
Δεξαμενή (Tank) 8	1,05m	71,5%	1,258 g/mL	6,26 m ³
ΣΥΝΟΛΟ ΙΛΥΟΣ				55,61 m³



Πίνακας 2. Συγκέντρωση εκρηκτικών ουσιών και παραγώγων αποσύνθεσης στα υγρά απόβλητα της διαδικασίας καταστροφής.

			Όρια ανιχ.	P.E.L.	TANK 1	TANK 2	TANK 3	TANK 4	TANK 5	TANK 6	TANK 7	TANK 8
1	2,4,6-Trinitrotoluene	(TNT)	2,0	51	931280	561724	721424	821358	668651	520770	643792	520501
2	2-Amino-4,6-dinitrotoluene	(2-ADNT)	1,5	11	M.A.	42	1036	M.A.	68	94	M.A.	23
3	4-Amino-2,6-Dinitrotoluene	(4-ADNT)	1,5	11	M.A.	15	25	M.A.	M.A.	7,6	M.A.	18
4	2,4-Dinitrotoluene*	(2,4-DNT)	-	7,4	402	205	609	460	448	364	334	256
5	2,6-Dinitrotoluene	(2,6-DNT)	1,5	1,5	M.A.	M.A.	M.A.	M.A.	M.A.	M.A.	M.A.	M.A.
6	1,3-Dinitrobenzene	(1,3-DNB)	2,0	8,2	28	38	96	36	23	76	18	80
7	1,3,5-Trinitrobenzene	(TNB)	1,5	3200	199	279	454	317	134	249	88	298
8	4-Nitrotoluene	(p-nitrotoluene)	2,0	140	M.A.	M.A.	M.A.	M.A.	M.A.	M.A.	M.A.	M.A.
9	3-Nitrotoluene	(MNT)	2,0	8,2	M.A.	M.A.	M.A.	M.A.	M.A.	M.A.	M.A.	M.A.
10	2-Nitrotoluene	(ortho-nitrotoluene)	2,0	15	M.A.	M.A.	M.A.	M.A.	M.A.	M.A.	M.A.	M.A.
11	Hexogen	(RDX)	2,0	38	7624	7710	12653	18125	4922	6691	2373	10543
12	Oktogen	(HMX)	2,0	5700	241	216	1730	787	695	305	191	133
13	Tetryl	(CE)	2,0	230	31321	257	199	5314	18409	7974	54949	450
14	Στυφνικό οξύ	-	0,5	-	2610	4294	2657	901	3063	2981	708	4598
15	Υγρασία (%)	-	-	-	40,8	55,0	59,8	31,8	36,7	62,6	40,6	71,5
16	Πυκνότητα	-	-	-	1,264 g/mL	1,264 g/mL	1,258 g/mL	1,264 g/mL	1,264 g/mL	1,264 g/mL	1,258 g/mL	1,258 g/mL

Permissible Exposure Limits (PEL) : Οριακές τιμές για χώρους βιομηχανικής χρήσης (USEPA 2021)

Επισημαίνονται οι συγκεντρώσεις που υπερβαίνουν την οριακή τιμή για χώρους βιομηχανικής χρήσης με κόκκινο

M.A.: Μη Ανιχνεύσιμο, <LOQ: Μεγαλύτερο του ορίου ανίχνευσης & μικρότερο του ορίου ποσοτικοποίησης (3 x όριο ανίχνευσης)

1.6 Κατάσταση βιομηχανικών μονάδων παραγωγής

ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ

ΕΛΛΑΔΑ

Στον ελλαδικό χώρο η παρουσία εταιρικών, ιδιωτικών και κρατικών, είναι περιορισμένη. Μπορούν να αναφερθούν οι ακόλουθες εταιρείες.

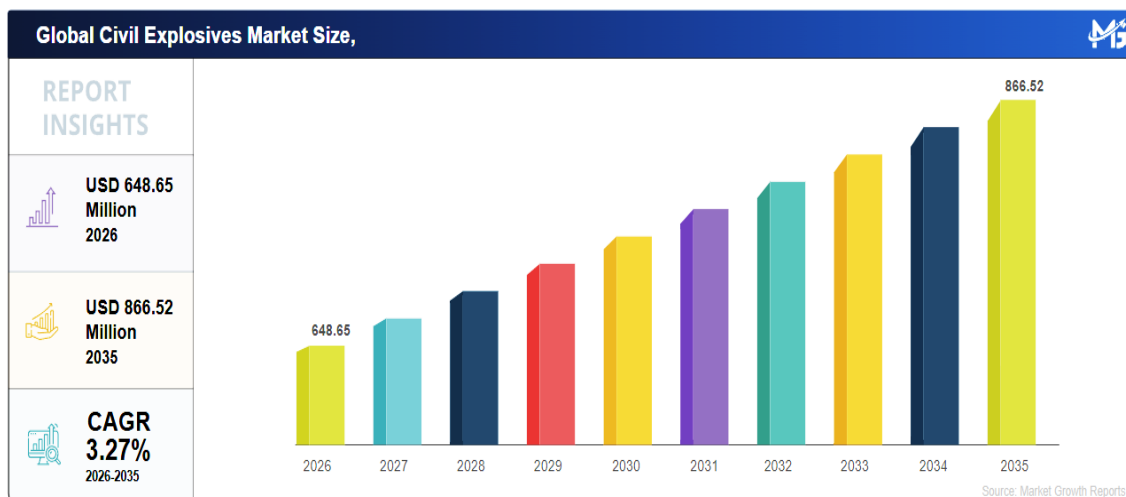
1. Extraco A.E.. Είναι μια σύγχρονη και πρωτοπόρος ελληνική εταιρία που ιδρύθηκε το 1984. Δραστηριοποιείται στον τομέα της εμπορίας και παραγωγής εμπορικών εκρηκτικών υλών. Αναπτύσσει προϊόντα που χρησιμοποιούνται κυρίως σε λατομεία, μεταλλεία και στην κατασκευή δημοσίων έργων (εκβραχισμοί, λατομεία, σήραγγες, δρόμοι, κλπ.). καθαρά ελληνική εταιρεία, εξωστρεφής και δραστήρια, αποτελεί την μεγαλύτερη εταιρεία στην Ελλάδα, ενώ κατέχει κυρίαρχη θέση στην αγορά της Βαλκανικής και της Μεσογείου.
2. Η εταιρεία «ΕΛΤΕΚ» (Ελληνική Τεχνολογία Εκρηκτικών), σήμερα είναι η ταχύτερα αναπτυσσόμενη εταιρεία παραγωγής και εμπορίας εκρηκτικών υλών στη Νοτιοανατολική Ευρώπη. Στην ταχεία εξέλιξη της εταιρείας, έχουν συμβάλει οι κομβικές συνεργασίες και στρατηγικές συμμαχίες που έχει συνάψει με κορυφαίους πολυεθνικούς Ομίλους.
Η πολυεθνική ελβετική εταιρεία «Societe Suisse des Explosifs» (SSE) κατέχει περίπου το 22% των μετοχών της εταιρείας. Με τη συνεργασία αυτή η ΕΛΤΕΚ έχει πλέον πρόσβαση σε τεχνολογία, τεχνογνωσία και διεθνή μεθοδολογία. Η ΕΛΤΕΚ σήμερα δραστηριοποιείται σε ένα εμπορικό δίκτυο που αυξάνεται διαρκώς, εξυπηρετώντας Ελλάδα, Βαλκάνια, την Κεντρική και Βόρεια Ευρώπη (Γερμανία, Πολωνία και Σκανδιναβικές χώρες).
Η εταιρεία έχει επενδύσει σε ένα ιδιόκτητο στόλο κατηγορίας ADR EX III, πιστοποιημένα με τους κανονισμούς ADR που διέπουν τη ασφαλή μεταφορά των επικίνδυνων εμπορευμάτων, από τις αρμόδιες αρχές για τη μεταφορά εκρηκτικών υλών εντός και εκτός Ελλάδας.
Στις παραπάνω κύριες ενεργές εταιρείες του Ελλαδικού χώρου, αξίζει να σημειωθεί ότι υπήρχαν σημαντικές εταιρείες όπως η «ΕΛΒΙΕΜΕΚ» και «ΠΥΡΚΑΛ».

- Η ΕΛΒΙΕΜΕΚ Α.Ε., από την ίδρυσή της το 1945 και μέχρι τα πρώτα χρόνια της δεκαετίας του 1990, δραστηριοποιήθηκε αποκλειστικά στον τομέα της παραγωγής και εμπορίας εκρηκτικών υλών, υπήρξε ίσως η πιο ισχυρή βιομηχανία στο χώρο των εκρηκτικών, λειτουργώντας παραγωγικές μονάδες στα Οινόφυτα και στο Τάχυ Θηβών και αργότερα και στον Άγιο Θωμά Βοιωτίας. Από ομόρρυθμη εταιρεία μετατράπηκε σε ανώνυμη εταιρεία το έτος 1960, με αρχική επωνυμία «ΕΛΒΙΕΜΕΚ Χρήστος Φασσέας και Χρήστος Λάμπρου Ελληνική Βιομηχανία Εκρηκτικών και Πυρομαχικών Ανώνυμη Εταιρεία». Η επωνυμία της εταιρείας μεταβλήθηκε το 1980 σε «ΕΛΒΙΕΜΕΚ Ελληνική Βιομηχανία Εκρηκτικών και Πυρομαχικών Ανώνυμη Εταιρεία» και, το 2006, κατόπιν απόφασης της Τακτικής Γενικής Συνέλευσης των μετόχων της, σε «ΕΛΒΙΕΜΕΚ Αξιοποίηση Ακινήτων-Εμπορευματικά Κέντρα», που είναι η επωνυμία της εταιρείας σήμερα.

- Το Ελληνικό Πυριτιδοποιείο & Καλυκοποιείο γνωστότερο ως «ΠΥΡΚΑΛ», ιδρύθηκε το 1874 αποκτώντας νομική μορφή ανωνύμου εταιρείας με το νόμο 2190/1920. Δραστηριοποιήθηκε και στα εμπορικά εκρηκτικά με μεγάλη επιτυχία μέχρι το 2014.

ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΑΓΟΡΑ

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 μετρικούς τόνους, με το εκρηκτικό νιτρικού αμμωνίου (ANFO) να αντιπροσωπεύει πάνω από το 60% αυτού του όγκου. Τα εκρηκτικά αυτά χρησιμοποιούνται σε ελεγχόμενες ανατινάξεις, εξασφαλίζοντας οικονομικά αποδοτικές εκσκαφές και κατεδαφίσεις. 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 μετρικούς 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. Οι μεγάλοι κατασκευαστές επικεντρώνονται στη βελτίωση των αποτελεσμάτων των ανατινάξεων, μειώνοντας παράλληλα τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Πάνω από το 80% των εκρηκτικών καταναλώνεται σε μεταλλευτικές δραστηριότητες, ιδίως στην εξόρυξη άνθρακα, σιδηρομεταλλεύματος και ασβεστόλιθου. Οι αυξανόμενες επενδύσεις σε μεγάλης κλίμακας έργα υποδομών και στην εξερεύνηση ορυκτών στις αναδυόμενες οικονομίες ενισχύουν περαιτέρω τη ζήτηση. 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).

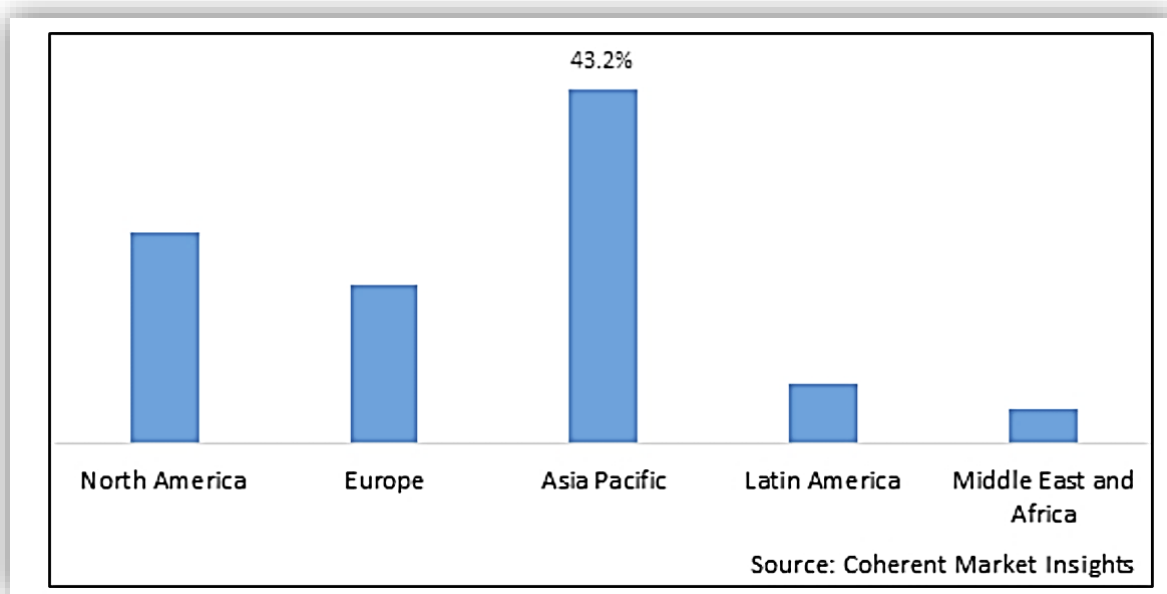


Σχήμα 8. Μέγεθος της παγκόσμιας αγοράς των εκρηκτικών του Πολιτικού Τομέα.

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 μετρικοί τόνοι βράχου εξορύχθηκαν παγκοσμίως χρησιμοποιώντας εκρηκτικά γαλακτώματος χύδην, 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. Η ζήτηση για εκρηκτικά υψηλής ενέργειας όπως ο δυναμίτης και η TNT έχει σημειώσει μέτρια αύξηση στις δραστηριότητες κατασκευής σηράγγων και λατομείων. Επιπλέον, οι αυξανόμενες επενδύσεις σε υποδομές παγκοσμίως - πάνω από 2 τρισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ σε έργα υποδομών ξεκίνησαν το 2023 - έχουν οδηγήσει σε εκρηκτική ζήτηση στον τομέα των πολιτικού μηχανικού και των κατεδαφίσεων.

Οι οικολογικές και χαμηλής τοξικότητας συνθέσεις έχουν δει ανάπτυξη καθώς οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί γίνονται αυστηρότεροι. Οι κατασκευαστές επενδύουν σημαντικά στην Έρευνα και Ανάπτυξη για την ανάπτυξη πράσινων παραλλαγών εκρηκτικών. 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 τηλεπυροδότησης 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.



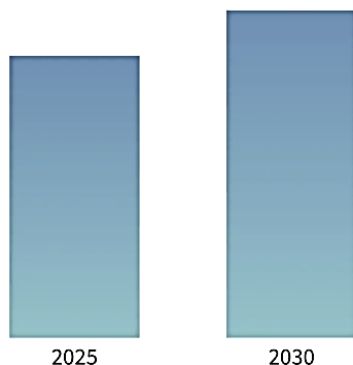
Σχήμα 9. Παγκόσμιο μερίδιο αγοράς βιομηχανικών εκρηκτικών (%) ανά περιοχή (Coherent Market Insights, 2025).

ΑΜΥΝΤΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ

Europe Ammunition Market

Market Size

CAGR >3%



Source : Mordor Intelligence



Study Period 2019 - 2030

Base Year For Estimation 2024

Forecast Data Period 2025 - 2030

Historical Data Period 2019 - 2023

CAGR 3.00%

Market Concentration High

Major Players

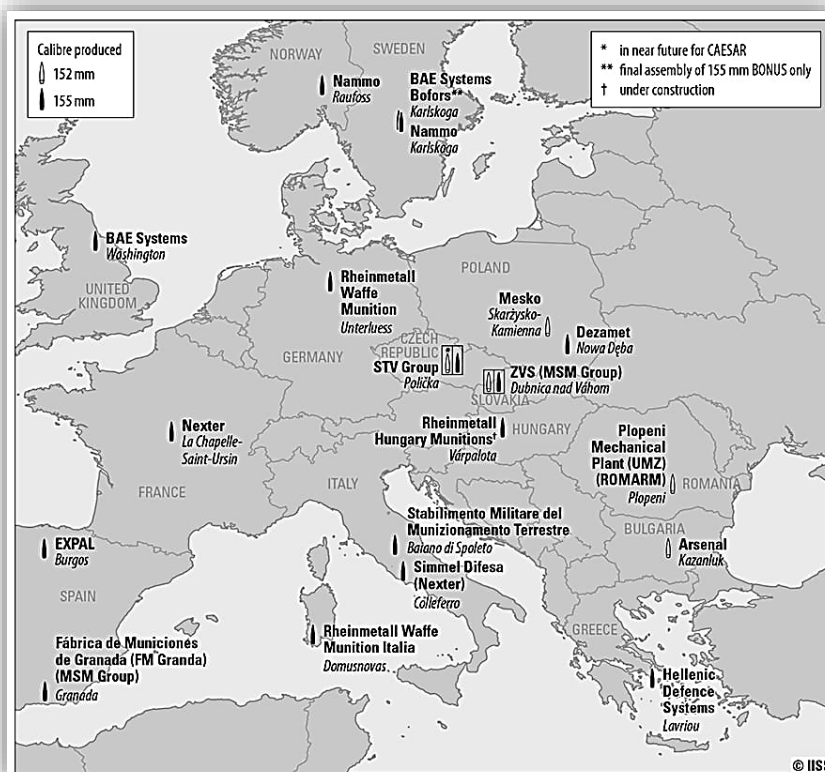


*Disclaimer: Major Players sorted in no particular order

Σχήμα 10. Ευρωπαϊκή αγορά πυρομαχικών (Mondor Intelligence, 2025)

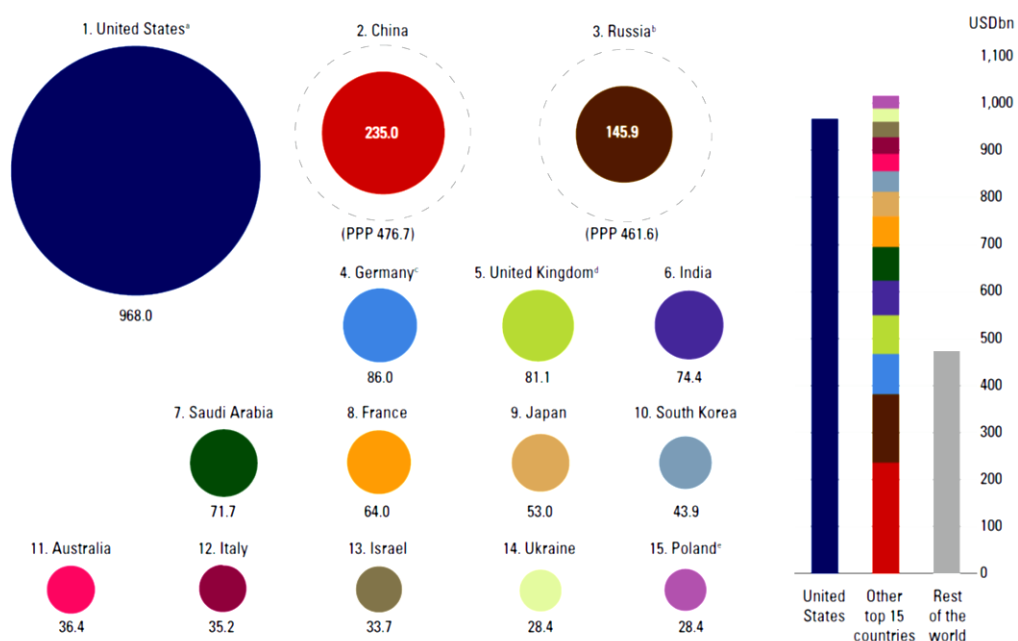
Αρκετές χώρες στην Ευρώπη ενισχύουν την παραγωγή πυρομαχικών για να καλύψουν την τρέχουσα ζήτηση, ιδίως για φυσίγγια 155 χιλιοστών, με βασικούς παίκτες όπως οι Rheinmetall, Nammo και Nexter Group. Η Γερμανία, Γαλλία, η Δανία και η Πολωνία είναι μεταξύ των χωρών που επανεκκινούν ενεργά ή επενδύουν στην εγχώρια παραγωγή. Η ΕΕ 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 πυρίτιδας και εκρηκτικών.

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.

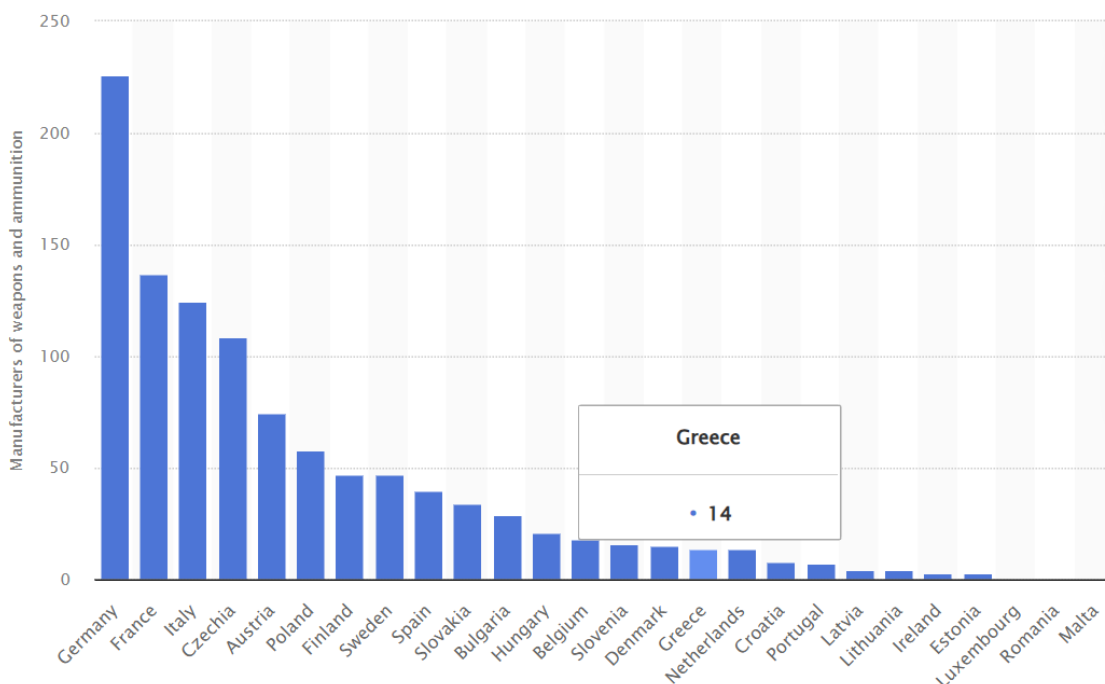


Σχήμα 11. Επιλεγμένες χώρες ως Ευρωπαϊκές μονάδες παραγωγής για πυρομαχικά πυροβολικού (International Institute for Strategic Studies (IISS), 2025).

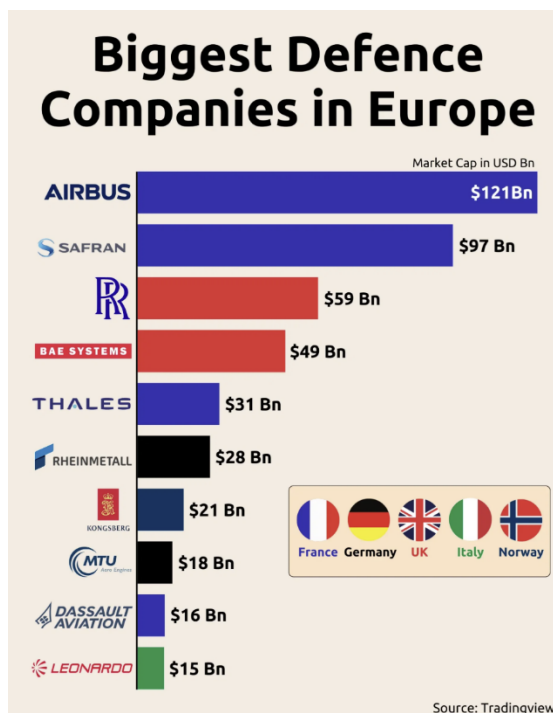
Top 15 defence budgets (USDbn), 2024^{††}



Σχήμα 12. Οι δεκαπέντε μεγαλύτεροι κρατικοί προϋπολογισμοί για αμυντικές δαπάνες (International Institute for Strategic Studies (IISS), 2025).



Σχήμα 13. Κατασκευαστές όπλων και πυρομαχικών στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 2024, ανά χώρα (STATISTA, 2024).



World's biggest arms sellers

Top 10 2021 Analysis by the Stockholm International Peace Research Institute

Company	Country	Arms sales, US\$, billions
Lockheed Martin	US	60.3
Raytheon	US	41.9
Boeing	US	33.4
Northrop Grumman	US	29.9
General Dynamics	US	26.4
BAE Systems	UK	26.0
NORINCO ^a	CHINA	21.6
AVIC ^b	CHINA	20.1
CASC ^c	CHINA	19.1
CETC ^d	CHINA	15.0

a - China North Industries Group Corp
b - Aviation Industry Corp of China
c - China Aerospace Science and Technology Corp
d - China Electronics Technology Group Corp

Εικόνα 1. Μεγαλύτερες αμυντικές βιομηχανίες στην Ευρώπη και παγκοσμίως.

1.7 Κατάσταση βιομηχανικών μονάδων αποστρατιωτικοποίησης

Η αποστρατιωτικοποίηση είναι μια όλο και πιο σημαντική πτυχή της διαχείρισης των πυρομαχικών. Για υψηλότερη απόδοση και μεγαλύτερη ασφάλεια, τα νέα πυρομαχικά και τα προωθητικά γεμίσματα καθιστούν τα παλιά πυρομαχικά απαρχαιωμένα και τα αποθέματα πυρομαχικών κοστίζουν χρήματα τόσο για την εγκατάσταση όσο και για τη συντήρηση, επομένως τα πλεονάζοντα πυρομαχικά αποτελούν ανεπιθύμητη δαπάνη και δυνητικά κίνδυνο.

Η διαδικασία απόρριψης διαμορφώνεται από διάφορους παράγοντες.

Το κυριότερο είναι η ολοένα και πιο αυστηρή περιβαλλοντική ρύθμιση που περιορίζει και τροποποιεί τις μεθόδους. Αλλά άλλοι παράγοντες είναι επίσης σημαντικοί, όπως η ρύθμιση της μεταφόρτωσης, οι περιορισμοί στη διάδοση των συμβατικών όπλων και η ανάκτηση πόρων είτε μέσω οικονομικής πίεσης είτε μέσω πολιτικής. Το αποτέλεσμα είναι ένα συνονθύλευμα τεχνικών αποστρατιωτικοποίησης – άλλοτε συμπληρωματικών, άλλοτε ανταγωνιστικών – για το οποίο το παρόν πόνημα θα προσπαθήσει να σταχυολογήσει και να αποσαφηνίσει.

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 αποστρατιωτικοποίηση.

Η απόρριψη απαγορεύεται στη θάλασσα ως αποτέλεσμα της Σύμβασης του Λονδίνου και των σχετικών συμφωνιών.

Η απόρριψη στη γη περιορίζεται αυστηρά εάν δεν απαγορεύεται στις περισσότερες δικαιοδοσίες. 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 ζητήματα διάδοσης και ασφάλειας.

Αυτό αφήνει την αποστρατιωτικοποίηση ως την κύρια μέθοδο διάθεσης.

Αποστρατιωτικοποίηση σημαίνει αφαίρεση ή άλλως εξουδετέρωση του στρατιωτικού δυναμικού ενός αντικειμένου, στην προκειμένη περίπτωση ενός πυρομαχικού. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει ή όχι την καταστροφή των πυρομαχικών, αλλά απαιτεί την καταστροφή ή τη μετατροπή του ενεργητικού-εκρηκτικού υλικού (Munitions Safety Information Analysis Center (MSIAC), 2006).

Η αποστρατιωτικοποίηση δεν είναι η μόνη επιλογή για την απόρριψη των πυρομαχικών. Συχνά μπορούν να δαπανηθούν για εκπαίδευση κατά προτίμηση από πυρομαχικά με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Απαρχαιωμένα ή πλεονάζοντα πυρομαχικά θα μπορούσαν να πωληθούν σε άλλες χώρες. Ωστόσο, δεν είναι δυνατή ή επιθυμητή η απόρριψη όλων των

πυρομαχικών με αυτόν τον τρόπο, επομένως σημαντική ποσότητα αποστρατικοποιείται. 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 αποστρατιωτικοποίησης ποικίλλει από τεχνολογία σε τεχνολογία, ωστόσο οι τρόποι επίπτωσης είναι παρόμοιοι και στην πραγματικότητα είναι παρόμοιοι με αυτούς που συναντώνται στην κατασκευή πυρομαχικών. Οι κανονισμοί για τις εκπομπές λυμάτων και τη διάθεση στερεών αποβλήτων είναι εθνικοί ή ακόμη και ειδικοί για το κράτος.

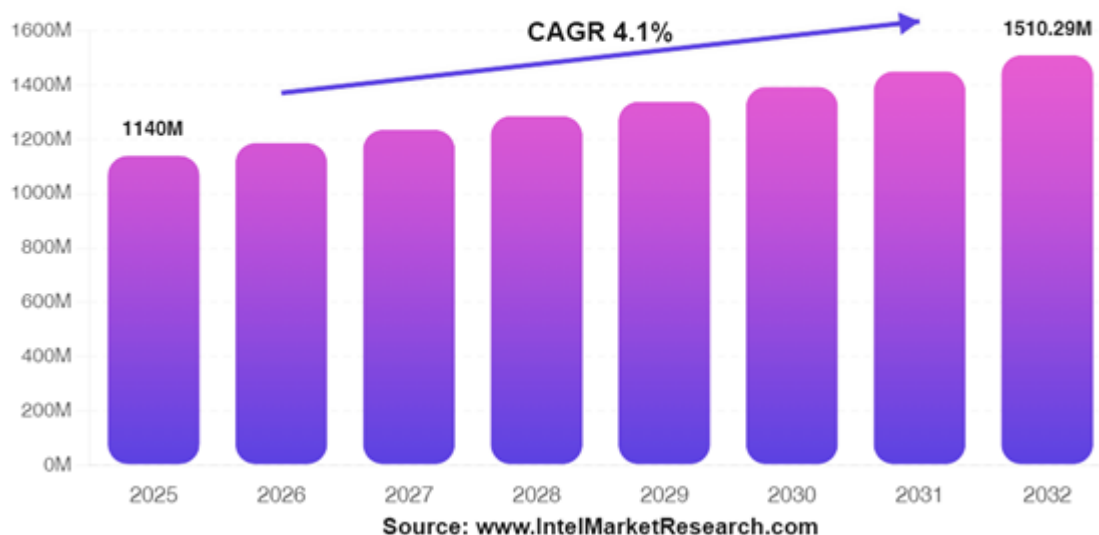
Οι σημαντικότεροι πιθανοί περιβαλλοντικοί κίνδυνοι είναι:

- Λύματα μολυσμένα με TNT, RDX και HMX, που αναφέρονται ως ροζ νερό,
- Λύματα μολυσμένα με νιτρικά,
- Λύματα μολυσμένα με υπερχλωρικά,
- Υπολειμματικά ενεργητικά υλικά,
- Μολυσμένα στερεά απόβλητα,
- Μολυσμένα αναλώσιμα διεργασίας, και
- Επικίνδυνες χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία, ιδίως διαλύτες και οξέα.

Οι παραπάνω ρυπαντές δεν αποτελούν κίνδυνο εάν περιοριστούν και υποβληθούν σε κατάλληλη επεξεργασία, ωστόσο, εάν τους επιτραπεί να εισέλθουν στο περιβάλλον, μπορεί να αποτελέσουν κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία. Το πρωταρχικό μέλημα είναι συνήθως η έκπλυση του ρύπου στο σύστημα υπόγειων υδάτων όπου μπορεί να μεταφερθεί σε πηγάδια που χρησιμοποιούνται για ανθρώπινη κατανάλωση ή να εισέλθει στην ανθρώπινη τροφική αλυσίδα. Άλλοι κίνδυνοι για την υγεία μπορεί να προκύψουν από την έκθεση των εργαζομένων ή του ευρύτερου κοινού, εάν η μολυσμένη γη χρησιμοποιείται για διαφορετικές χρήσεις.

Τα αυξανόμενα προγράμματα εκσυγχρονισμού της άμυνας και οι αυξανόμενες προτεραιότητες για την ασφαλή διάθεση των απαρχαιωμένων αποθεμάτων επηρεάζουν σημαντικά την αγορά αποστρατιωτικοποίησης αχρησιμοποίητων πυρομαχικών (ανακύκλωση ορείχαλκου, απόρριψη εκρηκτικών). Οι κυβερνήσεις υιοθετούν ολοένα και περισσότερο τυποποιημένα πρωτόκολλα για την εξουδετέρωση ασταθών πυρομαχικών, αυξάνοντας τη ζήτηση για προηγμένες τεχνολογίες καταστροφής και συστήματα ανακύκλωσης. Η αυξημένη έμφαση στη συμμόρφωση με την περιβαλλοντική ασφάλεια ενισχύει περαιτέρω τις προοπτικές της αγοράς.

Demilitarization of Unserviceable Ammunition (Recycling Brass, Explosive Disposal) Market



Σχήμα 14. Αποστρατιωτικοποίηση Πυρομαχικών. Καινοτομίες, Προοπτικές & Πρόβλεψη 2026-2034 (INTELMARKET RESEARCH, 2026).

Explosive Ordnance Disposal Top Companies

- 1 L3Harris Technologies, Inc.
- 2 Northrop Grumman Corporation
- 3 Teledyne FLIR LLC
- 4 Cobham Limited
- 5 Med-Eng Holdings ULC (Cadre Holdings, Inc.)

Σχήμα 15. Κορυφαίες εταιρείες αποστρατιωτικοποίησης (Mondor Intelligence, 2025).

2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΑΜΥΝΤΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ

Τα φυσικά, χημικά και τοξικά χαρακτηριστικά είναι σημαντικά για την αξιολόγηση των ροών, τις διαδρομές, την περιβαλλοντική τύχη των εκρηκτικών και τους κινδύνους που δημιουργούν οι ουσίες αυτές. Οι κίνδυνοι εξαρτώνται από ιδιότητες όπως η διαλυτότητα στο νερό, η δυνατότητα εξάτμισης και παράγοντες που επηρεάζουν τη βιοσυσσώρευση, τον καταμερισμό και μεταναστευτικά χαρακτηριστικά (JOANNA AALTO, 2016).

Οι υψηλότεροι κίνδυνοι για μετανάστευση είναι μεταξύ διαλυτών ή πτητικών ουσιών που δεν είναι εύκολα να συγκρατηθούν στο έδαφος. Αυτές είναι επίσης οι ουσίες που πιθανότατα βρίσκονται στα υπόγεια ύδατα.

Τα εκρηκτικά χαρακτηριστικά επηρεάζονται επίσης από τις συνθέσεις.

Γενικά, τα εκρηκτικά χρησιμοποιούνται ευρέως ως μείγματα. TNT ή Composition B (60:40 μείγμα RDX και TNT) χρησιμοποιούνται γενικά ως εκρηκτικά σε κεφαλές πυροβολικού και όλμων.

Το πλαστικό εκρηκτικό C4 αποτελείται από RDX (91%) και πλαστικοποιητές (9%).

Το Octol αποτελείται κυρίως από HMX και TNT σε διαφορετικές αναλογίες (π.χ. αναλογίες 75:25 ή 70:30 επί % κατά βάρος HMX και TNT) συμπεριλαμβανομένου επίσης <1 % κ.β. RDX ως ακαθαρσία. Το HMX είναι επίσης συστατικό όλων των εκρηκτικών μειγμάτων που περιέχουν RDX, δεδομένου ότι περιέχουν RDX στρατιωτικής ποιότητας 8 έως 10% HMX ως πρόσμειξη (JOANNA AALTO, 2016).

