ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

« ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΙΝΗΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΙΘΑΝΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΡΕΥΜΑΤΑ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Σταύρος Φ. Παππάς

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

Αθήνα, Ιούλιος 2022

Επιβλέπων: Καθηγητής Δ. Δερματάς

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) με τίτλο «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων». Η εκπόνηση έγινε υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής κ. Δημήτρη Δερματά, τον οποίο θέλω να ευχαριστήσω για την αδιάλειπτη καθοδήγηση και τις συμβουλές που μου προσέφερε όλο αυτό το διάστημα. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Δανιήλ Μαμάη, Καθηγητή Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος και τον κ. Συμεών-Αλέξανδρο Μαλαμή Επίκουρο Καθηγητή Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, μέλη της τριμελούς επιτροπής.

Η επιτυχής τελεσφόρηση της παρούσας εργασίας, πέραν από τη δική μου προσπάθεια και τη συμβολή διαφόρων ανθρώπων από τον ακαδημαϊκό χώρο, οφείλεται και στη συμβολή διαφόρων ανθρώπων από τον επαγγελματικό τομέα. Για το λόγο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Στέλιο Παπαδόπουλο Γενικό Διευθυντή της INTERGEO ΕΠΕ και Δρ. Χρήστο Βατσέρη Τεχνικό Διευθυντή της εταιρείας, οι οποίοι συνέβαλαν με κάθε δυνατό τρόπο στην επιτυχή διεκπεραίωση της εργασίας καθώς θα ήταν αδύνατο να εκπονηθεί το συγκεκριμένο θέμα χωρίς την υλικοτεχνική υποδομή και τεχνογνωσία της INTERGEO ΕΠΕ.

Δε θα μπορούσα να παραλείψω τους συναδέλφους μου Μάριο Καμπίσιο, Αθανάσιο Μαραγκόπουλο και Σπύρο Καστανάκη τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω για τη βοήθεια που μου προσέφεραν και γενικότερα για την άριστη συνεργασία που υπήρξε υπό την καθοδήγηση του προϊσταμένου του Τμήματος Διαχείρισης Επικίνδυνων Αποβλήτων κ. Στέργιου Ζησέκα.

Ωστόσο, όλα αυτά θα ήταν αδύνατα χωρίς την υποστήριξη της οικογένειας μου που ήταν πάντα στο πλευρό μου στηρίζοντας τις προσπάθειες μου και ενθαρρύνοντας κάθε μου βήμα.

Σταύρος Παππάς,

Ιούλιος 2022

Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος 2

Ευρετήριο σχημάτων 5

Ευρετήριο πινάκων 8

Περίληψη 10

Abstract 12

1. Εισαγωγή 14

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο 15

2.1. Απόβλητα 15

2.1.1. Απόβλητο Απολαστιχοποίησης 16

2.1.2. Απόβλητο Επεξεργασίας Ελιάς 19

2.1.3. Απόβλητο Βυρσοδεψείου 20

2.2. Μέθοδοι Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων 23

2.2.1. Οξείδωση 24

2.2.2. Κροκίδωση – Συσσωμάτωση 26

2.2.3. Ηλεκτροκροκίδωση 31

2.2.4. Καθίζηση 35

2.2.5. Φίλτρανση 36

3. Υλικά και μέθοδοι 38

3.1. Υλικά 38

3.1.1. Εργαστηριακά πειράματα 38

3.1.2. Πιλοτική εφαρμογή 43

3.1.3. Εφαρμογή πλήρους κλίμακας 44

3.2. Μέθοδοι 47

3.2.1. Εργαστηριακά πειράματα 47

3.2.2. Πιλοτική εφαρμογή 49

3.2.3. Εφαρμογές πλήρους κλίμακας 49

3.2.4. Εργαστηριακές αναλύσεις 50

3.2.4.1. pH 51

3.2.4.2. Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) 51

3.2.4.3. Χημικώς Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD) 52

3.2.4.4. Ολικά Στερεά (TS) και Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS) 52

3.2.4.5. Φαινόλες 52

3.2.4.6. Εξασθενές Χρώμιο (Cr^{6+}) 53

3.2.4.7. Βαρέα Μέταλλα 53

4. Ανάλυση αποτελεσμάτων 54

4.1. Απόβλητο απολαστιχοποίησης 54
4.1.1. Πιλοτική δοκιμή 58
4.1.2. Εφαρμογές στο πεδίο 59
4.1.3. Σχεδιασμός μονάδας 72
4.1.3.1. Τεχνικο-οικονομική μελέτη 83
4.2. Διερεύνηση δυνατότητας επεξεργασίας άλλων αποβλήτων με τη κινητή μονάδα φυσικοχημικής επεξεργασίας 85
4.2.1. Απόβλητο παραγωγής βρώσιμης ελιάς 85
4.2.1.1. Ηλεκτροκροκίδωση 86
4.2.2. Απόβλητο βυρσοδεψείου 90
4.2.2.1. Κροκίδωση – Συσσωμάτωση – Καθίζηση και Φίλτρανση 90
4.2.2.2. Ηλεκτροκροκίδωση 92
5. Συμπεράσματα 94
Βιβλιογραφία 96

Ευρετήριο σχημάτων

Σχήμα 1. Εφαρμογή της μεθόδου απολαστιχοποίησης αεροδιαδρόμου στο αεροδρόμιο του Σιατλ, με τη μέθοδο της υδροβολής εξαιρετικά υψηλής πίεσης (40.000 psi) (www.seattletimes.com) 17

Σχήμα 2. Εφαρμογή της χημικής μεθόδου για την απολαστιχοποίησης αεροδιαδρόμου (www.unicen-industries.com) 17

Σχήμα 3. Σύστημα καθαρισμού εναποθετημένου ελαστικού από αεροδιάδρομο με τη μέθοδο της εκτόξευσης λειαντικών σωματιδίων (shotblasting) (Abduljabbar, Salman and Jaleel, 2020; www.blastrac.eu). 18

Σχήμα 4. Σχηματική απεικόνιση διατμητικής επιφάνειας (shear plane) (Ghernaout,2015) 28

Σχήμα 5. Σχηματική απεικόνιση αντιδραστήρα ηλεκτροκροκίδωσης με δύο ηλεκτρόδια (An et al., 2017) 31

Σχήμα 6. Σχηματισμός υδροξειδίων για διάφορες τιμές pH και REDOX για δυο περιπτώσεις: α) ηλεκτρόδια από σίδηρο και β) ηλεκτρόδια από αλουμίνιο (Vepsäläinen and Sillanpää, 2020) 33

Σχήμα 7. Σχηματική απεικόνιση αντιδραστήρα ηλεκτροκροκίδωσης με διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων: α) Μονοπολική παράλληλη β) Μονοπολική σε σειρά και γ) Διπολική παράλληλη (Naje et al., 2017) 33

Σχήμα 8. Φωτομικρογραφία άνθρακα πριν από τη διαδικασία της ενεργοποίησης (α) και μετά (β) (Khaniabadi et al., 2015) 37

Σχήμα 9. Κωνική φιάλη όγκου 250 ml 39

Σχήμα 10. Μαγνητικός αναδευτήρας 6 θέσεων τύπου VELP Scientific F203A0177 (80 to 1500 RPM) 39

Σχήμα 11. Ποτήρι ζέσεως 2.000 ml 39

Σχήμα 12. Μαγνητικός αναδευτήρας τύπου VELP AREX heating magnetic stirrer (50 to 1.300 rpm) 40

Σχήμα 13. Διηθητικό χαρτί 40

Σχήμα 14. Χάρτινο φίλτρο (0,45 μm) 40

Σχήμα 15. Κενό δοχείο φίλτρανσης όγκου 0,42 L (11 cm ύψος x 7 cm διάμετρος) 40

Σχήμα 16. Άμμος 41

Σχήμα 17. Χαλαζιακή άμμος 41

Σχήμα 18. Ενεργός Άνθρακας 41

Σχήμα 19. Ζεόλιθος 41

Σχήμα 20. Ψείρα 42

Σχήμα 21. Γυάλινο δοχείο όγκου 9 L 42

Σχήμα 22. Ηλεκτρόδια αλουμινίου και σιδήρου πάχους 2 mm και διαστάσεων 150 mm x 250 mm 42

Σχήμα 23. Τροφοδοτικό Πάγκου με 1 Κανάλι 30V 5A (Uni-T UTP3315TFL-II) 42

Σχήμα 24. Παλετοδεξαμενή όγκου 1 m3 43

Σχήμα 25. Μεταλλικό φίλτρο βάθους όγκου 88 L (0,7m ύψος x 0,4m διάμετρος) 43

Σχήμα 26. Αναδευτήρας τύπου Einhell TC-MX 1200 E (0 - 680 RPM) 44

Σχήμα 27. Φυγοκεντρική αντλία επιφάνειας DAB Jet 132 M 44

Σχήμα 28. Μεταλλικό φίλτρο βάθους όγκου 442 L (1,15m ύψος x 0,7m διάμετρος) 45

Σχήμα 29. Αναδευτήρας παλετοδεξαμενής (Fluko IBC-Container stirrer GMEC, 22 to 218 RPM) 45

Σχήμα 30. Υποβρύχια αντλία ακαθάρτων DAB FEKA 600 MA SV 45

Σχήμα 31. Πετρελαιοκίνητη κλειστή γεννήτρια (MIYAKE YDS6000TEB1 / 6,5 kVA) 46

Σχήμα 32. Διάγραμμα ροής της πιλοτικής μονάδας αποτελούμενη από έναν αντιδραστήρα SBR 1 m3 για κροκίδωση-συσσωμάτωση-καθίζηση και ένα φίλτρου βάθους όγκου 88 L ... 55

Σχήμα 33. Διάγραμμα ροής της μονάδας επεξεργασίας αποβλήτων απολαστιχοποίησης, αποτελούμενη από τέσσερεις (4) αντιδραστήρες SBR 1 m3 για κροκίδωση-συσσωμάτωση-καθίζηση και ένα (1) φίλτρο βάθους 442 L 56

Σχήμα 34. Διάγραμμα απόδοσης φίλτρου κατά την επεξεργασία 12 m3 57

Σχήμα 35. Διάγραμμα ροής της μονάδας επεξεργασίας αποβλήτων απολαστιχοποίησης, αποτελούμενη από είκοσι (20) αντιδραστήρες SBR 1 m3 για κροκίδωση-συσσωμάτωση-καθίζηση και πέντε (5) φίλτρα βάθους 442 L έκαστο 59

Σχήμα 36. Διάγραμμα απόδοσης Φίλτρου 1 κατά την επεξεργασία 32 m3 61

Σχήμα 37. Διάγραμμα απόδοσης Φίλτρου 2 κατά την επεξεργασία 33 m3 63

Σχήμα 38. Διάγραμμα απόδοσης Φίλτρου 3 κατά την επεξεργασία 14 m3 64

Σχήμα 39. Διάγραμμα απόδοσης Φίλτρου 4 κατά την επεξεργασία 15 m3 67

Σχήμα 40. Διάγραμμα απόδοσης Φίλτρου 5 κατά την επεξεργασία 4 m3 68

Σχήμα 41. Σκαρίφημα της κινητής μονάδας φυσικοχημικής επεξεργασίας με τη διάταξη των δεξαμενών, των φίλτρων και του λοιπού ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού για τη Περίπτωση Α 70

Σχήμα 42. Επεξεργασία αποβλήτων απολαστιχοποίησης σε συνάρτηση με τον χρόνο για τη Περίπτωση Α.1 70

Σχήμα 43. Επεξεργασία αποβλήτων απολαστιχοποίησης σε συνάρτηση με τον χρόνο για τη Περίπτωση Α.2 71

Σχήμα 44. Σκαρίφημα της κινητής μονάδας φυσικοχημικής επεξεργασίας με τη διάταξη των δεξαμενών, των φίλτρων και του λοιπού ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού για τη Περίπτωση Β 72

Σχήμα 45. Επεξεργασία αποβλήτων απολαστιχοποίησης σε συνάρτηση με τον χρόνο για τη Περίπτωση Β.1 72

Σχήμα 46. Επεξεργασία αποβλήτων απολαστιχοποίησης σε συνάρτηση με τον χρόνο για τη Περίπτωση Β.2 73

Σχήμα 47. Σκαρίφημα της κινητής μονάδας φυσικοχημικής επεξεργασίας με τη διάταξη των δεξαμενών, των φίλτρων και του λοιπού ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού για τη Περίπτωση Γ 74

Σχήμα 48. Επεξεργασία αποβλήτων απολαστιχοποίησης σε συνάρτηση με τον χρόνο για τη Περίπτωση Γ.1 74

Σχήμα 49. Επεξεργασία αποβλήτων απολαστιχοποίησης σε συνάρτηση με τον χρόνο για τη Περίπτωση Γ.2 75

Σχήμα 50. Σκαρίφημα της κινητής μονάδας φυσικοχημικής επεξεργασίας με τη διάταξη των δεξαμενών, των φίλτρων και του λοιπού ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού για τη Περίπτωση Δ 76

Σχήμα 51. Επεξεργασία αποβλήτων απολαστιχοποίησης σε συνάρτηση με τον χρόνο για τη Περίπτωση Δ 76

Σχήμα 52. Σκαρίφημα της κινητής μονάδας φυσικοχημικής επεξεργασίας με τη διάταξη των δεξαμενών, των φίλτρων και του λοιπού ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού για τη Περίπτωση Ε 77

Σχήμα 53. Επεξεργασία αποβλήτων απολαστιχοποίησης σε συνάρτηση με τον χρόνο για τη Περίπτωση Ε 78

Σχήμα 54. Απόδοση συστήματος κινητής μονάδας φυσικοχημικής επεξεργασίας για διάφορους συνδυασμούς δεξαμενών και φίλτρων (περιπτώσεις Α, Β, Γ, Δ και Ε) 78

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων, προσαρμοσμένος από (Αϊβαζίδης, 2000) 15

Πίνακας 2. Παραγωγή αποβλήτων από τα διάφορα στάδια επεξεργασίας δερμάτων 22

Πίνακας 3. Κατηγορίες μεθόδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (Αϊβαζίδης, 2000) 24

Πίνακας 4. Κατηγοριοποίηση σωματιδίων ανάλογα με το μέγεθος τους (John Bratby, 2016) 26

Πίνακας 5. Μηχανισμοί αποσταθεροποίησης συστήματος αιωρούμενων στερεών σωματιδίων (Arcadio P. Sincero, 2003) 29

Πίνακας 6. Κύριες χημικές αντιδράσεις κατά την ηλεκτροκροκίδωση με χρήση ηλεκτροδίων αλουμινίου ή σιδήρου (L. K. Wang, Y.-T. Hung, 2005) 32

Πίνακας 7. Χρόνοι καθίζησης σωματιδίων ανάλογα με το μέγεθος τους (John Bratby, 2016) 35

Πίνακας 8. Εφαρμοζόμενες μέθοδοι προσδιορισμού φυσικοχημικών χαρακτηριστικών αποβλήτων 47

Πίνακας 9. Αναλύσεις ανεπεξέργαστου αποβλήτου απολαστιχοποίησης 51

Πίνακας 10. Ποσοστό απομάκρυνσης COD έπειτα από φίλτρανση μέσω άμμου και μέσω ενεργού άνθρακα 52

Πίνακας 11. Ποσοστό απομάκρυνσης COD έπειτα από οξείδωση με χρήση H2O2 (50%) σε διάφορες συγκεντρώσεις σε συνδυασμό με φίλτρανση μέσω φίλτρου βάθους πληρωμένο με 40% (v/v) ενεργό άνθρακα και 60% (v/v) άμμο 52

Πίνακας 12. Ποσοστό απομάκρυνσης COD έπειτα από κροκίδωση-συσσωμάτωση και καθίζηση με χρήση Ferrisol (9%) και PAC (17-18%) σε διάφορες συγκεντρώσεις 53

Πίνακας 13. Ποσοστό απομάκρυνσης COD έπειτα από κροκίδωση-συσσωμάτωση και καθίζηση με χρήση Ferrisol (9%) και PAC (17-18%) σε διάφορες συγκεντρώσεις 53

Πίνακας 14. Ποσοστό απομάκρυνσης COD έπειτα από κροκίδωση-συσσωμάτωση και καθίζηση με χρήση PAC (17-18%) και φίλτρανση με διάφορα φίλτρα 53

Πίνακας 15. Ποσοστό απομάκρυνσης COD και TSS κατά την εφαρμογή της πιλοτικής μονάδας επεξεργασίας αποβλήτων απολαστιχοποίησης 55

Πίνακας 16. Ποσοστό απομάκρυνσης COD και TSS κατά την εφαρμογή πλήρους κλίμακας επεξεργασίας 12 m3 αποβλήτων απολαστιχοποίησης στο πεδίο 57

Πίνακας 17. Ποσοστό απομάκρυνσης COD και TSS κατά την εφαρμογή πλήρους κλίμακας επεξεργασίας 110 m3 αποβλήτων απολαστιχοποίησης στο πεδίο για το Φίλτρο 1 60

Πίνακας 18. Ποσοστό απομάκρυνσης COD και TSS κατά την εφαρμογή πλήρους κλίμακας επεξεργασίας 110 m3 αποβλήτων απολαστιχοποίησης στο πεδίο για το Φίλτρο 2 62

Πίνακας 19. Ποσοστό απομάκρυνσης COD και TSS κατά την εφαρμογή πλήρους κλίμακας επεξεργασίας 110 m3 αποβλήτων απολαστιχοποίησης στο πεδίο για το Φίλτρο 3 64

Πίνακας 20. Ποσοστό απομάκρυνσης COD και TSS κατά την εφαρμογή πλήρους κλίμακας επεξεργασίας 110 m3 αποβλήτων απολαστιχοποίησης στο πεδίο για το Φίλτρο 4 65

Πίνακας 21. Ποσοστό απομάκρυνσης COD και TSS κατά την εφαρμογή πλήρους κλίμακας επεξεργασίας 110 m3 αποβλήτων απολαστιχοποίησης στο πεδίο για το Φίλτρο 5 67

Πίνακας 22. Παράμετροι σχεδιασμού κινητής μονάδας επεξεργασίας αποβλήτων απολαστιχοποίησης αεροδιαδρόμου 68

Πίνακας 23. Τεχνικά χαρακτηριστικά για το σενάριο χρήσης 12 δεξαμενών και 2 φίλτρων για την επεξεργασία των αποβλήτων (Περίπτωση Α) 69

Πίνακας 24. Τεχνικά χαρακτηριστικά για το σενάριο χρήσης 11 δεξαμενών και 3 φίλτρων για την επεξεργασία των αποβλήτων (Περίπτωση Β) 71

Πίνακας 25. Τεχνικά χαρακτηριστικά για το σενάριο χρήσης 10 δεξαμενών και 4 φίλτρων για την επεξεργασία των αποβλήτων (Περίπτωση Γ) 73

Πίνακας 26. Τεχνικά χαρακτηριστικά για το σενάριο χρήσης 9 δεξαμενών και 5 φίλτρων για την επεξεργασία των αποβλήτων (Περίπτωση Δ) 75

Πίνακας 27. Τεχνικά χαρακτηριστικά για το σενάριο χρήσης 8 δεξαμενών και 6 φίλτρων για την επεξεργασία των αποβλήτων (Περίπτωση Ε) 77

Πίνακας 28. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά ανεπεξέργαστου αποβλήτου από παραγωγή βρώσιμης ελιάς 80

Πίνακας 29. Αποτελέσματα πειράματος ηλεκτροκροκίδωσης για ένταση I = 5 A και τάση V = 4,5 V 81

Πίνακας 30. Αποτελέσματα πειράματος ηλεκτροκροκίδωσης για ένταση I = 1.5 A και τάση V = 1,6 V 82

Πίνακας 31. Αποτελέσματα πειράματος ηλεκτροκροκίδωσης για ένταση I = 5 A και τάση V = 3,5 V, με δυο συστοιχίες ηλεκτροδίων 82

Πίνακας 32. Αποτελέσματα πειράματος ηλεκτροκροκίδωσης για ένταση I = 5 A και τάση V = 3,75 V, με δυο συστοιχίες ηλεκτροδίων και αρχικό pH ίσο με 5,5 83

Πίνακας 33. Αποτελέσματα πειράματος ηλεκτροκροκίδωσης για ένταση I = 5 A και τάση V = 4 V, με δυο συστοιχίες ηέλτροδίων και αρχικό pH ίσο με 4 84

Πίνακας 34. Αναλύσεις ανεπεξέργαστου αποβλήτου βυρσοδεψείου 85

Πίνακας 35. Αποτελέσματα απομάκρυνσης COD και TSS έπειτα από κροκίδωση-συσσωμάτωση και καθίζηση για διάφορες συγκεντρώσεις PAC (17-18%) 86

Πίνακας 36. Αποτελέσματα απομάκρυνσης COD και TSS έπειτα από φίλτρανση μέσω φίλτρου βάθους, πληρωμένο με λευκό χαλίκι 30%,χαλαζιακή άμμος 30% και ενεργό άνθρακα 40% 86

Πίνακας 37. Αποτελέσματα πειράματος ηλεκτροκροκίδωσης απόβλητου βυρσοδεψείου για τάση V = 8 V, με δυο συστοιχίες ηέλτροδίων και αρχικό pH ίσο με 5,3 87

Πίνακας 38. Αναλύσεις αποβλήτου βυρσοδεψείου έπειτα από τη μέθοδο της ηλεκτροκροκίδωσης και έπειτα από φίλτρανση μέσω διηθητικού χαρτιού 88

Περίληψη

Στη παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία διερευνήθηκε η επεξεργασία υγρών αποβλήτων απολαστιχοποίησης αεροδιαδρόμου μέσω κινητής μονάδας φυσικοχημικής επεξεργασίας και η δυνατότητα εφαρμογής της σε διάφορα ρεύματα αποβλήτων. Συγκεκριμένα, πέρα από τα απόβλητα απολαστιχοποίησης μελέτη έγινε σε υγρά απόβλητα από παραγωγή βρώσιμης ελιάς και υγρά απόβλητα βυρσοδεψείου.

Αρχικά έγιναν εργαστηριακά πειράματα σε απόβλητα απολαστιχοποίησης αεροδιαδρόμου, όπου δοκιμάστηκαν οι μέθοδοι της φίλτρανσης, της οξείδωση σε συνδυασμό με φίλτρανση, της κροκίδωσης-συσσωμάτωσης-καθίζησης και της κροκίδωσης-συσσωμάτωση-καθίζησης σε συνδυασμό με φίλτρανση. Για τις παραπάνω μεθόδους χρησιμοποιήθηκε ως οξειδωτικό μέσο H_2O_2 (50%), ως κροκιδωτικό υλικό PAC (17-18%) και Ferisol, και ως πληρωτικό υλικό των φίλτρων βάθους χρησιμοποιήθηκε άμμος, χαλαζιακή άμμος, ενεργός άνθρακας, ζεόλιθος και ψείρα.

Η μέθοδος της φίλτρανσης και της οξείδωσης σε συνδυασμό με φίλτρανση δεν έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η μέθοδος της κροκίδωσης-συσσωμάτωση-καθίζησης πέτυχε ποσοστό απομάκρυνσης COD ίσο με 92,0 % και TSS > 97,8 %. Ο συνδυασμός της κροκίδωσης-συσσωμάτωσης-καθίζησης με φίλτρανση έδωσε τη βέλτιστη απόδοση με ποσοστό απομάκρυνσης COD 94,1 % % και TSS > 97,9 %.

Από τα δεδομένα που προέκυψαν στο εργαστήριο στήθηκε μια πιλοτική SBR μονάδα κροκίδωσης-συσσωμάτωσης-καθίζησης όγκου 1 m^3 σε συνδυασμό με ένα φίλτρο βάθους όγκου 88 L, η οποία έδωσε ποσοστό απομάκρυνσης COD 93,9 % και TSS > 97,5 %. Κατά τη συγκεκριμένη εφαρμογή παρατηρήθηκε αύξηση του χρόνου καθίζησης σε σχέση με τα εργαστηριακά πειράματα.

Ακολούθησε ο σχεδιασμός ενός συστήματος πλήρους κλίμακας με δυνατότητα επεξεργασίας 12 m^3 με χρήση έξι SBR όγκου 1 m^3 και ενός φίλτρου βάθους 442 L το οποίο σημείωσε ποσοστό απομάκρυνσης COD 94,4 % και TSS > 97,2 %. Κατά τη συγκεκριμένη εφαρμογή ελέγχθηκε η λειτουργεία του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού καθώς και του φίλτρου. Στόχος ήτα να προσδιοριστεί η υδραυλική συμπεριφορά του φίλτρου και η απόδοση απομάκρυνσης των ρύπων.

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν πέντε συστάδες της παραπάνω διάταξης για την επεξεργασία 110 m^3 με σκοπό τον έλεγχο της υδραυλικής συμπεριφοράς, της απόδοσης και του σημείου κορεσμού του φίλτρου. Από τη συγκεκριμένη εφαρμογή προέκυψε ότι τα φίλτρα έχουν δυνάτοτητα να επεξεργαστούν κατά μέσο όρο 23,5 m^3 αποβλήτων απολαστιχοποίησης αεροδιαδρόμου προτού κορεστούν. Σημειώνεται ότι δεν εξετάστηκε το ενδεχόμενο έκπλυσης των φίλτρων έπειτα από τον κορεσμό λόγο ιδιαιτεροτήτων του πεδίου εφαρμογής για το οποίο προορίζεται η μονάδα, επομένως η μέθοδος που επιλέχθηκε ήταν αυτή του χειρωνακτικού καθαρισμού εντός της εγκατάστασης της εταιρείας.

Βάση των δεδομένων που προέκυψαν από όλες τις παραπάνω εφαρμογές το σύστημα επεξεργασίας πλήρους κλίμακας προσαρμόστηκε εντός κλειστού φορτηγού οχήματος με σκοπό τη δημιουργία μιας κινητής μονάδας επεξεργασίας αποβλήτων. Υπολογισμοί έγιναν για πέντε (5) διαφορετικά σενάρια, όπου σε κάθε περίπτωση διαφοροποιούνταν ο αριθμός των φίλτρων και των δεξαμενών που θα τοποθετηθούν εντός της κινητής μονάδας. Στο πρώτο σενάριο έγιναν υπολογισμοί για δυο (2) φίλτρα και δώδεκα (12) SBR αντιδραστήρες ενώ στο πέμπτο και τελευταίο σενάριο για (6) φίλτρα και (6) SBR αντιδραστήρες.

Επιπρόσθετα στα τρια πρώτα σενάρια εξετάστηκε το ενδεχόμενο αποθήκευσης της παραγόμενης λάσπης εντός του συστήματος.

Στη συνέχεια ακολούθησε η διερεύνηση της δυνατότητας επεξεργασίας και άλλων υγρών αποβλήτων μέσω τη συγκεκριμένης μονάδας. Τα κριτήρια επιλογής των προς εξέταση αποβλήτων ήταν να έχουν ίδια τάξη μεγέθους φορτίο (COD και TSS) με τα απόβλητα απολαστιχοποίησης και η μέθοδος με την οποία θα γίνει η επεξεργασία τους να προσαρμόζεται στη κινητή μονάδα. Βάση των παραπάνω επιλέχθηκαν να εξεταστούν απόβλητα από επεξεργασία βρώσιμης ελιάς και απόβλητα βυρσοδεψείου.

Στα απόβλητα παραγωγής βρώσιμης ελιάς έγιναν πειράματα με τη μέθοδο της ηλεκτροκροκίδωσης. Κατά την εφαρμογή δοκιμάστηκαν διάφορες τιμές έντασης και τάσης ηλεκτρικού ρεύματος καθώς και διάφορες τιμές pH. Ως ηλεκτρόδια χρησιμοποιήθηκαν πλάκες αλουμινίου και σιδήρου σε διάφορες διατάξεις. Η συγκεκριμένη μέθοδος έδωσε απομάκρυνση COD ίση με 68,4 %, TSS ίση με 88,5 % και φαινόλες ίση με 21,7 %.

Για τη περίπτωση των αποβλήτων βυρσοδεψείου μελετήθηκε η εφαρμογή κροκίδωσης-συσσωμάτωσης-καθίζησης σε συνδυασμό με φίλτρανση και η εφαρμογή ηλεκτροκροκίδωσης. Για την κροκίδωση-συσσωμάτωση-καθίζηση χρησιμοποιήθηκε PAC (17-18%). Για την φίλτρανση χρησιμοποιήθηκε φίλτρο βάθους πληρωμένο με λευκό χαλίκι 30%, χαλαζιακή άμμος 30% και ενεργό άνθρακα 40%. Το ποσοστό απομάκρυνσης που επιτεύχθηκε με τη συγκεκριμένη μέθοδο ήταν 51,5 % για το COD, τουλάχιστον 87,5 % για τα TSS και 69,2 % για το Cr^{6+}. Όσο αφορά τη μέθοδο της ηλεκτροκροκίδωσης χρησιμοποιήθηκαν πλάκες αλουμινίου και σιδήρου ως ηλεκτρόδια. Η συγκεκριμένη μέθοδος πέτυχε απομάκρυνση COD ίση με 15,8 %, TSS ίση με 8,6 %, και Cr^{6+} ίση με 99,8 %.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προέκυψε ότι για την on-site επεξεργασία των αποβλήτων απολαστιχοποίησης η χρήση ενός κινητού συστήματος φυσικοχημικής επεξεργασίας αποτελεί μια αποτελεσματική και ενδιαφέρουσα λύση. Όσο αφορά τα απόβλητα από την επεξεργασία βρώσιμης ελιάς, η εφαρμογή της κινητής μονάδας χρήζει περαιτέρω έρευνας καθώς δεν ήταν εφικτή η απομάκρυνση των φαινολών σε ικανοποιητικό ποσοστό. Τα απόβλητα βυρσοδεψείου χρήζουν επίσης περαιτέρω έρευνας καθώς δεν επιτεύχθηκε αποδοτική απομάκρυνση και των τριών παραμέτρων COD, TSS και Cr^{6+} με καμία από τις δύο μεθόδους.

Abstract

In the present postgraduate thesis, the treatment of wastewater of derubberazation process through a mobile physicochemical treatment unit and the possibility of use in various waste streams were investigated. Specifically, in addition to derubberazation wastewater, a study was carried out on liquid waste from edible olive production and liquid tannery waste.

Initially, laboratory experiments were performed on derubberazation wastewater, where the methods of filtration, oxidation combined with filtration, coagulation-flocculation-precipitation and coagulation-flocculation-precipitation combined with filtration were tested. For the above methods, H_2O_2 (50%) was used as oxidizing agent, PAC (17-18%) and Ferisol as flocculants, and sand, quartz sand, activated carbon, zeolite and white gravel were used as filling material for the depth filters.

The method of filtration and oxidation combined with filtration did not give satisfactory results. The coagulation-flocculation-precipitation method achieved a COD removal rate of 92,0% and TSS > 97,8%. Coagulation-flocculation-precipitation method in combination with filtration which gave a COD removal rate of 94,1 % and a TSS > 97,9 %.

From the data obtained in the laboratory, a pilot SBR unit of coagulation-flocculation-precipitation with a volume of 1 m3 was set up in combination with a depth filter of 88 L, which gave a removal rate of COD of 93,9 % and TSS > 97,5 %. During the pilot application an increase in the settling time was observed in relation to the laboratory experiments.

Next came the design of a full-scale system capable of processing 12 m^3 using six SBRs with a volume of 1 m^3 and a depth filter of 442 L, which recorded a COD removal rate of 94,4 % and a TSS > 97,2 %. During this specific application, the operation of the electromechanical equipment as well as the filter was checked. The aim was to determine the hydraulic behavior of the filter and the pollutant removal performance.