Τα χημικά χαρακτηριστικά επηρεάζουν επίσης το ρυθμό αποικοδόμησης, ο οποίος με τη σειρά του είναι ένας σημαντικός καθοριστικός παράγοντας ανθεκτικότητας των οργανικών ρύπων στο έδαφος και τον υδροφόρο ορίζοντα. Οι ιδιότητες τοξικότητας και βιοσυγκέντρωσης καθορίζονται επίσης από τα χημικά χαρακτηριστικά των ουσιών. Οι ιδιότητες των ρυπαντών είναι επίσης απαραίτητες για τη δειγματοληψία και τη διερεύνηση της ρυπασμένης τοποθεσίας στη διαχείριση εκρηκτικών ουσιών.

2.1 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά αποβλήτων

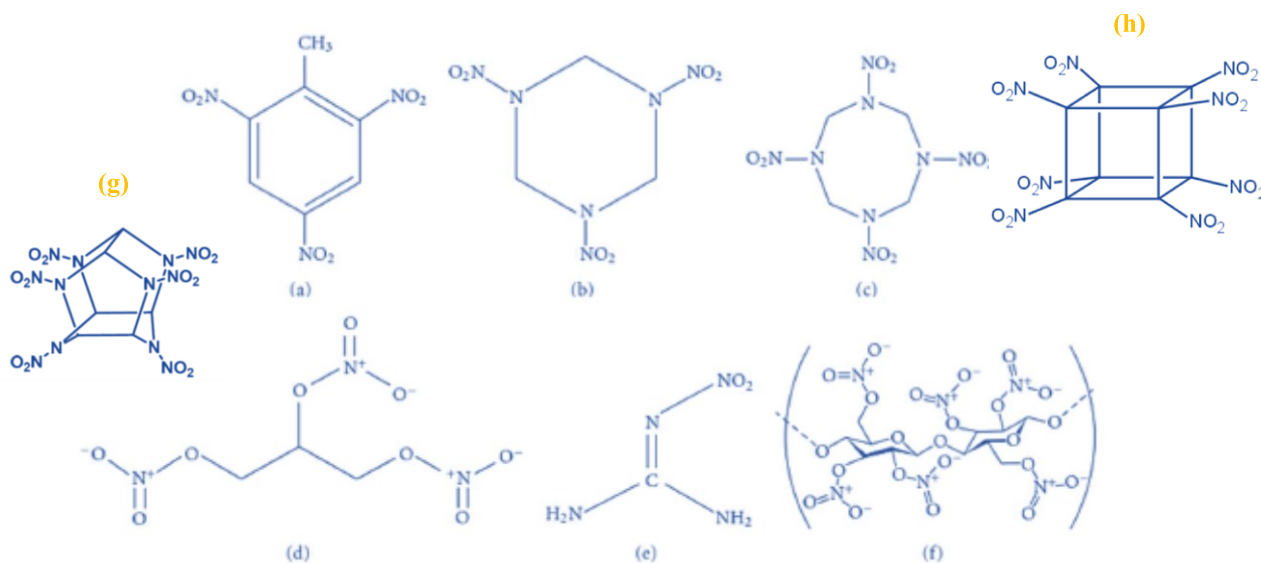
Η παραμονή των οργανικών ουσιών στο έδαφος και τον υδροφόρο ορίζοντα εξαρτάται από την αποικοδόμηση των ενώσεων. Κατά την αποικοδόμηση, η αποικοδόμηση των εκρηκτικών μπορεί να είναι πλήρης, ή μερική, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό άλλων ενδιάμεσων χημικών ουσιών. Η αποικοδόμηση μπορεί να οφείλεται σε βιολογικές διεργασίες (βιοαποικοδόμηση, βιομετασχηματισμός) ή σε χημικές, βιολογικές ή αβιοτικές διεργασίες (μετασχηματισμός). Ο ρυθμός αποικοδόμησης επηρεάζεται από τον τύπο του ρύπου, περιβαλλοντικούς και βιολογικούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία, οι φυσικές και χημικές ιδιότητες του υδροφορέα, οι ιδιότητες του εδάφους και η μικροχλωρίδα στην περιοχή (JOANNA AALTO, 2016).

Οι εκρηκτικές ενώσεις στο έδαφος και τον υδροφόρο ορίζοντα μπορούν να αποικοδομηθούν με βιολογικές, χημικές και αβιοτικές διεργασίες. Τα προϊόντα αποικοδόμησης των TNT, RDX και HMX που έχουν ταυτοποιηθεί σε διαφορετικές διεργασίες με βάση τη βιβλιογραφία συνοψίζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Οι διεργασίες αποικοδόμησης συζητούνται πιο διεξοδικά στα επόμενα κεφάλαια.

Οι ενεργητικές χημικές ουσίες (εκρηκτικά και προωθητικά) περιέχουν νιτρο-NO₂-χαρακτηριστικές ομάδες και ανήκουν σε νιτροαρωματικές, νιτραμινικούς ή νιτρικούς εστέρες.

Οι χημικές δομές των κοινών εκρηκτικών και προωθητικών είναι (a) 2,4,6-trinitrotoluene (**TNT**), (b) hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine (**RDX**), (c) octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-terazocine (**HMX**) και προωθητικά (d) nitroglycerin (**NG**), (e) nitroguanidine (**NQ**) (f) nitrocellulose (**NC**), (g) **CL-20**, (h) **ONC**.



Σχήμα 16. Οι χημικές δομές των κοινών εκρηκτικών και προωθητικών

Πίνακας 3. Οι φυσικοχημικές ιδιότητες ορισμένων κοινών εκρηκτικών που χρησιμοποιούνται στις στρατιωτικές εφαρμογές (Environmental Protection Agency, SITE CHARACTERIZATION FOR MUNITIONS CONSTITUENTS, 2012).

Common Name	Molecular Weight (g mol ⁻¹)	Melting Point (°C)	Water Solubility ^a at 25 °C (mg L ⁻¹)	Octanol/Water Partition Coefficient (log K _{ow})	Henry's Law Constant at 25 °C (atm m ³ mol ⁻¹)	Vapor Pressure at 25 °C (mm Hg)
TNT	227.13	80.1	130	1.6	4.57 x 10 ⁻⁷ *	1.99 x 10 ⁻⁶ *
2,4-DNT	182.15	71	270	1.98	1.86 x 10 ⁻⁷	1.47 x 10 ⁻⁴
2,6-DNT	182.15	64-66	206	2.02		5.7 x 10 ⁻⁴
2-Am-DNT	197.17	176	42	1.94		4.0 x 10 ⁻⁵
4-Am-DNT	197.17	171	42	1.91		2.0 x 10 ⁻⁵
Tetryl	287.17	129.5	75	2.04	2.69 x 10 ⁻¹¹	5.69 x 10 ⁻⁹
TATB	258.15	ND	32	0.7	5.8 x 10 ⁻¹²	1.34 x 10 ⁻¹¹
Picric Acid	229.10	121.8	12800	1.33	1.7 x 10 ⁻⁸	7.5 x 10 ⁻⁷
NC	10 ⁵ -10 ⁶	206 ^b	Insoluble	ND ^c	ND	ND
PETN	316.17	143.3	43*	3.71	1.7 x 10 ⁻⁹	5.38 x 10 ⁻⁹
NG	227.11	13.5	1800	1.62	3.4 x 10 ⁻⁶ *	2 x 10 ⁻⁴
EGDN	152.08	-22.3	5200	1.16	2.52 x 10 ⁻⁶	7.2 x 10 ⁻²
RDX	222.26	205	56.3	0.90	1.96 x 10 ⁻¹¹	4.0 x 10 ⁻⁹
HMX	296.16	286	4.5	0.17	2.60 x 10 ⁻¹⁵	3.3 x 10 ⁻¹⁴
CL-20	438.19	260 ^b	3.7	1.92	ND	ND
NQ	104.07	239	4400	-0.89	4.67 x 10 ⁻¹⁶	1.43 x 10 ⁻¹¹

Note: ^a At 20°C; ^b With decomposition; ^c ND – Not determined;
 * This value is uncertain; range of cited values from 2.1 to 43 mg L⁻¹

Με υδατοδιαλυτότητα 130 mg/L στους 20°C, το TNT είναι δυσδιάλυτη 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 20°C και 5 mg/l στους 25°C, αντίστοιχα) και ως εκ τούτου, διαλύονται σε νερό λιγότερο σε σύγκριση με το TNT. Στην ίδια θερμοκρασία 20°C, η διαλυτότητα του HMX μετρήθηκε στα 3,34 (±0,12) mg/L (JOANNA AALTO, 2016). Ωστόσο, ο ρυθμός διάλυσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία, σε ένα εύρος 3-33°C, αλλά η διάλυση δεν εξαρτάται από το pH. Για παράδειγμα, σε χαμηλότερες θερμοκρασίες στους 10°C που αντιστοιχούν σε συνθήκες υπόγειων νερών, η διαλυτότητα του HMX είναι μόνο 2 mg/L ενώ η διαλυτότητα του TNT παρέμεινε σχετικά υψηλή στα 110 mg/L όπως μετρήθηκε στη δοκιμή διάλυσης με χρήση οκτανόλης.

2.2 Ποσοτικά χαρακτηριστικά αποβλήτων

Οι ιδιότητες μετανάστευσης των εκρηκτικών ενώσεων αξιολογούνται με βάση τη διαλυτότητα στο νερό και την πιθανότητα δέσμευσης οργανικού άνθρακα σε εδάφη και ιζήματα. Ωστόσο, οι ιδιότητες του εδάφους και του υδροφορέα, όπως το pH και το οξειδοαναγωγικό δυναμικό, επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά μετανάστευσης και συγκράτησης των εκρηκτικών. Η βιολογική αποικοδόμηση και ο μετασχηματισμός των ενώσεων εξαρτώνται επίσης από τις συνθήκες του εδάφους. Επομένως, οι φυσικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους και του υδροφορέα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την αξιολόγηση της μεταφοράς και της τύχης των εκρηκτικών υπολειμμάτων.

Τα εκρηκτικά στο έδαφος και την ακόρεστη ζώνη του υδροφορέα καταλήγουν στα υπόγεια ύδατα μέσω διάλυσης σε νερό. Ο ρυθμός ροής του νερού στους πόρους του εδάφους επηρεάζει τον χρόνο επαφής μεταξύ των εκρηκτικών ενώσεων, του νερού και των σωματιδίων του εδάφους.

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.

Η κατανομή των ρύπων θεωρείται γενικά ισορροπημένη και η συγκέντρωση των ρύπων περίπου σταθερή στο έδαφος, το νερό των πόρων και τον αέρα στους πόρους.

Με βάση την γνωστή τιμή K_d και τη συγκέντρωση των εκρηκτικών ενώσεων στο χώρο, μπορεί να υπολογιστεί η συγκέντρωση της ένωσης στο νερό των πόρων σε ισορροπημένες συνθήκες.

$$k_d = k_{oc} \cdot f_{oc} \quad (1)$$

Εξίσωση 1. Υπολογισμός του συντελεστή κατανομής οργανικών ρύπων.

Όπου

K_d , ο συντελεστής κατανομής εδάφους/νερού (l/Kg ή ml/g)

K_{oc} , συντελεστή κατανομής οργανικού άνθρακα – νερού (l/Kg ή ml/g)

f_{oc} , είναι το ποσοστό του οργανικού άνθρακα στο μέσο (κυμαίνεται από 0.0001 σε 0.03)

Οι ιδιότητες μετανάστευσης και η τύχη των εκρηκτικών μπορούν επίσης να ληφθούν υπόψη εξετάζοντας τις συγκεντρώσεις εκρηκτικών που αναφέρθηκαν από το έδαφος, τις πηγές νερού και τα ιζήματα. Γενικά, οι συγκεντρώσεις είναι πολύ υψηλές σε χώρους που έχουν μολυνθεί από τη λειτουργία εργοστασίων πυρομαχικών και χώρων διάθεσης πυρομαχικών, ενώ ανιχνεύονται σημαντικά χαμηλότερα επίπεδα μόλυνσης λόγω στρατιωτικής εκπαίδευσης και χώρων δοκιμών εκρηκτικών.

Οι αναφερόμενες συγκεντρώσεις TNT, RDX και HMX λόγω των εργοστασίων παραγωγής και διάθεσης πυρομαχικών παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες (JOANNA AALTO, 2016).

Πίνακας 4. Συγκεντρώσεις εκρηκτικών κοντά σε εργοστάσια και χώρους απόρριψης πυρομαχικών.

		Concentration	Characterization of the site	References
Soil	TNT	<0.1 – 10,056 mg/kg	Ammunition plant sites in US	Pennington <i>et al.</i> 1999
	RDX	0.587 – 75,000 mg/kg	Ammunition plant sites in US	US Army 2011 in ATSDR 2012
		<0.1 – 0.50 mg/kg	Ammunition plant sites in US	Pennington <i>et al.</i> 1999
	HMX	<0.1 mg/kg	Ammunition plant sites in US	Pennington <i>et al.</i> 1999
Sediment	RDX	0.363 – 14,100 mg/kg	Iowa Army ammunition plant site	US Army 2011 in ATSDR 2012
Ground-water	TNT	3,400 ± 140 µg/L	Former ammunition production site; and well near former production site, Germany	Godejohann <i>et al.</i> 1998
		910 – 1,370 µg/L	Former ammunition plant site from WW II in Germany	Steuckart <i>et al.</i> 1994
		690 – 870 µg/L	Ammunition plant sites in US	Pennington <i>et al.</i> 1999
		<0.02 – 15,100 µg/L		
	RDX	7.51 – 12,130 µg/L		
		< 50 - 18,000 µg/L	Ammunition plant sites, US	ATSDR 2012
		2,380 – 3,800 µg/L	Former ammunition plant site from WW II in Germany	Steuckart <i>et al.</i> 1994
		310 – 400 µg/L	Ammunition plant sites in US	Pennington <i>et al.</i> 1999
	HMX	7.97 – 25,500 µg/L		
		2.18 – 22.7 µg/L		
		<0.02 – 9,080 µg/L	Ammunition plant sites in US	Pennington <i>et al.</i> 1999
		<0.02 – 2.04 µg/L		
Surface water	TNT	4.0 ± 0.3 µg/L	Former deposition site of neutralization sludge, Germany	Godejohann <i>et al.</i> 1998
	RDX	80 - 120 µg/L up to 36,900 µg/L	Ammunition plant sites Closed army munitions plant	ATSDR 2012
Porewater leachate	TNT	180 ± 7 µg/L	Leachate at former ammunition production site, Germany	Godejohann <i>et al.</i> 1998

Πίνακας 5. Συγκεντρώσεις εκρηκτικών σε χώρους στρατιωτικής εκπαίδευσης και δοκιμών εκρηκτικών.

		Concentration	Characterization of the site	References
Soil	TNT	5.9 µg /kg	Anti-tank range impact area, Älvdalen, Sweden	Wingfors <i>et al.</i> 2006
		<0.01 – 36 mg/kg	Hand grenade ranges, US	Jenkins <i>et al.</i> 2006
		0.04 – 126 mg/kg	Antitank rocket range	
		<0.001 – 5.6 mg/kg	Artillery targets	
	RDX	16,000 mg/kg	US military training site operated for decades	Morley <i>et al.</i> 2006
		9.8 µg /kg	Anti-tank range impact area, Älvdalen, Sweden	Wingfors <i>et al.</i> 2006
		<0.01 – 51 mg/kg	Hand grenade ranges, US	Jenkins <i>et al.</i> 2006
		<0.01 – 5.3 mg/kg	Antitank rocket range	
Ground-water	HMX	<0.001 – 6.5 mg/kg	Artillery targets	
		4,800 µg /kg	Anti-tank range impact area, Älvdalen, Sweden	Wingfors <i>et al.</i> 2006
		<0.01 – 9.1 mg/kg	Hand grenade ranges, US	Jenkins <i>et al.</i> 2006
		23 – 987 mg/kg	Antitank rocket range	
	TNT	0.003 – 5.6 mg/kg	Artillery targets	
		128 ± 6 µg/L	Military training site, Germany	Godejohann <i>et al.</i> 1998
	RDX	0.0087–86.4 µg/L	Aberdeen Proving Ground in US	US Army 2011 in ATSDR 2012
		50 µg/L	shallow well (3-6 m) in silty sand aquifer at US explosives testing range (also contaminated by perchlorate)	Cho <i>et al.</i> 2015
		21 ± 1 µg/L	Military training site, Germany	Godejohann <i>et al.</i> 1998

2.3 Σημεία παραγωγής αποβλήτων & Τεχνικές περιορισμού

Για τις περιπτώσεις των βιομηχανιών αμυντικού τομέα τα σημεία παραγωγής αποβλήτων είναι κυρίως οι χημικές μονάδες παραγωγής των εκρηκτικών πρώτων υλών. Επειδή η πλειονότητα αυτών συνιστούν νιτρο-ενώσεις, οι διαδικασίες νίτρωσης αποτελούν τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές πλευρές των συγκεκριμένων εφαρμογών.

Ας μη διαφεύγει το γεγονός ότι μια αμυντική βιομηχανία στο σύνολό της αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα κάτω από αυστηρά στρατιωτικά πρότυπα με τα ακόλουθα στάδια.

1. Παραγωγή και επεξεργασία των μεταλλικών μερών
2. Δημιουργία πυροδοτικών μηχανισμών (πυροσωλήνας ηλεκτρονικός ή μηχανικός)
3. Παραγωγή εκρηκτικών και προωθητικών πρώτων υλών
4. Γόμωση μεταλλικών μερών προς παραγωγή πυρομαχικών
5. Επισήμανση και συσκευασία πυρομαχικών
6. Μεταφορά και αποθήκευση πυρομαχικών
7. Δοκιμές πυρομαχικών σε στρατιωτικά πεδία βολής και εκπαίδευση προσωπικού (πυρομαχικά ασκήσεων και μάχης)

Όπως γίνεται αντιληπτό το παρόν πόνημα δεν θα μπορούσε να καλύψει την τεράστια ποικιλία εφαρμογών και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των παραπάνω διεργασιών.

Το ενδιαφέρον εντοπίζεται κυρίως στην χημική βιομηχανία δηλ. την παραγωγή εκρηκτικών και προωθητικών πρώτων υλών, τις διαδικασίες γόμωσης, επισήμανσης και συσκευασίας των πυρομαχικών γνωστό στη βιομηχανία ως LAP (Loading Assembly and Packaging).

Είναι φανερό ότι τα στάδια των μεταλλικών κατασκευών καλύπτονται από τις περιπτώσεις βιομηχανιών που ασχολούνται με επεξεργασία μετάλλων με σημαντικά θέματα ρύπανσης με βαρέα μέταλλα και όχι μόνο.

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.

Σύμφωνα με την κείμενη νομοθεσία (Ν.3329/89), τα προερχόμενα από ένα εργοστάσιο εκρηκτικών απόβλητα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες;

- α. Τα επικίνδυνα απόβλητα που είναι τα απόβλητα (υγρά ή αέρια), που προέρχονται από κάποια στάδια της παραγωγικής διαδικασίας και που περιέχουν εκρηκτικές ύλες.
- β. Τα μη επικίνδυνα απόβλητα δηλαδή εκείνα που ενώ δεν περιέχουν εκρηκτικές ύλες μπορεί να περιέχουν άλλες ουσίες επιβλαβείς για το περιβάλλον. Τα επικίνδυνα απόβλητα θα πρέπει με κατάλληλες μηχανικές ή χημικές διεργασίες να απαλλάσσονται από τις εκρηκτικές ύλες και να μεταπίπτουν στην κατηγορία των μη επικινδύνων αποβλήτων.

Οι τεχνικές περιορισμού των αποβλήτων περιλαμβάνουν:

- A. Εφαρμογή της κείμενης νομοθεσίας στην παραγωγή και υιοθέτηση των Βέλτιστων Τεχνικών και ελέγχου στις διεργασίες.
- B. Συντήρηση του κύριου και βοηθητικού μηχανολογικού εξοπλισμού συμπεριλαμβανομένων των κτιριακών υποδομών (π.χ. δεξαμενές καθίζησης) για την αποφυγή διαρροών και ατυχημάτων.
- Γ. Εφαρμογή διαδικασιών διαχείρισης αποβλήτων κατά τα διεθνή πρότυπα (Σύστημα Οικολογικής Διαχείρισης και ελέγχου (EMAS), , EN ISO 14001 κ.α.).
- Δ. Εμπόριο αποβλήτων με κανόνες.

Είναι απαραίτητη η ρύθμιση του εμπορίου αποβλήτων γιατί χωρίς ρύθμιση και έλεγχο, το εμπόριο αποβλήτων μπορεί να αποβεί επιβλαβές για το περιβάλλον και την υγεία των ανθρώπων.

Τα απόβλητα, και ιδιαίτερα εκείνα που περιέχουν επικίνδυνες ουσίες, μπορούν να προκαλέσουν **ρύπανση** του εδάφους, των επιφανειακών υπόγειων και επίγειων νερών, των ωκεανών και να έχουν καταστροφικές συνέπειες για το περιβάλλον. Τα πλαστικά απόβλητα δεν είναι γενικά βιοαποδομήσιμα και παραμένουν στο περιβάλλον για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Εικάζεται ότι ένα ποσοστό μεταξύ 15% και 30% των μεταφορών αποβλήτων σήμερα είναι παράνομες.

Οι μεταφορές που δεν παρακολουθούνται διαφεύγουν των ελέγχων και είναι πιθανότερο τα απόβλητα να διατεθούν κατά τρόπο ακατάλληλο ή να υποβληθούν σε ακατάλληλη επεξεργασία, αυξάνοντας έτσι τους περιβαλλοντικούς κινδύνους. Επίσης, με το παράνομο εμπόριο αποβλήτων χάνεται και η ευκαιρία για επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση των υλικών.

Οι κανόνες της ΕΕ για τις μεταφορές αποβλήτων, οι οποίοι θεσπίστηκαν για πρώτη φορά το 2006, διέπουν:

- τις εξαγωγές αποβλήτων από την ΕΕ σε τρίτες χώρες και τις εισαγωγές αποβλήτων από τρίτες χώρες στην ΕΕ
- τις μεταφορές αποβλήτων μεταξύ κρατών μελών της ΕΕ

Οι κανόνες αφορούν **όλα τα είδη αποβλήτων**.

Εντός της ΕΕ επιτρέπονται και ρυθμίζονται οι μεταφορές επικίνδυνων και μη επικίνδυνων αποβλήτων.

Για τις μεταφορές εκτός της ΕΕ, από την άλλη πλευρά, οι κανόνες απαγορεύουν την εξαγωγή επικίνδυνων αποβλήτων από χώρες της ΕΕ σε χώρες εκτός ΕΕ και εκτός ΟΟΣΑ. Οι διαδικασίες κοινοποίησης και συγκατάθεσης για τις μεταφορές αποβλήτων καθορίζονται στους κανόνες.

Ο κανονισμός της ΕΕ για τις μεταφορές αποβλήτων βασίζεται στη **Σύμβαση της Βασιλείας** του 1989, η οποία αποτελεί την πιο ολοκληρωμένη παγκόσμια περιβαλλοντική συμφωνία για τα επικίνδυνα απόβλητα και άλλα απόβλητα.

Η ΕΕ είναι μέρος αυτής της συμφωνίας του ΟΗΕ από το 1994.

Επιπλέον, οι κανόνες της ΕΕ για τις μεταφορές αποβλήτων βασίζονται σε απόφαση του 2001 του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ) —οι περισσότερες χώρες της ΕΕ είναι μέλη του ΟΟΣΑ— για τη θέσπιση **συστήματος ελέγχου της ανάκτησης αποβλήτων εντός των χωρών του ΟΟΣΑ**.

Το 2024 η ΕΕ επικαιροποίησε τους κανόνες της με σκοπό την καλύτερη ρύθμιση του εμπορίου αποβλήτων εντός της ΕΕ και με τρίτες χώρες. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία και το σχέδιο δράσης για την κυκλική οικονομία, οι στόχοι του αναθεωρημένου κανονισμού της ΕΕ για τις μεταφορές αποβλήτων είναι:

1. η προώθηση της κυκλικής οικονομίας εντός της ΕΕ,
2. η διασφάλιση ότι οι εξαγωγές αποβλήτων δεν βλάπτουν το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία,
3. η αντιμετώπιση των παράνομων μεταφορών.

Οι επικαιροποιημένοι κανόνες περιλαμβάνουν:

1. αυστηρότερους κανόνες για τις εξαγωγές αποβλήτων σε τρίτες χώρες,
2. βελτιωμένους κανόνες για τις μεταφορές εντός της ΕΕ,
3. μέτρα για την αντιμετώπιση των παράνομων μεταφορών.

2.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Αρκετές βιβλιογραφικές αναφορές έχουν δείξει ότι περίπου 15 εκατομμύρια στρέμματα εδάφους στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι μολυσμένα με εκρηκτικά όπως RDX, TNT και HMX. Μεταξύ αυτών, περίπου το 87% του εδάφους συσχετίστηκε με μόλυνση των υπόγειων υδάτων. Παρόμοια επίπεδα εκρηκτικής ρύπανσης έχουν αναφερθεί σε όλη την Ευρώπη και την Ασία (W. Jabez Osborne et. al., 2026). Αξιοσημείωτο είναι ότι το HMX έχει αναγνωριστεί ως ο κύριος ρύπος σε αρκετές ευρωπαϊκές χώρες και τις Ηνωμένες Πολιτείες. Έχει επιβεβαιωθεί από τον στρατό των Ηνωμένων Πολιτειών ότι υπάρχουν σημαντικές συγκεντρώσεις εκρηκτικής ρύπανσης σε 583 τοποθεσίες στις Ηνωμένες Πολιτείες. Αρκετές τοποθεσίες στις ΗΠΑ, γνωστές για την παραγωγή πυρομαχικών και την επεξεργασία εκρηκτικών, έχουν συμπεριληφθεί στον εθνικό κατάλογο των 34 πιο κρίσιμων τοποθεσιών προτεραιότητας με μολυσμένα υπόγεια ύδατα και έδαφος. Επιπλέον, σημαντική ποσότητα μόλυνσης από RDX αναφέρθηκε στο Νέο Μεξικό, κυρίως λόγω της απουσίας επαρκούς επεξεργασίας λυμάτων πριν από την απόρριψη κατά τη διάρκεια εργασιών κατασκευής εκρηκτικών στο Εθνικό Εργαστήριο Los Alamos (LANL).

Η μόλυνση διαπιστώθηκε ότι ήταν εξαιρετικά σοβαρή, με αποτέλεσμα να εντοπιστούν ίχνη εκρηκτικών σε κοντινά πηγάδια, γεγονός που υποδηλώνει τη διείσδυσή τους στα υπόγεια ύδατα. Σύμφωνα με πρόσφατες αναφορές, 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. Ως εκ τούτου, αυτές οι αναφορές υπογραμμίζουν ότι τα εκρηκτικά θεωρούνται ανησυχητικοί περιβαλλοντικοί ρύποι σε ολόκληρο τον κόσμο, λόγω του αυξανόμενου αριθμού στρατιωτικών εγκαταστάσεων.

Πίνακας 6. Οριακές τιμές για εκρηκτικές ουσίες στα εδάφη και στο νερό παροχής (USEPA, 2021)

		Εδάφη (mg/kg)		Νερό οικιακής χρήσης (μg/L)
		Οικιστική χρήση	Βιομηχανική χρήση	
2-Nitrotoluene		3.2	15	0.31
3-Nitrotoluene		0.6	8.2	0.17
4-Nitrotoluene		25	140	4.3
2,4-Dinitrotoluene	(2,4-DNT)	1.7	7.4	0.24
2,6-Dinitrotoluene	(2,6-DNT)	0.4	1.5	0.05
1,3-Dinitrobenzene	(1,3-DNB)	0.6	8.2	0.19
1,3,5-Trinitrobenzene	(TNB)	220	3200	59
4-Amino-2,6-dinitrotoluene	(4-ADNT)	0.77	11	0.19
2-Amino-4,6-dinitrotoluene	(2-ADNT)	0.77	11	0.19
2,4,6-Trinitrotoluene	(TNT)	3.6	51	0.98
Ethylen glycol dinitrate	(EGDN)			
Diethylene glycole dinitrate	(DEGN)			
Nitroglycerin	(NG)	0.63	8.2	0.20
Hexogen	(RDX)	8.3	38	0.97
Oktogen	(HMX)	390	5700	100
tetryl	(CE)	16	230	3.9
Hexa nitro diphenylamine	(HNDA)			
Nitropenta	(PETN)	57	530	17
picric acid	(PA)	13	160	4
Diphenylamine		630	8200	130

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. Ο ακόλουθος πίνακας δείχνει τα επιτρεπόμενα επίπεδα RDX και HMX στο πόσιμο νερό σύμφωνα με τον οργανισμό USEPA και ATSDR (W. Jabez Osborne et. al., 2026).

Πίνακας 7. Επιτρεπόμενα όρια RDX και HMX στο πόσιμο νερό.

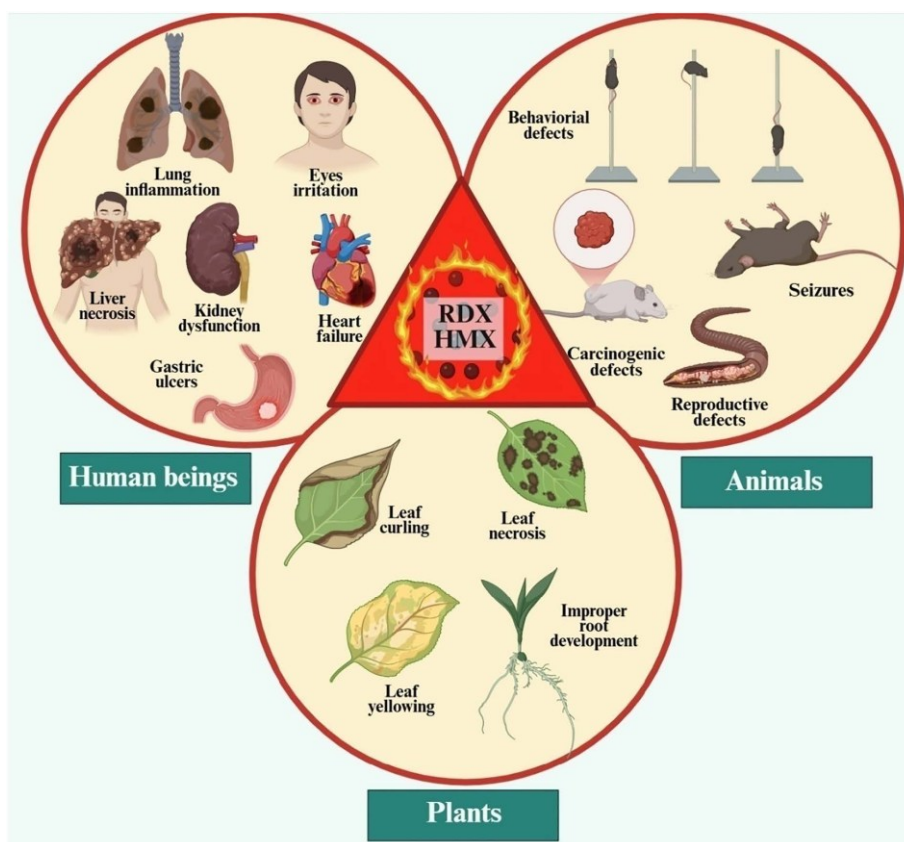
Name of the explosive	Permissible limit in drinking water by USEPA	Permissible limit in drinking water by ATSDR
HMX	0.4 mg/L (Sharma et al., 2023)	0.1 mg/L (Abadin et al., 2013)
RDX	0.002 mg/L (Sharma et al., 2023)	0.2 mg/L (Abadin et al., 2013)

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, μόλις εισέλθουν στο σώμα, προσβάλλουν το κεντρικό νευρικό σύστημα των ζώων, ιδίως των θηλαστικών. Επιπλέον, μπορούν επίσης να μεταβάλουν τη λειτουργία του ήπατος και της καρδιάς, σύμφωνα με τις εκθέσεις της USEPA. Το ανθρώπινο σώμα, όταν εκτίθεται σε εκρηκτικά με διάφορους τρόπους, όπως το δέρμα, η αναπνευστική οδός ή η πεπτική οδός, προκαλεί χρόνιες επιπτώσεις που σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να οδηγήσουν σε κώμα και θάνατο. Σύμφωνα με έκθεση της ATSDR (2012), ο πιο συνηθισμένος τρόπος έκθεσης σε ενώσεις πυρομαχικών είναι το πόσιμο νερό μολυσμένο 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. Σε προηγούμενες μελέτες, παρατηρήθηκε ότι τα κουνέλια που έλαβαν 10 mg/kg μολυσμένου με εκρηκτικά εδάφους υπέστησαν ηπατική ανεπάρκεια και νευρολογικούς σπασμούς.

Θνησιμότητα παρατηρήθηκε επίσης σε ορισμένα από τα κουνέλια λόγω της υψηλής τοξικότητας των εκρηκτικών. Σε μια άλλη παρόμοια μελέτη, ποντίκια που εκτέθηκαν σε RDX και HMX τελικά διαγνώστηκαν με ηπατικό νεόπλασμα. Σε μια μελέτη περίπτωσης, αναφέρθηκαν τιμές LD50 από το στόμα που κυμαίνονταν από 1,7 έως 6,5 g/kg σε τρωκτικά. Αντίθετα, η ενδοφλέβια οδός έδειξε πολύ χαμηλότερη LD₅₀ από 10 έως 38 mg/kg. Επιπλέον, επιβεβαιώθηκε ότι μια από του στόματος δόση 50mg/kg και μια ενδοφλέβια δόση 1mg/kg βρέθηκαν να προκαλούν επιληπτικές κρίσεις σε ποντίκια και άλλα τρωκτικά (W. Jabez Osborne et. al., 2026).

Λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις επικίνδυνες και τοξικές ιδιότητες, η USEPA και το Υπουργείο Υγείας και Ανθρωπίνων Υπηρεσιών των Ηνωμένων Πολιτειών έχουν χαρακτηρίσει τα εκρηκτικά RDX και HMX ως πιθανά καρκινογόνα. Μεταξύ αυτών των δύο, το RDX χαρακτηρίζεται ως καρκινογόνο ομάδας C και ως ανησυχητική ρύπανση από τον Οργανισμό για τις Τοξικές Ουσίες και το Μητρώο Νοσημάτων. Έχει αναφερθεί από αυτούς τους οργανισμούς ότι το RDX και το HMX είναι επικίνδυνα για την υγεία και μπορούν να προκαλέσουν οξεία έως χρόνια σειρά διαταραχών. Και τα δύο αυτά εκρηκτικά έχουν παρατηρηθεί ότι προκαλούν εμετό και ναυτία στους ανθρώπους. Έχει επίσης εντοπιστεί ότι το RDX μπορεί να διαπεράσει τον αιματοεγκεφαλικό φραγμό και να προκαλέσει μεταλλαξιογόνες ανωμαλίες στην γονιδιακή έκφραση.

Μαζί με τους ανθρώπους και τα ζώα, τα φυτά βιώνουν επίσης διάφορες αρνητικές επιπτώσεις κατά την έκθεση 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. Αυτά τα ελαττώματα περιλαμβάνουν συγχωνευμένα φύλλα, άτυπη αμφοτερόπλευρη συμμετρία και ακατάλληλη ανάπτυξη ριζών. Επιπλέον, το RDX αναφέρεται ως επικίνδυνο εκρηκτικό, υπεύθυνο για την πρόκληση αλλοίωσης στην περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη στα φυτά. Τα φυτά που εκτίθενται σε RDX οδήγησαν σε συστροφή των φύλλων, νέκρωση και κιτρίνισμα των φύλλων (χλώρωση). Όταν το RDX απορροφάται από τα φυτά, φράζει στα φύλλα των φυτών λόγω της μετατόπισης ρύπων μέσω του ριζικού συστήματος. Αυτή η πρόσληψη μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τη διάρκεια της έκθεσης. Τελικά, οι μετατοπισμένες ενώσεις καταναλώνονται από ζώα που τρέφονται με τα μολυσμένα φύλλα των φυτών. Το ακόλουθο σχήμα απεικονίζει τις αρνητικές επιπτώσεις των RDX και HMX στον άνθρωπο, τα φυτά και τα ζώα. Η μετακίνηση αυτών των ενώσεων από το ένα επίπεδο στο άλλο μπορεί να οδηγήσει στη βιομεγέθυνση των RDX και HMX.



Σχήμα 17. Διαταραχές που προκαλούνται από RDX και HMX σε φυτά, ζώα και ανθρώπους.

Οι τοξικές επιδράσεις του TNT περιλαμβάνουν αιματολογικές αλλαγές, κυάνωση, μεθαιμοσφαιριναιμία και τοξική ηπατίτιδα. Η μόλυνση είναι πιθανή μέσω εισπνοής, κατάποσης και απορρόφησης από το δέρμα.

Η εξάτμιση της λιωμένης TNT και της σκόνης στον χώρο εργασίας πρέπει να αποφεύγεται.

Η TNT είναι μια ισχυρότερη τοξίνη για τα ψάρια.

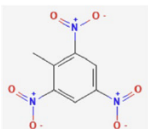
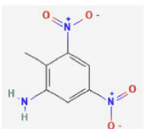
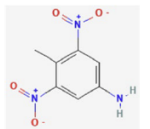
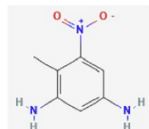
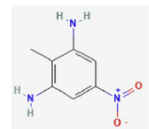
Πίνακας 8. Δεδομένα τοξικότητας και καρκινογένεσης των TNT και DNTs

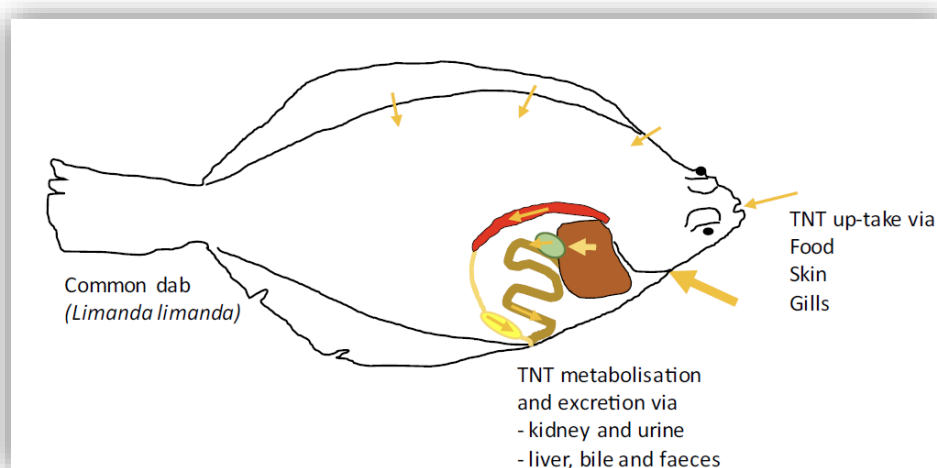
Property	2,4,6-trinitro toluene (TNT)	2,4-dinitro toluene	2,6-dinitro toluene
LD ₅₀ for rat lethal dose, 50% kill	800–1300 mg/kg	268–650 mg/kg	177–795 mg/kg
LC ₅₀ for fish lethal concentration, 50% kill	2.4 mg/l	35.5 mg/l	19.8 mg/l
Carcinogenic class (D)	possible carcinogen (B2)	possible carcinogen (B2)	unambiguous carcinogen (B1)
TDI = Tolerable Daily Intake per kg weight (D)	0.05 µg	0.2 µg	0.0002 µg
Equivalent factor for long-term exposure (TNT = 1) (D)	1	5	150
Permissible Exposure Limit (mg/m ³ in air) US-OSHA	1.5	1.5	1.5

Μεγάλες ποσότητες συμβατικών πυρομαχικών κατέληξαν στον πυθμένα της θάλασσας παγκοσμίως λόγω στρατιωτικής δραστηριότητας, κυρίως μέσω σκόπιμης απόρριψης μετά τους Παγκόσμιους Πολέμους. Στα γερμανικά παράκτια ύδατα, η ποσότητα μόνο των συμβατικών θαλάσσιων πυρομαχικών εκτιμάται σε 1,6 εκατομμύρια τόνους. Μετά από περισσότερα από 80 χρόνια, τα κελύφη πυρομαχικών διαβρώνονται και οι τοξικές ενώσεις από τα πυρομαχικά διαρρέουν στο θαλάσσιο περιβάλλον. Δεδομένου ότι τα ψάρια είναι θεμελιώδη συστατικά των θαλάσσιων οικοσυστημάτων και σημαντική πηγή ανθρώπινης διατροφής, μια σημαντική ανησυχία στο πλαίσιο των θαλάσσιων πυρομαχικών είναι ο τρόπος με τον οποίο οι τοξικές ενώσεις των πυρομαχικών επηρεάζουν τα ψάρια. Το τρινιτροτολουόλιο (TNT) είναι ένα από τα πιο άφθονα τοξικά εκρηκτικά σε συμβατικά πυρομαχικά που απορρίπτονται στη θάλασσα και διαρρέει στο περιβάλλον. Σε χώρους απόρριψης θαλάσσιων πυρομαχικών, η TNT και οι μεταβολίτες της ανιχνεύονται στο νερό, τα ιζήματα και τη βιοποικιλότητα. Γενικά, οι συγκεντρώσεις TNT είναι χαμηλές (στην περιοχή ng/l), αλλά κοντά σε αντικείμενα πυρομαχικών έχουν καταγραφεί υψηλότερες συγκεντρώσεις (µg–mg/l). Η διαρροή TNT από συμβατικά πυρομαχικά που απορρίπτονται στη θάλασσα πιθανότατα θα αυξηθεί στο μέλλον, καθώς τα κελύφη πυρομαχικών συνεχίζουν να διαβρώνονται. Οι φυσικές (ρεύμα, κύματα, θερμότητα) και χημικές (οξειδωση) παράμετροι που διευκολύνουν την αποικοδόμηση των πυρομαχικών αναμένεται επίσης να ενταθούν λόγω της κλιματικής αλλαγής.

Οι υψηλές συγκεντρώσεις TNT ($> 1,0 \text{ mg/l}$ στο νερό) μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τα ψάρια σε πολλαπλά βιολογικά επίπεδα. Ανάλογα με τη δοσολογία, το είδος του ψαριού και το στάδιο ζωής, οι επιπτώσεις της έκθεσης σε TNT κυμαίνονται από την απουσία φυσιολογικών επιδράσεων έως βλάβη στο DNA, τροποποιημένη ενζυμική δραστηριότητα και εμβρυϊκές δυσπλασίες, έως κατεστραμμένα βράγχια, ανώμαλη συμπεριφορά, μειωμένη γονιμότητα και αυξημένη θνησιμότητα. Συνεπώς, τα ψάρια (και άλλοι θαλάσσιοι οργανισμοί) είναι πιθανό να επηρεαστούν σοβαρά από την έκθεση σε TNT στο περιβάλλον τους και τις αλληλεπιδράσεις των ψαριών με την TNT και τους μεταβολίτες του (Michael Gabel et. al., 2026).

Πίνακας 9. Χημικές ιδιότητες του τρινιτροτολουολίου (TNT) και των κύριων μεταβολιτών του.

Substance/Properties	TNT	2-ADNT	4-ADNT	2,4-DANT	2,6-DANT
CAS_Number	000118-96-7	035572-78-2	019406-51-0	6629-29-4	59229-75-3
PubChem CID	8376	37182	29574	96177	91671
Chemical name	2,4,6-trinitrotoluen	2-amino-4,6-dinitro-toluen	4-amino-2,6-dinitrotol-uene	2,4-diamino-6-nitrotol-uene	2,6-diamino-4-nitro-toluene
Molecular formula	$\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_6$	$\text{C}_7\text{H}_7\text{N}_3\text{O}_4$	$\text{C}_7\text{H}_7\text{N}_3\text{O}_4$	$\text{C}_7\text{H}_9\text{N}_3\text{O}_2$	$\text{C}_7\text{H}_9\text{N}_3\text{O}_2$
Mol weight (g/mol)	227.13	197.15	197.15	167.17	167.17
Melting point (°C)	80.1	174.5	171	–	–
Water solubility (Value/Temperature)	115 mg/l/23.0 °C	1,220 mg/l/25 °C	1,220 mg/l/25 °C	–	–
Octanol–water-coeffi- cient (Log P)	1.60	1.84	1.84	0.6	0.8
Hydrogen bond donor count	0	1	1	2	2
Hydrogen bond accep- tor count	6	5	5	4	4
Vapor pressure (mm Hg/ Temperature)	8.02E-006/25 °C	1.07E-005/25 °C	1.07E-005/25 °C	–	–
Henry's law constant [(atm·m ³ /mole)/Tem- perature]	2.08E-008/15 °C	3.27E-011/25 °C	3.27E-011/25 °C	–	–
Structural formula					



Εικόνα 2, Σχηματική πρόσληψη και απέκκριση TNT από ένα πλατύψαρο.

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.

Για ενώσεις που υπόκεινται σε μεταβολικό μετασχηματισμό, όπως η TNT, ο BCF μπορεί να περιγραφεί κινητικά ως ο λόγος του συντελεστή κάθαρσης πρόσληψης ειδικής για το TNT (k_u) προς το άθροισμα του ρυθμού αποβολής του TNT (k_{ep}) και του ρυθμού απώλειας μέσω βιομετασχηματισμού (k_m) (Michael Gabel et. al., 2026).

$$BCF = \frac{C_f}{C_w} = \frac{k_u}{(k_{ep} + k_m)} \quad (2)$$

Εξίσωση 2. Υπολογισμός του συντελεστή βιοσυγκέντρωσης.

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} , συντελεστή αποβολής του TNT

k_m , συντελεστή απώλειας μέσω βιομετασχηματισμού

Πίνακας 10. Πειραματικά προσδιορισμένη πρόσληψη TNT μέσω του νερού και κατανομή στο σώμα του ψαριού σε σολομό του Ατλαντικού (*S. salar*).

Organ	TNT equivalents after 6 h exposure	BCF 6 h (ml/g)	TNT equivalents after 48 h exposure	BCF 48 h (ml/g)	Highest measured concentration	Time to highest concentration (exposure/deuration)
Gills	5.2–6.5 µg/g	46±5.0	1.3 µg/g	9.6±0.5	5.2–6.5 µg/g	6 h (exposure)
Blood	1.2–1.5 µg/g	10±1.4	0.4–0.6 µg/g	2.5±0.6	1.2–1.5 µg/g	6 h (exposure)
Liver	4.2–6.8 µg/g	43±9.2	2.1–2.9 µg/g	18±3.0	4.2–6.8 µg/g	6 h (exposure)
Kidney	6.1–8.5 µg/g	57±9.4	2.0 µg/g	13±1.3	6.1–8.5 µg/g	6 h (exposure)
Muscle	1.7–1.9 µg/g	14±0.7	0.3–0.4 µg/g	2.4±0.4	1.7–1.9 µg/g	6 h (exposure)
Brain	1.8–2.0 µg/g	15±1.0	0.9–1.1 µg/g	6.7±0.5	6.7 ml/g	12 h (exposure)
Intestines	5.0–6.0 µg/g	41±3.9	11–16.5 µg/g	94±18	11–16.5 µg/g	48 h (exposure)
Bile fluid	150 µg/g	404±75	230–330 µg/g	1,933±354	350–430 µg/g	54 h (exposure—>deuration)

Salmons were exposed to 163 µg/l radioactive labelled ^{14}C TNT and concentrations were measured in gills, blood, liver, kidney, muscle, brain, intestines and bile fluid after 1, 3, 6, 12, 24, and 48 h of exposure. Sampling was repeated in the same intervals during 48 h of deuration in clean water. BCF Bioconcentration factor (ml/g) between tissue and water

3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ

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

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

Εκρηκτικά μίγματα που περιέχουν νιτρογλυκερίνη (NG) χαρακτηρίζονται δυναμίτιδες.

Η νιτρογλυκερίνη είναι ένα άχρωμο υγρό που παρασκευάζεται με νίτρωση της γλυκερίνης από μίγμα οξέων (40% νιτρικό οξύ, 59,5% θειικό οξύ και 0,5% νερό). Είναι μία από τις πλέον ευαίσθητες εκρηκτικές ύλες, ως εκ τούτου η χρήση της έχει ελαχιστοποιηθεί. Χρησιμοποιείται ζελατινοποιημένη με νιτροκυτταρίνη για την παραγωγή των λεγόμενων ζελατοδυναμίτιδων. Με το όρο νιτροκυτταρίνη χαρακτηρίζεται οι ουσίες σχηματίζονται με νίτρωση της κυτταρίνης (χρησιμοποιώντας κυρίως βαμβάκι και πολύ ξύλου). Στη σύγχρονή τους μορφή οι ζελατινοδυναμίτιδες αποτελούν εκρηκτικές ύλες, οι οποίες ενσωματώνουν υψηλές τιμές ενέργειας, πυκνότητας και ταχύτητας έκρηξης, δεν περιέχουν καθόλου νιτρογλυκερίνη (όπως και το καρκινογόνο δινιτροτολουένιο), και τα κύρια συστατικά τους είναι το νιτρικό αμμώνιο, η νιτρογλυκόλη και η νιτροκυτταρίνη.

Οι Αμμωνίτιδες είναι κοκκώδεις εκρηκτικές ύλες που επίσης έχουν ως βάση το νιτρικό αμμώνιο. Το ποσοστό του όμως κυμαίνεται από 75% έως 95%. Το νιτρικό αμμώνιο διαδραματίζει το ρόλο του οξειδωτικού, ενώ το ρόλο του καυσίμου παίζει το TNT, και το πετρέλαιο. Το TNT είναι από τις λιγότερο ευαίσθητες εκρηκτικές ύλες και έχει πολύ υψηλή θερμοκρασία έκρηξης (175°C - 190°C). Παρασκευάζεται από τολουένιο (95%) ακολουθώντας πορεία σταδιακής νίτρωσης που οδηγεί σε μονονιτροτολουένιο, δινιτροτολουένιο και τελικά σε τρινιτροτολουένιο. Οι αμμωνίτιδες είναι οικονομικά εκρηκτικά για χρήση σε διατρήματα μικρής ή μεσαίας διαμέτρου. Η απουσία νιτρογλυκόλης ή νιτρογλυκερίνης καθιστούν τις αμμωνίτιδες ασφαλείς κατά τη χρήση τους. Ωστόσο, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε νιτρικό αμμώνιο, οι αμμωνίτιδες έχουν μικρή αντοχή στην υγρασία. Ακόμη οικονομικότερες αλλά εξίσου υγροσκοπικές είναι οι Πετραμμωνίτιδες (ANFO, Ammonium Nitrate – Fuel Oil). Πρόκειται για τις πλέον απλές εκρηκτικές ύλες οι οποίες αποτελούνται από μίγματα νιτρικού αμμωνίου και πετρελαίου.

Βασική προϋπόθεση για την παραγωγή ANFO υψηλής απόδοσης είναι η χρήση νιτρικού αμμωνίου υψηλής απορροφητικότητας (μεγάλο πορώδες) (Κοίλιαρης Π., 2017).

Τόσο οι ζελατινοδυναμίτιδες, όσο και οι αμμωνίτιδες και το ANFO ανήκουν στην κατηγορία των παραδοσιακών εμπορικών εκρηκτικών. Τα τελευταία όμως 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, αναμεμιγμένο με ελαιώδη συστατικά και γαλακτωματοποιητή. Σε ειδικές περιπτώσεις μπορεί να προστίθεται αλουμίνιο (Al) για την αύξηση της ισχύος τους.

3.1 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά αποβλήτων

ΑΜΜΩΝΙΤΙΔΕΣ

Πυκνότητα: 0,98-1,08 gr./cm³

Σχετική κατά βάρος ισχύς: 72%

Ταχύτητα έκρηξης: 4.000 m/sec

Ενέργεια έκρηξης: 1.000 kcal/kg

Θερμοκρασία έκρηξης: 2.930°C



ΖΕΛΑΤΟΔΥΝΑΜΙΤΙΔΕΣ

Πυκνότητα: 1,5 gr/cm³

Σχετική κατά βάρος ισχύς: 86%

Ταχύτητα έκρηξης: 6.000 m/sec

Ενέργεια έκρηξης: 4.100 kJ/kg

Θερμοκρασία έκρηξης: 3000 °C



ΠΕΤΡΑΜΜΩΝΙΤΙΔΕΣ

Πυκνότητα: $0,8 \text{ gr/cm}^3$

Σχετική κατά Βάρος ισχύς: 75%

Ταχύτητα έκρηξης: 3.000 m/sec

Ενέργεια έκρηξης: 920 kcal/kg

Θερμοκρασία έκρηξης: $2.600 \text{ }^\circ\text{C}$



ΓΑΛΑΚΤΩΜΑΤΑ

Πυκνότητα: $1,2 \text{ gr/cm}^3$

Σχετική κατά βάρος ισχύς: 80%

Ταχύτητα έκρηξης: 5.500 m/sec

Ενέργεια έκρηξης: 965 kcal/kg



Οι βασικές κατηγορίες εκρηκτικών υλών που χρειάζονται διαχείριση ή καταστροφή περιλαμβάνουν τα εκρηκτικά στοιχεία ή υλικά που προκύπτουν ως παραπροϊόντα κατά την παραγωγή, την αποθήκευση ή τη χρήση τους, υλικά που έχουν ρυπανθεί από εκρηκτικές ύλες σε βαθμό που ο κίνδυνος πυρκαγιάς ή έκρηξης κρίνεται αυξημένος, εκρηκτικές ύλες που δεν είναι πια λειτουργικές, καθώς και εκρηκτικές ύλες που έχουν αποσυρθεί από την αγορά για διάφορους λόγους.

Πέραν όμως από τα τελικά προϊόντα, η σύνθεση των εκρηκτικών αυτών περιλαμβάνει διαδικασίες οι οποίες συντελούν στη ρύπανση του περιβάλλοντος με υψηλές ποσότητες νιτρικών ενώσεων, όπως νιτροοργανικών, ανόργανων νιτρικών και νιτρωδών, η τοξικότητα των οποίων είναι ευρέως γνωστή. Βεβαίως, τοξικότητα μπορεί να εμφανίζουν όχι μόνο τα ίδια τα απόβλητα αλλά και τα προϊόντα της αποσύνθεσής τους. Για παράδειγμα, τα νιτροαρωματικά εκρηκτικά είναι τοξικά, αλλά τα προϊόντα που προκύπτουν μετά τον περιβαλλοντικό μετασχηματισμό τους όπως οι αρυλαμίνες, οι αρυλδωξυλαμίνες και τα προϊόντα συμπύκνωσης όπως αζω- ή αζωξυ-ενώσεις, είναι εξίσου ή και περισσότερα τοξικά από τις αρχικές νιτροαρωματικές ενώσεις.

Οι ρυπαντές προκύπτουν κυρίως κατά την παρασκευή των εκρηκτικών πρώτων υλών.

Μπορούν να παραχθούν κατά την ενσωμάτωση των εκρηκτικών σε βιομηχανικά εκρηκτικά, καθώς επίσης και κατά τους καθαρισμούς μηχανημάτων και χώρων. Τα υδατικά απόβλητα τέτοιων εγκαταστάσεων μπορεί να είναι πολύ όξινα ή πολύ βασικά και με υψηλή απαίτηση οξυγόνου, διαλυμένα και αιωρούμενα στερεά, με λάδια και γράσα και φυσικά με υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών.

Η περιβαλλοντική ρύπανση από νιτροενώσεις αποτελεί σημαντικό πρόβλημα δεδομένης της κλίμακας που τα εκρηκτικά παράγονται και χρησιμοποιούνται.

Μέχρι πριν από τη δεκαετία του 1980, τα απόβλητα αυτά συνήθως απορρίπτονταν σε ανεξέλεγκτους χώρους απόθεσης, ρυπαίνοντας έτσι τόσο το έδαφος όσο και τα υπόγεια νερά.. Κατά το παρελθόν, τα απόβλητα αυτά απορρίπτονταν στην ανοιχτή θάλασσα, σε ειδικούς χώρους υγειονομικής ταφής ή οδηγούνταν για καύση εάν οι ποσότητές τους ήταν μικρές. Πολλές φορές, ακόμα και σήμερα, αποτίθενται σε λίμνες ή σε πηγάδια. Όμως, όλες αυτές οι μέθοδοι βλάπτουν το οικοσύστημα. Αφενός η διάθεση στη γη προκαλεί ρύπανση του εδάφους και των υπόγειων νερών, αφετέρου η καύση προξενεί ρύπανση με την απελευθέρωση αερίων του θερμοκηπίου όπως CO₂ και οξειδίων του αζώτου NO_x.

Η τέφρα από την καύση πρέπει κι αυτή με τη σειρά της να υποβληθεί σε επεξεργασία ως επικίνδυνο απόβλητο.

Ιπτάμενη τέφρα - Κωδικός ΕΚΑ 19.01.13* ((ΥΠΕΚΑ, 2024)).

Αποτελεί το ελαφρύτερο ρεύμα τέφρας και είναι αυτό το οποίο παρασύρεται από τα καυσαέρια και συλλέγεται από ειδικά φίλτρα. Η τέφρα αυτή (FA) αποτελεί περίπου το 3% των υποπροϊόντων της καύσης των ΑΣΑ (MSWI) και χαρακτηρίζεται από λεπτόκοκκα σωματίδια και εμφάνιση σκόνης, με γκρι ή σκούρο γκρι χρώμα ((Byoung Hooi Cho et al., 2020; Byoung Hooi Cho et al., 2020)). Οι εικόνες (1) και (2) δείχνουν δείγμα ιπτάμενης τέφρας ΑΣΑ (MSWI FA), μαζί με μια εικόνα ηλεκτρονικού μικροσκοπίου SEM. Σε ότι αφορά τις φυσικές ιδιότητες της τέφρας MSWI FA, η πυκνότητά της είναι χαμηλότερη από εκείνη των άλλων υλικών πλήρωσης που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές από 1,7 έως 2,4 kg/m³.

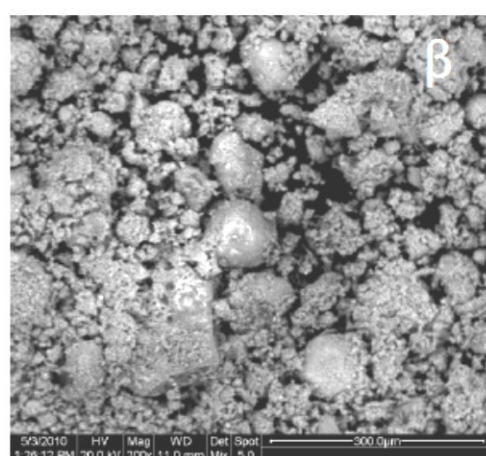
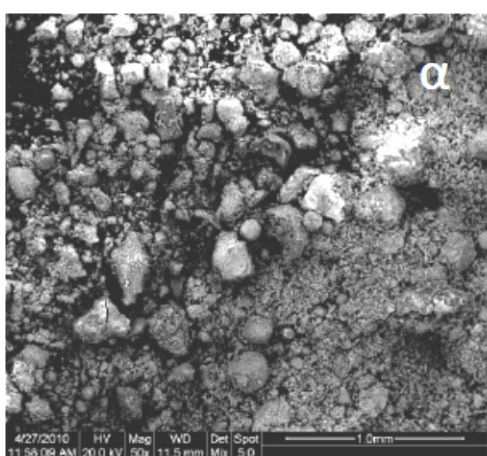
Επιπλέον, η απώλεια πύρωσης [LOI (loss on ignition)] της ιπτάμενης τέφρας (FA MSWI στους 975° C είναι υψηλή (13%) (BABBA ΧΡΥΣΑΝΘΗ (Δ.Δ.), 2018; BABBA ΧΡΥΣΑΝΘΗ (Δ.Δ.), 2018).

Πίνακας 11. Φυσικά χαρακτηριστικά της ιπτάμενης τέφρας ΑΣΑ

	Μέτρηση	Μονάδες
Υγρασία (105 °C)	0.27	wt%
Πυκνότητα	2.52	g/cm ³
pH	12.0	
Ειδική επιφάνεια – BET	1.897	m ² /g
Όγκος πόρων	0.005	cm ³ /g
Μέση διάμετρος πόρων	105.430	Å



Εικόνα 3. Ακατέργαστη ιπτάμενη τέφρα από ΑΣΑ.



Εικόνα 4. Φωτο SEM (α) ακατέργαστης ΑΣΑ (x50) & (β) επεξεργασμένης ιπτάμενης τέφρας (x200)

Γίνεται λοιπόν σαφές ότι η διαχείριση των απόβλητων που προκύπτουν από την παραγωγή και χρήση των εκρηκτικών υλών, λόγω της μεγάλης σταθερότητάς τους δεν είναι εύκολη διαδικασία. Για παράδειγμα, οι αρωματικές νιτροενώσεις είναι ανθεκτικές στη χημική ή βιολογική οξείδωση και στην υδρόλυση. Το υδροφιλικό λιποφιλικό ισοζύγιο των ενώσεων αυτών ευνοεί τη διαλυτότητα των λιπιδίων, μειώνοντας την κινητικότητά τους στο περιβάλλον. Επομένως, εξαιτίας του λιποφιλικού χαρακτήρα τους και του αδρανοποιημένου αρωματικού δακτυλίου, παραμένουν και συσσωρεύονται στο περιβάλλον και η αποκατάσταση των ρευμάτων αποβλήτων ή των ρυπασμένων υπόγειων νερών είναι δύσκολη.

3.2 Ποσοτικά χαρακτηριστικά αποβλήτων

Τα ποσοτικά χαρακτηριστικά των αποβλήτων του πολιτικού τομέα έχουν αρκετές ομοιότητες με αυτές του αμυντικού τομέα, και αυτό είναι αναμενόμενο με δεδομένο την χρήση των ίδιων πρώτων υλών. Η μεγάλη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι η χρήση είναι εντελώς διαφορετική.

Κάτι τέτοιο διαφοροποιεί τις συγκεντρώσεις στην παρασκευή των εμπορικών μιγμάτων.

Πίνακας 12. Παράμετροι για βιομηχανικά λύματα που απορρίπτονται στο νερό ή στο έδαφος (Gabriela Kamińska et al., 2026).

Parameter	Unit	Limit
Temperature	°C	35
pH		6.5-12.5
Total suspended solids (TSS)	mg/L	35
Biochemical oxygen demand (BOD ₅)	mg O ₂ /L	25
Chemical oxygen demand (COD)	mg O ₂ /L	125
Total organic carbon (TOC)	mg C/L	30
Nitrate nitrogen (NO ₃ ⁻ -N)	mg/L	30
Nitrite nitrogen (NO ₂ ⁻ -N)	mg/L	1
Total nitrogen (TN)	mg/L	30
Sodium	mg/L	800
Iron	mg/L	10
Antimony	mg/L	0.3
Lead	mg/L	0.5
Phenol index	mg/L	0.1

3.3 Σημεία παραγωγής αποβλήτων & Τεχνικές περιορισμού

Για τις περιπτώσεις των βιομηχανιών του πολιτικού τομέα τα σημεία παραγωγής αποβλήτων συνήθως δεν αποτελούν οι χημικές μονάδες παραγωγής των εκρηκτικών πρώτων υλών. Επειδή η πλειονότητα αυτών εξακολουθούν να συνιστούν οι νιτρο-ενώσεις, η απόρριψή τους στο περιβάλλον είναι οι σημαντικότερες περιβαλλοντικές πλευρές των συγκεκριμένων εφαρμογών.

Στον πολιτικό τομέα που είναι κατασκευαστικός και διαδικασίες εξόρυξης το σύστημα μετατοπίζεται σε λιγότερα μεταλλικά μέρη με τα ακόλουθα στάδια.

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

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

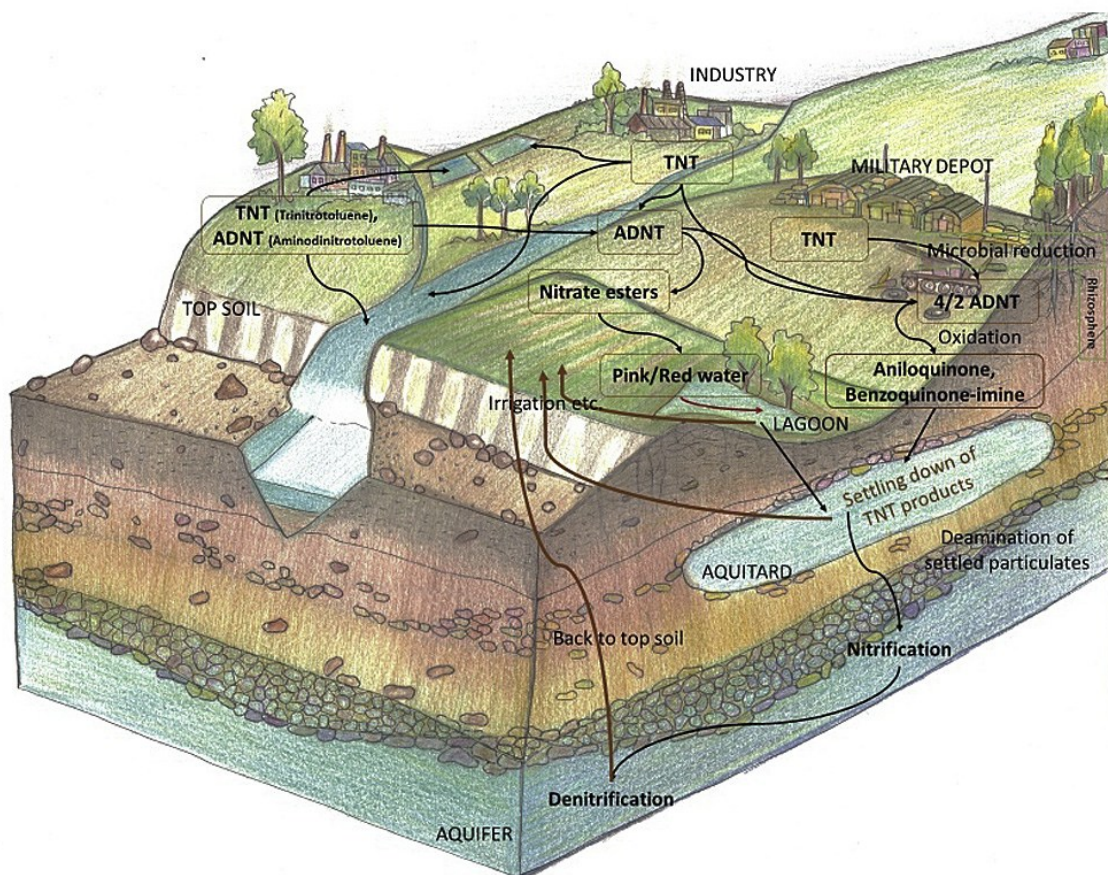
1. Απόβλητα των διεργασιών στις μονάδες παραγωγής εκρηκτικών και γαλακτωμάτων.
2. Απόβλητα κατά τη διαδικασία ανάμιξης, επισήμανσης και συσκευασίας των εμπορικών εκρηκτικών.
3. Απόβλητα από τη χρήση του ειδικού βοηθητικού μηχανολογικού εξοπλισμού.

3.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Υπάρχει ένα σαφές μοτίβο αλληλεπίδρασης με το περιεχόμενο του εδάφους και τους τύπους εδάφους με τα εκρηκτικά υλικά ανάλογα με τη χημική φύση. Για παράδειγμα, η κατανομή του TNT και των προϊόντων αποικοδόμησης, ανιλίνης και νιτροβενζολίου, έχει

συγκεκριμένη διεπιφάνεια αντίδρασης με σωματιδιακή οργανική ύλη, διαλυμένη οργανική ύλη εδάφους και ελεύθερες ενώσεις στο οικοσύστημα. Η βιοτική και η αβιοτική αναγωγική αποικοδόμηση στο έδαφος βοηθούν στο σχηματισμό παραγώγων TNT που ενδεχομένως μολύνουν το γλυκό νερό ή/και το έδαφος με συνεχή έκπλυση μαζί με τα οργανικά συστατικά. Το TNT και το προϊόν αποδόμησής του, 4-αμινο-2,6-δινιτροτολουόλιο (4ADNT), συζεύγγονται οξειδωτικά με οργανική ύλη εδάφους, όπως χουμικά μονομερή (συνυπόστρωμα) και φαινολοοξειδάσες (βιοκαταλύτες) σε έναν μηχανισμό αντίδρασης δύο σταδίων, αναφέροντας ότι το χουμικό μονομερές αρχικά οξειδώνεται σε μια ρίζα ημικινόνης από μια φαινολοοξειδάση, ακολουθούμενη από οξειδωτική σύζευξη με επιπλέον χουμικά μονομερή ή ανιλινικά προϊόντα που προέρχονται από το TNT, σχηματίζοντας μια ανιλινοκινόνη μέσω πυρηνόφιλης προσθήκης ή μια βενζοκινονοϊμίνη μέσω συμπύκνωσης. Αναφέρθηκε ότι το νερό ήταν σχεδόν πλήρως αποτελεσματικό για την αποκατάσταση εδάφους μολυσμένου με TNT (12% TNT στο έδαφος w/w), τα ποσοστά καταστροφής της TNT κυμαίνονταν μεταξύ 98 και 100%, όπου το βήμα που περιορίζει τον ρυθμό και η μήτρα του εδάφους διέπουν την εκχύλιση/διάχυση μορίων TNT από τον πυρήνα του εδάφους στην επιφάνεια του εδάφους για αποικοδόμηση. Η κινητικότητα και η βιοδιαθεσιμότητα της TNT μπορούν επίσης να τροποποιηθούν χρησιμοποιώντας μονοφωσφορικό κάλιο (MKP). Το μολυσμένο έδαφος με MKP παρουσίασε σημαντικά αυξημένη προσρόφηση TNT σε σύγκριση με το μη επεξεργασμένο μολυσμένο έδαφος με MKP, υποδεικνύοντας ότι η εφαρμογή MKP θα μπορούσε να μειώσει τόσο την εκπλυσιμότητα όσο και τη βιοδιαθεσιμότητα της TNT στο έδαφος.

Η συγκριτική περιβαλλοντική τύχη των εκρηκτικών απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα (Soumya Chatterjee et. al., 2017).



Εικόνα 5. Συγκριτική περιβαλλοντική τύχη των εκρηκτικών σε έδαφος και νερό.

Οι τοποθεσίες κατασκευής, αποθήκευσης και εφαρμογής εκρηκτικών στην Ευρώπη και τις ΗΠΑ επηρεάστηκαν από τα NAC (Muhammad Bilal et. al., 2021). Η νιτροομάδα στα εκρηκτικά υπήρχε ως υβρίδιο συντονισμού. Τα μικροβιακά στελέχη πραγματοποίησαν την αναγωγική αποικοδόμηση των νιτροαρωματικών ενώσεων. Η λογική πίσω από την αναγωγική αποικοδόμηση είναι είτε ένας μηχανισμός ενός είτε δύο ηλεκτρονίων.

Οι μικροβιακές οντότητες σε αυτές τις μολυσμένες τοποθεσίες μπορούν να αποκαταστήσουν τα εκρηκτικά NAC. Τα αυτόχθονα μικροβιακά στελέχη αποικοδομούν τις εκρηκτικές ενώσεις μέσω φυσικής εξασθένησης.

Η φυσική εξασθένηση λειτουργεί πιο αργά για την πλήρη αποκατάσταση.