Five blocks of the above system were then used for the processing of 110 m3 in order to control the performance of the filters and to determine the saturation point. From this application it was found that the filters have the capacity to treat an average of 23,5 m^3 of derubberazation wastewater before becoming saturated. It is noted that the possibility of backwashing the filters after saturation was not considered due to the peculiarities of the field of application for which the unit is intended, therefore the chosen cleaning method was that of manual cleaning within the company's facility.

Based on the data obtained from all the above applications, the full-scale treatment system was adapted inside a closed truck in order to create a mobile waste treatment unit. Calculations were made for five (5) different scenarios, where in each case the number of filters and SBRs to be placed inside the mobile unit was varied. In the first scenario calculations were made for two (2) filters and twelve (12) SBR reactors while in the fifth and last scenario for (6) filters and (6) SBR reactors.

Then followed the investigation of the possibility of treating other wastewaters through the above unit. The selection criteria of the wastes to be examined were that they had the same order of magnitude in terms of pollutant load (COD and TSS) as the derubbing wastes and the method by which they will be treated is able to get adapted to the mobile unit. Based on the above, edible olive processing wastewater and tannery wastewater were chosen to be examined.

For edible olive processing waste the electrocoagulation method was used. Various values of electrical current and voltage as well as various pH values were tested during the application. Aluminum and iron plates were used as electrodes in various arrangements. This particular method gave removal of COD equal to 68.4 %, TSS equal to 88.5 % and phenols equal to 21.7 %.

For the case of tannery waste, the application of coagulation-flocculation-precipitation combined with filtration and the application of electroflocculation was studied. PAC (17-18%) was used for coagulation-flocculation-precipitation. A depth filter filled with 30 % white gravel, 30 % quartz sand and 40 % activated carbon was used for filtration. The percentage removal achieved by this method was 51,5 % for COD, at least 87,5 % for TSS and 69,2 % for Cr^{6+}. Regarding the electroflocculation method, aluminum and iron plates were used as electrodes. This particular method achieved COD removal equal to 15,8%, TSS equal to 8,6%, and Cr6+ equal to 99,8%.

From the above results it emerged that the use of a mobile physicochemical treatment system is an effective and interesting solution for the on-site treatment of derubberazation wastewater. Regarding the wastewater from edible olive processing, the application of the mobile unit needs further research as it was not possible to remove the phenols in a satisfactory percentage. Tannery wastewater also needs further investigation as efficient removal of all three parameters COD, TSS and Cr6+ was not achieved by either method.

1. Εισαγωγή

Η συνεχόμενη αύξηση του πληθυσμού έχει οδηγήσει στην αύξηση της βιομηχανικής δραστηριότητας και επομένως στη παραγωγή μεγαλύτερων ποσοτήτων βιομηχανικών αποβλήτων. Λόγο της αύξησης των πιέσεων που δέχεται το περιβάλλον εφαρμόζονται όλο και αυστηρότερα όρια διάθεσης με αποτέλεσμα η επεξεργασία των αποβλήτων να χρήζει ολοένα και μεγαλύτερης προσοχής.

Ως βιομηχανικό απόβλητο θεωρείται κάθε υλικό, προϊόν ή παραπροϊόν που δεν έχει κάποια αξία ή χρησιμότητα ως προς τον ιδιοκτήτη και απορρίπτεται από χώρους ή κτήρια που χρησιμοποιούνται για οποιαδήποτε βιομηχανική ή εμπορική δραστηριότητα, με εξαίρεση τα αστικά/οικιακά λύματα και τα όμβρια ύδατα.

Σε ορισμένες περιπτώσεις η κατασκευή, η λειτουργία και η συντήρηση μιας μονάδας επεξεργασίας εντός της εκάστοτε βιομηχανικής εγκατάστασης που παράγει απόβλητα δεν αποτελεί βιώσιμη λύση κυρίως λόγο της μικρής ποσότητας των προς επεξεργασία αποβλήτων. Στις συγκεκριμένες περιπτώσεις η ορθή μέθοδος διαχείρισης είναι η ανάθεση της σε κατάλληλα αδειοδοτημένες εταιρείες. Συχνά αυτό σημαίνει μεταφορά των αποβλήτων από την εγκατάσταση παραγωγής σε μια εγκατάσταση αποθήκευσης και στη συνέχεια μεταφορά από την εγκατάσταση αποθήκευσης προς την εγκατάσταση διαχείρισης. Παρόλα αυτά υπάρχουν και οι περιπτώσεις όπου η επεξεργασία γίνεται επι τόπου (on-site), δηλαδή η διαχείριση των αποβλήτων γίνεται από εξειδικευμένη εταιρεία στην εγκατάσταση όπου παράγονται.

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και ο σχεδιασμός μιας κινητής μονάδας επεξεργασίας αποβλήτων, με σκοπό την on-site επεξεργασία αποβλήτων απολαστοχοποίησης αεροδιαδρόμου. Το συγκεκριμένο απόβλητο παράγεται στα πλαίσια της συντήρησης των αεροδιαδρόμων, η οποία συνήθως γίνεται με τη μέθοδο της υδροβολής. Χαρακτηριστικό του αποβλήτου είναι η υψηλή συγκέντρωση του COD και των στερεών. Επίσης, γίνεται διερεύνηση της επεξεργασίας και άλλων ρευμάτων αποβλήτων μέσω της συγκεκριμένης μονάδας. Συγκεκριμένα η διερεύνηση γίνεται για απόβλητα από επεξεργασία βρώσιμης ελιάς και απόβλητα βυρσοδεψείου.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά το σύνολο των αποβλήτων και των μεθόδων επεξεργασίας που εξετάστηκαν στη παρούσα εργασία.

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1. Απόβλητα

Τα απόβλητα ανάλογα με την φυσική τους κατάσταση μπορούν να χωριστούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες υγρά, στερεά και αέρια. Ανάλογα με την προέλευση τους διακρίνονται σε αστικά και βιομηχανικά. Στην Ελληνική νομοθεσία ένας ορισμός αναφέρει ως βιομηχανικά υγρά απόβλητα, τα υγρά απόβλητα που παράγονται από οποιαδήποτε επαγγελματική δραστηριότητα και τα οποία δεν είναι οικιακά λύματα ή όμβρια ύδατα (Εγκ. Αρ. Πρωτ: Δ1ε/Γ.Π. 33942/17).

Ένας ακόμα σημαντικός διαχωρισμός που μπορεί να γίνει είναι σε οργανικά και μη οργανικά, ανάλογα την χημική τους σύσταση και συγκεκριμένα το περιεχόμενο τους σε οργανικό άνθρακα. Τα οργανικά διακρίνονται σε βιοαποικοδομήσιμα και μη βιοαποικοδομήσιμα ή αλλιώς βιολογικά προβληματικά. Ο οργανικός άνθρακας απαντάται σε διάφορες μορφές μέσα στο απόβλητο όπως υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λίπη και έλαια. Μη οργανικές ουσίες που συναντώνται συχνά σε απόβλητα είναι τα νιτρικά, τα φωσφορικά, τα θειικά και τα βαρέα μέταλλα.

Εάν λάβουμε επιπλέον υπόψη τα φυσικά χαρακτηριστικά θερμοκρασία, οσμή, χρώμα κτλ, καθώς και τα βιολογικά συστατικά όπως αρχαιοβακτήρια, προκαρυωτικά κτλ, και επικεντρωθούμε στα υγρά απόβλητα με τα οποία ασχολείται η παρούσα εργασία, τότε καταλήγουμε σε έναν συγκεντρωτικό πίνακα στον οποίο εμφανίζονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων (Πίνακας 1).

Πίνακας 1. *Χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων, προσαρμοσμένος από (Αϊβαζίδης, 2000).*

ΦΥΣΙΚΑ	**ΧΗΜΙΚΑ**		**ΒΙΟΛΟΓΙΚΑ**
	ΟΡΓΑΝΙΚΑ	**ΑΝΟΡΓΑΝΑ**	
Χρώμα	Υδατάνθρακες	pH	Αρχαιοβακτήρια
Οσμή	Πρωτεΐνες	Αλκαλικότητα	Προκαρυωτικά
Θερμοκρασία	Λίπη, έλαια, λιπαντικά	Χλωριόντα	Ευκαρυωτικά
Θολότητα	Οργανικό άζωτο	Νιτρικά, νιτρώδη	
Στερεά	Φαινολικές ενώσεις	Ολικός φώσφορος, φωσφορικά	
Διαλυμένο οξυγόνο	Οργανοχλωριωμένες ενώσεις	Ολικό θείο, θειικά, θειώδη	
	Επιφανειακά ενεργές ενώσεις	Βαρέα μέταλλα	
	Παρασιτοκτόνα, εντομοκτόνα, φυτοφάρμακα	Τοξικές ουσίες	

2.1.1. Απόβλητο Απολαστιχοποίησης

Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί η δραστηριότητα της βιομηχανίας της αεροπορίας. Αυτό έχει επιφέρει μεγάλη κινητικότητα στους χώρους των αεροδρομίων και ειδικά στους αεροδιαδρόμους όπου καθημερινά δέχονται πιέσεις από προσγειώσεις και απογειώσεις αεροπλάνων. Δεδομένου ότι η ποιότητα των αεροδιαδρόμων είναι κρίσιμος παράγοντας για την ασφαλή διεκπεραίωση των εναέριων μεταφορών, η συντήρηση τους είναι θέμα μείζονος σημασίας.

Ένα βασικό πρόβλημα που δημιουργείται κατά τη λειτουργία των αεροδιαδρόμων είναι η εναπόθεση λάστιχου (rubber) από την τριβή των τροχών των αεροπλάνων κατά την προσγείωση και την απογείωση. Το εναποθετημένο λάστιχο προκαλεί μείωση στον συντελεστή τριβής του οδοστρώματος. Κατά συνέπεια αυξάνεται ο χρόνος πέδησης και επομένως η απαιτούμενη απόσταση που απαιτείται κατά την προσγείωση.

Ακριβώς πριν τη προσγείωση τα λάστιχα του αεροπλάνου είναι σε ακινησία, την στιγμή που ακουμπάνε στο οδόστρωμα αποκτούν απότομα πολύ υψηλή ταχύτητα περιστροφής την οποία και μειώνουν σταδιακά για περίπου 300 μέτρα. Σε όλο αυτό το διάστημα τα λάστιχα και ο αεροδιάδρομος βρίσκονται κάτω από μεγάλη πίεση και λόγο της τριβής παράγεται θερμότητα. Η θερμότητα οδηγεί στον πολυμερισμό του ελαστικού το οποίο εναποτίθεται στον αεροδιάδρομο με την μορφή σκληρού και λείου υλικού. Η ίδια αρχή ισχύει και κατά την απογείωση ενός αεροπλάνου. Υπολογίζεται ότι για κάθε Boing 747 που προσγειώνεται, εναποτίθενται 700 gr λάστιχο από κάθε ελαστικό (Paper, 2010; Adathodi, Raja and Shanagam, 2018; Abduljabbar, Salman and Jaleel, 2020)

Υπάρχουν τέσσερεις μέθοδοι που χρησιμοποιούνται ευρέως για την απομάκρυνση του εναποθετημένου ελαστικού. Η μέθοδος της υδροβολής (water blasting), η χρήσης χημικών (chemical removal), η εκτόξευση λειαντικών σωματιδίων (shot blasting) και η μηχανική απομάκρυνση (mechanical removal) (Gransberg, 2008). Και οι τέσσερεις μέθοδοι πρέπει να εφαρμόζονται σωστά καθώς η εμπειρία έχει δείξει ότι σε αντίθετη περίπτωση μπορούν να προκαλέσουν καταστροφή της υφής του αεροδιαδρόμου (Paper, 2010).

Η μέθοδος της υδροβολής ξεκίνησε να εφαρμόζεται στις Η.Π.Α. το 1973 με σκοπό να αντικαταστήσει την χρήση χημικών στα αεροδρόμια, τα οποία περιβαλλόντουσαν από λεκάνες απορροής καθώς δεν αποτελούσε περιβαλλοντικά φιλική μέθοδο (Horne *et al.*, 1975). Η συγκεκριμένη μέθοδος απομακρύνει το λάστιχο με νερό, το οποίο αντλείται και εκτοξεύεται με υψηλή πίεση. Ανάλογα την πίεση η μέθοδος χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες, σε αυτή της υψηλής πίεσης (high pressure) όπου οι πιέσεις κυμαίνονται μεταξύ 2.000 και 15.000 psi και σε αυτή της εξαιρετικά υψηλής πίεσης (ultra - high pressure) όπου οι πιέσεις κυμαίνονται μεταξύ 15.000 και 40.000 psi (Gransberg, 2008).

Οι μηχανισμοί απομάκρυνσης που λαμβάνουν χώρα κατά την υδροβολή είναι η σπηλαίωση (cavitation), η μηχανική πρόσκρουση (mechanical impact), η δυναμική πίεση (dynamic pressure), η αστοχία του υλικού λόγω κόπωσης (fatigue failure) και τέλος η δράση του νερού ως «σφήνα» (water wedge) (Hu *et al.*, 2014). Παρακάτω στο Σχήμα 1 φαίνονται κάποιες εικόνες από την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου.

Σχήμα 1. *Εφαρμογή της μεθόδου απολαστιχοποίησης αεροδιαδρόμου στο αεροδρόμιο του Σιατλ, με τη μέθοδο της υδροβολής εξαιρετικά υψηλής πίεσης (40.000 psi) (www.seattletimes.com).*

Η απομάκρυνση με χρήση χημικών είναι μια άλλη μέθοδος που στοχεύει στην χρήση ουσιών κατάλληλων ώστε να μαλακώνει το λάστιχο και να αφαιρείται εύκολα με χρήση απλών εργαλείων όπως βούρτσες, σκούπες και ξέστρα. Στη συνέχεια ξεπλένονται τα υπολείμματα με νερό (Gransberg, 2008). Παρακάτω στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου.

Σχήμα 2. *Εφαρμογή της χημικής μεθόδου για την απολαστιχοποίησης αεροδιαδρόμου (www.unicen-industries.com).*

Η απομάκρυνση ελαστικού με εκτόξευση λειαντικών σωματιδίων συνήθως εφαρμόζεται όταν δεν μπορεί να εφαρμοστεί η υδροβολή, δηλαδή σε περιπτώσεις όπου το νερό είναι δύσκολα προσβάσιμο ή οι θερμοκρασίες πολύ χαμηλές.

Η διαδικασία γίνεται μέσω μιας προωθητικής μηχανής η οποία εκτοξεύει λειαντικά σωματίδια με μεγάλη ταχύτητα τα οποία απομακρύνουν τους ρύπους και ταυτόχρονα συλλέγει το σύνολο των υλικών. Στη συνέχεια τα ξεχωρίζει με σκοπό την επαναχρησιμοποίηση των λειαντικών σωματιδίων και την χωριστή συλλογή των απομακρυνόμενων υλικών (Gransberg, 2008). Η συγκεκριμένη μέθοδος σε αντίθεση με τις προηγούμενες δύο, χρησιμοποιείται πιο συχνά για την απομάκρυνση μπογιάς από τον αεροδιάδρομο και όχι ελαστικού (Paper, 2010). Στο σχήμα 3 παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο σύστημα καθαρισμού του ελαστικού με σύστημα ανακύκλωσης των λειαντικών σωματιδίων.

Τέλος, η μηχανική απομάκρυνση περιλαμβάνει κάθε τρόπο απομάκρυνσης εναποθετημένου ελαστικού που δεν έχει αναφερθεί στις προηγούμενες τρεις μεθόδους. Παραδείγματα μηχανικής απομάκρυνσης είναι η λείανση (grinding), η άλεση (milling), η χρήση συρμάτινης βούρτσας (wire-bristle brushing) και το ξύσιμο με λεπίδες (scrapingwithblades) (Gransberg, 2008).

Σχήμα 3. *Σύστημα καθαρισμού εναποθετημένου ελαστικού από αεροδιάδρομο με τη μέθοδο της εκτόξευσης λειαντικών σωματιδίων (shotblasting)* (Abduljabbar, Salman and Jaleel, 2020; *www.blastrac.eu*).