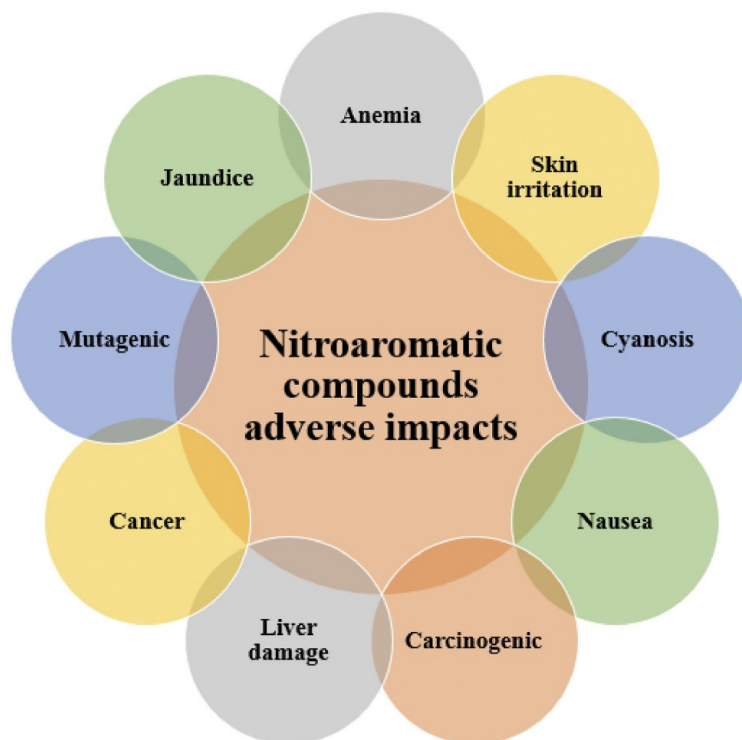
Έτσι, τα εγκλιματισμένα στελέχη σε διαφορετικά νιτροαρωματικά είναι σε θέση να αποδώσουν καλύτερα στη μακροπρόθεσμη βιοαποκατάσταση. Οι βακτηριακές και μυκητιασικές καλλιέργειες θα μπορούσαν να εγκλιματιστούν στο εργαστήριο και να εφαρμοστούν για βιοαποκατάσταση μεγάλης κλίμακας από το υδάτινο και εδαφικό περιβάλλον.

Σε μια μελέτη, ο *Rhodococcus rhodochrous* εγκλιματίστηκε και χρησιμοποιήθηκε για τη βιοαποικοδόμηση του RDX (Seth-Smith et al., 2002). Ο αριθμός των βακτηριακών

κυττάρων στην περιοχή των 107-108 κυττάρων ανά γραμμάριο εδάφους αναφέρθηκε για αποτελεσματική αποκατάσταση στη βιοαποκατάσταση με βάση το έδαφος.

Οι αξενικές καλλιέργειες και τα μικτά μικροβιακά στελέχη έχουν διερευνηθεί για την αποικοδόμηση των ξενοβιοτικών από το περιβάλλον. Παρατηρήθηκε ότι η πλειονότητα των μικτών καλλιεργειών απέδωσε καλύτερα στην αποτελεσματική απομάκρυνση των τοξικών χημικών ουσιών από το περιβάλλον.

Οι αερόβιες και αναερόβιες μικροβιακές διεργασίες διαπιστώθηκε ότι εμπλέκονται στην αποικοδόμηση των εκρηκτικών.



Σχήμα 18. Αρνητικές επιπτώσεις των νιτροαρωματικών ενώσεων.

4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΩΝ ΑΜΥΤΝΙΚΟΥ & ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ

Το νερό είναι ένας από τους ζωτικούς φυσικούς πόρους. Είναι απαραίτητο για τη διατήρηση της ζωής στο ζωικό και φυτικό κόσμο. Παίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της ισορροπίας στο οικοσύστημα. Η ρύπανση των υδάτων αποτελεί μια σημαντική απειλή που αντιμετωπίζει ο κόσμος. Τα βιομηχανικά απόβλητα αποτελούν την κύρια πηγή περιβαλλοντικής ρύπανσης. Οι βιομηχανίες χαρτοπολτού και χαρτιού, τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα, η επεξεργασία τροφίμων, το δέρμα, η φαρμακευτική βιομηχανία και η βιομηχανία εκρηκτικών είναι μερικά παραδείγματα βιομηχανιών που απελευθερώνουν τεράστιες ποσότητες λυμάτων στα υδάτινα σώματα.

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 μολυσμένα υπόγεια ύδατα με εκρηκτικά περιλαμβάνουν βιολογικές, χημικές και φυσικές μεθόδους από τις οποίες άλλες είναι καταστροφικές και άλλες μη καταστροφικές.

Οι προσμείξεις μπορούν να αντιμετωπιστούν βιολογικά σε βιοαντιδραστήρες, χημικά με αλκαλική υδρόλυση, οξειδωτικές διεργασίες όπως AOPs και διεργασίες Fenton (αναφέρονται ως *in situ* μέθοδοι αποκατάστασης) και UV ακτινοβολία (US EPA 1996).

Το κοινό χαρακτηριστικό των ΠΔΟ (προχωρημένων Διαδικασιών Οξείδωσης) ή AOP είναι:

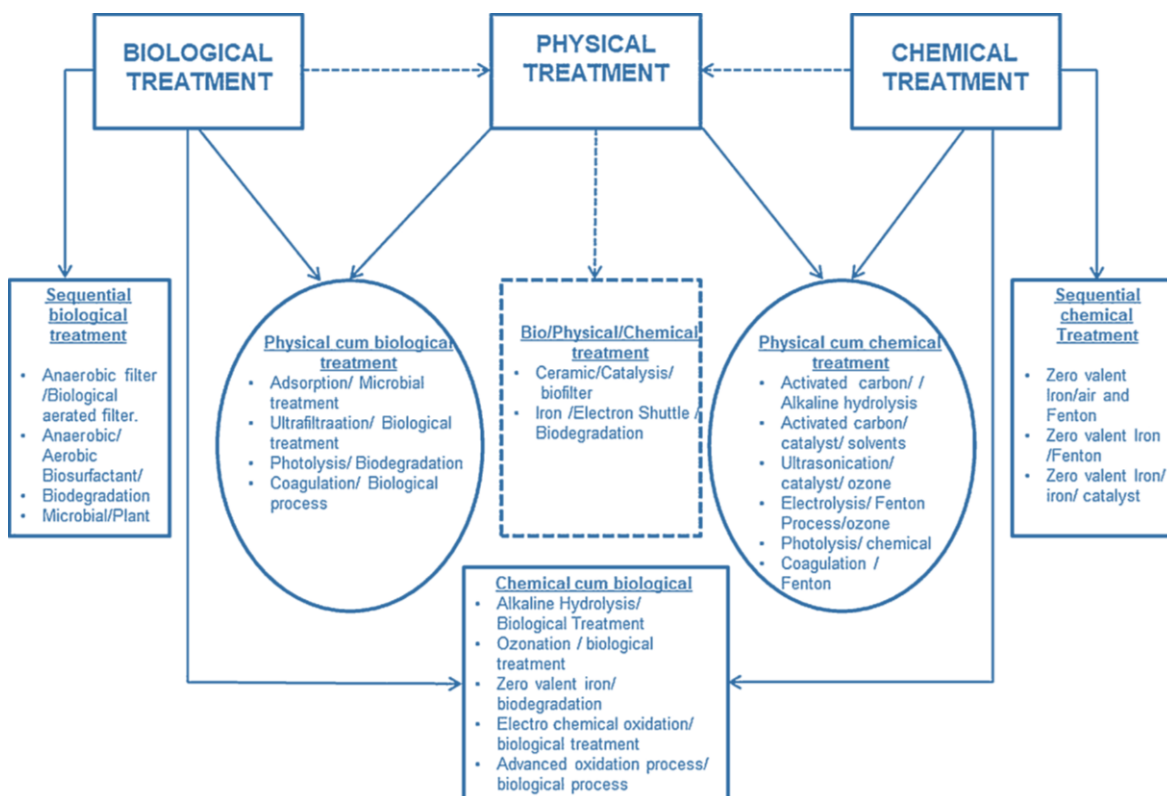
- Οι ισχυρές οξυγονούχες χημικές ενώσεις (Reactive Oxygen Species, ROS) στο μηχανισμό.
- Οι ελεύθερες ρίζες (MANTZABINOS ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ, 2015):
 - ο υδροξυλίου (hydroxyl radicals), $\text{HO}^\bullet$
 - ο υπεροξειδίου (superoxide) $\text{O}_2^{\bullet-}$
 - ο υπερυδροξυλίου (perhydroxyl radicals) $\text{HO}_2^\bullet$

Ακόμη και με διεργασίες φυσικοχημικής προσρόφησης π.χ. χρησιμοποιώντας κοκκώδη ενεργό άνθρακα (GAC) (US EPA 1996) και φλοιός πεύκου. Τα εκρηκτικά μπορούν επίσης να αφαιρεθούν με διαδικασίες φυσικού διαχωρισμού χρησιμοποιώντας διήθηση ή αντίστροφη όσμωση.

4.1 Μέθοδοι επεξεργασίας

Στόχος κάθε βιώσιμης στρατηγικής επεξεργασίας νερού είναι η πλήρης αδρανοποίηση του στοχευμένου ρύπου, με αποτέλεσμα μηδενικές απορρίψεις. Οι ολοκληρωμένες διαδικασίες επεξεργασίας που αξιοποιούν τη συνδυασμένη αποτελεσματικότητα των φυσικών/χημικών/βιολογικών διεργασιών έχουν αποκτήσει τεράστια οικολογική σημασία τελευταία, καθώς ο στόχος της επεξεργασίας νερού μπορεί να επιτευχθεί με τον βέλτιστο συνδυασμό τους.

Ερευνητές σε όλο τον κόσμο εργάζονται σε μια ποικιλία τεχνολογιών επεξεργασίας για τη μετατροπή των επικίνδυνων εκρηκτικών ρύπων σε περιβαλλοντικά φιλικά τελικά προϊόντα. Έχουν αναφερθεί επιτυχείς περιπτώσεις εξάλειψης των αζωτούχων οργανικών ουσιών που υπάρχουν στα λύματα πυρομαχικών χρησιμοποιώντας συνδυασμό φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών. Μια σχηματική αναπαράσταση των ευρέως δοκιμασμένων ολοκληρωμένων διεργασιών επεξεργασίας εκρηκτικών στα λύματα δίνεται στο ακόλουθο σχήμα (Pallvi Bhanota et. al., 2020).



Σχήμα 19. Διάγραμμα με ομάδες ολοκληρωμένων μεθόδων επεξεργασίας για τα λύματα της βιομηχανίας εκρηκτικών.

4.2 Φυσικοχημικές μέθοδοι

Για την επεξεργασία των συγκεκριμένων βιομηχανικών αποβλήτων εφαρμόζονται τεχνικές, που απομακρύνουν ή τροποποιούν κατάλληλα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους ώστε να εξαλείφονται ή ελαττώνονται οι δυσμενείς συνέπειες από τη διάθεσή τους στο περιβάλλον. Η προστασία όλων των φυσικών αποδεκτών από τη συνεχώς απειλούμενη ρύπανση, και συγκεκριμένα την ανεπιθύμητη μεταβολή των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού (Κοίλιαρης Π., 2017).

Βασικά στάδια στην επεξεργασία των υγρών βιομηχανικών αποβλήτων είναι τα ακόλουθα:

1. **Προεπεξεργασία**, κατά την οποία απομακρύνονται υλικά, τα οποία ενδεχομένως να προκαλέσουν ζημιές στο μηχανολογικό εξοπλισμό (π.χ. άμμος, λίπη, έλαια). Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται κατά την προεπεξεργασία προκειμένου να απομακρυνθούν υλικά τα οποία προκαλούν βλάβες στο μηχανολογικό εξοπλισμό είναι βασικά η εσχάρωση, αμμοσυλλογή και η λιποσυλλογή.

Στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις εφαρμόζεται το στάδιο της εξισορρόπησης που σκοπό έχει την ανάμιξη και ομογενοποίηση όλων των ρευμάτων που έχουν παραχθεί δημιουργώντας ένα ομοιόμορφο ποιοτικά απόβλητο, με σταθερή παροχή.

2. **Πρωτοβάθμια επεξεργασία**, με την οποία απομακρύνεται (συνήθως με καθίζηση) ένα μέρος των αιωρούμενων στερεών και ένα μέρος των οργανικών ουσιών (άρα και του BOD), καθώς επίσης και μέρος από τα θρεπτικά συστατικά φωσφόρου και αζώτου. Επιτυγχάνεται με καθίζηση ή μέσω επίπλευσης για την απομάκρυνση των ελαφρών στερεών. Η επίπλευση γίνεται είτε με παροχή αέρα είτε με διαλυμένο αέρα.

3. **Δευτεροβάθμια επεξεργασία**, όπου απομακρύνονται οι βιοαποικοδομήσιμες οργανικές ουσίες και τα αιωρούμενα στερεά με εφαρμογή βιολογικών και χημικών διεργασιών. Περαιτέρω μείωση του διαλυτού οργανικού φορτίου και των αιωρούμενων στερεών, χρησιμοποιώντας φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες. Μείωση στις ποσότητες των αζωτούχων (N) ενώσεων που εμφανίζονται στα υγρά απόβλητα. Αναφορικά με τη βιολογική επεξεργασία, αυτή διακρίνεται σε αερόβια, αναερόβια και αερόβια - αναερόβια διαδικασία, αναλόγως από το είδος των μικροοργανισμών που χρησιμοποιούνται.

Η μέθοδος της αερόβιας επεξεργασίας περιλαμβάνει τον αερισμό και στη συνέχεια την ανάμιξη του υγρού αποβλήτου, σε συνθήκες που επιτρέπουν την ανάπτυξη κατάλληλων αερόβιων μικροοργανισμών, οι οποίοι έχουν την ικανότητα τα διαλυτά και κολλοειδή ρυπαντικά φορτία του αποβλήτου να τα μετατρέπουν σε προϊόντα που θα έχουν την ικανότητα να διαχωρίζονται εύκολα από την υγρή φάση (π.χ. διοξείδιο του άνθρακα, άζωτο).

Με την αναερόβια βιολογική επεξεργασία, η βιολογική αποικοδόμηση του υλικού συντελείται χωρίς την παρουσία του οξυγόνου, με τη δράση των αναερόβιων μικροοργανισμών που αναπτύσσονται με μόνη πηγή ενέργειας τις οργανικές ενώσεις. Η διαδικασία αυτή είναι εξαιρετικά αργή, ωστόσο πετυχαίνει υψηλή βιοαποδόμηση, κατά την επεξεργασία της βιομάζας που

προκύπτει από αερόβια επεξεργασία. Τα συστήματα ενεργού ιλύος έχουν ως στόχο να μειώσουν τους βασικούς ρυπαντές του αποβλήτου, όπως το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο, το ολικό άζωτο, τον ολικό φώσφορο και τα αιωρούμενα σωματίδια.

Η σχετική νομοθεσία είναι αυστηρότατη ως προς τα επιτρεπτά όρια συγκεντρώσεων των αμμωνιακών ιόντων. Για το λόγο αυτό, απαιτείται επιπλέον κατεργασία των αποβλήτων, και η πιο συχνά εφαρμοζόμενη είναι η βιολογική νιτροποίηση / απονιτροποίηση που συμβάλλει άμεσα στη μείωση των αμμωνιακών που περιέχονται στα απόβλητα.

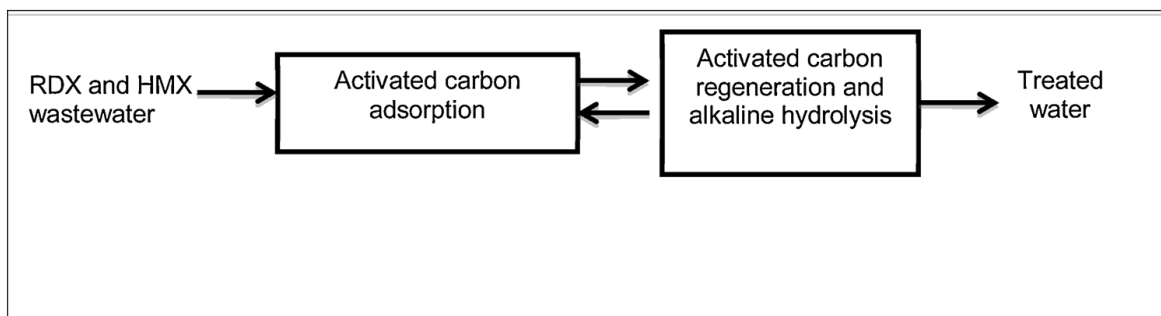
4. Τριτοβάθμια ή προχωρημένη επεξεργασία στα πλαίσια της οποίας απομακρύνονται οι εναπομείνουσες από την δευτεροβάθμια επεξεργασία αιωρούμενες ουσίες (συνήθως με διήθηση), και εδώ είναι πιθανό να εφαρμοστεί και προχωρημένη επεξεργασία, για την απομάκρυνση των αιωρούμενων αλλά και των διαλυμένων ουσιών που παραμένουν στα απόβλητα μετά τη συνηθισμένη βιολογική επεξεργασία, όταν αυτή απαιτείται σε διάφορες εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης του νερού (με συνδυασμό φυσικών, βιολογικών και χημικών διεργασιών όπως χρήση μεμβρανών, αντίστροφη ώσμωση, προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα, και ιοντοεναλλαγή). Στοχεύει στην περαιτέρω αφαίρεση στερεών, οργανικού φορτίου, αμμωνιακών, νιτρικών, θεικών, φωσφορικών και άλλων ρυπαντών όπως τα βαριά μέταλλα, και γενικώς οι τοξικές ενώσεις. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται κατά κανόνα είναι η διήθηση (διήθηση χώρου ή διήθηση επιφάνειας με διάφορους συνδυασμούς διηθητικών μέσων), η αντίστροφη ώσμωση, η χημική επεξεργασία (οξείδωση, αναγωγή κλπ.), η προσρόφηση (κυρίως σε ενεργό άνθρακα), και η ιοντοανταλλαγή.

Η διήθηση περιλαμβάνει πολλές παραλλαγές και τελείται με διάφορους συνδυασμούς διηθητικών μέσων όπως η άμμος, ο ανθρακίτης και διάφορες συνθετικές ίνες και μεμβράνες. Οι συνήθεις διατάξεις επιτυγχάνουν τη διήθηση των επεξεργασμένων αποβλήτων, με βαρύτητα ή υπό πίεση, σε κλίνες αποτελούμενες από αλληπάλληλα στρώματα άμμου και ανθρακίτη. Η εφαρμογή των μεμβρανών είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία από οξική κυτταρίνη ή από ιδιοσκευάσματα πολυμερών και εμφανίζουν βέλτιστες τιμές απόδοσης για συγκεκριμένο τύπο υγρού ρυπαντή. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της χρήσης τους είναι ο μεγάλος βαθμός απομάκρυνσης οργανικού φορτίου και διαλυτών αλάτων, ενώ τα σημαντικότερα μειονεκτήματα είναι το υψηλό κόστος των διατάξεων αλλά και το υψηλό λειτουργικό κόστος που οφείλεται κυρίως στις μεγάλες καταναλώσεις ενέργειας για την επίτευξη της απαιτούμενης υπερπίεσης. Η αντίστροφη ώσμωση είναι μια μέθοδος αντιστροφής της φυσικοχημικής διεργασίας που καλείται ώσμωση, και περιλαμβάνει τη χρήση μεμβρανών που δρώντας ως μοριακό φίλτρο, συγκρατούν τα διαλυμένα συστατικά ενός υδατικού διαλύματος. Η διεργασία χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό διαλυτών συστατικών σε ένα υγρό απόβλητο. Ωθούσα δύναμη είναι η πίεση που εφαρμόζεται σε ένα υδατικό διάλυμα, που υπερβαίνει την ωσμωτική πίεση του διαλύματος έναντι μιας ημιπερατής μεμβράνης, και εξαναγκάζει τη διέλευση καθαρού νερού διαμέσου της μεμβράνης, όχι όμως των διαλυτών συστατικών του.

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 μολυσμένα υπόγεια ύδατα έχουν υποστεί επεξεργασία με κοκκώδη ενεργό άνθρακα σε αντιδραστήρες σταθερής ή ρευστοποιημένης κλίνης. Τα συστήματα επεξεργασίας που βασίζονται σε GAC δεν οδηγούν σε καταστροφή του ρύπου, καθώς απλώς μεταφέρουν τους ρύπους από τη μία φάση στην άλλη. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, αξιολογείται το GAC σε συνδυασμό με χημικές/βιολογικές διεργασίες.

Το GAC, όταν συνδυάζεται με χημική επεξεργασία, έδειξε βελτιωμένη αποτελεσματικότητα επεξεργασίας.

Η προσρόφηση RDX και HMX σε GAC μπορεί να συνδυαστεί με αναγέννηση εκτός σύνδεσης και αλκαλική υδρόλυση. Η αναγέννηση του ενεργού άνθρακα οδήγησε σε 100% εκρόφηση των προϊόντων υδρόλυσης. Μελέτες ισοζυγίου μάζας βρήκαν ανάκτηση άνθρακα και αζώτου σε ποσοστό 94 και 95% αντίστοιχα.



Σχήμα 20. Επεξεργασία λυμάτων με εκρηκτικά σε ενεργό άνθρακα και συνδυασμό με αλκαλική υδρόλυση (Pallvi Bhanota et. al., 2020).

Το GAC που προκύπτει από τη διαδικασία φέρει ποσότητα εκρηκτικού και ταξινομείται ως επικίνδυνο απόβλητο. Η αποτέφρωση είναι η τελική επιλογή διάθεσης που προκαλεί περαιτέρω περιβαλλοντική ρύπανση.

Οι διαδικασίες Fenton και φωτο-Fenton είναι αποτελεσματικές στην καταπολέμηση πολυάριθμων οργανικών ρύπων, συμπεριλαμβανομένων των υπολειμμάτων εκρηκτικών σε υδάτινα σώματα και έδαφος (Varsha Srivastava et. al., 2022). Εξετάστηκε η αποτελεσματικότητα διαφόρων AOPs, δηλαδή η φωτόλυση, η φωτο-υπεροξειδωση, και η οξειδωση φωτο-Fenton, για την αποικοδόμηση του HMX στα λύματα.

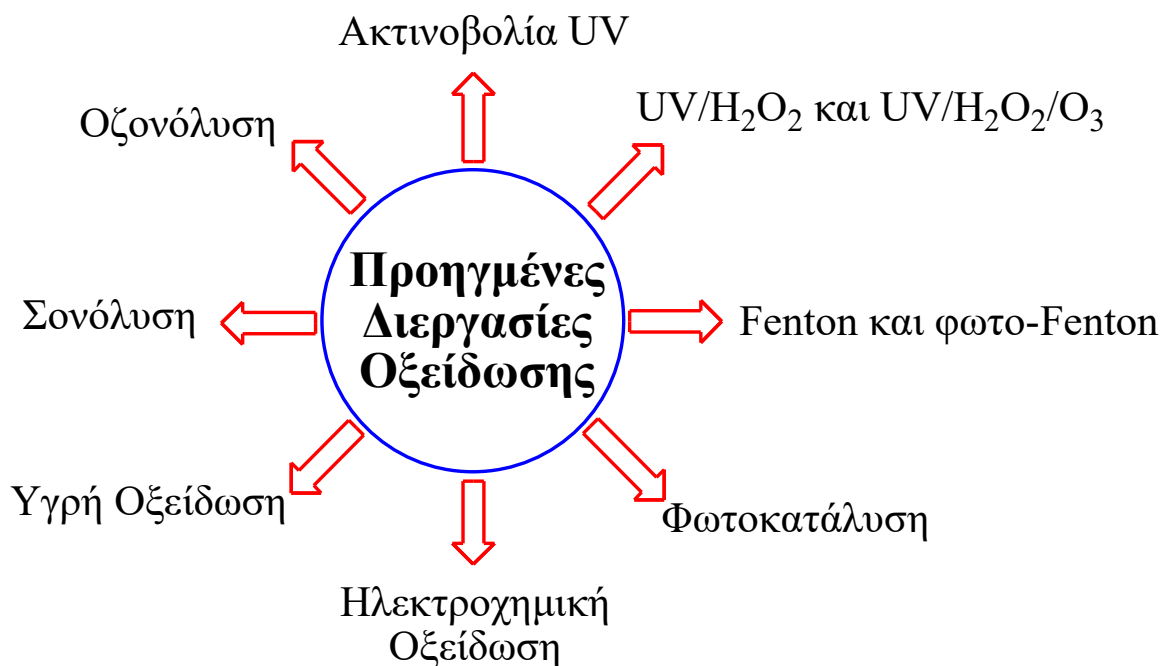
Τόσο η φωτο-υπεροξειδωση όσο και η φωτο-οξειδωση Fenton ήταν σε θέση να απομακρύνουν περίπου το 98% του HMX.

Αναφέρθηκε ότι η συγκέντρωση του αντιδραστήριου Fenton επηρεάζει τον ρυθμό αντίδρασης. Τα αντιδραστήρια Fenton μπορούν να ανοργανοποιήσουν αποτελεσματικά το

HMX, μια θερμοκρασία 25°C, pH 3.0, 0.2 mL 1% υπεροξείδιο του υδρογόνου H₂O₂ και 8.3 mL με 0.01% FeSO₄ · 7H₂O συγκέντρωση και χρόνος αντίδρασης 80 λεπτών βρέθηκαν να είναι βέλτιστοι για την αποικοδόμηση συγκέντρωσης HMX 4 mg/L.

Πίνακας 13. Φυσικοχημικές προσεγγίσεις αποκατάστασης για τη μείωση των HMX

HMX Remediation Approach	Conditions	Medium	Removal/Degradation Efficiency/Adsorption Capacity
Fenton process	Temp. 25 °C; 0.2 mL of 1% H ₂ O ₂ ; 8.3 mL of 0.01% FeSO ₄ ·7H ₂ O, pH 3.0; reaction time 80 min; HMX concentration 4 mg/L, and COD 214 mg/L	Wastewater	81.4%
Zero-valent iron	4% Fe ⁰ (w/w) + 2% didecyl (w/v) cationic surfactant, HMX 45,000 mg/kg, and reaction time 6 days	Soil	>80%
UV and hydrogen peroxide	4.45 wt% Pt/TiO ₂ catalyst, particle diameter < 105 μm, surface area of 62.8 m ² /g batch test; UV radiation 254 nm, stirring 300 rpm, temp 32 °C, pH 3.4–10.4, and HMX 4 ppm	Wastewater	NA
Electro-assisted Fenton	Ti/RuO ₂ -IrO ₂ anode, HMX 5.8 mg/L, and electroactive area 37 cm ²	Wastewater	60%
Fe/Cu bimetal reduction	Volume 60 mL, 600 mg bimetallic particles; 1% solid/liquid loading, pH 3.0, and HMX conc. 4.98 mg/L	Synthetic solution	NA
Adsorption-mesoporous silicas	HMX conc. 21 mg/L, 0.1 g N-SBA-15, contact time 30 min, temp 20 °C, and agitation speed 250 rpm	Aqueous solution of explosives	4.7 μmol/g adsorption capacity
Fenton process	Temp 20 °C and 50 °C, pH 3, HMX conc. 4.5 mg/L, and molar ratios of 5178: 48:1 of Fe ²⁺ : H ₂ O ₂ : HMX	HMX solution	
Granular activated carbon (GAC)	350 μg/L HMX and small-scale column tests	Groundwater	NA
Photo-Fenton process	H ₂ O ₂ to FeSO ₄ and 7H ₂ O ratio (1:1, 1:3 and 3:1); UV irradiation: 125 W and HMX conc. 201.52 ± 2.29 mg/L	Real wastewater	98%
Adsorption on soil	2 g of dried soil, HMX conc. 0.5 to 4 mg/L, and contact time 1 h to 7 d.	Synthetic solution	96%
Fenton and photo-Fenton processes	H ₂ O ₂ concentration of 0.29 M and Fe ²⁺ conc. 0.72 mM, temp (25 + 2 °C), speed 130 rpm, UV wavelength 254 nm, pH 2.8, and HMX conc. 1.07 × 10 ⁻⁴ M	Synthetic solution	84.9%
Poly(N-isopropylacrylamide)-copoly(acrylic acid) hydrogels	HMX conc. 5.3 mg/L, hydrogel mass 0.0024 g, volume of HMX solution 5 mL, and batch experiments	Synthetic solution	48%



Σχήμα 21. Προηγμένες Διεργασίες Οξείδωσης (AOP) (MANTZABINOS ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ, 2015).

Οι χημικές διεργασίες συνήθως συνδυάζονται με τις φυσικές και τις βιολογικές διεργασίες, και στοχεύουν κατά βάση στην οξείδωση ουσιών οι οποίες δεν αποικοδομούνται (οξειδώνονται) βιολογικά.

Οι κύριες χημικές διεργασίες στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων είναι η εξουδετέρωση, η χημική κατακρήμνιση, η κροκίδωση και η χημική απολύμανση.

Η εξουδετέρωση συνίσταται στον μετριασμό της οξύτητας ή της αλκαλικότητας με προσθήκη χημικού αντιδραστηρίου. Στόχος, δηλαδή, είναι η ρύθμιση του pH των υγρών αποβλήτων σε μια περιοχή μεταξύ 6.5 και 8.5 η οποία απαιτείται είτε για τη βελτιστοποίηση των συνθηκών της χημικής ή βιολογικής επεξεργασίας είτε για τη διόρθωση του pH των κατεργασμένων λυμάτων πριν αυτά διατεθούν στο φυσικό περιβάλλον. Τα αντιδραστήρια είναι οξέα, βάσεις ή άλατα, αν και συνήθως γίνεται η εξουδετέρωση όξινων λυμάτων με βάσεις ή άλατα όπως είναι το υδροξείδιο του ασβεστίου, το υδροξείδιο του νατρίου, το ανθρακικό ασβέστιο, το οξείδιο του μαγνησίου και το ανθρακικό νάτριο (Κοίλιαρης Π., 2017).

Η χημική κατακρήμνιση ή ιζηματοποίηση (precipitation) είναι ταυτόχρονα φυσική και χημική διεργασία. Πρόκειται για διεργασία αδιαλυτοποίησης ορισμένων ανεπιθύμητων συστατικών του υγρού απόβλητου με σχηματισμό αδιάλυτων ενώσεων, ως απόρροια της μεταβολής της διαλυτότητάς τους, και επιτυγχάνεται με μεταβολή του pH, προσθήκη κατάλληλων αντιδραστηρίων, αλλαγή του αριθμού οξείδωσης των στοιχείων που θα μετατραπούν σε ίζημα. Η χημική κατακρήμνιση στοχεύει στην αύξηση της απομάκρυνσης

των ολικών και διαλυμένων στερεών και του BOD σε εγκαταστάσεις πρωτοβάθμιας καθίζησης, και εφαρμόζεται επίσης για την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων, αζώτου και φωσφόρου καθώς και για τον έλεγχο της διάβρωσης των υπονόμων από την έκλυση υδρόθειου και θειικού οξέος. Συχνά, η χημική κατακρήμνιση εφαρμόζεται σε συνδυασμό με τις διεργασίες της κροκίδωσης και της συσσωμάτωσης. Τα αντιδραστήρια που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως ισχυρά οξειδωτικά μέσα, όπως το όζον, το διοξειδίο του χλωρίου, το χλώριο, το υπεροξείδιο του υδρογόνου, το υπερμαγγανικό κάλιο κ.ά. Από τις αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα, δημιουργούνται αδιάλυτα άλατα που καθιζάνουν στον πυθμένα των δεξαμενών αντίδρασης ή των δεξαμενών τελικής καθίζησης.

Κροκίδωση ή θρόμβωση ονομάζεται το φαινόμενο της εξουδετέρωσης του ηλεκτρικού φορτίου των μικκυλίων κολλοειδούς διασποράς, με συνέπεια τη συνένωση των αποσταθεροποιημένων κολλοειδών και τη δημιουργία μεγάλων σχηματισμών, δηλαδή κροκίδων, τα οποία μπορούν να απομακρυνθούν με καταβύθιση. Η κροκίδωση αποσκοπεί στην περαιτέρω απομάκρυνση οργανικού φορτίου ως COD και εφαρμόζεται για την κατακρήμνιση των αιωρούμενων – κολλοειδών ρύπων, οι οποίοι στη συνέχεια απομακρύνονται στις δεξαμενές καθίζησης. Τα κυριότερα χημικά μέσα που χρησιμοποιούνται ως κροκιδωτικά ή θρομβωτικά μέσα είναι το θειικό αργίλιο, ο θειικός σίδηρος, ο ένυδρος θειικός υποσίδηρος ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), ο χλωριούχος σίδηρος, το αργλικό νάτριο και η υδράσβεστος.

Ακόμη μία μέθοδος που μπορεί να λάβει χώρα στα πλαίσια της τριτοβάθμιας επεξεργασίας είναι η προσρόφηση. Προσρόφηση είναι το φαινόμενο μεταφοράς μάζας από μια υγρή φάση στην επιφάνεια ενός στερεού. Πρόκειται για διεργασία συσσώρευσης των συστατικών τα οποία βρίσκονται σε ένα διάλυμα πάνω σε μια κατάλληλη επιφάνεια, ενός δηλαδή προσροφητικού μέσου. Η προσρόφηση των συστατικών στο προσροφητικό μέσο πραγματοποιείται μέσω ηλεκτροστατικών δυνάμεων (φυσικών και χημικών) που έλκουν το συστατικό από το διάλυμα στη στερεά επιφάνεια του προσροφητικού μέσου. Διάφορα προσροφητικά μέσα έχουν χρησιμοποιηθεί, ωστόσο ο ενεργός άνθρακας είναι αυτός με τις περισσότερες εφαρμογές. Ο ενεργός άνθρακας παράγεται από ποικίλες οργανικές πρώτες ύλες, ύλες με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, όπως το ξύλο και ο λιγνίτης. Κατά την παραγωγή του, στόχος είναι η δημιουργία πολύ μεγάλης ειδικής επιφάνειας. Στην επιφάνεια αυτή γίνεται προσρόφηση των διαλυμένων ουσιών που περιέχονται στο υγρό απόβλητο. Η προσρόφηση των ρύπων γίνεται καθώς το ρεύμα των αποβλήτων διέρχεται από κλίνες, οι οποίες περιέχουν ενεργό άνθρακα σε κοκκώδη μορφή. Ο χρόνος επαφής πρέπει να είναι

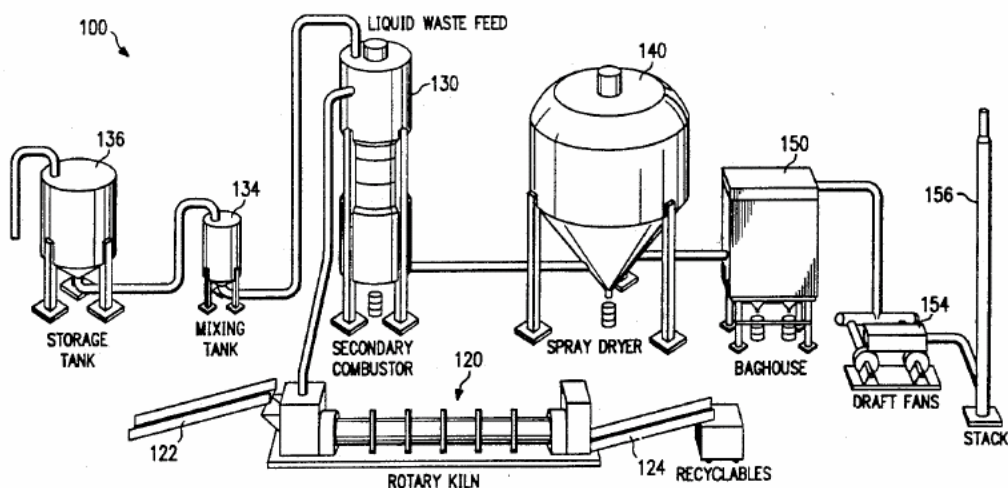
όσο το δυνατόν περιορισμένος διότι οι αυξημένοι χρόνοι αφενός δε βελτιώνουν ουσιαστικά την απόδοση, αφετέρου οδηγούν στη δημιουργία ανεπιθύμητων αναερόβιων συνθηκών.

Για την επεξεργασία των βιομηχανικών υγρών αποβλήτων συχνά εφαρμόζεται η μέθοδος της ιοντοεναλλαγής. Είναι μια φυσικοχημική διεργασία με την οποία επιτυγχάνεται μεταφορά ιόντων από ένα αδιάλυτο στερεό σε μια υγρή φάση και αντίστροφα. Τοιουτοτρόπως, ιόντα που βρίσκονται σε ένα αδιάλυτο μέσο ανταλλαγής αντικαθίστανται από ιόντα διαφορετικού είδους που βρίσκονται στην υγρή φάση. Το αδιάλυτο στερεό διαθέτει ευκίνητα ανιόντα ή κατιόντα ικανά για αντιστρεπτή και στοιχειομετρική εναλλαγή με ιόντα ίδιου φορτίου από το διάλυμα ενός ηλεκτρολύτη με το οποίο έρχεται σε επαφή. Η διεργασία βασίζεται στην ικανότητα που εμφανίζουν κάποια υλικά (πχ. ζεόλιθοι, πολυμερικές ρητίνες, κ.ά.) να δεσμεύουν εκλεκτικά διάφορα ιόντα. Η μέθοδος της ιοντοεναλλαγής βρίσκει συνεχώς νέες εφαρμογές στην επεξεργασία των βιομηχανικών αποβλήτων για την ανάκτηση χρήσιμων υλικών ή την εκλεκτική απομάκρυνση ανεπιθύμητων ουσιών, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση πρώτων υλών και υδάτινων πόρων.

Βασικό χαρακτηριστικό αρκετών από τις τεχνικές που προαναφέρθηκαν είναι οι αυξημένες ποσότητες της ιλύος που προκύπτουν και που οφείλονται τόσο στην προσθήκη χημικών και στα σχηματιζόμενα ιζήματα, όσο και στην αυξημένη απομάκρυνση στερεών. Η ποσότητα της ιλύος από τη χημική επεξεργασία εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο χημικό και τη δόση του, τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων και την απόδοση των διαδικασιών επεξεργασίας. Ανεξάρτητα από την ποσότητά της, απαιτείται επεξεργασία της ιλύος με στόχο τη μείωση του όγκου, τη σταθεροποίηση της ιλύος και τη μετατροπή της σε αδρανή, δηλαδή βιολογικά σταθερή μάζα. Υποβάλλοντας λοιπόν την ιλύ σε επεξεργασία που περιλαμβάνει μια σειρά από στάδια (πάχυνση / συμπύκνωση, βιολογική χώνευση, χημική βελτίωση / αποστείρωση, αφυδάτωση, κτλ.), λόγω της σύνθεσής της και ιδίως λόγω της αυξημένης περιεκτικότητάς της σε οργανικό άνθρακα (C), άζωτο (N), φώσφορο (P), κλπ. η ιλύς μπορεί, υπό ορισμένες προϋποθέσεις, να υποκαταστήσει σε μεγάλο ποσοστό τη χρήση λιπασμάτων.

Ως επακόλουθη μέθοδος επεξεργασίας, η αποτέφρωση είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη κυρίως για το μολυσμένο 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 CO₂ και NO_x, η παραγωγή άχρηστης τέφρας και το υψηλό κόστος (JOANNA AALTO, 2016). 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 μολυσμένη περιοχή μπορεί να είναι τεράστια. Για παράδειγμα, στη Νεμπράσκα, στο πρώην στρατιωτικό εργοστάσιο πυρομαχικών, η ποσότητα εδάφους που απαιτούσε αποκατάσταση ήταν 10.000 τόνοι εδάφους.



Σχήμα 22. Αποτεφρωτήρας Αποβλήτων Εκρηκτικών (Munitions Safety Information Analysis Center (MSIAC), 2006)

4.3 Βιολογικές μέθοδοι

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. Αυτό περιλαμβάνει διαδικασίες όπως η νιτροποίηση (μετατροπή της αμμωνίας σε νιτρικό) και η απονιτροποίηση (μετατροπή νιτρικών σε αέριο άζωτο).

Η χρήση ζωντανών οργανισμών για την αποκατάσταση μολυσμένου νερού (bio-remediation) έχει επικεντρωθεί στην παγκόσμια έρευνα για το νερό, με στόχο την ανάπτυξη ενός περιβάλλοντος με τεχνολογία που χρησιμοποιεί βιολογικές οντότητες που παράγουν λιγότερα ή και καθόλου επιβλαβή υποπροϊόντα (Karabelo M. Moloantoa et. al., 2022).

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. Διαφορετικές βιολογικές οντότητες, και οι δύο ευκαρυωτικές (φυτά, μύκητες, αμφύκη) και προκαρυωτικά (βακτήρια και αρχαία), έχει αποδειχθεί ότι έχουν μεταβολισμούς αζώτου που προσλαμβάνουν νιτρικές ρίζες NO_3^- από το περιβάλλον και το μετατρέπουν σε διάφορες μορφές νιτρικού άλατος.

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 βιολογική απονιτροποίηση είναι μια σταδιακή ενζυματική διαδικασία που εξαρτάται από την ενζυματική αντίδραση ιόντων, καθώς οι εγγενείς πρωτεΐνες των οργανισμών που μειώνουν το οξειδωμένο N σε άλλες μορφές.

Σε βιολογικά συστήματα, η απομάκρυνση της νιτρικής ρίζας NO_3^- από το νερό μπορεί να είναι είτε αφομοιωτική, όπου το N ενσωματώνεται στη βιομάζα του οργανισμού, είτε διαλυτική, όπου το οξειδωμένο N ανάγεται μέσω καταβολισμού σε λιγότερο οξειδωμένες μορφές με βάση τους οργανισμούς και τις συνθήκες στο περιβάλλον. Αρκετοί ευκαρυωτικοί μικροοργανισμοί, όπως μύκητες, διάτομα και κροσσωτά, μπορούν να προσλάβουν NO_3^- για αποθήκευση και, στη συνέχεια, όταν το περιβάλλον τους γίνει ευνοϊκό για διαλυτική αναγωγή της ρίζας NO_3^- , μπορούν να το αναγάγουν σε N_2O ή NH_3 , NH_3 και NO_2 , αντίστοιχα.

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 aquatic*), 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^- .

Τα υδρόβια φυτά αναπτύσσονται ταχύτερα (1 έως 12 ημέρες) από άλλα χερσαία φυτά και ορισμένες ποικιλίες μπορούν να δεσμεύσουν το μεγαλύτερο μέρος νιτρικής ρίζας, έως και 90% των 120 mg/L από μολυσμένο νερό, μειώνοντας τα επίπεδα συγκέντρωσης κοντά στο αποδεκτό όριο των 10 mg/L. Αυτή η μέθοδος είναι φιλική προς το περιβάλλον και φθηνή στη συντήρηση, καθώς χρειάζεται μόνο μια μεγάλη επιφάνεια υγροτόπου. Δεν απαιτεί προσθήκη χημικών ουσιών στο νερό, κάτι που θα μπορούσε να οδηγήσει σε μόλυνση μετά την αποκατάσταση.

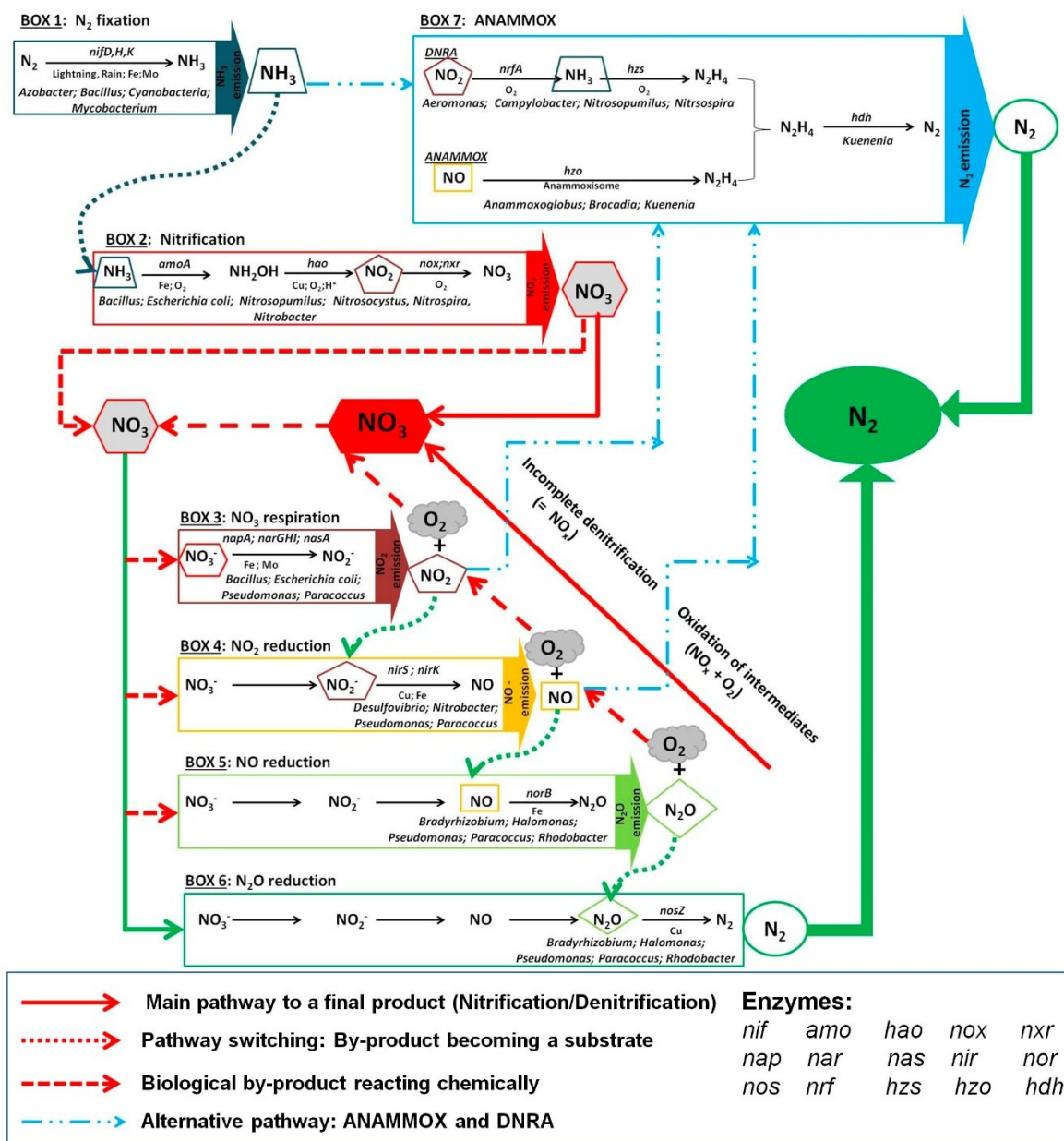
Η εφαρμογή της στρατηγικής φυτοαποκατάστασης στην απομάκρυνση νιτρικής ρίζας περιορίζεται σε νερά με χαμηλότερες συγκεντρώσεις μετάλλων ως συν-ρυπαντές, καθώς αυτοί μπορεί να εμποδίσουν την ανάπτυξη των φυτών.

Σε ορισμένα συστήματα λυμάτων, τα αναπτυσσόμενα φυτά μπορεί να χρειαστούν περισσότερο χρόνο για να αναπτυχθούν λόγω των συν-ρυπαντών που εμποδίζουν την ανάπτυξή τους, μαζί με τη χαμηλή βιοδιαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών εκτός από την NH_3^+ και νιτρικής ρίζας, επηρεάζοντας έτσι την αποτελεσματικότητα του συστήματος.

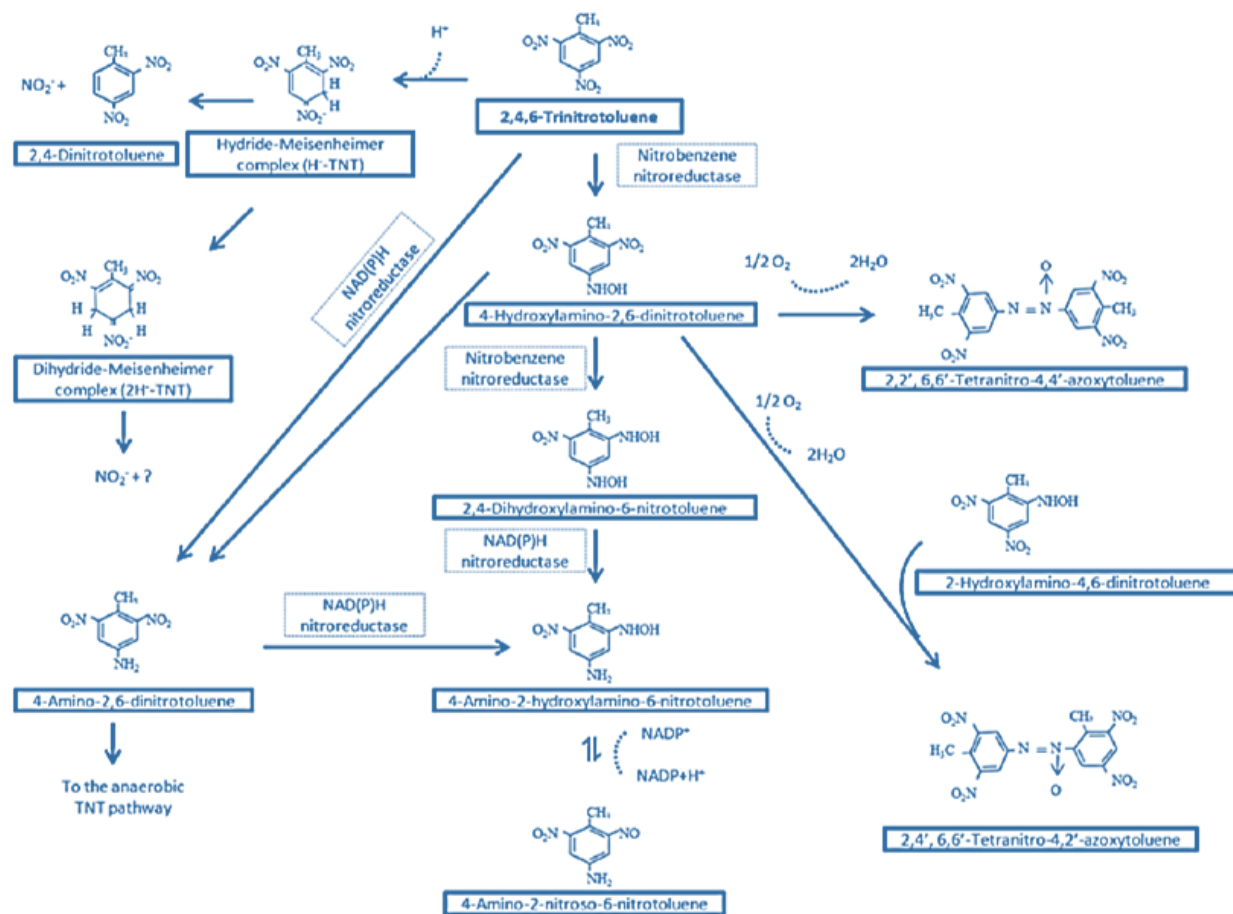
.

Πίνακας 14. Πρόσληψη TNT από υδρόβια και χερσαία φυτά σε υδροπονική καλλιέργεια (Katarzyna Panz et. al., 2012).

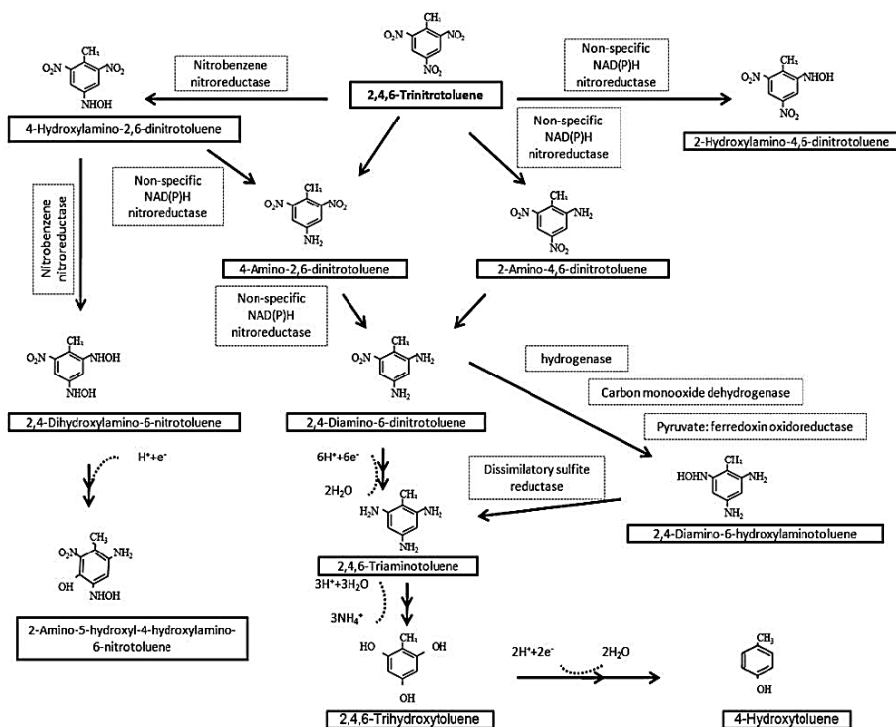
TNT uptake by aquatic and terrestrial plants in hydroponic culture.					
Picture	Nomenclature	Plant species	Initial concentration [mM]	Incubation time (d)	TNT concentration decrease [%]
	<i>Πίσον το ήμερον (Pisum sativum)</i>	<i>Pisum sativum</i>	0.1	3	82.9
	<i>Η μηδική (επιστημονική ονομασία Medicago sativa) ή πολυέτες τριφύλλι, είναι ανθοφόρο φυτό και ανήκει στην οικογένεια των ψυχανθών.</i>	<i>Medicago sativa</i>	0.1	3	72
	<i>Κριθή της οικογένειας των Ποσειδών (Poaceae) ή Αρροστωδών (Gramineae).</i>	<i>Hordeum sativum</i>	0.1	3	86.7
	<i>Cicer arietinum - Ερέβινθος ο κοινός ή Ερέβινθος ο κρύομορφος, πιστή μετάφραση της λατινικής ονομασίας του είδους, η οποία οφείλεται στο σχήμα του σπόρου του φυτού, που θυμίζει κεφάλι κριαριού.</i>	<i>Cicer arietinum</i>	0.1	3	68.8
	<i>Η σόγια (επιστημονική ονομασία: Γλυκίνη η μαζ, Glycine max) είναι φυτό ιθαγενές της Ανατολικής Ασίας, που ανήκει στα είδη των ψυχανθών.</i>	<i>Glycine max</i>	0.1	3	90
	<i>Το Lolium multiflorum είναι ένα ιθαγενές ρυκαλόχορτο στην εικόρατη Ευρώπη, αν και το ακριβές ερηνές είδος του είναι άγνωστο. Είναι ποώδες ετήσιο, διετές ή πολυέτες χόρτο που καλλιεργείται για ενσίρωση και ως καλλιέργειας.</i>	<i>Lolium multiflorum</i>	0.1	3	94.3
	<i>Ο κοινός ηλιάνθος είναι ένα είδος μεγάλου ετήσιου βλαστού της οικογένειας των μαργαριτών Asteraceae.</i>	<i>Helianthus annuus</i>	0.1	3	56.4
	<i>Το καλαμπόκι ή αραβόσιτος ή αραποσίτι έχει την επιστημονική ονομασία Zea mays.</i>	<i>Zea mays</i>	0.1	3	91.5
	<i>Το Chrysorogon zizanioides, κοινός γνωστό ως βέτιβερ και khui, είναι ένα πολυέτες τομαπόχορτο της οικογένειας Poaceae. Το βέτιβερ σχετίζεται πιο στενά με το σόργο, ενώ μοιράζεται πολλά μορφολογικά χαρακτηριστικά με άλλα αρωματικά χόρτα, όπως το λεμονόχορτο, η σιτρονέλλα και η παλμαρόζα.</i>	<i>Vetiveria zizanioides</i>	0.18	8	100
	<i>Το Phragmites australis, γνωστό ως το κοινό καλάμι, είναι ένα είδος ανθοφόρου φυτού της οικογένειας των χόρτων Poaceae. Είναι ένα γρασίδι υδροτόπου που μπορεί να φτάσει τα 20 πόδια και έχει κατανομή σε όλο τον κόσμο.</i>	<i>Phragmites australis</i>	0.44	10	>90
	<i>Το Juncus inflexus, η σκληρή βιασύνη, είναι ένα είδος ανθοφόρου φυτού της οικογένειας Juncaceae, ερηνές στην Ευρώπη, την Ασία και την Αφρική και εισήχθη στη Σρι Λάνκα, την Ιάβα, το Νέο Άμστερνταμ και το New Saint-Paul, τη Βικτόρια στην Αυστραλία, τη Νέα Ζηλανδία, την Ουρουγουάη και την ανατολική Βόρεια Αμερική.</i>	<i>Juncus inflexus / glaucus</i>	0.44	10	>90
	<i>Το Carex acuta είναι ένα πολυέτες φυτό που σχηματίζει μουντζόδες στην οικογένεια Carex, η σπαθιάρα.</i>	<i>Carex acuta / gracillius</i>	0.44	10	>90
	<i>Ψάθα ή ψαθί, αλλιώς τύφη ή πλατύφυλλος ή βούρλο, ή κν. ψάθα ή παπύρι, είναι φυτό που διαβίει συνήθως σε στάσιμα ύδατα, ή νερά με ροή. Είναι ένα πολυέτες φυτό που φυτρώνει επίσης σε έλη και στις όχθες λίμνων και ποταμών. Ανήκει στην οικογένεια Typhaceae και φτάνει σε ύψος από 1 μέχρι και 2,5 μέτρα.</i>	<i>Typha latifolia</i>	0.44	10	>90
	<i>Το Myriophyllum aquaticum είναι ένα ανθοφόρο φυτό, ένα αργεακό δίκωτο, που ονομάζεται συνήθως φτερό παπαγάλου και φτερό παπαγάλου.</i>	<i>Myriophyllum aquaticum</i>	0.11	15	100
		<i>Myriophyllum aquaticum</i>	0.44	5	100
	<i>Το Myriophyllum spicatum είναι ένα βυθισμένο πολυέτες υδρόβιο φυτό που αναπτύσσεται σε ακίνητο ή βραδέως κινούμενο νερό.</i>	<i>Myriophyllum spicatum</i>	0.5	5	100
		<i>Myriophyllum spicatum</i>	0.35	7	100
	<i>Ο Catharanthus roseus, κοινός γνωστός ως λαμπερά μάτια, ακροτήρι, φυτό νεκροταφείου, μυρτιά Μαδαγασκάρης, γριά καμαριέρα, ροζ μυρτιά, τριανταφυλλιά, είναι ένα πολυέτες είδος ανθοφόρου φυτού της οικογένειας των Αporcynaceae.</i>	<i>Catharanthus roseus</i>	0.44	5	100



Σχήμα 23. Βιοχημικές οδοί που εμπλέκονται στον μικροβιακό κύκλο του αζώτου, διευκολύνονται από εγγενή ένζυμα και τους συμπαραγόντές τους (Karabelo M. Moloantoa et. al., 2022).



Εικόνα 6. Πιθανή οδός βιοαποικοδόμησης TNT υπό αερόβιες συνθήκες (JOANNA AALTO, 2016).



Εικόνα 7. Πιθανή οδός βιοαποικοδόμησης TNT υπό αναερόβιες συνθήκες (JOANNA AALTO, 2016).

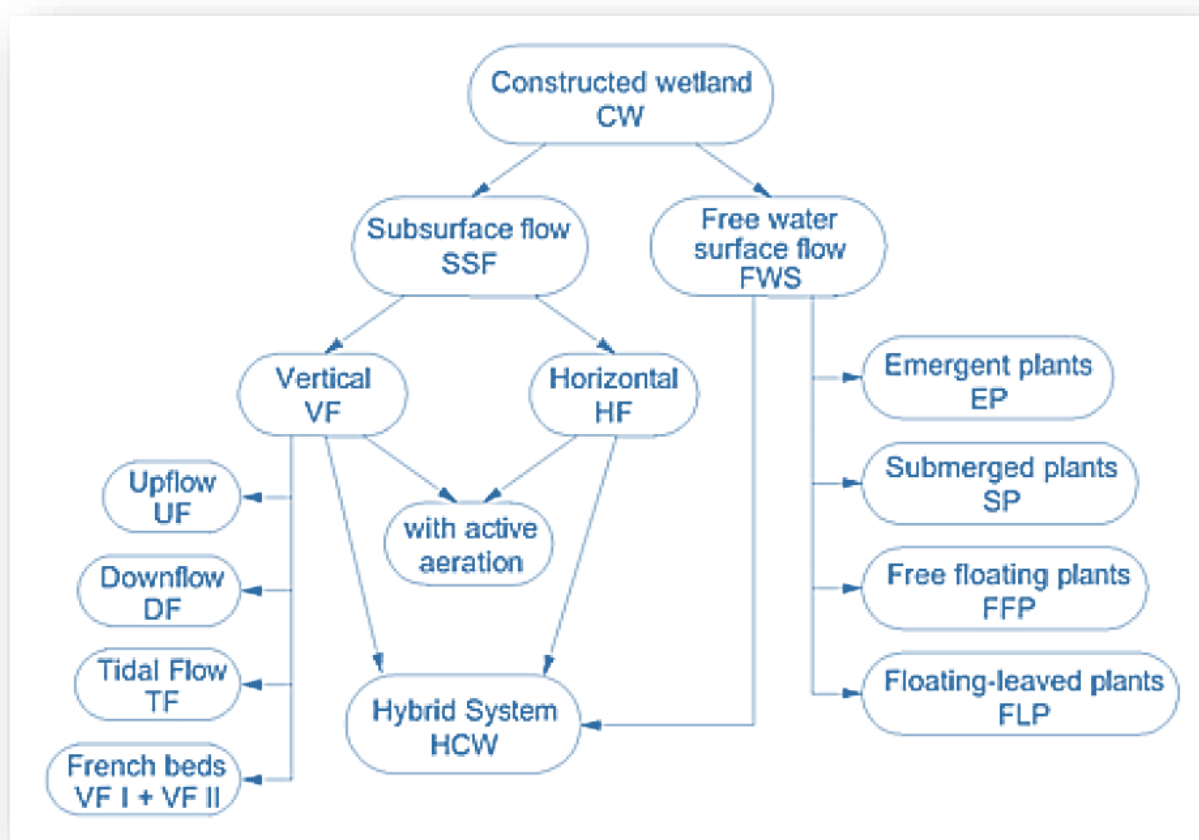
4.4 Τεχνητοί υγρότοποι

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). Ωστόσο, οι βιολογικές πρακτικές απομάκρυνσης αζώτου (π.χ. τροποποιημένη ενεργοποιημένη λάσπη) 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).

Οι απομακρύνσεις αζώτου (αμμωνίου ή νιτρικού) σε ΤΥ εξαρτώνται από το καθεστώς ροής του νερού, τον υποστρωματικό πίνακα, την εγκατάσταση, το βάθος της κλίνης, τις εφαρμοζόμενες λειτουργικές παραμέτρους (όπως το υδραυλικό φορτίο (HL), τα οργανικά και αζωτούχα φορτία, ο λόγος C/N, το καθεστώς τροφοδοσίας, το επίπεδο πλημμύρας, και τις κλιματικές συνθήκες (π.χ. θερμοκρασία). Εάν τα λύματα έχουν χαμηλή βιοαποικοδομήσιμη οργανική ύλη, η αναγωγή των νιτρικών σε μοριακό άζωτο μπορεί να υπονομευθεί, καθώς η διαδικασία απονιτροποίησης περιλαμβάνει τη μεταφορά ηλεκτρονίων από την βιοαποικοδομήσιμη οργανική ύλη. Ωστόσο, αυτό μπορεί να μην είναι επιζήμιο για ορισμένα φυτά, καθώς ορισμένα φυτά μπορεί να συμβάλλουν στη διαδικασία απονιτροποίησης απελευθερώνοντας ασθενή οργανικά οξέα μέσω του ριζικού τους συστήματος και ένζυμα που μπορούν να μετατρέψουν σύνθετη οργανική ύλη στις απλούστερες μορφές. Ορισμένα φυτά, όπως τα *Phragmites australis*, *Typha latifolia*, *Cyperus papyrus*, *Typha domingensis*, αναγνωρίζονται για το μεγάλο δυναμικό τους για φυτοεξυγίανση λυμάτων, αλλά πρόσφατα το ενδιαφέρον για το φυτό *Vetiveria zizanioides* έχει αυξηθεί. Αυτό το φυτό έχει ευρεία ανοχή σε δυσμενείς συνθήκες όπως ο καιρός, το έδαφος, το pH (μεταξύ 3,0-10,5) και η αλατότητα (μέχρι 47,5 dSm⁻¹), αν και η παραγωγικότητά του μειώνεται από dSm⁻¹, και έχει υψηλό δυναμικό για την απομάκρυνση του συνολικού αζώτου, της αμμωνίας, των συνολικών αιωρούμενων στερεών (TSS) και της χημικής ζήτησης οξυγόνου (COD) από τα λύματα. Τα λύματα εκρηκτικών (EW), από τις βιομηχανίες νιτρικού αμμωνίου-πετρελαίου (ANFO) και γαλακτωμάτων, είναι βιομηχανικά λύματα με υψηλές ποσότητες αζώτου (με τη μορφή νιτρικών ή/και αμμωνιακού αζώτου) και υψηλή περιεκτικότητα σε μη βιοδιασπώμενη οργανική ύλη.

Ανάλογα με την πορεία ροής στο σύστημα, υπάρχουν δύο ευρείς τύποι: οι τεχνητοί υγροτόποι ελεύθερης επιφάνειας νερού (FWS CWs) και οι τεχνητοί υγροτόποι υπόγειας ροής (SSF CWs). Στους FWS CWs, το νερό ρέει αργά πάνω από ένα υπόστρωμα, δημιουργώντας έτσι μια ελεύθερη επιφάνεια νερού και βάθος στήλης νερού συνήθως μερικών εκατοστών. Αντίθετα, στους SSF CWs, το νερό ρέει μέσα σε ένα πορώδες υπόστρωμα. Ανάλογα με την κατεύθυνση της πορείας ροής, οι SSF CWs μπορούν να υποδιαιρεθούν σε οριζόντια (HSSF) ή κάθετη ροή (VSSF) (Alexandros Stefanakis et. al., 2014).

Οι τύποι τεχνητών υγροτόπων για επεξεργασία λυμάτων φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 24. Ταξινόμηση τεχνητών υγροτόπων για επεξεργασία λυμάτων.

Μικρής κλίμακας υγρότοποι κατασκευασμένοι από FWS, φυτεμένοι με *T. angustifolia* (στενόφυλλο cattail) χρησιμοποιήθηκαν για την αποκατάσταση επιφανειακών και υπόγειων υδάτων μολυσμένων με εκρηκτικά στο εργοστάσιο πυρομαχικών του στρατού στο Τενεσσί, όπου παράγονταν εκρηκτικά, μεταξύ 1942 και 1978 (Jan 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%.

Σε ένα άλλο εργοστάσιο πυρομαχικών στις ΗΠΑ, χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρικά πεδία υψηλής απόδοσης (HF) και ηλεκτρικά πεδία (FWS) για την απομάκρυνση διαφόρων εκρηκτικών από μολυσμένο νερό. Το ηλεκτρικά πεδία (FWS CW) αποτελούνταν από δύο τάφρους (24 m & 9,4 m). Το ηλεκτρικά πεδία υψηλής απόδοσης (HF CW) αποτελούνταν από δύο κλίνες (συνδεδεμένες σε σειρά). Το πρώτο κελί (32 m X 11 m) διατηρήθηκε σε αναερόβιες συνθήκες με την προσθήκη υποκατάστατου γάλακτος, ενώ το δεύτερο κελί (11 m X 11 m) διατηρήθηκε αερόβιο με αερισμό.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα ηλεκτρικά πεδία υψηλής απόδοσης (HF CW) ήταν ανώτερα από τα ηλεκτρικά πεδία (FWS CW) όσον αφορά την αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας. Τα κελιά FWS υπέφεραν από προβλήματα με την εγκατάσταση του φυτού λόγω της φωτοαποικοδόμησης των εκρηκτικών, η οποία ανέστειλε τη φωτοσύνθεση χρωματίζοντας το νερό σε σκούρο κόκκινο.

4.5 Συνδυασμός μεθόδων

Οι ενεργητικές χημικές ουσίες, λόγω της ανθεκτικής φύσης τους, παραμένουν στο περιβάλλον για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Οι συμβατικές μέθοδοι επεξεργασίας, οι οποίες βασίζονται σε φυσικές/χημικές/βιολογικές διαδικασίες, όταν χρησιμοποιούνται μόνες τους, δεν είναι αποτελεσματικές στην πλήρη καταστροφή αυτών των ρύπων.

Η αποτελεσματική επεξεργασία μπορεί να επιτευχθεί μόνο με την ενσωμάτωση δύο ή περισσότερων μεθόδων επεξεργασίας.

Οι τεχνικές φυσικής επεξεργασίας, δηλαδή η αντίστροφη ώσμωση, η διήθηση και η προσρόφηση ενεργού άνθρακα, θα πρέπει να συνδυάζονται με βιολογική επεξεργασία για την εξάλειψη της μεταφοράς φάσης, για την εξασφάλιση της καταστροφής του ρύπου και για την παροχή οικονομικά αποδοτικής λύσης.

Οι μέθοδοι Photo-Fenton και Electro-Fenton μπορούν να αντιμετωπίσουν συνθήκες υψηλής οξύτητας, οι οποίες είναι τυπικές για τα λύματα πυρομαχικών. Οι συνθήκες χαμηλού pH ευνοούν την παραγωγή πρωτονίων, οδηγώντας σε αυξημένη παραγωγή ριζών υδροξυλίου σε αυτά τα συστήματα. Όπως φαίνεται από τη βιβλιογραφία, προκαλούν σημαντική μείωση του BOD και του COD και ενισχύουν τη βιοδιασπασιμότητα των λυμάτων.

Ο παράγοντας κόστους της προηγμένης διαδικασίας οξείδωσης, δηλαδή η φωτοκατάλυση και η οξείδωση του όζοντος, θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν με τη μετάβαση σε συστήματα ηλιακής ενίσχυσης και την ηλεκτροχημική παραγωγή όζοντος *in situ*.