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος απομάκρυνσης ελαστικού από τον αεροδιάδρομο, και αυτή που χρησιμοποιήθηκε στο απόβλητο όπου έγιναν οι πειραματικές δοκιμές και στη συνέχεια ο σχεδιασμός της μονάδας φυσικοχημικής επεξεργασίας της παρούσας εργασίας, είναι η μέθοδος της υδροβολής.

Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει πολλά πλεονεκτήματα. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως είναι μια περιβαλλοντικά φιλική λύση συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους. Παρόλα αυτά ξεχωρίζει και για την αποτελεσματικότητα, την ταχύτητα και το χαμηλό λειτουργικό κόστος. Ο λόγος που ο περιβαλλοντικά φιλικός χαρακτήρας δεν αποτελεί το πιο σημαντικό πλεονέκτημα ενδέχεται να οφείλεται στο γεγονός ότι και στη συγκεκριμένη μέθοδο παράγονται απόβλητα τα οποία χρήζουν διαχείρισης (Gransberg, 2008).

Κάποια μειονεκτήματα που παρουσιάζει η συγκεκριμένη μέθοδος είναι η καταστροφή της υφής του αεροδιαδρόμου, ο περιορισμός εφαρμογής σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και διάφορα περιβαλλοντικά προβλήματα που προκύπτουν από την μη ορθή διαχείριση του αποβλήτου (Gransberg, 2008).

Διάφορες μελέτες έχουν δείξει ότι το απόβλητο απολαστιχοποίησης που παράγεται με τη μέθοδο της υδροβολής, μπορεί να αποτελεί επικίνδυνο υλικό λόγω της περιεκτικότητας του σε ψευδάργυρο (Zn) (Gransberg, 2008). Ο ψευδάργυρος ανιχνεύεται σε μεγάλη συγκέντρωση διότι χρησιμοποιείται στην παραγωγική διαδικασία του ελαστικού. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται στη διεργασία του βουλκανισμού, με τη μορφή του οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO) (Culková *et al.*, 2013). Υπολογίζεται ότι η βιομηχανία των ελαστικών χρησιμοποιεί το 50% με 60% του ZnO παγκοσμίως (Moezzi, McDonagh and Cortie, 2012). Άλλα βαρέα μέταλλα που μπορεί να περιέχονται στο απόβλητο είναι το

τιτάνιο (Ti), ο χαλκός (Cu), το νικέλιο (Ni), το χρώμιο (Cr), ο μόλυβδος (Pb), το κοβάλτιο (Co), το αρσενικό (As) και το κάδμιο (Cd) (Huang *et al.*, 2020). Όσο αφορά τα υπόλοιπά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του αποβλήτου, το οργανικό φορτίο και το φορτίο των στερεών δεν αναμένεται να είναι πολύ υψηλά καθώς μεγάλο μέρος του αποβλήτου αποτελείται από νερό.

2.1.2. Απόβλητο Επεξεργασίας Ελιάς

Από την επεξεργασία της ελιάς δύναται να προκύψουν δυο διαφορετικά ρεύματα αποβλήτων. Το ένα αφορά απόβλητα ελαιοτριβείου, δηλαδή απόβλητα που παράγονται κατά την εξαγωγή ελαιόλαδου, ενώ το άλλο αφορά απόβλητα που παράγονται κατά την επεξεργασία της βρώσιμης ελιάς. Και οι δύο βιομηχανικές δραστηριότητες έχουν σημαντική οικονομική σημασία για χώρες της μεσογείου όπως η Ισπανία, η Ιταλία, η Ελλάδα και η Τουρκία (Deligiorgis *et al.*, 2008).

Από την παραγωγή του ελαιόλαδου προκύπτουν απόβλητα ελαιοτριβείου (Olive Mill Wastes - OMW) τα οποία χρήζουν διαχείρισης πριν την διάθεσή τους στο περιβάλλον. Τα εν λόγω απόβλητα αποτελούνται από το στερεό μέρος δηλαδή τον πολτό ελιάς και τα κουκούτσια που απομένουν μετά το πάτημα του καρπού και από το ρευστό μέρος δηλαδή τους φυτικούς χυμούς και το επιπρόσθετο νερό. Τα τελευταία χρόνια τα απόβλητα ελαιοτριβείου έχουν μελετηθεί σε βάθος και έχουν προταθεί διάφορες τεχνολογίες επεξεργασίας όπως βιολογική επεξεργασία (αερόβια ή αναερόβια), προχωρημένη οξείδωση, χημική και μηχανική επεξεργασία (Deligiorgis *et al.*, 2008).

Λιγότερη μελέτη έχει γίνει πάνω στα απόβλητα από την παραγωγή βρώσιμης ελιάς (Table Olive Processing Wastewater – TOPW) σε σχέση με τα απόβλητα ελαιοτριβείου. Τα χαρακτηριστικά του αποβλήτου βρώσιμης ελιάς είναι παρόμοια με αυτά του ελαιοτριβείου, με βασική διαφορά την περιεκτικότητα τους σε οργανικό φορτίο η οποία είναι αρκετά υψηλότερη. Επίσης το βιοαποδομίσιμο οργανικό φορτίο στα απόβλητα βρώσιμης ελιάς είναι αναλογικά χαμηλότερο. Τέλος στα απόβλητα βρώσιμης ελιάς συναντάται υψηλό ποσοστό χλωριούχου νατρίου και υδροξειδίου του νατρίου, τα οποία χρησιμοποιούνται στο στάδιο της αφαίμαξης (Deligiorgis *et al.*, 2008; Benekos *et al.*, 2019).

Τα βήματα της επεξεργασίας της βρώσιμης ελιάς είναι ο αρχικός καθαρισμός, η πλύση η οποία ακολουθεί μετά την αφαίμαξη, η ζύμωση και η συσκευασία. Συνολικά, από όλα τα παραπάνω βήματα, σε συνδυασμό με τη πλύση των δεξαμενών και γενικότερα του εξοπλισμού, υπολογίζεται ότι για κάθε τόνο πράσινης ελιάς που επεξεργάζεται προκύπτουν 3,9 – 7,5 m^3 υγρών αποβλήτων και για κάθε τόνο μαύρης ελιάς 0,9 – 1,9 m^3 υγρών αποβλήτων (Deligiorgis *et al.*, 2008; Benekos *et al.*, 2019).

Από την επεξεργασία των δυο τύπων βρώσιμης ελιάς (πράσινης και μαύρης) προκύπτουν απόβλητα με παρόμοια χαρακτηριστικά. Και στις δυο περιπτώσεις συναντάται αρκετά υψηλό οργανικό φορτίο και φορτίο στερεών, ο λόγος βιοδιασπάσιμου οργανικού φορτίου προς μη βιοδιασπάσιμο (BOD_5/COD) είναι χαμηλός και οι συγκεντρώσεις χλωριόντων και χλωριούχου νατρίου είναι επίσης υψηλές (Kopsidas, 1992).

Αναφορικά με τις μεθόδους επεξεργασίας των αποβλήτων βρώσιμης ελιάς, έως τώρα οι μελέτες έχουν δείξει ότι οι βιολογικές (αερόβιες και αναερόβιες) μέθοδοι δεν επιτυγχάνουν το επιθυμητό αποτέλεσμα καθώς οι φαινόλες και η υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα που προκύπτει από τη παρουσία χλωριούχου του νατρίου δρουν ανασταλτικά στην ανάπτυξη των μικροοργανισμών, επίσης κάποιες φαινόλες και σακχαρίτες δεν βιοαποικοδομούνται.

Σχετικά με τις χημικές μεθόδους και συγκεκριμένα τη μέθοδο της κροκίδωσης - συσσωμάτωσης επιτυγχάνονται καλύτερα αποτελέσματα, αλλά χρειάζονται μεγάλες ποσότητες κροκιδωτικών υλικών και παράγονται μεγάλες ποσότητες λάσπης που χρήζουν περεταίρω διαχείρισης. Τέλος, οι προχωρημένες μέθοδοι οξείδωσης και η μέθοδος της προσρόφησης φαίνεται να έχουν πολλά πλεονεκτήματα (Benekos *et al.*, 2019; Niazmand, Jahani and Kalantarian, 2019).

2.1.3. Απόβλητο Βυρσοδεψείου

Η βιομηχανία της επεξεργασίας δερμάτων αποτελεί κομμάτι της παγκόσμιας οικονομίας και είναι ιδιαίτερα σημαντική για τις χώρες της μεσογείου και για πολλές αναπτυσσόμενες χώρες όπως η Ινδία, η Κίνα και η Βραζιλία. Παρατηρείται ότι η ζήτηση για δέρματα και δερμάτινα προϊόντα αυξάνεται συνεχώς και ανεξάρτητα από την προσφορά. Επομένως, αναμένεται μελλοντική αύξηση της παραγωγικής δραστηριότητας, το οποίο σημαίνει αύξηση των περιβαλλοντικών πιέσεων που επιφέρει η συγκεκριμένη δραστηριότητα (Lofrano *et al.*, 2013; Saxena *et al*., 2018).

Η επεξεργασία των ακατέργαστων δερμάτων γίνεται με τη μέθοδο της βυρσοδεψίας, μέσω της οποίας η πρώτη ύλη μετατρέπεται σε δέρμα κατάλληλο για βιομηχανική χρήση. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μιας σειράς πολύπλοκων βημάτων με αποτέλεσμα την παραγωγή υγρών και στερεών αποβλήτων καθώς και την υψηλή κατανάλωση νερού. Η διαδικασία της βυρσοδεψίας γίνεται σε τρία στάδια, στο πρώτο προετοιμάζονται τα δέρματα για τη διεργασία της δέψης, στο δεύτερο γίνεται η δέψη και στο τρίτο γίνεται το φινίρισμα (Γιακούπη, 2017; Zhao and Chen, 2019; Mohammed, 2021).

Το στάδιο της προεργασίας ξεκινάει με τα ακατέργαστα δέρματα που παράγονται στα σφαγεία, τα οποία για να διατηρηθούν υπόκεινται σε ξήρανση. Το πρώτο βήμα της προεργασίας είναι να μουλιάσουν τα δέρματα ώστε να ξανά αποκτήσουν το ίδιο ποσοστό υγρασίας που είχαν πριν τη ξήρανση. Στο συγκεκριμένο βήμα αφαιρούνται και τα υπολείμματα βρωμιάς, ακαθαρσιών, αίματος κτλ. Επόμενο βήμα είναι η αφαίρεση της σάρκας και της τρίχας, αυτό επιτυγχάνεται με χρήση σουλφιδίων (sulphide) και ασβέστη (lime). Στο επόμενο βήμα λαμβάνει χώρα η εξουδετέρωση των πλέον αλκαλικών δερμάτων με χρήση όξινων αλάτων αμμωνίου. Επίσης γίνεται χρήση ενζύμων ώστε να αφαιρεθούν τυχόν υπολείμματα τρίχας και να αποδομηθούν οι πρωτεΐνες. Στη συνέχεια εφαρμόζεται το τελευταίο βήμα, κατά το οποίο το pH μειώνεται στο 3 ώστε να επιτραπεί η είσοδος των τανίνων στο δέρμα. Στο ίδιο βήμα χρησιμοποιούνται μυκητοκτόνα και βακτηριοκτόνα για λόγους συντήρησης (Verheijen *et al*., 1996).

Το στάδιο της δέψης μπορεί να γίνει με δύο τρόπους, ο ένας είναι με χρήση τανίνων χρωμίου και ο άλλος με χρήση φυτικών τανίνων. Η δέψη με χρήση χρωμίου γίνεται εμβαπτίζοντας τα δέρματα σε διάλυμα με άλατα τρισθενούς χρωμίου. Η συγκεκριμένη διαδικασία στοχεύει στη διασύνδεση των ιόντων του χρωμίου με τις ελεύθερες καρβοξυλομάδες που βρίσκονται στο κολλαγόνο του δέρματος. Στη συνέχεια, γίνεται προσθήκη βασικού διαλύματος ώστε να αυξηθεί σταδιακά το pH των δερμάτων με σκοπό την στερέωση του χρωμίου. Το αποτέλεσμα είναι τα δέρματα να γίνονται ανθεκτικά στα βακτήρια και τις υψηλές θερμοκρασίες. Στη περίπτωση της δέψης με φυτικές τανίνες χρησιμοποιούνται δύο τύποι πολυφαινολικών ενώσεων, οι υδρολυόμενες και οι συμπυκνωμένες τανίνες. Η δέψη των δερμάτων πιθανότατα οφείλεται στους δεσμούς υδρογόνου των φαινολικών ομάδων με τους πεπτιδικούς δεσμούς των πρωτεϊνικών αλυσίδων των δερμάτων (Verheijen *et al*., 1996).

Κατά το φινίρισμα, επαναλαμβάνεται ξανά η δέψη των δερμάτων με χρήση χρωμίου και στη συνέχεια γίνεται η επεξεργασία τους με βαφή και λίπος ώστε να αποκτήσουν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Επόμενο βήμα είναι το ξύρισμα το οποίο δίνει στο δέρμα το επιθυμητό πάχος. Σε αυτό το σημείο τα δέρματα αποξηραίνονται. Έπειτα από όλες τις παραπάνω διαδικασίες τα δέρματα αποκτούν μια κρούστα, η οποία υποβάλλεται σε περαιτέρω εργασίες φινιρίσματος. Συγκεκριμένα, γίνεται χρήση οργανικού διαλύτη ή βαφή ή βερνίκι με βάση το νερό (Verheijen *et al*., 1996).

Το πιο σημαντικό, περίπλοκο και ρυπογόνο βήμα της βυρσοδεψίας είναι αυτό της δέψης. Στις περισσότερες περιπτώσεις γίνεται με χρήση εξασθενούς χρωμίου. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται ότι στο 90% των περιπτώσεων εφαρμογής της μεθόδου χρησιμοποιείται χρώμιο. Η λιγότερο εφαρμοσμένη μέθοδος δέψης αυτή τη στιγμή, είναι αυτή κατά την οποία χρησιμοποιούνται φυτικές τανίνες. Άλλοι τρόποι δέψης είναι με χρήση διπλού άλας θειικού αλουμινίου ή αλλιώς στυπτηρία (alum), με αλδεΰδες (aldehyde), με άλας ζιρκονίου (zirconium salt) και με συντάνες (syntans) (Giaccherini *et al.*, 2017; Zhao and Chen, 2019; Mohammed, 2021).

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2, τα απόβλητα που παράγονται από όλα τα παραπάνω βήματα είναι επιβαρυμένα με διάφορους ρυπογόνους παράγοντες. Υπολογίζεται ότι για κάθε τόνο ακατέργαστων δερμάτων χρησιμοποιούνται περίπου 300 kg χημικών και από το σύνολο τους μόνο το 20% παραμένει στα δέρματα ενώ το υπόλοιπο 80% καταλήγει στα απόβλητα (Zhao and Chen, 2019; Mohammed, 2021; Appiah-Brempong *et al.*, 2022).

Πιο συγκεκριμένα, στα υγρά απόβλητα συναντάται υψηλό οργανικό φορτίο (COD), οργανικό άζωτο, θείο, χημικές ουσίες, υψηλά επίπεδα αιωρούμενων στερεών, έντονος χρωματισμός και βαρέα μέταλλα. Αναφορικά με τα βαρέα μέταλλα, συναντάται υψηλή συγκέντρωση χρωμίου το οποίο στα απόβλητα μπορεί να υπάρξει είτε σε ως τρισθενές (Cr^{3+}) είτε ως εξασθενές (Cr^{6+}). Το εξασθενές χρώμιο είναι περίπου εκατό φορές πιο τοξικό από το τρισθενές (Giaccherini *et al.*, 2017; Zhao and Chen, 2019; Mohammed, 2021; Appiah-Brempong *et al.*, 2022).

Πίνακας 2. *Παραγωγή αποβλήτων από τα διάφορα στάδια επεξεργασίας δερμάτων.*

ΒΗΜΑΤΑ	ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ	ΑΠΟΒΛΗΤΑ
Προεργασία	Μούλιασμα Αφαίρεση σάρκας Αφαίρεση τρίχας Εξουδετέρωση Πικλάρισμα/Όξινση	Σάρκες, τρίχες, BOD, COD, SS, άλατα, οργανικό N, H_2S, NH_3
Δέψη	Δέψη	BOD, COD, SS, άλατα, Cr(III), Cr(VI)
Φινίρισμα	Επαναδέψη Βαφή Λίπανση Ξύρισμα Ξήρανση Φινίρισμα	Τρίχες BOD, COD, Cr(III), Cr(VI), βαφές, λίπη, διαλύτες, φορμαλδεΰδες

2.2. Μέθοδοι Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων

Γενικότερα, στα πλαίσια όλων των μεθόδων επεξεργασίας αποβλήτων λαμβάνουν χώρα διάφορα φυσικά, χημικά, και βιολογικά φαινόμενα ή συνδυασμός αυτών. Ανάλογα με τον τύπο του φαινομένου γίνεται ο αντίστοιχος διαχωρισμός σε τρεις βασικές κατηγορίες. Στον Πίνακα 3 αποτυπώνονται οι κατηγορίες και υποκατηγορίες αυτών καθώς και παραδείγματα από κάθε περίπτωση.

Συνοπτικά υπάρχουν, οι φυσικές μέθοδοι, οι οποίες αφορούν κυρίως τεχνικές διαχωρισμού στερεών από το υγρό. Αυτή η κατηγορία χωρίζεται σε δυο υποκατηγορίες αυτή των μηχανικών και αυτή των θερμικών διεργασιών. Μεταξύ άλλων οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες είναι οι εξής: αντίστροφη όσμωση, απόσταξη, μικροδιήθηση, φίλτρα άμμου και φίλτρα ενεργού άνθρακα. Στην κατηγορία αυτή κυρίαρχο ρόλο έχει η μέθοδος της διήθησης (filtration) (Bennett, 2002).

Οι χημικές μέθοδοι, οι οποίες βασίζονται στις χημικές αλληλεπιδράσεις των ρύπων που επιθυμούμε να απομακρύνουμε από το νερό. Λειτουργούν είτε ως τρόποι απομάκρυνσης του ρύπου από αυτό είτε βοηθούν στην εξουδετέρωση επιβλαβών επιδράσεων που σχετίζονται με τους ρύπους. Παραδείγματα τέτοιων μεθόδων είναι: χλωρίωση, ιωδίωση και κροκίδωση-συσσωμάτωση (Bennett, 2002).

Και οι βιολογικές μέθοδοι, οι οποίες χαρακτηρίζονται από την χρήση μικροοργανισμών για την αφαίρεση άνθρακα, αζώτου, φωσφόρου, μικρορυπαντών και παθογόνων. Ενώ τα τελευταία χρόνια εμφανίζονται και εφαρμογές ανάκτησης θρεπτικών όπως ο φώσφορος ή πολύτιμων υλικών όπως τα βιοπλαστικά (Nielsen, 2015). Σε αυτή τη κατηγορία γίνεται περεταίρω διαχωρισμός σε αερόβιες και αναερόβιες βιολογικές μεθόδους. Ο διαχωρισμός γίνεται βάση των συνθηκών που επικρατούν στο απόβλητο και συγκεκριμένα βάση της συγκέντρωσης του οξυγόνο. Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου δύναται να χρησιμοποιηθεί και συνδυασμός όλων των παραπάνω μεθόδων.

Στη παρούσα εργασία γίνεται μελέτη και εφαρμογή φυσικοχημικής επεξεργασίας, δηλαδή συνδυασμός φυσικών και χημικών μεθόδων, με σκοπό την επεξεργασία αποβλήτου απολαστιχοποίησης. Πιο συγκεκριμένα εφαρμόζεται η μέθοδος της κροκίδωσης - συσσωμάτωσης - καθίζησης και στη συνέχεια της διήθησης μέσω φίλτρων. Ο συγκεκριμένος συνδυασμός μεθόδων έχει εφαρμοστεί ευρέως για την απομάκρυνση στερεών και οργανικού φορτίου. Παρόλα αυτά πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι είναι κατάλληλος και για απομάκρυνση βαρέων μετάλλων, τοξικής οργανικής ύλης, ιών, και ραδιονουκλεϊδίων (Kurniawan *et al.*, 2006).

Στα πλαίσια της διερεύνησης επεξεργασίας και άλλων ρευμάτων αποβλήτων μέσω της μονάδας φυσικοχημικής επεξεργασίας, εφαρμόστηκε επίσης συνδυασμός φυσικοχημικών μεθόδων. Συγκεκριμένα, τόσο στα απόβλητα από παραγωγή βρώσιμης ελιάς όσο και στα απόβλητα βυρσοδεψείου δοκιμάστηκε η μέθοδος της κροκίδωσης - συσσωμάτωσης - καθίζησης σε συνδυασμό με φίλτρανση και η μέθοδος της ηλεκρτοκροκίδωσης σε συνδυασμό με φίλτρανση.

Πίνακας 3. *Κατηγορίες μεθόδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (Αϊβαζίδης, 2000).*

ΦΥΣΙΚΕΣ		**ΧΗΜΙΚΕΣ**	**ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ**
ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ	**ΘΕΡΜΙΚΕΣ**		
Συσσωμάτωση/ καθίζηση	Προσρόφηση/ εκρόφηση	Κροκίδωση/ συσσωμάτωση	Μέθοδοι ενεργούς ιλύος (Αερόβιες διεργασίες)
Διήθηση	Εκφύσηση	Κατακρήμνιση	Απομάκρυνση αζώτου και φωσφόρου
Επίπλευση	Εκχύλιση	Εξουδετέρωση	Συστήματα με καθηλωμένη βιομάζα
Φυγοκέντρηση	Απόσταξη/ συμπήκνωση	Οξείδωση	Αναερόβιες διεργασίες
Εξάμμωση/ λιποσυλλογή	Υπερδιήθηση	Ιοντοανταλλαγή	Σηπτικοί βόθροι
Εσχάρωση	Αντίστροφηόσμωση	Καύση	Λίμνες σταθεροποίησης
Εξισορρόπηση	Νανοδιήθηση	Ηλεκτροκροκίδωση	

2.2.1. Οξείδωση

Η χημική οξείδωση είναι μια διαδικασία που περιλαμβάνει τη μεταφορά ηλεκτρονίων από ένα οξειδωτικό μέσο στη χημική ένωση που οξειδώνεται. Κατά την επεξεργασία υγρών αποβλήτων, η χημική οξείδωση χρησιμοποιείται για την εξουδετέρωση ή σταθεροποίηση των ρύπων. Η παραπάνω διεργασία γίνεται με χρήση αντιδραστηρίων οξείδωσης όπως το υπεροξείδιο του υδρογόνου, το διοξείδιο του χλωρίου και το όζον για τη μείωση του υπολειμματικού COD, των μη βιοαποδομήσιμων ενώσεων και των ιχνών οργανικών ενώσεων (Bush, 1980; IPIECA, 2010).

Οι εφαρμογές της χημικής οξείδωσης στην επεξεργασία νερού και λυμάτων χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό σε εξειδικευμένες βιομηχανικές χρήσεις. Αυτό οφείλεται στο υψηλό λειτουργικό κόστος της συγκεκριμένης μεθόδου. Ως εκ τούτου, η έμφαση στις πρακτικές εφαρμογές των τεχνικών χημικής οξείδωσης δίνεται υπό τις ακόλουθες συνθήκες:

- Τελική επεξεργασία για τη συμμόρφωση με τα πρότυπα πόσιμου νερού.
- Επεξεργασία μικρών ποσοτήτων βιομηχανικών αποβλήτων με υψηλή συγκέντρωση τοξικών ρύπων.
- Επεξεργασία υπολειμμάτων αποβλήτων που απομονώνονται σε συμπυκνωμένη φάση (π.χ. λάσπες λυμάτων)
- Εξάλειψη ορισμένων χαρακτηριστικών των αποβλήτων χωρίς να απαιτείται πλήρης οξείδωση των ρύπων, όπως για παράδειγμα οι περιπτώσεις απολύμανσης, ελέγχου γεύσης και οσμής.

Το υπεροξείδιο του υδρογόνου (H_2O_2) είναι ένα πολύ αποτελεσματικό οξειδωτικό μέσο για την επεξεργασία κοινών ρύπων του νερού και γενικότερα των υγρών αποβλήτων. Ωστόσο, το σχετικά υψηλό κόστος του έχει περιορίσει την χρήση του σε μεγάλης κλίμακας συστήματα επεξεργασίας αποβλήτων. Τα αντιδραστήρια υπεροξυγόνου, συμπεριλαμβανομένου του υπεροξειδίου του υδρογόνου, είναι πολύ χρήσιμα ως οξειδωτικά μέσα για την επεξεργασία δύσκολων ρύπων (L. K. Wang, Y.-T. Hung, 2005)

Το καθαρό H_2O_2 έχει σημείο βρασμού 152ºC και σημείο πήξης −0,89ºC. Λόγω της ισχυρής οξειδωτικής του ισχύος, πωλείται συνήθως στο εμπόριο αραιωμένο ως υδατικό διαλύματα. Παράγεται στο εμπόριο με ηλεκτρόλυση διαλυμάτων θειικού οξέος ή θειικού αμμωνίου-θειικού οξέος. Το υπεροξυδιθειικό που παράγεται στην άνοδο ανακτάται και στη συνέχεια υδρολύεται με αντίδραση δύο σταδίων για να δώσει υπεροξείδιο του υδρογόνου. Το H_2O_2 απομακρύνεται γρήγορα μαζί με την περίσσεια νερού με απόσταξη σε υψηλή θερμοκρασία και μειωμένη πίεση. Το αραιό απόσταγμα συμπυκνώνεται με περαιτέρω απόσταξη για να δώσει προϊόντα εμπορικής ποιότητας που περιέχουν 28 – 35% H_2O_2 κατά βάρος. Εναλλακτικά, το H_2O_2 μπορεί να παραχθεί με διαδικασίες οργανικής οξείδωσης. Το υπεροξείδιο του υδρογόνου παράγεται όταν μια ανθρακινόλη οξειδώνεται με μοριακό οξυγόνο για να δώσει ανθρακινόνη. Ανακτάται με εκχύλιση με νερό και συμπυκνώνεται με απόσταξη (L. K. Wang, Y.-T. Hung, 2005).

Λόγω του σχετικά υψηλού κόστους του υπεροξειδίου του υδρογόνου, είναι φυσικό να διαπιστωθεί ότι οι σημαντικοί τομείς εφαρμογών επικεντρώνονται στα συστήματα επεξεργασίας αποβλήτων που απαιτούν μικρές ποσότητες αντιδραστηρίων. Άρα, οι χρήσεις του επικεντρώνονται κυρίως σε:

- Έλεγχο οσμών
- Μείωση της διόγκωσης ιλύος
- Βελτίωση καθίζησης αιωρούμενων στερεών
- Συμπλήρωμα για προσθήκη οξυγόνου

Εκτός από την αποτελεσματικότητά τους στην οξειδωτική αποικοδόμηση μιας μεγάλης ποικιλίας επιβλαβών ρύπων, τα αντιδραστήρια υπεροξειδίου του υδρογόνου παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και στην ευκολία χειρισμού και εφαρμογής τους. Το υπεροξείδιο του υδρογόνου χορηγείται εύκολα με τη μορφή υδατικών αντιδραστηρίων ποικίλων συγκεντρώσεων. Η χρήση του ως συμπληρωματικού αντιδραστηρίου τόσο σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών όσο και βιομηχανικών αποβλήτων αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά καθώς εφαρμόζονται όλο και πιο αυστηρά όρια επεξεργασίας και διάθεσης αποβλήτων (L. K. Wang, Y.-T. Hung, 2005).

2.2.2. Κροκίδωση – Συσσωμάτωση

Η μέθοδος της κροκίδωσης -συσσωμάτωσης (flocculation–coagulation) αποτελεί τον βασικό μηχανισμό επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων και του πόσιμου νερού. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται πολύ συχνά για την απομάκρυνση διαλυμένων και αιωρούμενων στερεών σωματιδίων από το νερό. Η απομάκρυνση των συγκεκριμένων στερεών επιτυγχάνεται μέσω προσθήκης κατάλληλων χημικών ουσιών (κροκιδωτικά και ενισχυτικά συσσωμάτωσης), τα οποία βοηθούν τα μικρότερα στερεά να έρθουν σε επαφή μεταξύ τους και να δημιουργήσουν μεγαλύτερα συσσωματώματα .Η δημιουργία τέτοιων σωμάτων διευκολύνει στον αποδοτικό διαχωρισμό των στερεών από το νερό. Συνήθως ως κροκιδωτικά υλικά χρησιμοποιούνται άλατα μετάλλου, άλατα αλουμινίου και οργανικά πολυμερή. Υπάρχουν αναφορές χρήσης κροκιδωτικών υλικών από το 1500 π.Χ. στην Αίγυπτο (L. K. Wang, Y.-T. Hung, 2005; Teh *et al.*, 2016).

Παρακάτω στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται ανά κατηγορία διάφορα παραδείγματα στερεών σωματιδίων που συναντώνται στα υγρά απόβλητα και το νερό. Η μέθοδος της κροκίδωσης συσσωμάτωσης στοχεύει κυρίως στην απομάκρυνση των κολλοειδών σωματιδίων (Kurniawan *et al.*, 2006; John Bratby, 2016). Κολλοειδή χαρακτηρίζονται τα σωματίδια τα οποία λόγω του πολύ μικρού τους μέγεθος δεν επηρεάζονται από τη βαρύτητα και παραμένουν σε εναιώρηση. Τέτοια σωματίδια αποτελούνται συνήθως από εκατοντάδες άτομα ή μόρια και σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να αποτελείται μόνο από ένα μεγάλο μόριο (Arcadio P. Sincero, 2003).

Πίνακας 4. *Κατηγοριοποίηση σωματιδίων ανάλογα με το μέγεθος τους* (John Bratby, 2016)

Μέγεθος σωματιδίου (mm)	**Κατηγοριοποίηση**	**Παραδείγματα**
10	Χονδροειδή (ορατά με γυμνό μάτι)	Χαλίκι, χοντρή άμμος, ορυκτές ουσίες, καταβυθισμένα και συσσωματωμένα σωματίδια, λάσπη, μακροπλαγκτόν
1		
10^{-1}		
10^{-2}	Λεπτόκοκκα (ορατά με μικροσκόπιο)	Ορυκτές ουσίες, καταβυθισμένα και συσσωματωμένα σωματίδια, λάσπη,βακτήρια, πλαγκτόν και άλλοιοργανισμοί
10^{-3}		
10^{-4}		
10^{-5}	Κολλοειδή (υπομικροσκοπικά)	Ορυκτές ουσίες, προϊόντα υδρόλυσης και καθίζησης, μακρομόρια,βιοπολυμερή και ιοί
10^{-6}		
$<10^{-6}$	Διάλυμα	Ανόργαναιόντα, μόρια και πολυμερή, πολυηλεκτρολύτες, οργανικά μόρια, αδιάσπαστη διαλυμένη ουσία

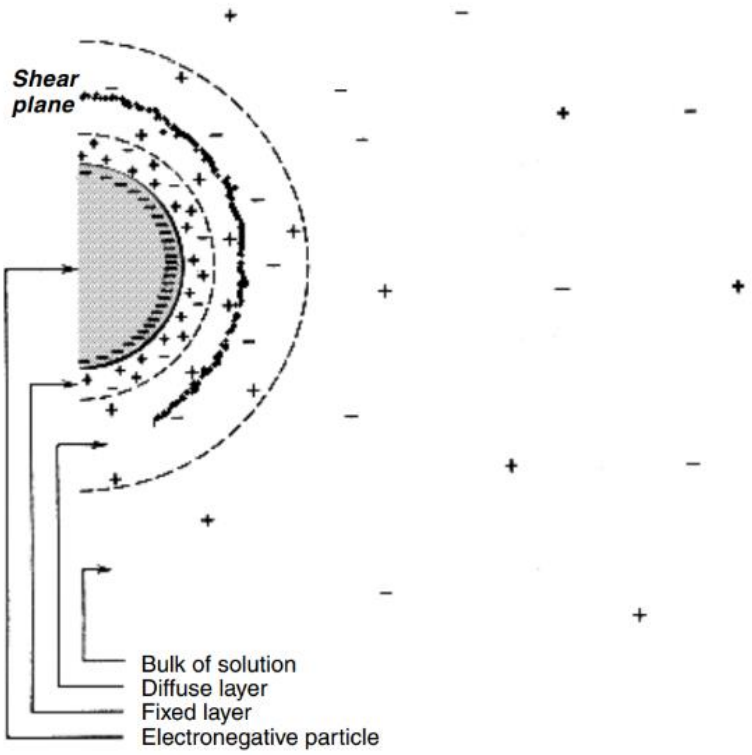
Όσο αφορά τη διεργασία της κροκίδωσης – συσσωμάτωσης, χωρίζεται σε δυο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, δηλαδή κατά τη κροκίδωση λαμβάνει χώρα η αποσταθεροποίηση των στερεών που βρίσκονται σε εναιώρηση. Στο δεύτερο στάδιο, δηλαδή αυτό της συσσωμάτωσης, λαμβάνουν χώρα οι διεργασίες κατά τις οποίες τα αποσταθεροποιημένα

πλέον στερεά έρχονται σε επαφή και δημιουργούν μεγαλύτερα συσσωματώματα τις κροκίδες (flocs). Το στάδιο της κροκίδωσης επιτυγχάνεται συνήθως μέσω έντονης ανάμιξης ενώ της συσσωμάτωσης μέσω αργής ανάμιξης ή απλά μέσω ροής του υγρού στο σύστημα (L. K. Wang, Y.-T. Hung, 2005; John Bratby, 2016; Teh *et al.*, 2016).