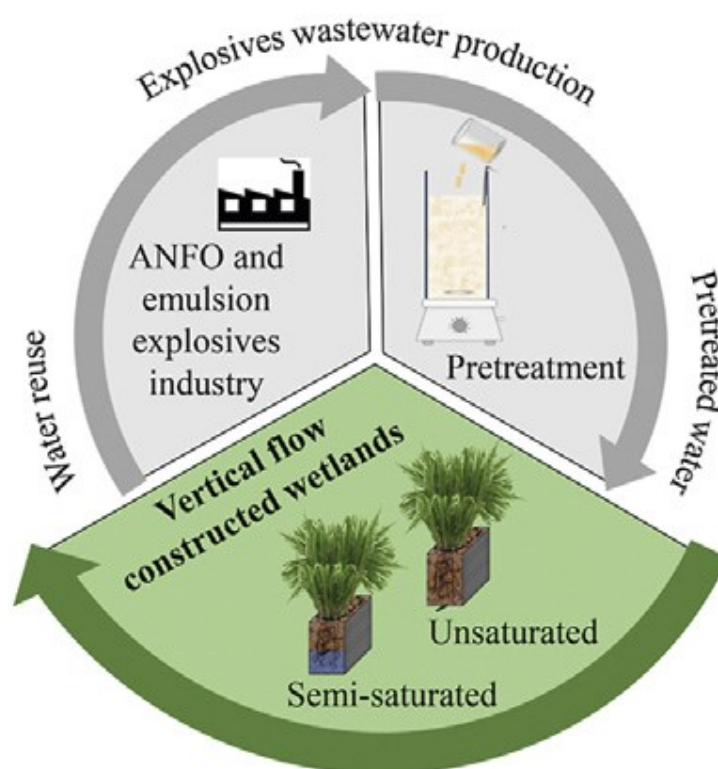
Αυτές οι τεχνικές σε συνδυασμό με τη βιοεπεξεργασία θα μπορούσαν να αποτελέσουν μια συνετή επιλογή.

Καθώς οι συνθήκες χαμηλού pH που είναι τυπικές για τα απόβλητα των διεργασιών πυρομαχικών είναι ευνοϊκές για την οξείδωση του Fenton, ο συνδυασμός της οξείδωσης του Fenton με βιοεπεξεργασία σε αερόβια ή αναερόβια λειτουργία αποτελεί μια πιθανή εναλλακτική λύση. Η αερόβια-αναερόβια επεξεργασία σε διαδοχική μορφή είναι μια φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση για τα εκρηκτικά απόβλητα.

Η επεξεργασία επικίνδυνων αποβλήτων, όπως οι εκρηκτικές ύλες, αποτελεί ένα καίριο πρόβλημα καθώς κατατάσσονται στους αναδυόμενους ρύπους. Πολλές από τις εφαρμοζόμενες τεχνολογίες απαιτούν υψηλό κόστος επένδυσης και λειτουργίας με αποτέλεσμα να κρίνεται επιτακτική η ανάγκη για βελτίωση και εκσυγχρονισμό των συστημάτων επεξεργασίας με καινοτόμες και βιώσιμες τεχνολογίες.

Προκειμένου να βελτιωθούν οι αποδόσεις των επιμέρους διεργασιών, προτείνεται ο συνδυασμός των διεργασιών υπερδιήθησης με καταλυτική οξείδωση. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η πρόταση επικεντρώθηκε στις ετερογενείς αντιδράσεις Fenton κατά τις

οποίες ο καταλύτης (σίδηρος και άλλα νανοσωματίδια μετάλλων) καθηλώνεται στην επιφάνεια πορώδων υλικών (ζεόλιθοι, ενεργός άνθρακας, ερυθρά ιλύς) με σκοπό να αποφευχθεί η επεξεργασία σε χαμηλό pH. Μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική περίπτωση προς αυτή την κατεύθυνση είναι η υλοποίηση ετερογενών αντιδράσεων σε καταλυτικούς αντιδραστήρες μεμβράνης (catalytic membrane reactors-CMR). Σε έναν τέτοιο αντιδραστήρα, η μεμβράνη είναι ημιπερατή και παράλληλα, λειτουργεί η ίδια ως καταλύτης για την αντίδραση ή φέρει καθηλωμένο τον καταλύτη. Συγκεκριμένα, προτείνεται η απομάκρυνση οργανικών ρύπων της πρωτοβάθμιας εκροής σε CMR με βάση τροποποιημένης μεμβράνης αλούμινας με καθηλωμένα νανοσωματίδια σιδήρου με σκοπό την αντίδραση του διαλυμένου οξειδωτικού (H_2O_2 , SPS) στο διάλυμα τροφοδοσίας προς το σχηματισμό ισχυρών οξειδωτικών ειδών.



Σχήμα 25. Υγρότοπος ως πράσινη λύση για χαμηλά βιοαποδομήσιμα και υψηλής περιεκτικότητας σε άζωτο λύματα

4.6 Επαναχρησιμοποίηση – αξιοποίηση επεξεργασμένων αποβλήτων

Η βιο-αποκατάσταση (bio-remediation) θεωρείται η περισσότερο περιβαλλοντικά φιλική αλλά και οικονομικά συμφέρουσα, καθότι επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση του κατεργασμένου συστήματος μειώνοντας την ποσότητα αυτού που διατίθεται για υγειονομική ταφή ενώ συγχρόνως επιδρά θετικά στην ολική βελτίωση του περιβάλλοντος και στην προστασία των έμβιων όντων που αυτό περιλαμβάνει.

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

- α) τη διασφάλιση της παραγωγής,
- β) την ανάκτηση/ανακύκλωση σε ικανό ποσοστό για την επαναχρησιμοποίηση των απορριμμάτων ως δευτερογενείς πρώτες ύλες, και
- γ) την ασφαλή διάθεση των αποβλήτων για όσα δεν είναι εφικτό να αξιοποιηθούν.

Αν και έχει θεσπιστεί σχετική νομοθεσία, η οποία προβλέπει τη δημιουργία υποδομών για τη διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων, όσες προσπάθειες έχουν επιχειρηθεί στο παρελθόν δεν έχουν τελεσφορήσει, με αποτέλεσμα ενώ ένα μεγάλο μέρος των αποβλήτων αρχικά να παραμένει επί μακρόν στους χώρους παραγωγής τους και στη συνέχεια να αποστέλλεται για επεξεργασία σε εγκαταστάσεις του εξωτερικού.

Τα εμπορικά εκρηκτικά κατά την παραγωγή τους αποδίδουν μικρές ποσότητες υγρών κατά τη κατασκευή τους και περισσότερο από τη χρήση τους. Τα λύματα από τις διεργασίες μπορεί να περιέχουν αμμωνία και νιτρικά άλατα, τα οποία είναι ρύποι που μπορούν να μολύνουν τα επιφανειακά και τα υπόγεια ύδατα εάν δεν διαχειρίζονται σωστά.

Τα προληπτικά μέτρα, όπως η επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων ή μη επεξεργασμένων λυμάτων στις διαδικασίες παραγωγής, είναι σημαντικά για την ελαχιστοποίηση της παραγωγής λυμάτων. Εάν δεν είναι δυνατή η επαναχρησιμοποίηση, είναι απαραίτητες εναλλακτικές λύσεις όπως φορείς διαχείρισης απορριμμάτων, λίμνες εξάτμισης ή εξειδικευμένες διαδικασίες επεξεργασίας για την αντιμετώπιση περιβαλλοντικών θεμάτων. Η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων στις διαδικασίες παραγωγής ANFO, όπως για θέρμανση, ψύξη ή πλύσιμο δαπέδου, μπορεί να μειώσει σημαντικά την ποσότητα των λυμάτων που πρέπει να επεξεργαστεί ή να απορριφθεί.

Η χρήση συσκευασμένων μειγμάτων ANFO και ANFO/γαλακτώματος σε ξηρές συνθήκες και η αποφυγή χύδην ANFO, μπορεί να βοηθήσει στην πρόληψη της μόλυνσης.

Η χρήση στοιχειομετρικών μιγμάτων ANFO, η διασφάλιση της άμεσης χρήσης μετά τη φόρτωση μπορεί επίσης να ελαχιστοποιήσει τα απορριπτόμενα και τη μόλυνση.

4.7 Επιλογή μεθόδου επεξεργασίας

Σε σχέση με τις μεθόδους διαχείρισης, η επιλογή τους θα πρέπει να γίνεται ανά θέση εκπομπής, καθότι ορισμένα χαρακτηριστικά της (είδος αποβλήτων, ποσότητα αποβλήτων, συχνότητα εκπομπής, κλπ.) ενδεχομένως να επηρεάσουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Για παράδειγμα, η τοξικότητα των νιτροαρωματικών ενώσεων περιορίζει την εφαρμογή της βιοαποκατάστασης όταν οι συγκεντρώσεις τους είναι υψηλές, ή όταν η διεργασία επεξεργασίας μπορεί να παράγει ανθεκτικά παραπροϊόντα. Αντίθετα, χημικές επεξεργασίες όπως η καύση μπορεί να είναι αρκετά ακριβές ακόμη και σε χαμηλές συγκεντρώσεις, ή μπορεί να δημιουργήσουν άλλα περιβαλλοντικά προβλήματα όπως εκπομπές οξειδίων του αζώτου NOx.

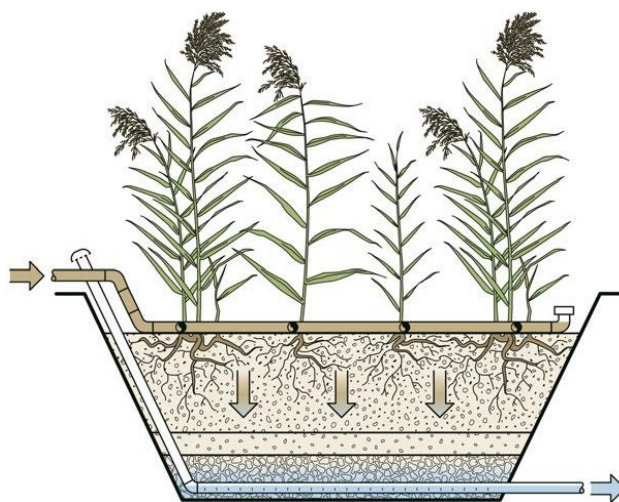
Η αναζήτηση για καινούργιες, πιο οικονομικές και in-situ μεθόδους επεξεργασίας επικίνδυνων αποβλήτων είχε σαν αποτέλεσμα το ενδιαφέρον να εστιαστεί στη συνδυαστική εφαρμογή δύο ή περισσότερων μεθόδων επεξεργασίας για τη πιθανότητα ταυτόχρονης αποδόμησης και διάσπασης των ξενοβιοτικών ενώσεων, προσφέροντας έτσι μια ολοκληρωμένη λύση για την αποτελεσματική μετά-δευτεροβάθμια βιολογική επεξεργασία. Η βασική ιδέα των υγροτόπων υπο-επιφανειακής ροής είναι ότι τα λύματα διοχετεύονται εντός του σώματος του υγροτόπου, το οποίο είναι εδαφικό, όπου και υφίστανται σταδιακή επεξεργασία από τους μικροοργανισμούς που βρίσκονται γύρω από τα ριζώματα των φυτών. Τα φυτά έχουν ένα φυσικό μηχανισμό απαγωγής αέρα από την ατμόσφαιρα προς τις ρίζες τους, δημιουργώντας έτσι ένα αερόβιο περιβάλλον γύρω από τις ρίζες, γεγονός που καθιστά δυνατή την ανάπτυξη αερόβιων μικροοργανισμών, οι οποίοι μπορούν να αποικοδομούν βιολογικά τα λύματα. Στους υγρότοπους οριζόντιας ροής, τα λύματα τροφοδοτούνται στην είσοδο και ρέουν αργά, διαμέσου του πορώδους υλικού του υγροτόπου, κάτω από την επιφάνεια, ακολουθώντας μια λίγο-πολύ οριζόντια ροή μέχρι το σημείο εκροής, όπου συλλέγονται και απορρίπτονται.

Οι τεχνητοί υγρότοποι υποεπιφανειακής ροής - βυθισμένης βλάστησης είναι τεχνητοί υγρότοποι συχνά γραμμικής ροής και αποτελούνται από υπόστρωμα διαβαθμισμένων αδρανών (π.χ. πετρώματα, χαλίκια, άμμο, χώμα) ή και συνθετικών υλικών, όπου η φύτευση των φυτών (κυρίως καλάμια) γίνεται στο ανώτερο στρώμα του εδαφικού υποστρώματος ενώ τα υγρά αφού διαχυθούν κατά μήκος του υγροτόπου, συλλέγονται στη βάση του υποστρώματος μέσω κατάλληλου συστήματος στράγγισης. Η ροή των υγρών γίνεται κάτω από την επιφάνεια του υγροτόπου όπου μεταφέρεται και οξυγόνο από την ατμόσφαιρα. Λόγω των μικρών κλίσεων, η ροή του νερού θα έχει χαμηλές ταχύτητες, πλησιάζοντας τη στρωτή ροή σε περιοχές με υψηλή βλάστηση, ώστε να επικρατήσουν οι ιδανικές

καταστάσεις για πολλές από τις φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στον υγρότοπο. Τα πληρωτικά υλικά μπορεί να είναι κροκάλες έως 90 nm, μέσο χαλίκι έως 25 nm, λεπτό χαλίκι έως 6 nm και τέλος άμμος έως 0.5 nm. Τα λύματα μεταφέρονται με κλίση της κατασκευής και με την βαρύτητα. Τα φυτά που θα φυτευτούν πρέπει να μπορούν να αφομοιώσουν τα υψηλά οργανικά θρεπτικά που υπάρχουν στα απόβλητα. Πιο συγκεκριμένα, θα υπάρχει πυκνή βλάστηση από υδρόβια φυτά, όπως καλάμια, βούρλα, ψάθες και σκίρπους καθώς και από αναδυόμενα φυτά.

Οι κυριότεροι μηχανισμοί απομάκρυνσης των οργανικών ρύπων στα συστήματα κατασκευασμένων υγροτόπων περιλαμβάνουν: Προσρόφηση των οργανικών ρύπων στο υπόστρωμα του υγροτόπου. Το υπόστρωμα μπορεί να κορεστεί, αν και η βιολογική αποικοδόμηση των προσροφημένων οργανικών ουσιών που ακολουθεί, συνήθως ανανεώνει την προσροφητική του χωρητικότητα. Η αναγέννηση αυτής συνδέεται με την καλή οξυγόνωση του και συνεπώς επηρεάζεται από τις συνθήκες λειτουργίας του υγροτόπου. Μόλις η οργανική ύλη προσροφηθεί, η βιολογική αποδόμηση (οξείδωση) λαμβάνει χώρα σε δύο διαδοχικά στάδια, αρχικά το στάδιο της υδρόλυσης της συσσωματωμένης οργανικής ύλης και στη συνέχεια ακολουθεί το στάδιο της οξείδωσης της οργανικής ύλης.

Οι εργασίες κατασκευής του κάθε υγροτόπου είναι: εκσκαφή του προβλεπόμενου χώρου, διαμόρφωση και συμπλήρωση με αυτούσιο αδρανές υλικό και σφράγιση με αργιλικό αδρανές υλικό. Μετά την κατασκευή της δεξαμενής γίνεται συμπλήρωση του πυθμένα με φυσικό χώμα και στη συνέχεια η φύτευση των φυτών που θα αποτελέσουν την βλάστηση. Για την λειτουργία ενός τεχνητού υγροτόπου είναι αρκετή μια έκταση λίγων στρεμμάτων. Επίσης, αποτελούν μια βιώσιμη λύση για την επεξεργασία των βιομηχανικών λυμάτων πριν την διάθεση, καθώς παράγονται μικρές ποσότητες παραπροϊόντων που δεν χρειάζονται περαιτέρω επεξεργασία.



Εικόνα 8. Προτεινόμενος Τεχνητός Υγρότοπος για βιομηχανία αμυντικού τομέα.

Τα συστήματα κατασκευασμένου υγροτόπου παρουσιάζουν μια σειρά πλεονεκτημάτων που τα καθιστούν επιλέξιμα έναντι των υπολοίπων φυσικών συστημάτων για την επεξεργασία λυμάτων:

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

Υπό αυτό το πρίσμα των πιθανών συνεργειών, στη συγκεκριμένη περίπτωση προτείνεται μια υβριδική μέθοδος απομάκρυνσης οργανικών ενώσεων από τα λύματα, που συνδυάζει τις φυσικές διεργασίες (δεξαμενή καθίζησης, διεργασίες διαχωρισμού) με χημικές διεργασίες οξείδωσης (αντιδραστήριο Fenton). Η χρήση χημικών μεθόδων οξείδωσης οδηγεί στη μετατροπή των τοξικών οργανικών ενώσεων σε πλέον ακίνδυνες ενώσεις (CO_2 , H_2O , ανόργανα ιόντα).

5 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΠΥΡΟΜΑΧΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΑΜΥΝΤΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

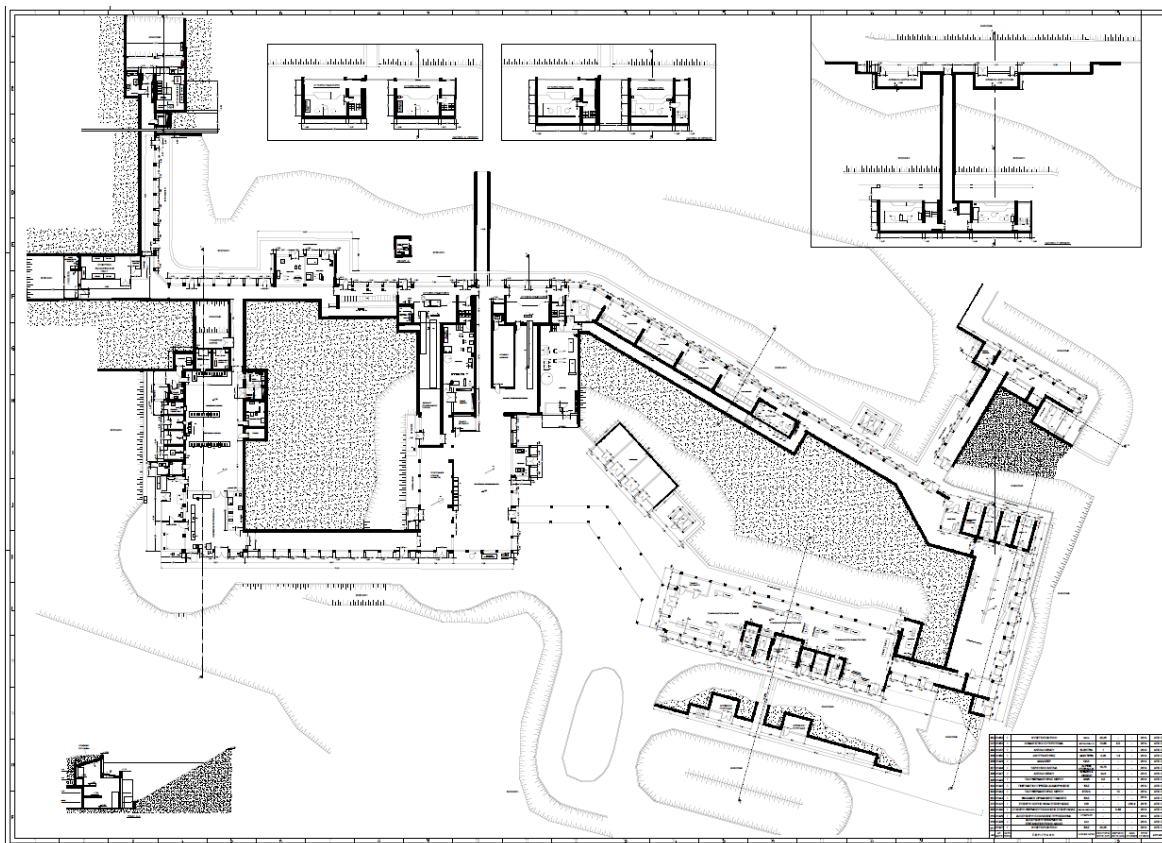
Όπως έχει τονιστεί και προηγουμένα, το συγκεκριμένο πόνημα επικεντρώνεται σε χημική βιομηχανία αμυντικού τομέα παραγωγής εκρηκτικών.

Η παραγωγή συμβατικών πυρομαχικών μεγάλου και μεσαίου διαμετρήματος λαμβάνει χώρα σε ειδικό χώρο γόμωσης, δηλαδή γεμίσματος του κενού μεταλλικού κορμού με εκρηκτικό υλικό. Το γομωτήριο ουσιαστικά είναι χώρος τήξεως του εκρηκτικού (κυρίως TNT) και πλήρωσης των κοίλων μεταλλικών κορμών με το τήγμα του εκρηκτικού. Πρόκειται για μια χυτή γόμωση.

Αντίστοιχα υπάρχουν και πρεσσαριστές γομώσεις που ονομάζονται πλακούντες με διαδοχικές συμπίεσεις των εκρηκτικών σε σκόνη με χρήση πρεσών σε ειδικούς χώρους και κτίρια με θώρακες ασφαλείας για προστασία από πιθανή έκρηξη.

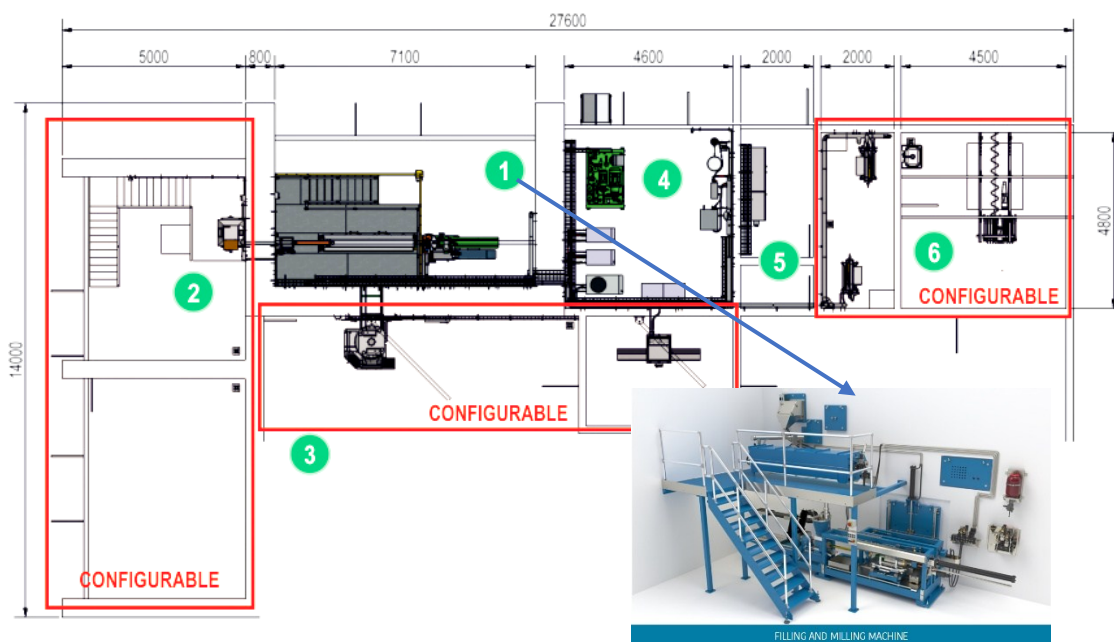
5.1 Διαθέσιμες τεχνικές

Οι διαθέσιμες τεχνικές υπαγορεύονται από το εγκατεστημένο μηχανολογικό εξοπλισμό που έγινε από τον Γερμανικό κολοσσό JOSEF MEISSNER GMBH & CO στις αρχές της δεκαετίας του 1990 στο εργοστάσιο της ΕΑΣ ΑΒΕΕ.



Σχήμα 26. Κάτοψη του Γομωτηρίου στις εγκαταστάσεις της εταιρείας ΕΑΣ ΑΒΕΕ στο Λαύριο.

Σε σύγκριση με άλλες διαθέσιμες τεχνικές όπως η χύτευση με χρήση ατέρμονος κοχλία, η υπάρχουσα στις εγκαταστάσεις της εταιρείας Ελληνικά Αμυντικά Συστήματα ΑΒΕΕ στο Λαύριο υπερτερεί σε θέματα ποιότητας, ενώ υστερεί σε χρόνους πλήρωσης, ενεργειακή κατανάλωση και διαχείριση περιβαλλοντικών πλευρών.



Σχήμα 27. Βασικά δεδομένα για την εφαρμογή της μηχανής πλήρωσης πυρομαχικών με εξώθηση κοχλία.

Χώροι διεργασίας (KONŠTRUKTA-Indrustry, 2024)

- 1 – Χώρος πλήρωσης
- 2 – Τμήμα Προετοιμασίας Εκρηκτικών
- 3 – Τμήμα Χειρισμού Βλημάτων
- 4 – Μηχανοστάσιο
- 5 – Χώρος αυτοματισμών
- 6 – Τμήμα Ποιοτικού Ελέγχου (Χειρισμός Βλημάτων & Τομή Γόμωσης)

Όπως έχει αναφερθεί τα εκρηκτικά υλικά που μπορούν να χυτευθούν με τήξη ή να πρεσαριστούν χρησιμοποιούνται σε μια ευρεία ποικιλία πολιτικών και στρατιωτικών εφαρμογών, όπως οι κατασκευές, οι κατεδαφίσεις, οι υποβρύχιες ανατινάξεις, η εξόρυξη, η διάτρηση και τα στρατιωτικά πυρομαχικά.

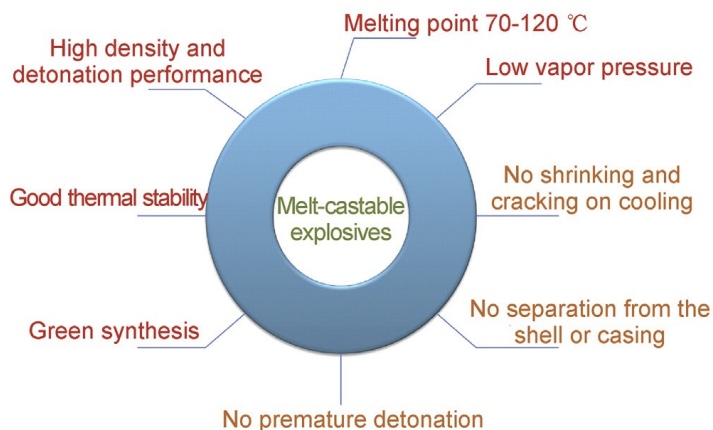
Το 2,4,6-τρινιτροτολουόλιο (TNT) είναι ένα παραδοσιακά εφαρμοζόμενο εκρηκτικό που μπορεί να χυτευθεί εύκολα σε χαμηλή θερμοκρασία. Ωστόσο, τα χαρακτηριστικά περιβαλλοντικής ρύπανσης και τα ζητήματα ασφάλειας περιορίζουν την περαιτέρω ανάπτυξή του προς μελλοντικές βιομηχανικές εφαρμογές.

Ο σχεδιασμός, η σύνθεση και ο χαρακτηρισμός νέων ενεργειακών υλικών που μπορούν να χυτευθούν με τήξη και περιέχουν φθόριο, δινιτροφθοροαιθυλικές και νιτρικές εστερικές ομάδες, καθώς και δομικές μονάδες νιτροφουραζάνης και 1,2,4-οξαδιζαόλης, οδηγούν στην ανάπτυξη νέων υποψήφιων TNT υψηλής απόδοσης μεταξύ 2012 και 2020 (Qing Ma et. al., 2021).

Από την πρώτη ανακάλυψη και παρασκευή του 2,4,6-τρινιτροτολουολίου (TNT) τη δεκαετία του 1860, το TNT είναι τοξικό για τον άνθρωπο και παρουσιάζει επίσης προβλήματα που σχετίζονται με την περιβαλλοντική ρύπανση και τη βιοαποικοδόμηση.

Αν και το TNT παρουσιάζει μια σειρά μειονεκτημάτων, εξακολουθεί να αποτελεί βασικό πρόδρομο στην παρασκευή διαφόρων θερμικά σταθερών εκρηκτικών,

όπως το 2,2',4,4',6,6'-εξανιτροστιλβένιο (HNS) και το 5,5'-δις(2,4,6-τρινιτροφαινυλ)-2,2'-δι-(1,3,4-οξαδιαζόλιο) (TKX-55), μεταξύ άλλων. Είναι γνωστό ότι το σημείο τήξης των ενεργειακών υλικών είναι μια σημαντική παράμετρος για το σχεδιασμό και τη σύνθεση τέτοιων ειδών. Μέχρι σήμερα, η C-μεθυλίωση, η N-μεθυλίωση, η νιτροεστεροποίηση, και η κατάλληλη εισαγωγή φουροζάνης έχει χρησιμοποιηθεί ως παρασκευαστική μέθοδος τέτοιων υλικών. Τα βασικά κριτήρια για τα εκρηκτικά που μπορούν να αποτελέσουν εναλλακτική λύση στα γνωστά εκρηκτικά δίνονται ακολούθως.



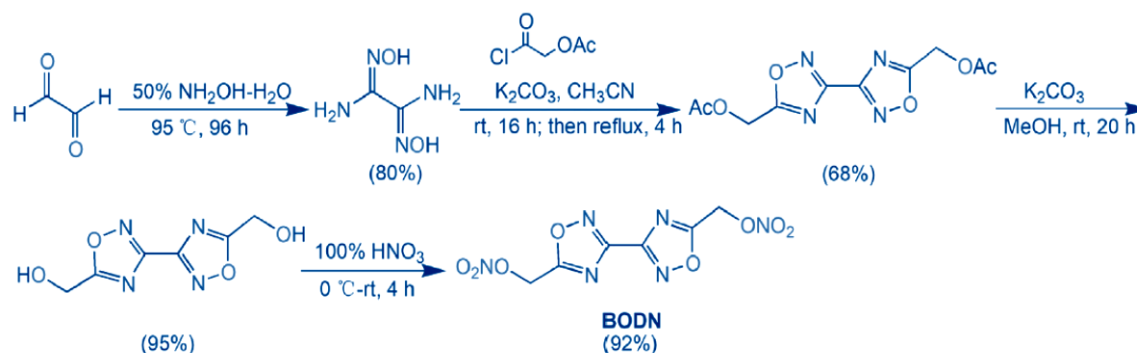
Σχήμα 28. Κριτήρια για ένα ιδανικό εκρηκτικό που χυτεύεται με τήξη (Qing Ma et.

Υπάρχει επομένως ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη συστατικών υψηλότερης απόδοσης που μπορούν να χυτευθούν σε τήξη, τα οποία είναι όχι μόνο πιο ισχυρά, πιο ενεργητικά από το TNT, αλλά λιγότερο προβληματικά για το περιβάλλον και λιγότερο τοξικά για την ανθρώπινη υγεία.

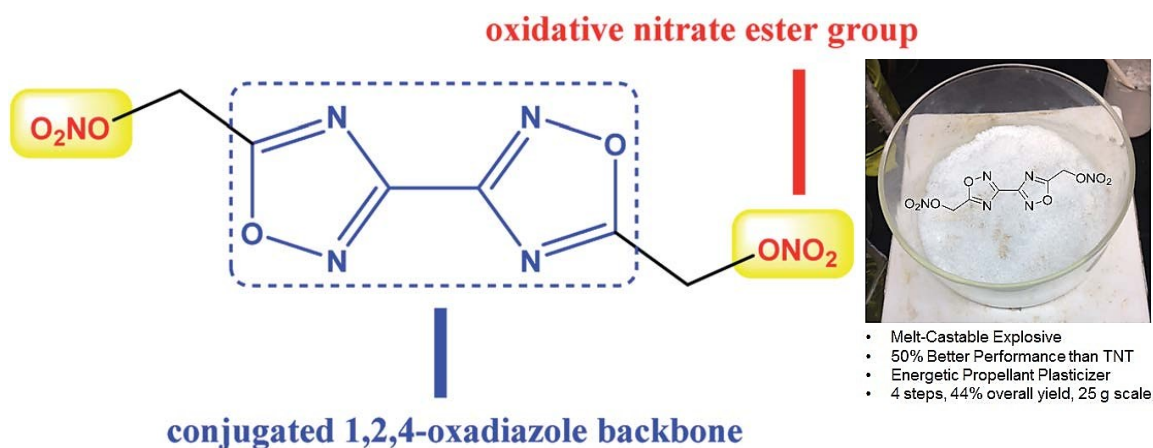
Οι Sabatini & Chavez συνεργάστηκαν στη σύνθεση και τις εκρηκτικές ιδιότητες ενός υψηλής ενέργειας τήξης-χυτεύσιμου εκρηκτικού και ενεργητικού συστατικού πλαστικοποίησης προωθητικού, του δις(1,2,4-οξαδιαζολ)δι(μεθυλενο)δινιτρικού (BODN, ή BOM) σε τέσσερα βήματα από την εμπορικά διαθέσιμη και φθηνή γλυοξάλη. Διαπίστωσαν ότι το BODN είχε πυκνότητα $1,832 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$, σημείο τήξης $84,5^\circ\text{C}$ και θερμοκρασία έναρξης αποσύνθεσης $183,4^\circ\text{C}$.

Η πυκνότητα και η θεωρητική του απόδοση έκρηξης ξεπερνούν εκείνες του TNT.

Επιπλέον, οι ασυμβατότητές του με άλλα χρησιμοποιούμενα εκρηκτικά νιτραμίνης, όπως τα RDX, HMX και CL-20 είναι μικρές. Η ευαισθησία κρούσης (H50, 5kg βάρος πτώσης) προσδιορίστηκε σε 115,3cm, η οποία ήταν συγκρίσιμη με αυτή του TNT.

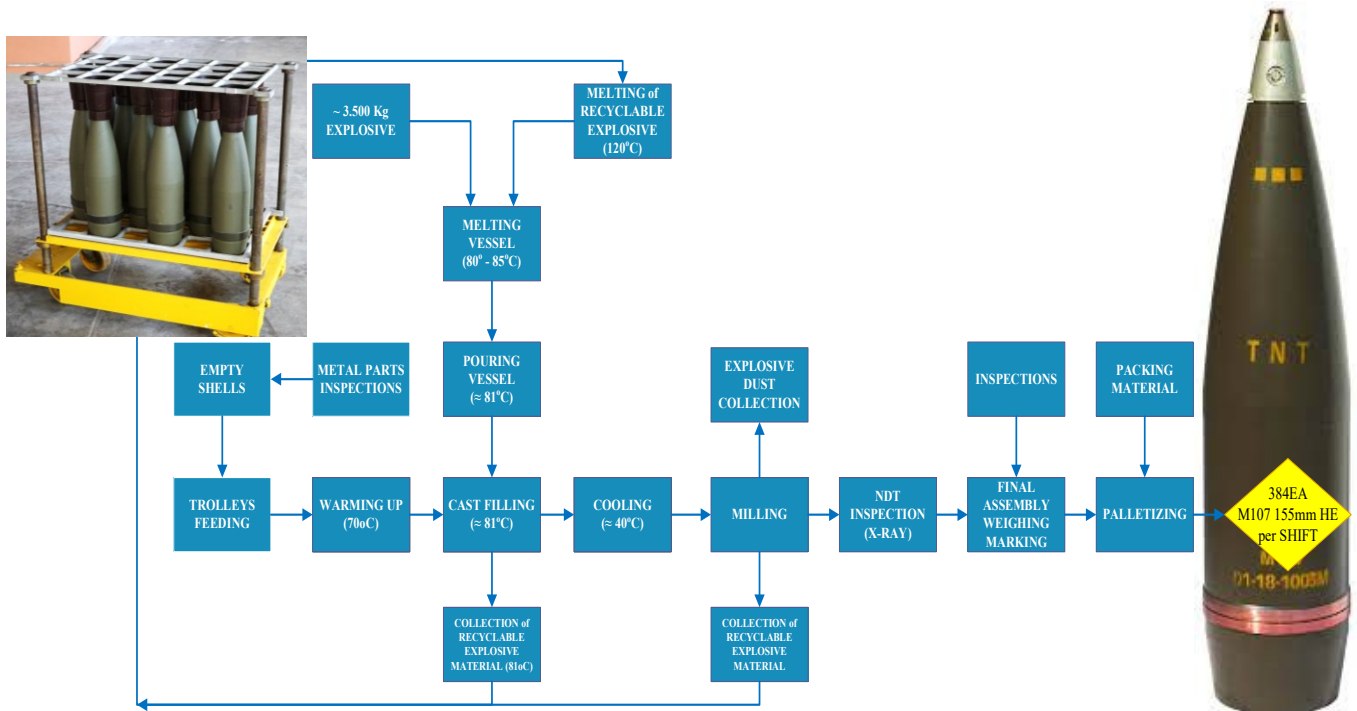


Σχήμα 29. Βελτιστοποιημένη συνθετική οδός για BODN (BOM) (Qing Ma et. al., 2021)



Σχήμα 30. Η μοριακή δομή του BOM (Xiong Yang et. al., 2020).