Με τον όρο αποσταθεροποίηση των στερεών εννοείται η άρση της ιδιότητας που έχουν τα κολλοειδή στερεά να απωθούνται μεταξύ τους. Η ιδιότητα αυτή οφείλετε στο ηλεκτρικό τους φορτίο. Συγκεκριμένα, το πολύ μικρό τους μέγεθος καθιστά κυρίαρχες τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις έναντι των ελκτικών δυνάμεων van der Waals. Παράλληλα σχεδόν όλοι οι ρύποι που συναντώνται στο νερό έχουν αρνητικό φορτίο στην επιφάνεια τους και επομένως απωθούνται μεταξύ τους (Teh *et al.*, 2016).

Το ηλεκτρικό φορτίο που φέρουν τα σωματίδια έλκει από το διάλυμα ιόντα αντίθετου φορτίου τα οποία στη βιβλιογραφία αναφέρονται ως αντίθετα ιόντα (counterions). Τα αντίθετα ιόντα συγκρατούνται από τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις και τις δυνάμεις van der Waals και σχηματίζουν μια στιβάδα γύρω από το στερεό γνωστή ως στιβάδα Stern (Stern layer). Τα ιόντα της στιβάδας Stern με τη σειρά τους έλκουν ιόντα με την αρχική φόρτιση του στερεού σχηματίζοντας επίσης μια στιβάδα την στιβάδα Gouy (Gouy layer). Χαρακτηριστικό της στιβάδας Stern είναι ότι τα ιόντα της μετακινούνται μαζί με το σωματίδιο, ενώ τα ιόντα της στιβάδας Gouy μπορούν είτε να μετακινηθούν με αυτό είτε να παραμείνουν διάχυτα στο υγρό (Arcadio P. Sincero, 2003).

Η νοητή ακτίνα γύρω από το στερεό που διαχωρίζει τα ιόντα της στιβάδας Gouy τα οποία θα μετακινηθούν μαζί με το στερεό, από τα ιόντα της ίδιας στιβάδας τα οποία θα παραμείνουν διάχυτα στο υγρό, αποτελεί σημείο αναφοράς και στη βιβλιογραφία χαρακτηρίζεται ως διατμητική επιφάνεια (shear plane) (βλ. Σχήμα 4). Το ηλεκτροστατικό δυναμικό που αντιστοιχεί στην απόστασήτης διατμητικής επιφάνειας από το στερεό λέγεται ζ-δυναμικό (zetapotential) και μέσω αυτού μπορεί να μελετηθεί η επίδραση των κροκιδωτικών στο σύστημα. Συγκεκριμένα εάν το ζ-δυναμικό είναι πολύ υψηλό τότε σημαίνει ότι οι απωστικές δυνάμεις είναι πολύ μεγάλες και άρα τα στερεά θα παραμείνουν σε εναιώρηση. Προϋπόθεση όμως στον παραπάνω έλεγχο είναι ο μηχανισμός αποσταθεροποίησης των στερεών να οφείλεται κυρίως σε επιδράσεις φορτίου (John Bratby, 2016; Teh *et al.*, 2016)



Σχήμα 4*. Σχηματική απεικόνιση διατμητικής επιφάνειας (shear plane)* (Ghernaout, 2015)

Η αποσταθεροποίηση ενός συστήματος αιωρούμενων στερεών σωματιδίων και στη συνέχεια η συσσωμάτωση τους σε μεγαλύτερα στερεά μπορεί να γίνει μέσω τεσσάρων μηχανισμών. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι η συμπίεση της διπλής στιβάδας (double layer compression), η εξουδετέρωση του φορτίου (charge neutralization), ο εγκλωβισμός των κολλοειδών (colloid entrapment) και η διασωματιδιακή γεφύρωση (intraparticle bridging). Η ουσία που θα προστεθεί στο απόβλητο προκειμένου να επέλθει αποσταθεροποίηση χαρακτηρίζεται ως κροκιδωτικό ή ως ενισχυτικό συσσωμάτωσης ανάλογα με τον μηχανισμό αποσταθεροποίησης που θα λάβει χώρα έπειτα από την προσθήκη του. Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται και περιγράφονται οι παραπάνω μηχανισμοί (Arcadio P. Sincero, 2003).

Συνοψίζοντας, στη βιβλιογραφία συναντώνται διάφοροι ορισμοί για τις παραπάνω έννοιες ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής τους. Για την ασφαλή περιγραφή τους σύμφωνα με τον (John Bratby, 2016), παρουσιάζονται παρακάτω οι εξής ευρέως αποδεκτοί ορισμοί:

- **Κροκίδωση:** η διαδικασία κατά την οποία επιτυγχάνεται αποσταθεροποίηση ενός εναιωρήματος ή διαλύματος. Δηλαδή, η άρση των παραγόντων που προάγουν τη σταθερότητα ενός δεδομένου συστήματος.
- **Συσσωμάτωση:** η διαδικασία κατά την οποία αποσταθεροποιημένα σωματίδια, ή σωματίδια που σχηματίζονται ως αποτέλεσμα της αποσταθεροποίησης, πλησιάζουν και έρχονται σε επαφή με αποτέλεσμα να σχηματιστούν μεγαλύτερα συσσωματώματα.
- **Κροκιδωτικό:** η χημική ουσία που προστίθεται σε ένα εναιώρημα ή διάλυμα για να επιφέρει αποσταθεροποίηση.

- **Ενισχυτικό συσσωμάτωσης:** η χημική ουσία που προστίθενται σε ένα αποσταθεροποιημένο εναιώρημα ή διάλυμα για να επιταχυνθεί ο ρυθμός κροκίδωσης ή να ενισχυθούν οι κροκίδες που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια της κροκίδωσης.

Πίνακας 5. *Μηχανισμοί αποσταθεροποίησης συστήματος αιωρούμενων στερεών σωματιδίων (Arcadio P. Sincero, 2003)*

Πρόσθετο χημικό	Μηχανισμός αποσταθεροποίησης	Περιγραφή μηχανισμού
Κροκιδωτικό	Συμπίεση διπλής στιβάδας	Ελάττωση ενεργειακού φράγματος και προσέγγιση σωματιδίων (κίνηση Brown) τα οποία στη συνέχεια παραμένουν σε επαφή (δυνάμεις vanderWaals)
	Εξουδετέρωση φορτίου	Ιόντα αντίθετου φορτίου από τα κολλοειδή έρχονται σε επαφή με τα σωματίδια και εξουδετερώνουν το επιφανειακό τους φορτίο
Ενισχυτικό συσσωμάτωσης	Εγκλωβισμός κολλοειδών	Κατά το σχηματισμό ιζημάτων τα κολλοειδή σωματίδια εγκλωβίζονται σε αυτά και καθιζάνουν
	Διασωματιδιακή γεφύρωση	Σχηματισμός γεφυρών μεταξύ σωματιδίων καλυμμένων με πολυμερές

Κλείνοντας, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, η μέθοδος της κροκίδωσης - συσσωμάτωσης είναι ευρέως εφαρμοσμένη λόγο του απλού σχεδιασμού και λειτουργίας του συστήματος καθώς και της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, έτσι σε αρκετές περιπτώσεις προτιμάται μεταξύ άλλων. Παρόλα αυτά, στα πλαίσια εφαρμογής της στα υγρά απόβλητα, εμφανίζει ορισμένα προβλήματα. Οι σημαντικότερες προκλήσεις αφορούν την τοξικότητα ορισμένων κροκιδωτικών, την παραγωγή λάσπης, την αδυναμία πλήρους απομάκρυνση βαρέων μετάλλων, σε ορισμένες περιπτώσεις την παραγωγή χρώματος στην εκροή, την αύξηση του COD έπειτα από χρήση οργανικών κροκιδωτικών και τέλος την πολυπλοκότητα της κλιμάκωσης (scaling up) (Kurniawan *et al.*, 2006; Teh *et al.*, 2016).

Παρακάτω παρουσιάζονται οι σημαντικότερες παράμετροι για την βελτίωση της απόδοσης της συγκεκριμένης μεθόδου. Η απόδοση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το pH, την θερμοκρασία, τη συγκέντρωση των κολλοειδών και του κροκιδωτικού, τη παρουσία ανιόντων ή κατιόντων καιτα χαρακτηριστικά της ανάμειξης.

Το pH αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες βελτιστοποίησης της μεθόδου. Συγκεκριμένα εκφράζει τη συγκέντρωση των ιόντων H^+ τα οποία επηρεάζουν το ηλεκτρικό φορτίο των κολλοειδών στερεών ως εξής, εάν η τιμή του pH είναι πάνω από το ισοηλεκτρικό σημείο τότε το φορτίο των στερεών γίνεται πιο αρνητικό και αντίστροφα. Το ισοηλεκτρικό σημείο αφορά την τιμή του pH κατά την οποία το ηλεκτρικό φορτίο είναι κατά το δυνατό πιο κοντά στο ουδέτερο και διαφέρει ανάλογα με την ιοντική ισχύς του

διαλύματος. Συνήθως βρίσκεται μεταξύ των τιμών 7 και 9 (L. K. Wang, Y.-T. Hung, 2005; Teh *et al.*, 2016).

Η θερμοκρασία παίζει επίσης σημαντικό ρόλο, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου ως κροκιδωτικά χρησιμοποιούνται άλατα μετάλλων. Έχει παρατηρηθεί ότι σε χαμηλές θερμοκρασίες μειώνεται η απόδοση του κροκιδωτικού γεγονός που φαίνεται να οφείλετε σε διάφορους παράγοντες (Duan and Gregory, 2003). Πιο συγκεκριμένα, με την άνοδο της θερμοκρασίας η κινητική ενέργεια των μορίων καθώς και ο ρυθμός των χημικών ενώσεων αυξάνονται, αντίθετα μειώνονται το ιξώδες του νερού και ο χρόνος δημιουργίας των κροκίδων (L. K. Wang, Y.-T. Hung, 2005).

Η συγκέντρωση των κολλοειδών στερεών παίζει επίσης σημαντικό ρόλο καθώς επηρεάζει την βέλτιστη απαιτούμενη δόση του κροκιδωτικού. Με την εφαρμογή της βέλτιστης δόσης επιτυγχάνεται μείωση του κόστους καθώς και της λάσπης που θα προκύψει μετά την καθίζηση. Στη περίπτωση που η προσρόφηση των κολλοειδών στερεών είναι ισχυρή, η δόση που απαιτείται υπολογίζεται στοιχειομετρικά από τη συγκέντρωση των κολλοειδών. Σε αντίθετη περίπτωση, για παράδειγμα σε συστήματα με μικρή συγκέντρωση κολλοειδών χρειάζεται αύξηση της δόσης. Παρόλα αυτά υπερβολική δόση κροκιδωτικού μπορεί να προξενήσει επανασταθεροποίηση του συστήματος. Γενικότερα, η βέλτιστη δόση ποικίλλει ανάλογα με το μοριακό βάρος, τον ιοντικό χαρακτήρα και τον ιοντικό βαθμό του κροκιδωτικού (L. K. Wang, Y.-T. Hung, 2005; Teh *et al.*, 2016).

Σημαντική είναι και η παρουσία ανιόντων και καιόντων στο σύστημα. Τα ανιόντα φαίνεται να βοηθούν στο να μην επανασταθεροποιείται το σύστημα έπειτα από μεγάλη δόση κροκιδωτικού. Τα κατιόντα από την άλλη βοηθούν στη συμπίεση της διπλής στιβάδας (Sternκαι Gouy), στη μείωση του αρνητικού ηλεκτρικού φορτίου που οφείλεται στα κολλοειδή και στη μείωση του εύρους του ενεργειακού φράγματος (repulsive burrier) (L. K. Wang, Y.-T. Hung, 2005).

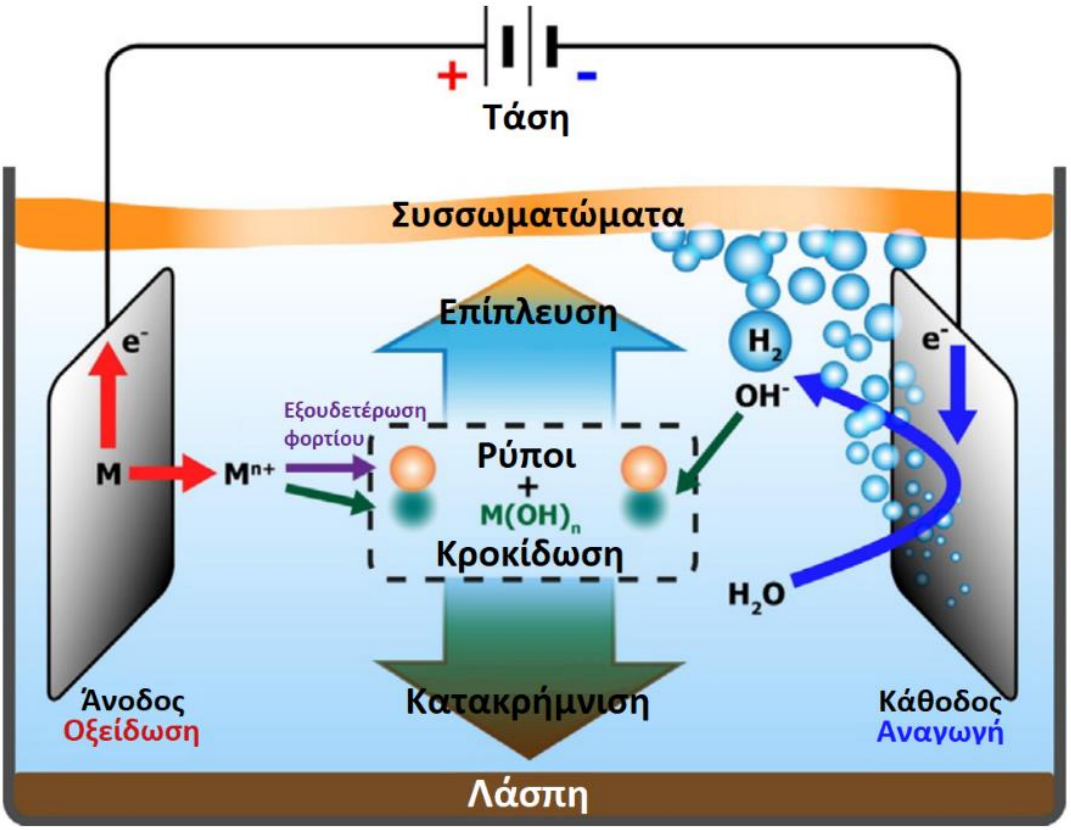
Τέλος, έχει παρατηρηθεί ότι ο τρόπος και ο χρόνος ανάμιξης έπειτα από τη προσθήκη κροκιδωτικού μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη διαδικασία της κροκίδωσης-συσσωμάτωσης. Συγκεκριμένα, όταν εφαρμόζεται έντονη ανάμιξη για σύντομο χρονικό διάστημα φαίνεται να δημιουργούνται μεγαλύτερες κροκίδες, οι οποίες όμως δεν είναι τόσο συμπαγείς σε σχέση με τις μικρότερες κροκίδες που σχηματίζονται έπειτα από έντονη ανάμιξη μεγάλης διάρκειας. Όσο αφορά το δεύτερο στάδιο, δηλαδή την αργή ανάμιξη, έχει παρατηρηθεί ότι παρατείνοντας την διάρκεια δημιουργούνται μεγαλύτερες κροκίδες χωρίς να μειώνεται η πυκνότητα τους (Teh *et al.*, 2016).

2.2.3. Ηλεκτροκροκίδωση

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο η διεργασία της κροκίδωσης-συσσωμάτωσης με χρήση χημικών έχει κάποια μειονεκτήματα. Βασικότερο όλων είναι η παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων λάσπης η οποία χρήζει περεταίρω επεξεργασίας. Μια εναλλακτική μέθοδος που μπορεί να εφαρμοστεί έναντι της κροκίδωσης-συσσωμάτωσης είναι η αυτή της ηλεκτροκροκίδωσης. Η συγκεκριμένη μέθοδος στοχεύει στην απομάκρυνση ρύπων από απόβλητα μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων (Tetreault, 2003; Kurniawan *et al.*, 2006; Benekos *et al.*, 2019).

Συγκεκριμένα μπορεί να απομακρύνει βαρέα μέταλλα, αιωρούμενα και κολλοειδή στερεά, λίπη, γράσα, βακτήρια και ιούς. Επίσης αποσταθεροποιεί έλαια και γαλακτώματα. Συγκριτικά με τη συμβατική μέθοδο της κροκίδωσης - συσσωμάτωσης, η ηλεκτροκροκίδωση παράγει λιγότερη λάσπη καθώς είναι ικανή να απομακρύνει μικρότερα σωματίδια (Tetreault, 2003; Kurniawan *et al.*, 2006).

Για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου απαιτούνται τουλάχιστον ένας αντιδραστήρας, δύο ηλεκτρόδια (μια άνοδος και μια κάθοδος), ηλεκτρολύτης και ένα σύστημα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Συνήθως το υλικό των ηλεκτροδίων είναι από αλουμίνιο, σίδηρο ή ανοξείδωτο ατσάλι. Συχνά συναντάται και υβριδικό σύστημα με συνδυασμό ηλεκτροδίων αλουμινίου και σιδήρου (Tetreault, 2003; Nippatla and Philip, 2020). Παρακάτω στο Σχήμα 5 απεικονίζεται ένα σύστημα ηλεκτροκροκίδωσης με δυο ηλεκτρόδια.



Σχήμα 5. *Σχηματική απεικόνιση αντιδραστήρα ηλεκτροκροκίδωσης με δύο ηλεκτρόδια (An et al., 2017).*

Βασικός μηχανισμός απομάκρυνσης των ρύπων στην ηλεκτροκροκίδωση είναι η παραγωγή θετικά φορτισμένων ιόντων μέσω ηλεκτρολυτικής οξείδωσης του υλικού της ανόδου. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα έρχονται σε επαφή με τα αρνητικά φορτισμένα αιωρούμενα

στερεά του αποβλήτου με αποτέλεσμα να λαμβάνει χώρα αποσταθεροποίηση του συστήματος και επομένως συσσωμάτωση των στερεών. Παράλληλα από το υλικό της καθόδου παράγονται ιόντα υδροξυλίου (OH^-) και αέριο υδρογόνου (H_2).Τα ιόντα του μετάλλου της ανόδου έρχονται σε επαφή με τα ιόντα OH^- της καθόδου και σχηματίζουν υδροξείδιο το οποίο έχει την ιδιότητα να προσροφά τα πλέον συσσωματωμένα αιωρούμενα στερεά. Τέλος το παραγόμενο αέριο υδρογόνο βοηθάει στην επίπλευση των ελαφρύτερων στερεών καθώς τα παρασύρει προς την επιφάνεια. Το αποτέλεσμα είναι οι ρύποι να απομακρύνονται από το υγρό είτε μέσω καθίζησης είτε μέσω επίπλευσης (Zailani and Zin, 2018; Nippatla and Philip, 2020). Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται οι σημαντικότερες χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την ηλεκτροκροκίδωση με χρήση ηλεκτροδίων αλουμινίου και σιδήρου.

Πίνακας 6. *Κύριες χημικές αντιδράσεις κατά την ηλεκτροκροκίδωση με χρήση ηλεκτροδίων αλουμινίου ή σιδήρου (L. K. Wang, Y.-T. Hung, 2005).*

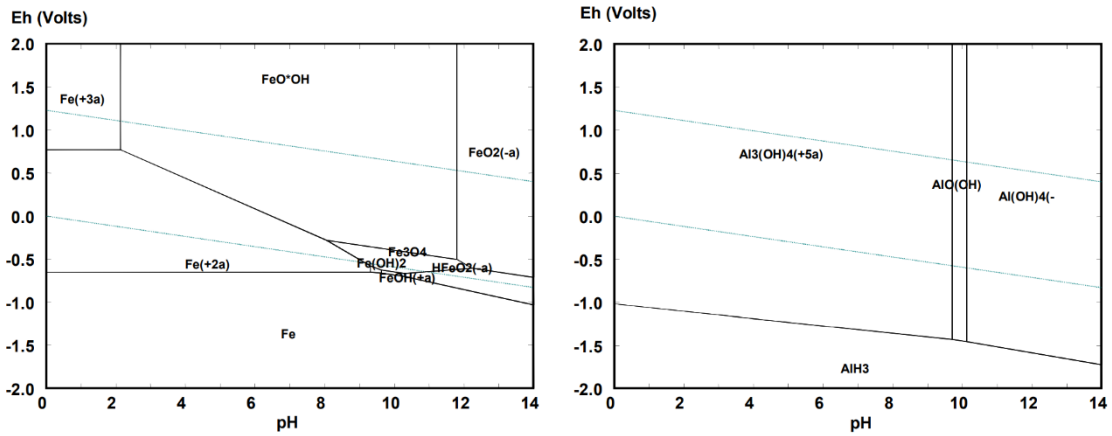
Σημείο	**Αντίδραση**[α]
Άνοδος	$4OH^- = 2H_2O + O_2 + 4e^-$
	$2Cl^- = Cl_2 + 2e^-$
	$Al = Al^{3+} + 3e^-$ (όταν χρησιμοποιείται Al)
	$Fe = Fe^{2+} + 2e^-$ (όταν χρησιμοποιείται Fe)
Κάθοδος	$2H^+ + 2e^- = H_2(g)$
	$O_2 + 2H_2O + 4e^- = 4OH^-$
Διάλυμα	$nAl^{3+} + mOH^- = Al_n(OH)_m^{3n-m}$(όταν χρησιμοποιείται Al)
	$iFe^{2+} + jOH^- + kH_2O = Fe_i(H_2O)_k(OH)_j^{2i-j}$(όταν χρησιμοποιείται Fe)
	$4Fe^{2+} + 10H_2O + O_2 = 4Fe(OH)_3(g) + 8H^+$(όταν χρησιμοποιείται Fe)
	$Fe^{2+} + 4H^+ + O_2 = Fe^{3+} + 2H_2O$(όταν χρησιμοποιείται Fe)
	$iiFe^{3+} + jjOH^- + kkH_2O = Fe_{ii}(H_2O)_{kk}(OH)_{jj}^{2ii-jj}$(όταν χρησιμοποιείται Fe)

[α] *i, j, k, m, ii, jj, RR, and n = 0, 1, 2, ….*

Παρακάτω παρουσιάζονται οι σημαντικότερες παράμετροι για την βελτίωση της απόδοσης της συγκεκριμένης μεθόδου. Γενικά η απόδοση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το pH, την ηλεκτρική αγωγιμότητα, τη θερμοκρασία, τη πυκνότητα ρεύματος (A/m^2), το χρόνο αντίδρασης, τη συγκέντρωση των ρύπων, το υλικό και τη διάταξη των ηλεκτροδίων (An *et al.*, 2017; Naje *et al.*, 2017; Zailani and Zin, 2018; Nippatla and Philip, 2020; Vepsäläinen and Sillanpää, 2020).

Το pH επηρεάζει τη διεργασία της ηλεκτροκροκίδωσης με διάφορους τρόπους. Αρχικά επιδρά στα κολλοειδή στερεά με τον ίδιο τρόπο που επιδρά και κατά τη συμβατική μέθοδο κροκίδωσης - συσσωμάτωσης. Δηλαδή, όσο αποκλίνει το pH από το ισοηλεκτρικό σημείο του συστήματος τόσο μεταβάλλεται και το φορτίο των στερεών. Επίσης το pH επιδρά στον σχηματισμό των υδροξειδίων των μετάλλων. Ανάλογα τη περίπτωση υπάρχει ένα

συγκεκριμένο εύρος τιμών στο οποίο πληρούνται οι προϋποθέσεις για το σχηματισμό των αντίστοιχων υδροξειδίων. Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η σχέση του pH με το σχηματισμό διάφορων υδροξειδίων για ένα εύρος τιμών REDOX από -2 έως 2 Volts και για τις δυο περιπτώσεις ηλεκτροδίων: α) ηλεκτρόδια από σίδηρο και β) ηλεκτρόδια από αλουμίνιο (Vepsäläinen and Sillanpää, 2020).

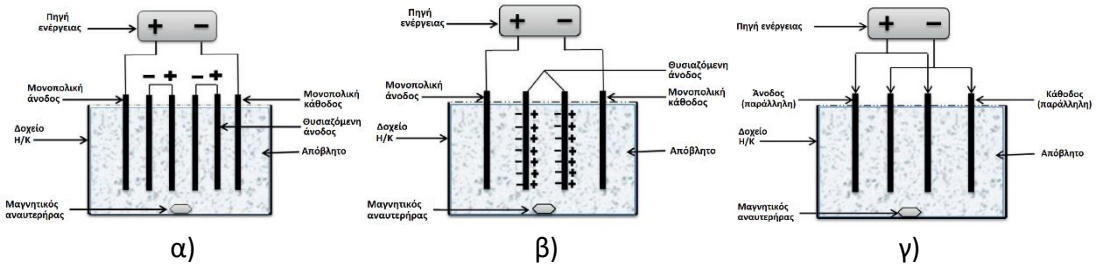


Σχήμα 6. *Σχηματισμός υδροξειδίων για διάφορες τιμές pH και REDOX για δυο περιπτώσεις: α) ηλεκτρόδια από σίδηρο και β) ηλεκτρόδια από αλουμίνιο (Vepsäläinen and Sillanpää, 2020).*

Η θερμοκρασία επηρεάζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα, τους ρυθμούς αντιδράσεων και την δημιουργία κροκίδων. Σε κάθε περίπτωση ρύπου αντιστοιχεί διαφορετική θερμοκρασία για μέγιστη απομάκρυνση (Vepsäläinen and Sillanpää, 2020).

Το υλικό των ηλεκτροδίων είναι σημαντικός παράγοντας καθώς καθορίζει τις αντιδράσεις που θα λάβουν χώρα κατά τη διεργασία της ηλεκτροκροκίδωσης. Η επιλογή του υλικού εξαρτάται από το είδος του προς απομάκρυνση ρύπου. Σε γενικές γραμμές το αλουμίνιο είναι πιο αποδοτικό αλλά έχει μεγαλύτερο κόστος. Ο συνδυασμός των παραπάνω δύο υλικών προτιμάται σε αρκετές περιπτώσεις καθώς δίνει αρκετά καλή απόδοση σε απόβλητα που περιέχουν υψηλό COD, χρώμα, φαινόλες και βαρέα μέταλλα (Naje *et al.*, 2017; Zailani and Zin, 2018).

Η διάταξη των ηλεκτροδίων μπορεί να είναι είτε μονοπολική (monopolar) είτε διπολική (bipolar). Συγκρίνοντας τις δυο μεθόδους προκύπτει ότι στη περίπτωση της διπολικής διάταξης επιτυγχάνεται μεγαλύτερη απομάκρυνση ρύπων αλλά και μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας για τον ίδιο όγκο αποβλήτων (Naje *et al.*, 2017). Η μονοπολική διάταξη μπορεί να είναι είτε παράλληλη είτε σε σειρά. Παρακάτω στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται σχηματικά και οι τρεις διατάξεις ηλεκτροδίων.



Σχήμα 7. *Σχηματική απεικόνιση αντιδραστήρα ηλεκτροκροκίδωσης με διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων: α) Μονοπολική παράλληλη β) Μονοπολική σε σειρά και γ) Διπολική παράλληλη* (Naje *et al.*, 2017).

Πολύ σημαντικό ρόλο παίζει επίσης και η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Εάν είναι πολύ κοντά, μειώνεται η αποδοτικότητα γιατί το κροκιδωτικό που παράγεται δεν

προλαβαίνει να σχηματίσει κροκίδες λόγο της μεγάλης ηλεκτροστατικής έλξης. Εάν είναι πολύ μακριά, επίσης μειώνεται η απόδοση καθώς δεν υπάρχει επαρκής ηλεκτρική έλξη ώστε να βοηθήσει τις κροκίδες να σχηματιστούν.

Η πυκνότητα του ρεύματος είναι ανάλογη με την ποσότητα των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου (Vepsäläinen and Sillanpää, 2020). Επηρεάζει τον ρυθμό παραγωγής του κροκιδωτικού, τη δημιουργία φυσαλίδων H_2 και τα χαρακτηριστικά των κροκίδων. Υψηλότερη πυκνότητα ρεύματος σημαίνει καλύτερη απομάκρυνση COD καθώς δημιουργούνται περισσότερες κροκίδες και αέριο H_2. Παρόλα αυτά εάν ξεπεραστεί η βέλτιστη τιμή του συστήματος δεν παρατηρείται περαιτέρω βελτίωση (Naje *et al.*, 2017; Zailani and Zin, 2018).

Ο χρόνος αντίδρασης είναι επίσης ανάλογος με τη ποσότητα ηλεκτροχημικών αντιδράσεων που λαμβάνου χώρα στο σύστημα. Επομένως μεγαλύτερος χρόνος αντίδρασης σημαίνει μεγαλύτερη απομάκρυνση ρύπων. Και σε αυτή τη περίπτωση, αύξηση του χρόνου αντίδρασης πέρα από το βέλτιστο σημείο δεν επιφέρει περαιτέρω βελτίωση (Naje *et al.*, 2017; Vepsäläinen and Sillanpää, 2020).

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι σημαντικός παράγοντας διότι επηρεάζει την κατανάλωση ενέργειας κατά την ηλεκτροκροκίδωση. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα μέσα σε ένα απόβλητο τόσο ευκολότερα θα περάσει ηλεκτρικό ρεύμα μέσα από αυτό. Επίσης, για σταθερή παροχή ενέργειας, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας τόσο μεγαλύτερη είναι και η πυκνότητα του ρεύματος. Επομένως μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη απομάκρυνση ρύπων χωρίς να αυξηθεί η κατανάλωση ενέργειας (Naje *et al.*, 2017).

Η υψηλή συγκέντρωση των ρύπων μειώνει την απόδοση απομάκρυνσης τους από το υγρό διότι από ένα σημείο και έπειτα σταματάει να αρκεί η ποσότητα του κροκιδωτικού που παράγεται (Naje *et al.*, 2017).