5.2 Βασικά χαρακτηριστικά παραγωγής



Σχήμα 31. Διάγραμμα ροής προϊόντων Γομωτηρίου M107 155mm HE

Οι ακόλουθες λειτουργίες, συμπεριλαμβανομένων των κατάλληλων προδιαγραφών και των Φασεολογίων (OP), περιλαμβάνονται στην υλοποίηση του προϊόντος:

- α. Έλεγχος της σωστής βαφής της εσωτερικής κοιλότητας με ειδικό αστάρι (MIL-P-22332).
- β. Πλήρωση κενών σωμάτων με εκρηκτικό TNT-Grade A (από τον Πελάτη) με μέσο βάρος TNT περίπου 6,3 kg (πυκνότητα 1,50 kg.dm³), ο όγκος της κοιλότητας είναι 4,46 dm³.
- γ. Βάψιμο της εξωτερικής επιφάνειας σύμφωνα με το MIL-DTL-11195, με τελική στρώση απόχρωσης No. 34088 του FED-STD-595 ή RAL 6014 (λαδί) με πάχος υγρού 60-75 μm.
- δ. Σήμανση του σώματος σύμφωνα με το σχέδιο του Πελάτη με RAL 1004.
- ε. Συσκευασία των τελικών προϊόντων στις αρχικές ξύλινες παλέτες στις οποίες θα παραληφθούν τα άδεια βλήματα από τον Πελάτη.
- στ. Έλεγχος ποιότητας με ακτίνες X μετά την πλήρωση με εκρηκτικά με όλες τις σχετικές αναφορές και πιστοποιητικά.
- ζ. Οπτική επιθεώρηση μετά την παραγωγή και πριν από τη συσκευασία.
- η. Διαθεσιμότητα αδειών εισαγωγής και εξαγωγής για το προϊόν.

5.3 Βασικά χαρακτηριστικά αποβλήτων

Η Μονάδα του Γομωτηρίου διαθέτει τρεις δεξαμενές βαρυτικής καθίζησης, κατασκευασμένες από οπλισμένο σκυρόδεμα, στις οποίες οδηγούνται τα υγρά απόβλητα που παράγονται στην συγκεκριμένη μονάδα.

Ειδικότερα:

A. Στην Δεξαμενή 5.93.Γ (δεξαμενή απογομωτηρίου) οδηγούνται:

τα νερά που προέρχονται από την έκπλυση των βλημάτων στο απογομωτήριο το νερό από τα δοχεία συγκέντρωσης/ ιζηματοποίησης της εκρηκτικής ύλης των συστημάτων Bernoulli. Η δεξαμενή αυτή διαθέτει τέσσερα διαμερίσματα, συνολικής χωρητικότητας 23,9 m³.

B. Στην Δεξαμενή 5.93.B (δεξαμενή πύλης γομωτηρίων) οδηγούνται τα κάτωθι απόβλητα, τα οποία περιέχουν υπολείμματα εκρηκτικής ύλης:

1. νερά που παράγονται κατά τη διαδικασία της κοπής των βλημάτων
2. νερά καθαρισμού των δαπέδων του χώρου κοπής των βλημάτων.

Η συγκεκριμένη δεξαμενή, χωρητικότητας 4,13 m³, διαθέτει τέσσερα τοιχεία συγκράτησης ιλύος.

Γ. Στην Δεξαμενή 5.93.A (δεξαμενή γομωτηρίων) οδηγούνται:

1. νερά που προκύπτουν από τον καθαρισμό του μηχανολογικού εξοπλισμού και των δαπέδων των εγκαταστάσεων, τα οποία περιέχουν ίχνη εκρηκτικής ύλης
2. νερό από τα δοχεία συγκέντρωσης / ιζηματοποίησης της εκρηκτικής ύλης των συστημάτων Bernoulli.

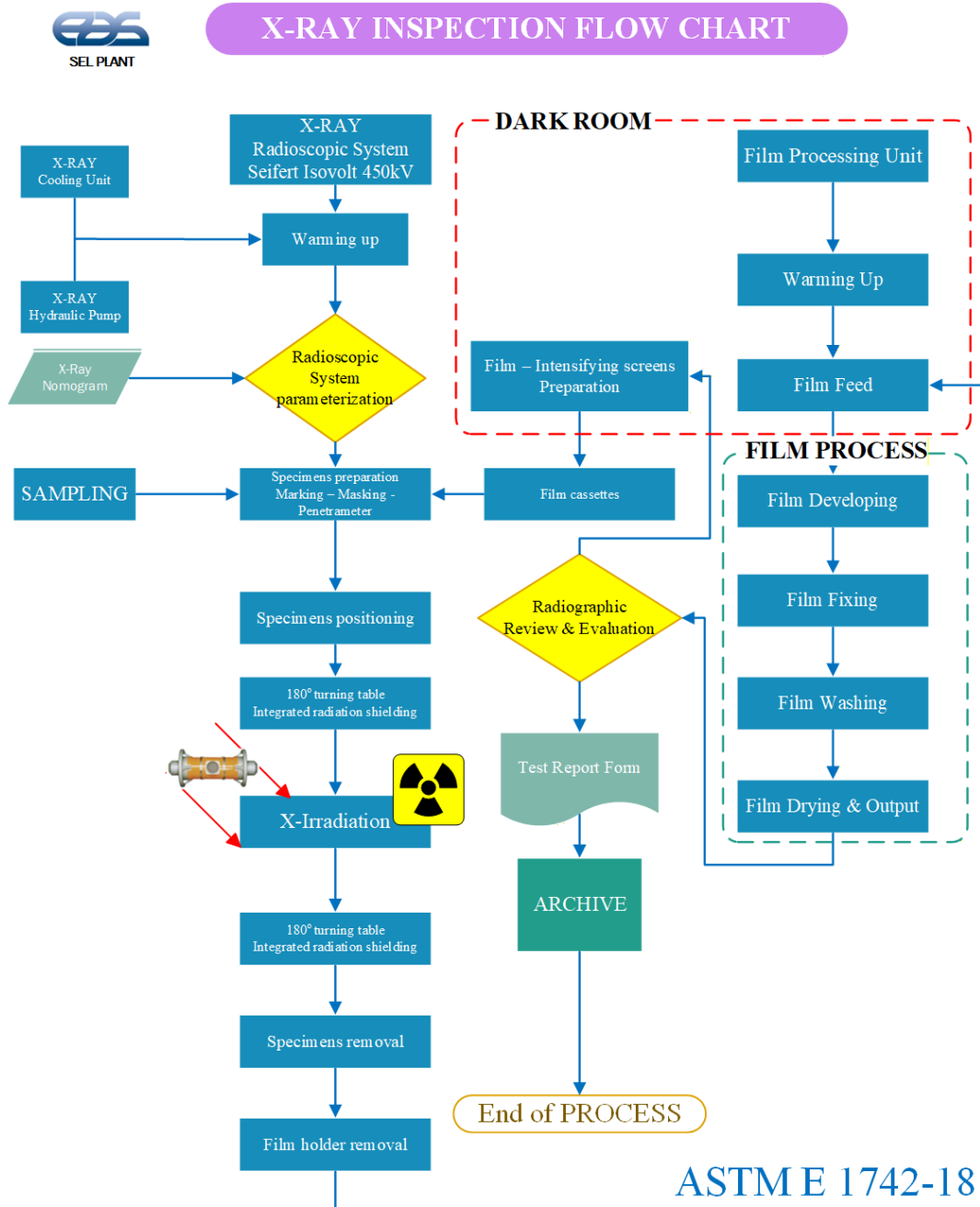
Η δεξαμενή αυτή διαθέτει τέσσερα διαμερίσματα, συνολικής χωρητικότητας 22,17 m³.

Δ. Στην Δεξαμενή 5.93.Δ (δεξαμενή πιλοτικής μονάδας) οδηγούνται:

Η δεξαμενή αυτή διαθέτει τρία διαμερίσματα, συνολικής χωρητικότητας 3,75 m³.

Όσον αφορά τα εξαντλημένα υγρά εμφάνισης που χρησιμοποιούνται στο εργαστήριο μη καταστροφικών ελέγχων, δεν έχει προκύψει έως και σήμερα ανάγκη αντικατάστασης τους. Ωστόσο η θεωρητική αντικατάστασή τους για πλήρη φόρτο παραγωγής, θα πραγματοποιείται ανά τρεις μήνες, ενώ τα εξαντλημένα υγρά συλλέγονται σε ειδικά

επισημασμένα δοχεία (X-Ray) και οδηγούνται για προσωρινή ενδιάμεση αποθήκευση προς διαχείριση από αδειοδοτημένη για τον σκοπό αυτό εταιρεία.



PERMIT by GREEK ATOMIC ENERGY COMMISSION

Σχήμα 32. Διάγραμμα ροής ραδιογραφικού ελέγχου στην παραγωγή πυρομαχικών (διαδικασία γόμωσης).

5.4 Υφιστάμενη μέθοδος επεξεργασίας

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.

MAIN WASTE SEDIMENTATION TANK of the CASTING STATION					EXPLOSIVE CAPACITY IN TONS
ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΚΑΘΙΣΗΣΗΣ ΓΟΜΩΤΗΡΙΟΥ 2025					
depth (m)	WIDTH: 1.65 (m)	length (m)	volume (m³)	TOTAL (m³)	33
1.75		3.00	8.66	22.17	
2.48		1.50	6.14		9
2.48		1.00	4.09		
2.48		0.80	3.27		5



Σχήμα 33. Κύρια δεξαμενή απορροής υγρών αποβλήτων κατά την παραγωγική διαδικασία πυρομαχικών.

Ο ανωτέρω τρόπος χειρισμού – διάθεσης των αποβλήτων γομωτηρίου δεν είναι πλέον επαρκής: Γενικά, τα υγρά απόβλητα των εγκαταστάσεων δραστηριότητας “LAP”, ακόμα και μετά 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/lι λυμάτων) έως τα 300 ppm (0,3 g/lι λυμάτων).

Σύμφωνα με τις σχετικές αναλύσεις δειγμάτων των αποβλήτων αυτών από το Χημείο του ΣΕΛ, τα διαλυτά σε ακετόνη οργανικά συστατικά των υγρών λυμάτων των δεξαμενών του γομωτηρίου (κατά τεκμήριο TNT) είναι της τάξεως των 100 mg/lι. 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/lι. Οι περιεκτικότητες αυτές είναι πολύ υψηλές και δημιουργούν τέτοιους περιβαλλοντικούς κινδύνους (ρύπανση εδάφους και φυσικών υδάτινων αποδεκτών) ώστε να μην επιτρέπεται η ελεύθερη απόρριψη αυτών των αποβλήτων στο φυσικό περιβάλλον.

Από την άλλη μεριά, η μελέτη της τοξικότητας του TNT και των άλλων νιτροπαραγώγων στους έμβιους οργανισμούς δεν κατέληξε στη θέσπιση κάποιων αυστηρών διεθνών ορίων όσον αφορά την αποδεκτή περιεκτικότητα των υγρών αποβλήτων στις ουσίες αυτές προκειμένου να είναι επιτρεπτή η ελεύθερη διάθεσή τους στο περιβάλλον.

Οι δεξαμενές καθίζησης αποτελούν το κύριο τρόπο διαχείρισης υγρών αποβλήτων.



Σχήμα 34. Τυπική τσιμεντένια δεξαμενή καθίζησης υγρών αποβλήτων (ΕΑΣ-ΑΒΕΕ-ΣΕΛ,, 2019)

Όσον αφορά τη διαχείριση των υγρών αποβλήτων του γομωτηρίου του ΣΕΛ, εφαρμόζονται, κατά σειρά προτεραιότητας τα εξής:

1. Απαγορεύεται η διάθεση ποσότητας υγρών αποβλήτων του γομωτηρίου στο φυσικό περιβάλλον, από οποιαδήποτε από τις δεξαμενές καθίζησης, δεδομένου ότι η περιεκτικότητά τους σε TNT υπερβαίνει κατά πολύ τα επιτρεπτά όρια που θέτει η σχετική περιβαλλοντική νομοθεσία.
2. Εκδίδεται οδηγία στην αποφυγή άσκοπης χρήσης του νερού πλύσεων που αυξάνει τον όγκο των υγρών αποβλήτων και δυσχεραίνει τη διαχείρισή τους.
3. Παρακολουθείται ανά τακτά διαστήματα (τουλάχιστον ανά τρίμηνο) η στάθμη των δεξαμενών και η σχετική μέτρηση καταχωρείται σε ειδικό αρχείο που διατηρεί ο υπεύθυνος περιβαλλοντικής διαχείρισης του ΣΕΛ. Δεν υπάρχει ανάγκη παρακολούθησης της περιεκτικότητας των υγρών αποβλήτων σε TNT, δεδομένου ότι η περιεκτικότητα αυτή κινείται στα ανωτέρω γνωστά όρια, και σε κάθε περίπτωση τα υγρά αυτά απόβλητα δεν επιτρέπεται να απορρίπτονται στο φυσικό περιβάλλον.
4. Λαμβάνονται μέτρα (πχ. δημιουργία υπόστεγου) ώστε να εξασφαλίζεται η δυνατότητα εξάτμισης του νερού από την επιφάνεια της δεξαμενής, χωρίς να αυξάνεται ο όγκος των αποβλήτων με την εισροή νερού από βροχοπτώσεις.
5. Σε περίπτωση που διαπιστωθεί ότι ο όγκος των υγρών αποβλήτων μιας δεξαμενής υπερβαίνει το 90% της δυναμικότητάς της, ένα μέρος αυτής μεταγγίζεται σε σιδερένια βαρέλια των 200 λίτρων ώστε να μειωθεί ικανοποιητικά ο όγκος των αποβλήτων εντός της δεξαμενής. Τα βαρέλια αφήνονται σε ειδικό χώρο με σκοπό την εξάτμιση μέρους του περιεχόμενου νερού. Το περιεχόμενό τους σε καμιά περίπτωση δεν διατίθεται στο φυσικό περιβάλλον.
6. Εφ' όσον μελλοντικά υπάρξει δραστηριότητα του γομωτηρίου από την οποία παράγονται μεγάλες ποσότητες υγρών αποβλήτων, που δεν είναι δυνατόν να διαχειριστούν με την ανωτέρω μεθοδολογία, εξετάζονται εναλλακτικά σενάρια, πχ. με τη δημιουργία κλειστού κυκλώματος νερού πλύσεων, μέσω της ανακύκλωσης του νερού των δεξαμενών καθίζησης.
7. Τα συγκεκριμένα υγρά απόβλητα είναι ουδέτερα και επομένως δεν υπάρχει κίνδυνος διάβρωσης των τοιχωμάτων των δεξαμενών και εξ αυτού διαρροής αποβλήτων στο περιβάλλον. Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι δεν υπάρχει διαρροή υγρών αποβλήτων από τα τοιχώματα κάποιας από τις δεξαμενές, εξ αιτίας κατασκευαστικής αστοχίας, ανά δυο χρόνια και επί ένα διάστημα δέκα ημερών σε περίοδο ανομβρίας παρακολουθείται και καταγράφεται καθημερινά η στάθμη και των τριών δεξαμενών. Σε περίπτωση που

διαπιστωθεί μείωση της στάθμης μιας δεξαμενής πέραν αυτής που οφείλεται στη φυσική εξάτμιση, ο υπεύθυνος περιβαλλοντικής διαχείρισης προτείνει στην Διεύθυνση τρόπους αντιμετώπισης του προβλήματος χωρίς να επιβαρυνθεί ή να απειληθεί το φυσικό περιβάλλον με την απόρριψη υγρών αποβλήτων σ' αυτό. Ένας τέτοιος τρόπος είναι πχ η εγκατάσταση φίλτρων ενεργού άνθρακα. Εφ' όσον υιοθετηθεί αυτή η λύση, θα ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- I. Καθαρισμός των υγρών αποβλήτων μέσω των φίλτρων και διάθεσή τους στο περιβάλλον, εφ' όσον προηγουμένως ελεγχθεί η ποιότητά τους.
- II. Συγκέντρωση της ιλύος που έχει καθιζάνει στον πυθμένα της δεξαμενής, ξήρανσή του, καύση της ξηράς ιλύος στο χώρο καύσης και διάθεση των στερεών υπολειμμάτων, κατά τα ισχύοντα.
- III. Έλεγχος και αποκατάσταση της στεγανότητας της δεξαμενής από εξειδικευμένο συνεργείο.

5.5 Πρόταση βελτιστοποίησης

Το «ροζ» νερό δεν έχει ιδιαίτερη σύνθεση (Munitions Safety Information Analysis Center (MSIAC), 2006).



Μπορεί να περιέχει TNT, RDX, HMX ή τα υποπροϊόντα αυτών των εκρηκτικών όπως DNT. Το όνομα προέρχεται από το χαρακτηριστικό χρώμα που τα αρχικά καθαρά λύματα εκτίθενται στο φως. Το ροζ νερό προέρχεται από τη φόρτωση, τη συναρμολόγηση και τη συσκευασία των πυρομαχικών καθώς και από μεθόδους αποστρατικοποίησης που περιλαμβάνουν νερό. Αντίθετα, το κόκκινο νερό είναι ένα μολυσμένο ρεύμα αποβλήτων ειδικά από την κατασκευή και τον καθαρισμό του TNT.

Παρά τα ονόματά τους, το κόκκινο και το ροζ νερό δεν μπορούν να αναγνωριστούν από το χρώμα τους (Olga Chusova, 2015). Και τα δύο είναι διαυγή όταν αναδύονται από τις αντίστοιχες διεργασίες τους και στη συνέχεια γίνονται ροζ, ανοιχτό κόκκινο, σκούρο κόκκινο ή μαύρο λόγω φωτοχημικής ακτινοβολίας διαλυμένου TNT για να σχηματίσουν σύνθετα μόρια που μοιάζουν με χρωστική, τα οποία συλλογικά αναφέρονται ως σύμπλοκο χρώματος TNT. Ο ρυθμός σχηματισμού ροζ νερού εξαρτάται ιδιαίτερα από την ακτινοβολία και το pH: το αλκαλικό pH ενισχύει τον ρυθμό και την ένταση της ανάπτυξης χρώματος. Η χημική σύνθεση του ροζ νερού ποικίλλει ανάλογα με τη διεργασία από την οποία προέρχεται. Το κόκκινο νερό έχει μια πιο καθορισμένη χημική σύνθεση.

Για αυτόν τον λόγο, είναι δύσκολο να προσομοιωθεί είτε το ροζ είτε το κόκκινο νερό στο εργαστήριο.

Το ροζ νερό μπορεί επίσης να περιέχει ποικίλα επίπεδα RDX και HMX, ανάλογα με τη συγκεκριμένη σύνθεση που χρησιμοποιείται. Τα νιτροσώματα που προκαλούν τη μεγαλύτερη ανησυχία στο ροζ νερό που συλλέχθηκε από ένα εργοστάσιο πυρομαχικών του στρατού στην Αϊόβα ήταν το TNT (100 mg/L), το RDX (30 mg/L), το HMX (30 mg/L) και το 2,4-DNT (1 mg/L). Εκτός από το TNT, το HMX, το RDX και το 2,4-DNT, το ροζ νερό μπορεί επίσης να περιέχει τετρύλιο, 2,6-DNT, 1,3-DNB, 1,3,5-TNB και νιτροβενζόλιο. Τα 2,4-DNT και 2,6-DNT δεν είναι αυστηρά εκρηκτικές ενώσεις πυρομαχικών, αλλά είναι υποπροϊόντα στην κατασκευή του TNT και συνήθως υπάρχουν σε χαμηλά επίπεδα στο ροζ νερό.

Η απόρριψη ροζ νερού στο περιβάλλον ελέγχεται αυστηρά.

Για την επεξεργασία των λυμάτων ώστε να πληρούνται αυτές οι απαιτήσεις, χρησιμοποιείται πιο συχνά ο κοκκοποιημένος ενεργός άνθρακας (GAC). Το GAC αποτελείται από υλικό με βάση τον άνθρακα, όπως ο άνθρακας, το οποίο έχει υποστεί επεξεργασία ώστε να παρέχει πολύ υψηλή επιφάνεια (πάνω από $500 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) και ως εκ τούτου πολύ υψηλά χαρακτηριστικά απορρόφησης. Αυτό επιτρέπει στο GAC να απορροφά πολύ αποτελεσματικά ενώσεις με βάση το άζωτο. Μετά την επεξεργασία του ροζ νερού, το GAC είναι επικίνδυνο απόβλητο και πρέπει να υποβάλλεται σε επεξεργασία, συνήθως με αποτέφρωση. Μια εγκατάσταση επεξεργασίας GAC απεικονίζεται στο Σχήμα.



Σχήμα 35. Στήλες GAC για την επεξεργασία λυμάτων TNT.

Ίσως η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη φυσικοχημική μέθοδος για την επεξεργασία του ροζ νερού σήμερα είναι η προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα, η οποία, εκτός του ότι είναι δαπανηρή, δημιουργεί μια λάσπη που πρέπει να αποτεφρωθεί εκτός του χώρου.

Σε πολλές χώρες, τα υπολείμματα φλοιού πεύκου της ξυλείας απορρίπτονται και δεν έχουν εφαρμογή υψηλής αξίας.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο φλοιός πεύκου έχει μεγάλο δυναμικό ως προσροφητικό μέσο για το TNT από μολυσμένο ροζ νερό. Η ταυτόχρονη χρήση μεθόδων βιομετασχηματισμού και προσρόφησης αποδείχθηκε βελτίωση σε σχέση με την προσρόφηση μόνο για την απομάκρυνση του TNT από μολυσμένα υδάτινα σώματα. Ο φλοιός πεύκου έδειξε μεγαλύτερη συγγένεια προς τους αμινο-μεταβολίτες του TNT παρά

για το ίδιο το TNT. Η μοριακή ανάλυση της μικροβιακής κοινότητας του φλοιού πεύκου και η χημική ανάλυση των εκχυλισμάτων παρέχουν στοιχεία για την ικανότητά του να βιομετασχηματίζει την TNT και τους μεταβολίτες του (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2017).



Εικόνα 9. Φλοιός Πεύκου

Μια ανασκόπηση 24 έργων αποκατάστασης σε 22 εγκαταστάσεις δείχνει ότι οι πιο συνηθισμένες τεχνολογίες επεξεργασίας εκρηκτικών στο έδαφος είναι η κομποστοποίηση (46,5%), ακολουθούμενη από την αποτέφρωση (32,1%) (Environmental Protection Agency, Fact Sheet – 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT), 2021).

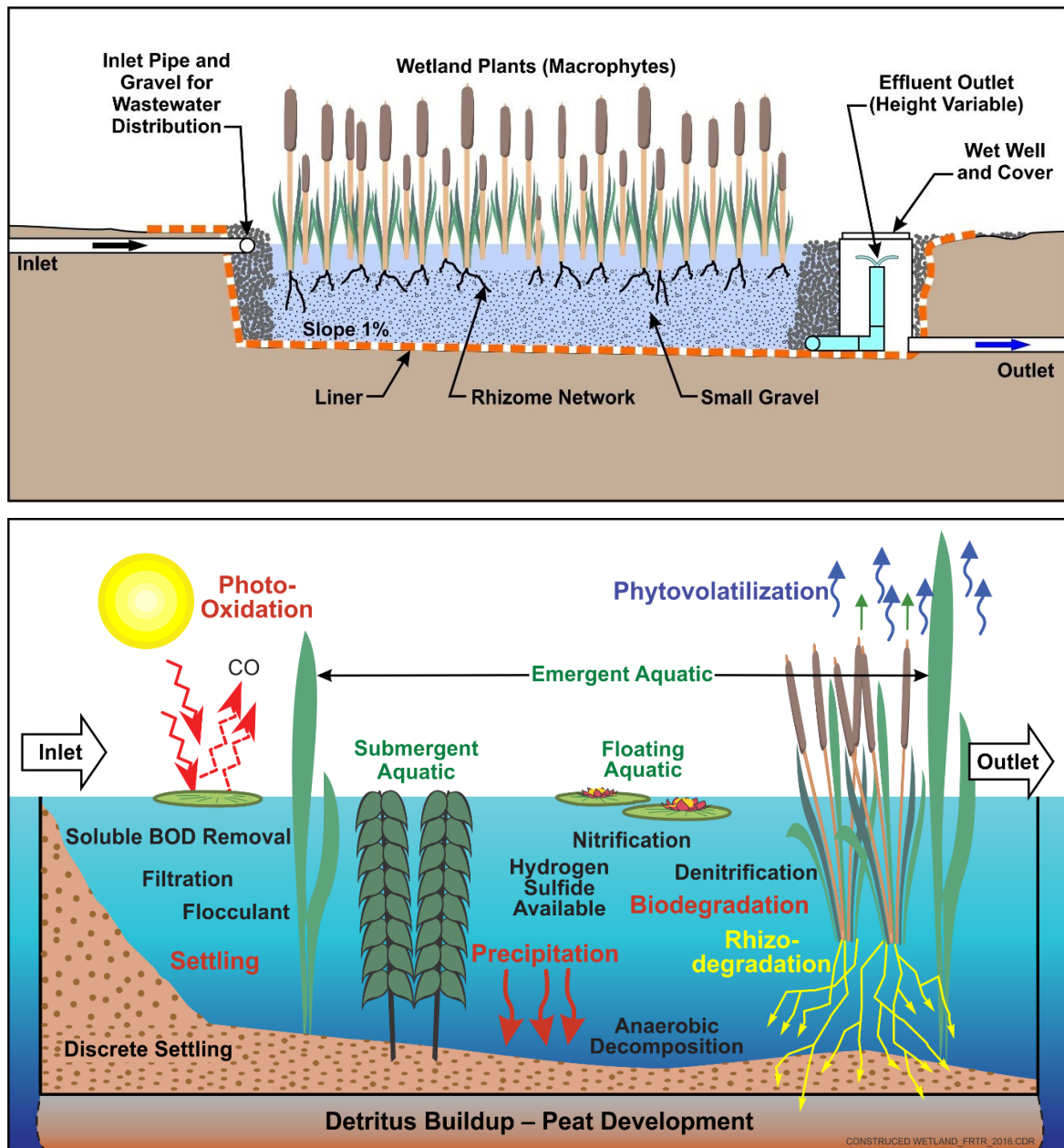
Η μόλυνση των υπόγειων υδάτων έχει αντιμετωπιστεί κυρίως με άντληση υπόγειων υδάτων και επεξεργασία με κοκκώδη ενεργό άνθρακα (GAC) ex situ. Με βάση τα πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα σε μελέτες επεξεργασίας σε πιλοτική κλίμακα, η βιοαποκατάσταση in situ θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί συχνότερα στο μέλλον (Environmental Protection Agency, Fact Sheet – 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT), 2021). Είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη οι συνέργειες μεταξύ των ρύπων, όπως τα μέταλλα και το υπερχλωρικό άλας, κατά την επιλογή μιας τεχνολογίας επεξεργασίας. Ο ακόλουθος πίνακας συνοψίζει τις τεχνολογίες επεξεργασίας για την TNT.

Πίνακας 15. Τεχνολογίες καθαρισμού για TNT
(Environmental Protection Agency, Fact Sheet – 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT), 2021)

Cleanup Technology	Water	Soil
Composting		✓
Incineration (emissions may require treatment)		✓
Alkaline hydrolysis		✓
Solidification/stabilization (metals co-contaminants)		✓
DARAMEND® process of biological and chemical reduction		✓
Granular activated carbon (ex situ)	✓	
Ion exchange (ex situ) (perchlorate co-contaminant)	✓	
In situ bioremediation	Potential	Potential

5.6 Ανάλυση πλεονεκτημάτων-μειονεκτημάτων πρότασης

Μια πιθανή λύση της διαχείρισης αποβλήτων είναι μέσω ενός υβριδικού συστήματος τεχνητού υγροτόπου στον οποίο θα οδηγούνται τα λύματα της διεργασίας ενός γομωτηρίου ή/και μονάδα παραγωγής εκρηκτικής πρώτης ύλης που θα συνδυάζει τη χρήση χημικής οξειδο-αναγωγής για τη μετατροπή των τοξικών οργανικών ενώσεων σε περισσότερο ακίνδυνες ενώσεις και επιδεκτικές σε ενζυματική βιο-αποδόμηση.



Εικόνα 10. Σχηματική αναπαράσταση Τεχνητών Υγροτόπων για βιομηχανίες (Luís Madeira et. al., 2021).

Στα μειονεκτήματα της πρότασης συγκαταλέγονται τα ακόλουθα:

- α. Κόστος κατασκευής τεχνητού υγρότοπου
- β. Κόστος αναλωσίμων χημικών
- γ. Συντήρηση του εξοπλισμού

Στα πλεονεκτήματα συμπεριλαμβάνονται:

- α. Μόνιμη λύση διαχείρισης επικίνδυνων αποβλήτων
- β. Διαχείριση μεγάλου όγκου υγρών αποβλήτων (δυνατότητα λειτουργίας σε τρεις βάρδιες).
- γ. Αύξηση της παραγωγικότητας της μονάδας
- δ. Προστασία του περιβάλλοντος, της υγείας και ασφάλειας των εργαζομένων.
- ε. Αυτονομία και αποφυγή δαπανών προς τρίτο μέρος για τη περιβαλλοντική διαχείριση.
- στ. Συμμόρφωση με την κείμενη νομοθεσία.

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).



Εικόνα 11. WERK TANNE ΥΓΡΟΤΟΠΟΙ ΣΕ ΠΡΩΗΝ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ ΕΚΡΗΚΤΙΚΩΝ (Leibniz University Hanover, 2020) σε 687 στρέμματα.

Η τοποθεσία ήταν εκτενώς μολυσμένη με ενώσεις τύπου εκρηκτικών. Λόγω της διάχυτης κατανομής στο έδαφος, η απολύμανση μεγάλης κλίμακας δεν είναι δυνατή, επομένως η αποκατάσταση πραγματοποιείται πλέον μέσω συλλογής και επεξεργασίας μολυσμένων στραγγισμάτων (ως κύρια πηγή μόλυνσης), χρησιμοποιώντας ένα κατασκευασμένο σύστημα υγροτόπων.

Το σύστημα αποτελείται από μια λεκάνη συγκράτησης όμβριων υδάτων (15.000 m^3), μια λεκάνη αντίδρασης με χαλίκι σιδηρούχο (36 m^3) με δοσολογία μελάσας, τον κατασκευασμένο 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 μολυσμένα στραγγίσματα συλλέγονται και προστίθενται στη λεκάνη συγκράτησης όμβριων υδάτων με όγκο 15.000 m^3 .

Υπόγεια οριζόντια ροή.

Λεκάνη συγκράτησης ανάντη και λεκάνη αντίδρασης με δοσολογία χαλκικού σιδήρου 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 στις $18 \text{ m}^3/\text{h}$.

Η ροή του νερού καθοδηγείται αποκλειστικά από τη βαρύτητα, προστίθεται μόνο μελάσα μέσω αντλίας, έτσι ώστε το λειτουργικό κόστος να είναι σχετικά χαμηλό.

6 ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Η πλειονότητα των νομοθετημάτων της ΕΕ έχει ενσωματωθεί στην ελληνική νομοθεσία.

Οι βασικές αρχές της πολιτικής της κοινότητας όσον αφορά το περιβάλλον είναι: η αρχή της προφύλαξης, η αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει», η ευθύνη του παραγωγού, η αρχή της πρόληψης και η αρχή της εγγύτητας.

Ειδικότερα, σε σχέση με τα επικίνδυνα απόβλητα, η Ευρωπαϊκή Κοινότητα έχει θεσπίσει νομοθεσία, που περιλαμβάνει κανονισμούς, οδηγίες, αποφάσεις, η οποία καλύπτει όλο το φάσμα διαχείρισής τους (από ταυτοποίηση έως ασφαλή τελική διάθεση). Οι κυριότεροι τομείς που καλύπτει η εν λόγω νομοθεσία είναι: ο χαρακτηρισμός και διαχείριση των επικίνδυνων αποβλήτων, η ταξινόμηση, η συσκευασία, και η επισήμανσή τους, η μεταφορά αποβλήτων (επικίνδυνων και μη) εντός και εκτός της χώρας, η διαχείριση ειδικών τύπων ΕΑ, η αποτέφρωση αποβλήτων (επικίνδυνων και μη), και η εφαρμογή ολοκληρωμένου ελέγχου και πρόληψης της ρύπανσης, όπως επίσης και συστημάτων οικολογικής διαχείρισης και ελέγχου, και απονομής οικολογικού σήματος. Στον πίνακα που ακολουθεί, δίνονται τα βασικά νομοθετήματα που καλύπτουν τους τομείς που προαναφέρθηκαν.

Στην Ελλάδα, το ισχύον θεσμικό πλαίσιο για την αποτελεσματική διαχείριση των επικίνδυνων αποβλήτων ενσωματώνει τις διατάξεις της ειδικής κοινοτικής νομοθεσίας στο εθνικό δίκαιο. Απαιτεί οι διαχειριστές των ΕΑ να έχουν λάβει κατάλληλη άδεια για μεταφορά, αποθήκευση, καταστροφή ή επεξεργασία των επικινδύνων αποβλήτων. Επιπλέον, η εταιρεία θα πρέπει να παραδίδει τα επικίνδυνα απόβλητά της σε φυσικό ή νομικό πρόσωπο το οποίο διαθέτει σχετική άδεια για τη διαχείρισή τους, να τηρεί μητρώο επικίνδυνων αποβλήτων (για 10 χρόνια, βλ. ΚΥΑ 24944/1159).

Απαγορεύεται η ρίψη των επικίνδυνων αποβλήτων σε οποιοδήποτε μέσο, απαιτείται η δημιουργία κατάλληλου χώρου εντός της εγκατάστασης για την αποθήκευση των αποβλήτων, και επιπλέον οι όροι για τη διαχείριση των επικίνδυνων αποβλήτων θα πρέπει να αναγράφονται στη Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων και στους Περιβαλλοντικούς Όρους της κάθε εγκατάστασης. Η ΚΥΑ 13588/725/2006 ορίζει στο Παράρτημα II τις ιδιότητες που πρέπει να εμφανίζουν τα απόβλητα προκειμένου να χαρακτηριστούν ως επικίνδυνα (πχ με σημείο ανάφλεξης μικρότερο ή ίσο 55°C, ουσίες που ταξινομούνται ως πολύ τοξικές σε ολική συγκέντρωση μεγαλύτερη ή ίση του 0,1%, κλπ.).

Τα απόβλητα αυτά, τα οποία έχουν συγκεκριμένο κωδικό (ΕΚΑ), επισημαίνονται με αστερίσκο (*).

Ο Ευρωπαϊκός Κατάλογος Αποβλήτων (EWC), πλέον επίσημα γνωστός ως Ευρωπαϊκός Κατάλογος Αποβλήτων (LoW), είναι ένα τυποποιημένο, εξαψήφιο σύστημα ταξινόμησης που χρησιμοποιείται σε ολόκληρη την Ευρωπαϊκή Ένωση. Εναρμονίζει την υποβολή εκθέσεων για τα απόβλητα, παρακολουθεί τα επικίνδυνα υλικά και διασφαλίζει την ασφαλή διαχείριση των αποβλήτων.

Η ταξινόμηση χρησιμοποιεί έναν εξαψήφιο κωδικό που ομαδοποιείται σε τρία κύρια ζεύγη, τα οποία προσδιορίζουν την προέλευση των αποβλήτων και το συγκεκριμένο υλικό:

XX: Τα δύο πρώτα ψηφία υποδηλώνουν τη βιομηχανία, τη διαδικασία ή τη δραστηριότητα που παράγει τα απόβλητα (π.χ., (17\)) για απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων, (20\)) για αστικά απόβλητα).

YY: Τα επόμενα δύο ψηφία προσδιορίζουν την υποκατηγορία ή τη συγκεκριμένη διαδικασία.

ZZ : Τα δύο τελευταία ψηφία υποδεικνύουν το συγκεκριμένο υλικό αποβλήτων.

Τα απόβλητα χαρακτηρίζονται σαφώς ως επικίνδυνα ή μη επικίνδυνα με βάση τους κωδικούς τους.

Τα επικίνδυνα απόβλητα προσδιορίζονται με έναν αστερίσκο στο τέλος του εξαψήφιου κωδικού.

Τα μη επικίνδυνα απόβλητα δεν φέρουν αστερίσκο.

Ο κατάλογος χωρίζεται σε 20 κύρια κεφάλαια, τα οποία κατανέμονται σε γενικές γραμμές σε συγκεκριμένες βιομηχανικές δραστηριότητες και τύπους υλικών:

01: Μεταλλεία και εξερεύνηση ορυκτών

02: Γεωργία, παρασκευή και επεξεργασία τροφίμων

03: Επεξεργασία ξύλου και παραγωγή χαρτιού 04: Βιομηχανίες δέρματος, γούνας και κλωστοϋφαντουργίας

05 & 06: Διεργασίες πετρελαίου, φυσικού αερίου και ανόργανων χημικών ουσιών

07: Οργανικές χημικές διεργασίες

08: Παραγωγή χρωμάτων, συγκολλητικών ουσιών και μελανιών

09: Φωτογραφική βιομηχανία

10: Θερμικές διεργασίες (σταθμοί παραγωγής ενέργειας, μεταλλουργία)

11 & 12: Επεξεργασία, διαμόρφωση και επίστρωση μετάλλων

13 & 14: Απόβλητα πετρελαίου, υγρά καύσιμα και οργανικοί διαλύτες

15: Υλικά συσκευασίας, απορροφητικών και φίλτρων

16: Διάφορα απόβλητα

17: Απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων (συμπεριλαμβανομένου του αμιάντου)

18: Απόβλητα υγειονομικής περίθαλψης και συναφή ερευνητικά απόβλητα

19: Εγκαταστάσεις διαχείρισης αποβλήτων και επεξεργασίας νερού

20: Αστικά και παρόμοια εμπορικά/οικιακά απόβλητα

Η εθνική πολιτική, οι στρατηγικές και προοπτικές στη διαχείριση των επικίνδυνων αποβλήτων, καθορίζονται στο Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Επικίνδυνων Αποβλήτων (ΕΣΔΕΑ. Το ΕΣΔΕΑ, όπως και το ΕΣΔΑ, είναι απόσταγμα επεξεργασίας προηγηθείσας μελέτης αφού ελήφθησαν υπόψη απόψεις των εμπλεκόμενων υπηρεσιών και φορέων στον τομέα διαχείρισης των επικίνδυνων αποβλήτων, καθώς και σχόλια προηγηθείσας δημόσιας διαβούλευσης. Βασικοί στόχοι του σχεδίου είναι η διασφάλιση της προστασίας του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας, αποβλέποντας στον κοινωνικό και οικολογικό μετασχηματισμό του παραγωγικού μοντέλου και στη μετάβαση προς μια οικονομία των κοινωνικών αναγκών. Ιδιαίτερης σημαντικότητας προς την επίτευξη των στόχων αυτών είναι η πλήρης εφαρμογή της πυραμίδας ιεράρχησης στη διαχείριση, με προτεραιότητα στην πρόληψη παραγωγής, ακολουθούμενη από την προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση, την ανακύκλωση, την ανάκτηση ενέργειας και τέλος την ασφαλή διάθεση, ως τελευταία επιλογή διαχείρισης.

Βασικό μέρος της πορείας που ακολουθείται κατά τη διαχείριση των επικίνδυνων αποβλήτων είναι η μεταφορά τους από τον χώρο παραγωγής τους (βιομηχανία) στον χώρο επεξεργασίας τους. Ειδικότερα, στη χώρα μας που η δυνατότητα επεξεργασίας ενός μεγάλου αριθμού επικίνδυνων αποβλήτων δεν είναι εφικτή με συνέπεια να απαιτείται η εξαγωγή τους, η διαδρομή αυτή είναι μεγάλη. Συνήθως γίνεται οδικώς, ακολουθώντας τις οδηγίες της σχετικής νομοθεσίας που αφορά τη μεταφορά επικίνδυνων υλικών (εμπορευμάτων). Βασικό νομοθέτημα είναι η συνθήκη ADR, που περιγράφει λεπτομερώς τις διαδικασίες που πρέπει να εφαρμόζονται για να εξασφαλίζεται η ασφαλής μεταφορά των επικίνδυνων εμπορευμάτων.

Στη συνθήκη ADR καθορίζονται όλες οι ευθύνες των εμπλεκόμενων μερών, δηλαδή του αποστολέα, του φορτωτή, του μεταφορέα, του κατόχου του μεταφορικού μέσου, του οδηγού και τέλος του παραλήπτη. Τοιουτοτρόπως, επιχειρείται η πιστή τήρηση των προδιαγραφών της συνθήκης εκ των έσω, δηλαδή από τα ίδια τα εμπλεκόμενα μέρη και όχι μόνο από τις αρμόδιες κρατικές αρχές. Με βάση, λοιπόν την εν λόγω συνθήκη, ορίζονται μεταξύ άλλων, η σήμανση και τα χαρακτηριστικά της συσκευασίας (που εξασφαλίζει τη συμβατότητα των υλικών συσκευασίας με τα ΕΑ προς αποφυγή διαρροών, και την ανθεκτικότητά της έναντι

μηχανικής καταπόνησης), τα σχετικά έγγραφα, τις προδιαγραφές των φορτηγών οχημάτων, τις επιτρεπτές ποσότητες που μπορούν να διακινούνται, καθώς και επίσης τις αρμοδιότητες του λεγόμενου Συμβούλου Ασφαλούς Μεταφοράς, ο οποίος παρέχοντας σχετικές οδηγίες στον μεταφορέα συμβάλλει στην ασφαλή διεξαγωγή της μεταφοράς. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των εκρηκτικών, βάσει της εν λόγω οδηγίας, η συνολική ποσότητα καθαρής εκρηκτικής ύλης που μπορεί να μεταφερθεί σε μία μεταφορική μονάδα εφόσον η μονάδα πληροί συγκεκριμένες προδιαγραφές, δεν μπορεί να υπερβαίνει τους 16 t.

Το σύνολο των νόμων των ΗΠΑ (US Code) μπορεί να το βρει κανείς δημοσιευμένο στην ιστοσελίδα: <http://www4.law.cornell.edu/uscode/>, και τους κανονισμούς στη διεύθυνση: <http://www.gpoaccess.gov/cfr/index.html>.

Πίνακας 16. Κοινοτική νομοθεσία για τη διαχείριση των επικίνδυνων αποβλήτων

ΘΕΜΑ	ΚΟΙΝΟΤΙΚΗ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ
Τοξικά και επικίνδυνα απόβλητα	78/319/ΕΟΚ 91/692/ΕΟΚ
Επικίνδυνα Απόβλητα	91/689/ΕΟΚ 94/31/ΕΚ
Κατάρτιση καταλόγου επικίνδυνων αποβλήτων	2001/119/ΕΚ
Ταξινόμηση, συσκευασία και επισήμανση επικίνδυνων αποβλήτων	Κανονισμός 1272/2008 (1907/2006/ΕΚ)
Ολοκληρωμένος έλεγχος και πρόληψη της ρύπανσης	1996/61/ΕΚ
Προστασία του περιβάλλοντος μέσω του ποινικού δικαίου	2008/99/ΕΚ
Διασυνοριακή μεταφορά επικίνδυνων αποβλήτων	2009/31/ΕΚ
Οδικές μεταφορές επικίνδυνων αποβλήτων	2015/974/ΕΚ
Σιδηροδρομικές μεταφορές επικίνδυνων αποβλήτων	2003/29/ΕΚ
Κίνδυνοι από ατυχήματα σχετιζόμενα με επικίνδυνες ουσίες	2012/18/ΕΕ
Αποτέφρωση επικίνδυνων αποβλήτων	Οδηγία 2000/76/ΕΚ (Κανονισμός 1137/2008)

ΕΘΝΙΚΗ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ

1. ΚΥΑ 62952/5384/30-12-2016, Έγκριση Εθνικού Σχεδίου Διαχείρισης Επικίνδυνων Αποβλήτων (ΕΣΔΕΑ), σύμφωνα με το άρθρο 31 του ν. 4342/2015.
2. Ν.4819/2021 (ΦΕΚ 129/Α' 23.7.2021) Ολοκληρωμένο πλαίσιο για τη διαχείριση των αποβλήτων - Ενσωμάτωση των Οδηγιών 2018/851 και 2018/852 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 30ής Μαΐου 2018 για την τροποποίηση της Οδηγίας 2008/98/ΕΚ περί αποβλήτων και της Οδηγίας 94/62/ΕΚ περί συσκευασιών και απορριμμάτων συσκευασιών, πλαίσιο οργάνωσης του Ελληνικού Οργανισμού Ανακύκλωσης, διατάξεις για τα πλαστικά προϊόντα και την προστασία του φυσικού περιβάλλοντος, χωροταξικές - πολεοδομικές, ενεργειακές και συναφείς επείγουσες ρυθμίσεις.
3. Ν.4736/2020 (ΦΕΚ Α' 200/2020) Ενσωμάτωση της Οδηγίας (ΕΕ) 2019/904 σχετικά με τη μείωση των επιπτώσεων ορισμένων πλαστικών προϊόντων στο περιβάλλον και λοιπές διατάξεις.
4. Ν.4685/2020 (ΦΕΚ Α' 92/7-5-2020) Εκσυγχρονισμός περιβαλλοντικής νομοθεσίας, ενσωμάτωση στην ελληνική νομοθεσία των Οδηγιών 2018/844 και 2019/692 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου και λοιπές διατάξεις.
5. Ν.4936/2022 (ΦΕΚ Α' 105/2022) Εθνικός Κλιματικός Νόμος - Μετάβαση στην κλιματική ουδετερότητα και προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή, επείγουσες διατάξεις για την αντιμετώπιση της ενεργειακής κρίσης και την προστασία του περιβάλλοντος.
6. Ν.2939/2001 (ΦΕΚ 179/Α/06.08.2001) «Συσκευασίες και εναλλακτική διαχείριση των συσκευασιών άλλων προϊόντων – Ιδρυση Εθνικού Οργανισμού Εναλλακτικής Διαχείρισης Συσκευασιών και άλλων Προϊόντων (ΕΟΕΔΣΑΠ) και άλλες διατάξεις», όπως τροποποιήθηκε με το Ν. 3854/10 (ΦΕΚ 94/Α/23.06.2010) «Τροποποίηση της νομοθεσίας για την εναλλακτική διαχείριση των συσκευασιών και άλλων προϊόντων και τον Εθνικό Οργανισμό Εναλλακτικής Διαχείρισης Συσκευασιών και Άλλων Προϊόντων (Ε.Ο.Ε.Δ.Σ.Α.Π.) και άλλες διατάξεις» και το Ν.4042/2012,
7. Ν.4042/2012 (ΦΕΚ 24/Α/13-2-2012) «Ποινική Προστασία του περιβάλλοντος – Εναρμόνιση με την Οδηγία 2008/99/ΕΚ – Πλαίσιο παραγωγής και διαχείρισης αποβλήτων – Εναρμόνιση με την Οδηγία 2008/98/ΕΚ – Ρύθμιση θεμάτων Υπουργείου Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής» που ενσωματώνει στο εθνικό δίκαιο την οδηγία-πλαίσιο 2008/98/ΕΕ για τα απόβλητα,
8. Ν. 4014/11 (ΦΕΚ 209/Α/21-9-11) «Περιβαλλοντική αδειοδότηση έργων και δραστηριοτήτων, ρύθμιση αυθαιρέτων σε συνάρτηση με δημιουργία περιβαλλοντικού ισοζυγίου και άλλες διατάξεις αρμοδιότητας Υπουργείου Περιβάλλοντος» όπως τροποποιήθηκε και ισχύει (Άρθρο 12).

9. Ευρωπαϊκός Κατάλογος Αποβλήτων (ΕΚΑ), σύμφωνα με το Παράρτημα της Απόφασης 2002/532/ΕΚ, όπως έχει τροποποιηθεί με τις Αποφάσεις 2001/118/ΕΚ, 2001/119/ΕΚ και 2001/573/ΕΚ της Επιτροπής Ε.Κ.
10. Κανονισμός (ΕΚ) 1013/2006 Για τις μεταφορές αποβλήτων, όπως έχει τροποποιηθεί, συμπληρωθεί και ισχύει.
11. ΚΥΑ 114218/1997 (ΦΕΚ 1016 Β) «Κατάρτιση πλαισίου Προδιαγραφών και γενικών προγραμμάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων»
12. ΚΥΑ 29407/3508/2002 (ΦΕΚ 1572 Β) «Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων»
13. ΚΥΑ 50910/2727/2003 (ΦΕΚ 1909 Β) «Μέτρα και Όροι για τη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων. Εθνικός και Περιφερειακός Σχεδιασμός Διαχείρισης», όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει.
14. ΚΥΑ 22912/1117/2005 (ΦΕΚ 759 Β) «Μέτρα και όροι για την πρόληψη και τον περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος από την αποτέφρωση των αποβλήτων»
15. ΚΥΑ Η.Π. 4641/232/2006 (ΦΕΚ 168 Β) «Καθορισμός τεχνικών προδιαγραφών μικρών ΧΥΤΑ σε νησιά και απομονωμένους οικισμούς κατ' εφαρμογή του άρθρου 3 (παρ.4) σε συνδυασμό με το άρθρο 20 (Παρ.Ι) της υπ' αριθμ.29407/3508/2002 ΚΥΑ».
16. ΚΥΑ Η.Π.13588/725/2006: Μέτρα, όροι και περιορισμοί για την διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 91/689/ΕΟΚ «για τα επικίνδυνα απόβλητα» του Συμβουλίου της 12ης Δεκεμβρίου 1991. Αντικατάσταση της υπ.αριθ.19396/1546/1997 ΚΥΑ «Μέτρα και όροι για τη διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων (ΦΕΚ Β'604/28-3-2006)».
17. ΚΥΑ Η.Π. 24944/1159/2006: Έγκριση Γενικών Τεχνικών Προδιαγραφών για την διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων σύμφωνα με το άρθρο 5 (παρ. Β) της υπ' αριθμ. 13588/725 κοινή υπουργική απόφαση «Μέτρα όροι και περιορισμοί για την διαχείριση επικινδύνων αποβλήτων κ.λπ.» (Β'383) και σε συμμόρφωση με τις διατάξεις του άρθρου 7 (παρ.1) της οδηγίας 91/156/ΕΚ του Συμβουλίου της 18ης Μαρτίου 1991» και του «Εθνικού Σχεδιασμού διαχείρισης επικίνδυνων αποβλήτων», που προβλέπονται στο άρθρο 5 της ίδιας ΚΥΑ (ΦΕΚ Β'791/30-6-2006)
18. ΚΥΑ 8668/2007 (ΦΕΚ Β'287/2-3-2007): Έγκριση Εθνικού Σχεδιασμού Διαχείρισης Επικίνδυνων Αποβλήτων (ΕΣΔΕΑ), σύμφωνα με το άρθρο 5 (παρ.Α) της υπ' αριθμ. 13588/725 κοινή υπουργική απόφαση «Μέτρα, όροι και περιορισμοί για τη διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων κ.λπ.» (Β' 383) και σε συμμόρφωση με τις διατάξεις του άρθρου 7 (παρ.1) της υπ' αριθμ. 91/156/ΕΚ οδηγίας του Συμβουλίου της 18ης Μαρτίου 1991. Τροποποίηση της υπ' αριθμ.13588/725/2006 κοινή υπουργική απόφαση «Μέτρα όροι και περιορισμοί για την διαχείριση επικινδύνων αποβλήτων ... κ.λπ.» (Β' 383) και της υπ' αριθμ.24944/1159/206 κοινή υπουργική απόφαση «Έγκριση Γενικών Τεχνικών Προδιαγραφών για την διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων ... κ.λπ.» (Β' 791).

19. ΚΥΑ 7589/731/2000 (ΦΕΚ Β 514) Για τον καθορισμό μέτρων και όρων για τη διαχείριση των πολυχλωροδифαινυλίων και πολυχλωροτριφαινυλίων.
20. ΚΥΑ 18083/1098 Ε.103/ 2003 (ΦΕΚ Β 606) Σχέδια διάθεσης/απολύμανσης συσκευών που περιέχουν PCB. Γενικές κατευθύνσεις για τη συλλογή και μετέπειτα διάθεση συσκευών και αποβλήτων με PCB, σύμφωνα με το άρθρο 7 της κοινής υπουργικής απόφασης 7589/731/2000 (Β' 514).
21. ΚΥΑ με αρ. Κ.Υ.Α.146163/2012 «Μέτρα και Όροι για τη Διαχείριση Αποβλήτων Υγειονομικών Μονάδων», που εκδόθηκε κατ' εξουσιοδότηση του άρθρου 38, παρ.7 του ν.4042/2012.
22. Ν. 2939/2001 (ΦΕΚ 179/Α/06.08.2001) «Συσκευασίες και εναλλακτική διαχείριση των συσκευασιών άλλων προϊόντων – Ίδρυση Εθνικού Οργανισμού Εναλλακτικής Διαχείρισης Συσκευασιών και άλλων Προϊόντων (ΕΟΕΔΣΑΠ) και άλλες διατάξεις» όπως τροποποιήθηκε και ισχύει.
23. Ν. 3854/2010 (ΦΕΚ 94/Α/23.06.2010) «Τροποποίηση της νομοθεσίας για την εναλλακτική διαχείριση των συσκευασιών και άλλων προϊόντων και τον Εθνικό Οργανισμό Εναλλακτικής Διαχείρισης Συσκευασιών και Άλλων Προϊόντων (Ε.Ο.Ε.Δ.Σ.Α.Π.) και άλλες διατάξεις» όπως τροποποιήθηκε και ισχύει.
24. ΚΥΑ 104826/2004 (ΦΕΚ 849 Β/9.6.2004) «Καθορισμός ύψους ανταποδοτικών τελών από ατομικά ή συλλογικά συστήματα εναλλακτικής διαχείρισης συσκευασιών / άλλων προϊόντων (όπως αυτά ορίζονται στο άρθρο 2, παρ. 4, του Ν. 2939/2001) σε εφαρμογή των άρθρων 7 (παρ. Β1, εδ. α3 και παρ. Β2, εδ. α5) και του άρθρου 17 του Ν. 2939/2001 "Συσκευασίες και εναλλακτική διαχείριση συσκευασιών και άλλων προϊόντων κ.λ.π." (Α' 179)».
25. ΚΥΑ 112145/2004 (ΦΕΚ 1916 Β/24.12.2004) «Ξεχωριστή αναγραφή της χρηματικής εισφοράς επί των τιμολογίων πώλησης σε όλα τα στάδια πώλησης των ελαστικών των οχημάτων, των ηλεκτρικών στηλών και συσσωρευτών, του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, των οχημάτων, των λιπαντικών ελαίων, εκτός των τιμολογίων που απευθύνονται στους τελικούς αγοραστές χρήστες – επιτηδευματίες.
26. ΚΥΑ 9268/469/07 (ΦΕΚ 286 Β) «Τροποποίηση των ποσοτικών στόχων για την ανάκτηση και ανακύκλωση των αποβλήτων των συσκευασιών σύμφωνα με το άρθρο 10 (παρ. Α1, τελευταίο εδάφιο) του ν. 2939/2001 (Α' 179), καθώς και άλλων διατάξεων του νόμου αυτού, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2004/12/ΕΚ «για την τροποποίηση της οδηγίας 94/62/ΕΚ για τις συσκευασίες και τα απορρίμματα συσκευασίας», του Συμβουλίου της 11ης Φεβρουαρίου 2004».
27. ΚΥΑ 9303/454/Ε103/2009 (ΦΕΚ 408 Β/5.3.09) Καθορισμός ύψους ανταποδοτικών τελών από ατομικά ή συλλογικά συστήματα εναλλακτικής διαχείρισης συσκευασιών / άλλων προϊόντων για την έκδοση πιστοποιητικού εναλλακτικής διαχείρισης (Π.Ε.Δ). ΚΥΑ 41624.2057.Ε103/2010 (ΦΕΚ 1625Β/11-10-2010). Μέτρα, όροι και πρόγραμμα για την εναλλακτική διαχείριση των χρησιμοποιημένων ηλεκτρικών στηλών και συσσωρευτών.

28. ΚΥΑ 36259/1757/Ε103/2010 (ΦΕΚ 1312Β/ 24-08-2010). Μέτρα, όροι και πρόγραμμα για την εναλλακτική διαχείριση των αποβλήτων από εκσκαφές, κατασκευές και κατεδαφίσεις (ΑΕΚΚ).
29. ΠΔ 82/2004 (ΦΕΚ Α 64/2.3.04) «Αντικατάσταση της 98012/2001/ ΚΥΑ «Καθορισμός μέτρων και όρων για τη διαχείριση των χρησιμοποιημένων ορυκτελαίων» (Β' 40).» «Μέτρα, όροι και πρόγραμμα για την εναλλακτική διαχείριση των Αποβλήτων των Λιπαντικών Ελαίων»
30. ΠΔ 109/2004 (ΦΕΚ Α 75/5.3.04) «Μέτρα και όροι για την εναλλακτική διαχείριση των μεταχειρισμένων ελαστικών των οχημάτων. Πρόγραμμα για την εναλλακτική διαχείρισή τους»
31. ΠΔ 116/2004 (ΦΕΚ Α 81/5.3.04) «Μέτρα, όροι και πρόγραμμα για την εναλλακτική διαχείριση των οχημάτων στο τέλος του κύκλου ζωής τους, των χρησιμοποιημένων ανταλλακτικών τους και των απενεργοποιημένων καταλυτικών μετατροπών σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της Οδηγίας 2000/53/ΕΚ «για τα οχήματα στο τέλος του κύκλου ζωής τους» του Συμβουλίου της 18ης Σεπτεμβρίου 2000»
32. ΠΔ 117/2004 (ΦΕΚ Α 82/5.3.04) «Μέτρα, όροι και πρόγραμμα για την εναλλακτική διαχείριση των αποβλήτων ειδών ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις των Οδηγιών 2002/95 «σχετικά με τον περιορισμό της χρήσης ορισμένων επικίνδυνων ουσιών σε είδη ειδών ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού» και 2002/96 «σχετικά με τα απόβλητα ειδών ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού» του Συμβουλίου της 27ης Ιανουαρίου 2003»
33. ΠΔ 15/2006 (ΦΕΚ Α 12/ 3.2.06) «Τροποποίηση του Προεδρικού Διατάγματος 117/2004 (Α' 82), σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2003/108 «για την τροποποίηση της οδηγίας 2002/96 σχετικά με τα απόβλητα ειδών ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ)» του Συμβουλίου της 8ης Δεκεμβρίου 2003
34. ΥΑ αρ.οικ.133480 (ΦΕΚ2711/Β/27.11.2011). Τροποποίηση Παραρτήματος ΙΒ του ΠΔ 117/2004.

7 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

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

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

Μεταξύ αυτών είναι το δινιτροτολουένιο (DNT), το 2,4,6 τρινιτροτολουένιο (TNT), η νιτρογλυκερίνη (NG), η τετρανιτρική πενταερυθρυτόλη (PETN), η κυκλο- τριμεθυλενο-τρινιτραμίνη (RDX), και η κυκλο-τετραμεθυλενο-τετρανιτραμίνη (HMX).

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

Ως εκ τούτου η παραγωγή και 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 νιτροοργανικών, η τοξικότητα των οποίων είναι δεδομένη και υψηλή. Φυσικά, τοξικότητα μπορεί να εμφανίζουν όχι μόνο τα απόβλητα των πρώτων υλών των εκρηκτικών αλλά και τα προϊόντα της αποσύνθεσής τους. Για παράδειγμα, τα νιτρο-αρωματικά εκρηκτικά είναι τοξικά, αλλά τα προϊόντα που προκύπτουν από τον μετασχηματισμό τους όπως οι 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.

 *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 επηρεάζουν τη μετανάστευση των εκρηκτικών. Ωστόσο, ενώ η διαλυτότητα των καθαρών ενώσεων είναι απλή, η διάλυση εκρηκτικών από στερεά σωματίδια υπό περιβαλλοντικές συνθήκες είναι πιο σύνθετη.

Οι ιδιότητες προσρόφησης παραμένουν ακόμη πιο αβέβαιες παρά τις εκτεταμένες έρευνες για το θέμα.

Τα TNT, RDX και HMX βρίσκονται όλα από υπόγεια ύδατα, με RDX πιο συχνά.

 *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.

 *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

μολυσμένου νερού. Βλέπουμε τη ζήτηση να 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 συνεχίσουμε να βλέπουμε τη χρήση των τεχνητών υγροτόπων να αυξάνεται και να αντικαθιστά ορισμένες από τις υπάρχουσες συμβατικές λύσεις επεξεργασίας νερού.

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

Το διεθνές εμπόριο απορριμμάτων, και σε αυτά συμπεριλαμβάνονται και τα απόβλητα (στερεά και υγρά) των εκρηκτικών, έχει παρουσιάσει σημαντική αύξηση στις 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.

☞ *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 των χώρων αυτών αναπόφευκτη. Η ενδεδειγμένη 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.

Στόχος αυτής της ΔΕ είναι να εξετάσει την υποβάθμιση, τα χαρακτηριστικά και τη μετανάστευση των εκρηκτικών, να μελετήσει την τοξικότητα των πρωτογενών ενώσεων και των γνωστών προϊόντων αποδόμησής τους. Να εξεταστούν οι κατάλληλες τεχνολογίες αποκατάστασης για μολυσμένους χώρους με εκρηκτικά και να εντοπιστούν οι διαθέσιμες και δοκιμασμένες τεχνολογίες επεξεργασίας εκρηκτικών σε μολυσμένα υπόγεια ύδατα. Ο σκοπός είναι να αξιολογηθούν οι δυνατότητες χρήσης των διαθέσιμων μεθόδων σε υδατικά έργα ως μέρος των πρακτικών επεξεργασίας νερού.

Οι ευρέως χρησιμοποιούμενες εκρηκτικές ενώσεις είναι τοξικές για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Συνάμα, πολλά από τα προϊόντα αποδόμησης εκρηκτικών και οι σχετικές με εκρηκτικές ουσίες έχουν επίσης δυσμενείς τοξικολογικές αναφορές, ακόμη και με το ίδιο μέγεθος με τα εκρηκτικά. 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.

☞ *Ο συνδυασμός της βιοαποικοδόμησης (biodegradation) και της βιοεξυγίανσης (bioremediation) των ρύπων είναι η καταλληλότερη προσέγγιση για τη βελτίωση ρυπασμένων περιοχών. περιοχών.*

Παρόλο που απαιτείται εξαντλητική μελέτη και βάσεις δεδομένων για την επιλογή του φυσικού μικροοργανισμού, ο οικολογικός τους ρόλος σε αυτήν την ανάπτυξη, η επιλογή των φυτών είναι μια άλλη σημαντική περιοχή προς εξερεύνηση. Τα φυτά έχουν την εγγενή δυνατότητα να βιομετασχηματίζουν ή/και να απομονώνουν τα ξενοβιοτικά.

☞ *Μια νέα χημική ένωση μπορεί να αποτελέσει κατάλληλη αντικατάσταση του TNT και να λύσει προβλήματα ρύπανσης και τοξικότητας.*

Το νέο μόριο, που ονομάζεται BOM ($C_6H_4N_6O_8$) (δισ-οξαδιαζόλιο), έχει υψηλή ενέργεια ($>1,5$ TNT), χαμηλή ευαισθησία στην έκρηξη. Είναι λιγότερο τοξικό και με καλές περιβαλλοντικές ιδιότητες. 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.

Βιβλιογραφία

- 1) Alexandros Stefanakis et. al. (2014). *Vertical Flow Constructed Wetlands, Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment*. Elsevier Science.
- 2) Andrzej Harat. (2019). Influence of Selected Environmental Management Systems on the Properties and Functional Parameters of Explosive Materials. *Journal of Ecological Engineering*, p. 8.
- 3) Byoung Hooi Cho et al. (2020). Municipal Solid Waste Incineration (MSWI) Ashes as Construction Materials—A Review. *Materials*, p. 30.
- 4) Coherent Market Insights. (2025). www.coherentmarketinsights.com. Retrieved from <https://www.coherentmarketinsights.com/market-insight/industrial-explosives-market-2966>
- 5) en.wikipedia.org. (2019). Retrieved from http://en.wikipedia.org/wiki/Geographic_information_system
- 6) en.wikipedia.org/wiki. (2019). Retrieved from http://en.wikipedia.org/wiki/Geographic_information_system
- 7) Environmental Protection Agency. (2012). *SITE CHARACTERIZATION FOR MUNITIONS CONSTITUENTS*.
- 8) Environmental Protection Agency. (2021). *Fact Sheet – 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT)*. US - EPA.
- 9) ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, „ (2017). *TECHNICAL FACT SHEET – 2,4,6-TNT* . US EPA.
- 10) Fausto Freire et. al. (2015). Life-cycle assessment of a civil explosive. *Journal of Cleaner Production*, p. 6.
- 11) Gabriela Kamińska et al. (2026). Treatment of industrial wastewater from explosives manufacturing: Technologies, legal requirements - Case study. *Water Resources and Industry*, p. 20.
- 12) INTELMARKET RESEARCH. (2026). www.intelmarketresearch.com. Retrieved from Demilitarization of Unserviceable Ammunition (Recycling Brass, Explosive Disposal) Market Growth Analysis, Dynamics, Key Players and Innovations, Outlook and Forecast 2026-2034: <https://www.intelmarketresearch.com/demilitarization-of-unserviceable-ammunition-market-45066>
- 13) International Institute for Strategic Studies (IISS). (2025). IISS.
- 14) Jan Vymazal. (2014). Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A Review. *Ecological Engineering*, p. 28.

- 15) JOANNA AALTO. (2016). *MANAGEMENT OF THE GROUNDWATER CONTAMINATED BY MILITARY EXPLOSIVES*. Tampere University of Technology, Finland - Master of Science thesis.
- 16) Karabelo M. Moloantoa et. al. (2022). Nitrate Water Contamination from Industrial Activities and Complete Denitrification as a Remediation Option. *Water*, p. 31.
- 17) Katarzyna Panz et. al. (2012). Phytoremediation of explosives (TNT, RDX, HMX) by wild-type and transgenic plants. *Journal of Environmental Management*, p. 8.
- 18) KONŠTRUKTA-Industry. (2024). www.kotaind.sk. Retrieved from <https://kotaind.sk/company>
- 19) Leibniz University Hanover. (2020). <https://data.cwetlandsdata.com/>. Clausthal-Zellerfeld.
- 20) 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.
- 21) Market Growth Reports. (2026). www.marketgrowthreports.com. Retrieved from <https://www.marketgrowthreports.com/aboutus>:
<https://www.marketgrowthreports.com/market-reports/civil-explosives-market-113115>
- 22) Michael Gabel et. al. (2026). Toxicity and bioaccumulation of trinitrotoluene (TNT) in fish: a review on fish health, with an emphasis on leakage from marine-dumped legacy conventional munitions. *Environmental Sciences Europe*, p. 29.
- 23) Mondor Intelligence. (2025). www.researchandmarkets.com. Retrieved from <https://www.researchandmarkets.com/report/europe-ammunition-market#product-toc>
- 24) Muhammad Bilal et. al. (2021). Environmental occurrence, toxicity concerns, and remediation of recalcitrant nitroaromatic compounds. *Journal of Environmental Management*, p. 13.
- 25) Munitions Safety Information Analysis Center (MSIAC). (2006). *REVIEW OF DEMILITARISATION AND DISPOSAL TECHNIQUES FOR MUNITIONS AND RELATED MATERIALS*.
- 26) Olga Chusova. (2015). *REMEDIATION OF TNT-CONTAMINATED WATER BY USING INDUSTRIAL LOW-COST RESIDUE PINE BARK*. Mälardalen University Press Dissertations.
- 27) Pallvi Bhanota et. al. (2020). Application of integrated treatment strategies for explosive industry wastewater—A critical review. *Journal of Water Process Engineering*, p. 14.

- 28) Qing Ma et. al. (2021). Strategies for constructing melt-castable energetic materials: A critical Review. *Energetic Materials Frontiers*, p. 17.
- 29) Soumya Chatterjee et. al. (2017). Common explosives (TNT, RDX, HMX) and their fate in the environment: Emphasizing bioremediation. *Chemosphere*, p. 14.
- 30) STATISTA. (2024). [www.statista.com](https://www.statista.com/statistics/1293809/manufacturers-of-weapons-ammunition-in-the-european-union-eu-27-country/?srsltid=AfmBOor-4pEZRMzsWCLtIsQDIrJdZ_sWtMhZDvbhGFDDub4hoO550Tfr). Retrieved from STATISTA: https://www.statista.com/statistics/1293809/manufacturers-of-weapons-ammunition-in-the-european-union-eu-27-country/?srsltid=AfmBOor-4pEZRMzsWCLtIsQDIrJdZ_sWtMhZDvbhGFDDub4hoO550Tfr
- 31) Tamara Pócsová et. al. (2026). Current Trends in Analytical Methods for Determination of Explosives in Water. *Water Air Soil Pollut*, p. 38.
- 32) Varsha Srivastava et. al. (2022). An Overview of Treatment Approaches for Octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine (HMX) Explosive in Soil, Groundwater, and Wastewater. *Environmental Research and Public Health*, p. 21.
- 33) 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.
- 34) www.ics.forth.gr. (n.d.). Retrieved from <http://www.ics.forth.gr/index-gr.html>
- 35) www.oasa.gr. (2019). Retrieved from <http://www.oasa.gr/>
- 36) 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.
- 37) ΒΑΒΒΑ ΧΡΥΣΑΝΘΗ (Δ.Δ.). (2018). ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΑΠΟ ΜΟΝΑΔΕΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ. ΕΜΠ - ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ.
- 38) ΒΕΛΤΙΩΝ Α.Ε. - ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ. (2023). ΕΚΠΟΝΗΣΗ ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΓΙΑ ΤΑ ΕΑΣ ΑΒΕΕ.
- 39) ΕΑΣ-ΑΒΕΕ-ΣΕΛ,. (2019). Συγκρότημα Εργοστασίου ΛΑΥΡΙΟΥ. ΕΑΣ ΑΒΕΕ.
- 40) Κοίλιαρης Π. (2017). Βιομηχανική παραγωγή εκρηκτικών: Περιβαλλοντικός αντίκτυπος αποβλήτων και αποκατάσταση ρυπασμένων χώρων. ΕΑΠ - ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ - ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.
- 41) ΜΑΝΤΖΑΒΙΝΟΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ. (2015). Τεχνολογία Πειβάλλοντος: Επεξεργασία Βιομηχανικών Υγρών Αποβλήτων, Προηγμένες Διεργασίες Οξειδωσης για την Επεξεργασία Νερού και Υγρών Αποβλήτων. ΠΑΤΡΑ: ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΑΣ.

- 42) ΜΗΧΑΝΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ. (2025). www.mixanitouxronou.gr. Retrieved from <https://www.mixanitouxronou.gr/gia-pio-logo-i-kiklopes-polemisan-ton-patera-tous-ourano-ke-charisan-ston-dia-ton-keravno-ke-ti-vronti-pia-ine-i-schesi-tous-me-tis-mikines/>
- 43) ΣΚΑΡΤΣΗΣ Ν. (2017). Αναγνώριση κινδύνων και σχεδιασμός έκτακτων αναγκών σε βιομηχανική εγκατάσταση παρασκευής εκρηκτικών υλών. ΕΚΠΑ - ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ.
- 44) ΥΠΕΚΑ. (2024). ΗΜΑ. Retrieved from <https://wrm.ypeka.gr/>

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.