2.2.4. Καθίζηση

Διάφορες μέθοδοι εφαρμόζονται για τον διαχωρισμό στερεών υλικών από ένα υγρό μέσο με πιο συνηθισμένες αυτές της καθίζησης, της επίπλευσης και της φίλτρανσης. Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται αυτή της καθίζησης. Με τον όρο καθίζηση εννοείται η διεργασία κατά την οποία τα στερεά σωματίδια έλκονται προς μια συγκεκριμένη πηγή έλξης. Όταν η δύναμη που δρα είναι αυτή της βαρύτητας τότε η διεργασία ονομάζεται βαρυτική καθίζηση (Arcadio P. Sincero, 2003).

Γενικά ισχύει ότι τα στερεά σωματίδια που βρίσκονται μέσα στο υγρό μέσο μπορούν να καθιζάνουν λόγο της βαρύτητας, με την προϋπόθεση ότι το ειδικό βάρος του στερεού ξεπερνάει αυτό του υγρού. Στο νερό συγκεκριμένα τα στερεά που συναντώνται συνήθως ως ρύποι έχουν μεγαλύτερο ειδικό βάρος και επομένως καθιζάνουν χωρίς πρόβλημα. Παρατηρείται όμως ότι όσο μικραίνει ο όγκος των στερεών σωματιδίων, τόσο μειώνεται η ταχύτητα καθίζησης τους (βλ. Πίνακα 7). Παρατηρείται επίσης ότι για τα κολλοειδή στερεά αυτή η ταχύτητα πρακτικά μηδενίζεται. Αυτό συμβαίνει καθώς το μικρότερο μέγεθος στερεών σωματιδίων συνεπάγεται μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια. Επομένως είναι πιο έντονη η επίδραση των ηλεκτροστατικών δυνάμεων από τη βαρυτική έλξη και τα σωματίδια παραμένουν σε αιώρηση (κίνηση Brownian) (John Bratby, 2016).

Στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται διάφορα μεγέθη στερεών σωματιδίων ίδιου ειδικού βάρους και οι χρόνοι που χρειάζονται ώστε να καθιζάνουν 100 mm στο νερό σε συνθήκες πλήρους ηρεμίας. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί για την απομάκρυνση των κολλοειδών στερεών απαιτούνται μη ρεαλιστικοί χρόνοι καθίζησης. Επομένως για την απομάκρυνση των συγκεκριμένων ρύπων η βαρυτική καθίζηση μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε συνδυασμό με κάποια άλλη μέθοδο η οποία μειώνει την ειδική επιφάνεια ή/και εξουδετερώνει το ηλεκτροστατικό φορτίο.

Πίνακας 7. *Χρόνοι καθίζησης σωματιδίων ανάλογα με το μέγεθος τους* (John Bratby, 2016).

Μέγεθος σωματιδίου (mm)	**Κατηγοριοποίηση**	**Συνολική επιφανεια σωματιδίου (m^2/cm^3)**	**Απαιτούμενος χρόνος για καθίζηση σωματιδίου 100 mm (για ειδικό βάρος = 2,65)**
10	Χονδροειδή (ορατά με γυμνό μάτι)	6×10^{-4}	0,1 δευτερόλεπτο
1		6×10^{-3}	1 δευτερόλεπτο
10^{-1}		6×10^{-2}	13 δευτερόλεπτα
10^{-2}	Λεπτόκοκκα (ορατά με μικροσκόπιο)	0,6	11 λεπτά
10^{-3}		6	20 ώρες
10^{-4}		60	80 ημέρες
10^{-5}	Κολοειδή (υπομικροσκοπικά)	600	2 χρόνια
10^{-6}		6.000	20 χρόνια

2.2.5. Φίλτρανση

Η φίλτρανση είναι επίσης μια μέθοδος κατά την οποία γίνεται διαχωρισμός των στερεών υλικών από ένα υγρό μέσο. Εφαρμόζεται κυρίως για την απομάκρυνση κολλοειδών και αιωρούμενων στερεών ρύπων από το νερό. Άλλοι ρύποι που μπορεί να απομακρύνει η συγκεκριμένη μέθοδος είναι τα βακτήρια, οι ιοί και τα βαρέα μέταλλα (Arcadio P. Sincero, 2003; Hoslett *et al.*, 2018).

Για την εφαρμογή της χρησιμοποιούνται διάφορα πορώδη υλικά μέσα από τα οποία περνάει το ρευστό και κατακρατούνται τα στερεά. Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι το βαμβάκι, το μαλλί, οι ίνες γυαλιού, ο πορώδης άνθρακας και τα μέταλλα. Ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται ως πληρωτικό μέσο, η μέθοδος χωρίζεται σε συμβατική ή προχωρημένη φίλτρανση. Το πληρωτικό υλικό ενός συμβατικού φίλτρου μπορεί να αποτελείται από διάτρητες πλάκες, υφαντά ή κοκκώδη υλικά. Ενώ κατά τη προχωρημένη μέθοδο χρησιμοποιούνται μεμβράνες (Arcadio P. Sincero, 2003; L. K. Wang, Y.-T. Hung, 2005; Murat Eyvaz, Serkan Arslan, 2016).

Κατά τη συμβατική μέθοδο η διεργασία της φίλτρανσης λαμβάνει χώρα σε όλο το βάθος του φίλτρου καθώς κάθε μεμονωμένο στοιχείο του υλικού έχει τη δυνατότητα να απορροφήσει ρύπους. Αντίθετα κατά τη προχωρημένη μέθοδο οι ρύποι δεν διαπερνούν τις μεμβράνες αλλά συσσωρεύονται ανάντη της ροής του υγρού. Βάση των παραπάνω η συμβατική μέθοδος λέγεται και φίλτρανση βάθους (depth filtration) ενώ η προχωρημένη επιφανειακή φίλτρανση (surface filtration) (Murat Eyvaz, Serkan Arslan, 2016).

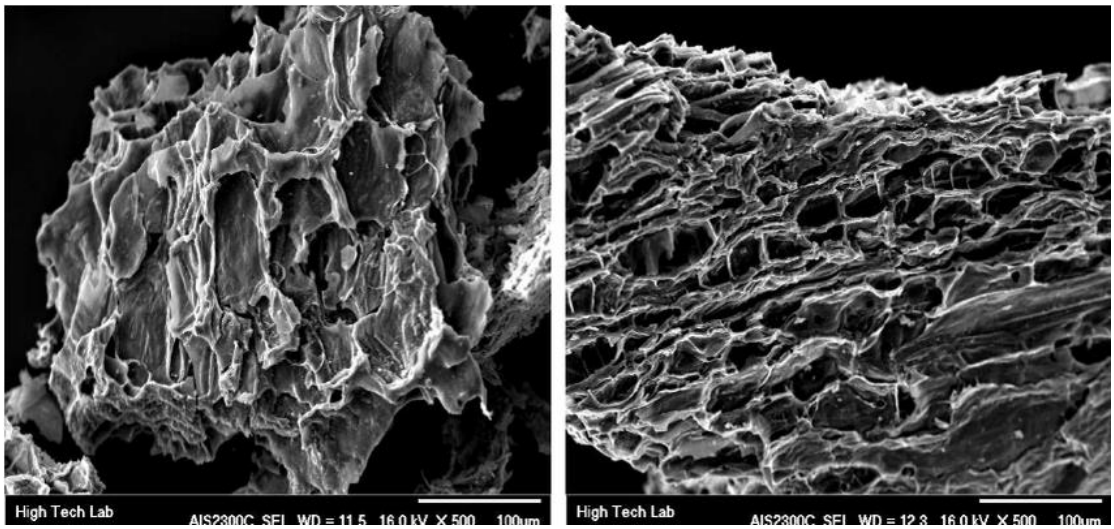
Ένας ακόμα διαχωρισμός της μεθόδου μπορεί να γίνει ανάλογα με τη κινητήρια δύναμη μέσω της οποίας ρέει το υγρό μέσα στο φίλτρο. Εάν η ροή του υγρού οφείλεται αποκλειστικά στη βαρυτική δύναμη τότε πρόκειται για φίλτρο βαρύτητας. Στη περίπτωση που ασκείται πίεση στο υγρό ώστε να κινηθεί πρόκειται για φίλτρο πίεσης. Εάν η ροή δημιουργείται μέσω υποπίεσης πρόκειται για φίλτρο κενού (Arcadio P. Sincero, 2003; L. K. Wang, Y.-T. Hung, 2005).

Κατά τη διεργασία της φίλτρανσης λαμβάνουν χώρα διάφοροι μηχανισμοί είτε μεταφοράς των ρύπων ανάμεσα από το υλικό του φίλτρου είτε προσκόλλησης σε αυτό. Η μεταφορά επηρεάζεται κυρίως από τις δυνάμεις αδράνειας και βαρύτητας, από τις υδροδυναμικές δυνάμεις και από το φαινόμενο της διάχυσης. Η προσκόλληση των ρύπων στο υλικό του φίλτρου επηρεάζεται από την πίεση του ρευστού, τις χημικές δυνάμεις, τη τριβή και τις επιφανειακές δυνάμεις (π.χ. van der Waals) (L. K. Wang, Y.-T. Hung, 2005).

Ιδιαίτερο ρόλο στη μέθοδο της φίλτρανσης παίζει η διεργασία της προσρόφησης (adsorption). Η προσρόφηση βασίζεται στην ιδιότητα των στερεών υλικών να έλκουν στην επιφάνεια τους διάφορα άλλα υλικά. Αυτό συμβαίνει καθώς σε ατομικό επίπεδο δεν υπάρχει ισορροπία δυνάμεων κοντά στην επιφάνεια του υλικού σε αντίθεση με το εσωτερικό του. Το αποτέλεσμα είναι οι ρύποι να προσκολλώνται στην επιφάνεια του προσροφητικού υλικού. Όταν η παραπάνω διεργασία λαμβάνει χώρα λόγο των δυνάμεων van der Waals τότε ονομάζεται φυσική προσρόφηση και είναι αρκετά ασθενής, ενώ όταν σχηματίζονται χημικοί δεσμοί ονομάζεται χημική προσρόφηση και είναι πολύ πιο ισχυρή (L. K. Wang, Y.-T. Hung, 2005).

Απαραίτητη προϋπόθεση για αποδοτική προσρόφηση είναι το προσροφητικό υλικό να έχει μεγάλη ειδική επιφάνεια με την οποία να μπορεί να έρθει σε επαφή ο ρύπος. Το υλικό που χρησιμοποιείται συνήθως είναι άνθρακας τεμαχισμένος σε μικρά κομμάτια των μερικών mm ή ακόμα και σκόνη ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζεται. Η απόδοση του συγκεκριμένου υλικού μπορεί να ενισχυθεί περεταίρω ενεργοποιώντας το. Η

ενεργοποίηση γίνεται μέσω χρήσης ατμού σε υψηλή θερμοκρασία. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία πόρων στην επιφάνεια του και επομένως η αύξηση της ειδικής του επιφάνειας. Παρακάτω στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα επιφάνειας ενεργού άνθρακα πριν και μετά την ενεργοποίηση του υλικού (L. K. Wang, Y.-T. Hung, 2005).



Σχήμα 8. *Φωτομικρογραφία άνθρακα πριν από τη διαδικασία της ενεργοποίησης (α) και μετά (β) (Khaniabadi et al., 2015).*

3. Υλικά και μέθοδοι

3.1. Υλικά

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα υλικά και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκαν για τα εργαστηριακά πειράματα που έγιναν σε όλα τα απόβλητα, καθώς και για τη πιλοτική εφαρμογή και την εφαρμογή στο πεδίο για την επεξεργασία του αποβλήτου απολαστιχοποίησης.

Στο εργαστήριο έγιναν πειράματα σε τρία διαφορετικά απόβλητα. Το βασικό απόβλητο ήταν αυτό της απολαστιχοποίησης αεροδιαδρόμου, ενώ στα πλαίσια της διερεύνησης της εφαρμογής του συστήματος κινητής μονάδας φυσικοχημικής επεξεργασίας και σε άλλα απόβλητα έγιναν πειράματα σε απόβλητο από παραγωγή βρώσιμης ελιάς και απόβλητο βυρσοδεψείου. Διευκρινίζεται ότι κατά τη πιλοτική εφαρμογή και την εφαρμογή στο πεδίο χρησιμοποιήθηκαν μόνο απόβλητα απολαστιχοποίησης.

3.1.1. Εργαστηριακά πειράματα

Εντός του εργαστηρίου έγιναν πειράματα σε απόβλητα απολαστιχοποίησης, απόβλητα από επεξεργασία βρώσιμης ελιάς και απόβλητα βυρσοδεψείου. Παρακάτω παρουσιάζονται τα υλικά και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση των πειραμάτων.

Τα απόβλητα απολαστιχοποίησης αεροδιαδρόμου συλλέχθηκαν από αεροδρόμιο. Για τη διεργασία της οξείδωσης χρησιμοποιήθηκε υπεροξείδιο του (H_2O_2). Για τη διεργασία της κροκίδωσης-συσσωμάτωσης χρησιμοποιήθηκε Ferisol και PAC (17-18%). Για τη διεργασία της φίλτρανσης, χρησιμοποιήθηκαν χάρτινα φιλτράκια (0.45 μm), διηθητικό χαρτί, άμμος, χαλαζιακή άμμος, ψείρα, ζεόλιθος και ενεργός άνθρακας.

Τα απόβλητα από την επεξεργασία βρώσιμης ελιάς συλλέχθηκαν από οξειδωτική λίμνη όπου συλλέγονται απόβλητα από διάφορες εγκαταστάσεις επεξεργασίας βρώσιμης ελιάς. Η διεργασία της ηλεκτροκροκίδωσης έγινε με ηλεκτρόδια αλουμινίου και σιδήρου. Η φίλτρανση των ηλεκτροκροκιδωμένων αποβλήτων έγινε μέσω διηθητικού χαρτιού.

Τα απόβλητα βυρσοδεψείου συλλέχθηκαν από βυρσοδεψείο. Για τη διεργασία της κροκίδωσης χρησιμοποιήθηκε Ferisol και PAC. Για τη διεργασία της φίλτρανσης χρησιμοποιήθηκαν ψείρα, χαλαζιακή άμμος και ενεργός άνθρακας. Η διεργασία της ηλεκτροκροκίδωσης έγινε με ηλεκτρόδια αλουμινίου και σιδήρου. Η φίλτρανση των ηλεκτροκροκιδωμένων αποβλήτων έγινε μέσω διηθητικού χαρτιού.

Για τα πειράματα της οξείδωσης και της κροκίδωσης-συσσωμάτωσης αρχικά χρησιμοποιήθηκαν κωνικές φιάλες όγκου 250 ml (βλ. Σχήμα 9). Στη περίπτωση της κροκίδωσης-συσσωμάτωσης η ανάδευση έγινε με μαγνητικό αναδευτήρα 6 θέσεων τύπου VELP Scientific F203A0177 (80 to 1500 RPM) (βλ. Σχήμα 10). Στη συνέχεια, έγιναν πειράματα κροκίδωσης-συσσωμάτωσης σε μεγαλύτερο δοχείο (jar tests) όπου χρησιμοποιήθηκε ποτήρι ζέσεως 2000 ml (βλ. Σχήμα 11). Η ανάδευση έγινε με μαγνητικό αναδευτήρα τύπου VELP AREX heating magnetic stirrer (50 to 1300 rpm) (βλ. Σχήμα 12).

Για τη διεργασία της φίλτρανσης, χρησιμοποιήθηκαν ως επιφανειακά φίλτρα διηθητικό χαρτί και χάρτινο φίλτρο (0,45 μm) (βλ. Σχήμα 13 και 14 αντίστοιχα) ενώ ως φίλτρο βάθους χρησιμοποιήθηκε κυλινδρικό δοχείο φίλτρανσης όγκου 0,42 L (11 cm ύψος x 7 cm διάμετρος) με οπές στο πάτο για την έξοδο του αποβλήτου (βλ. Σχήμα 15) το οποίο πληρωνόταν κατά περίπτωση με τα διάφορα πληρωτικά υλικά όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Παρακάτω από το Σχήμα 16 έως το Σχήμα 20 παρουσιάζονται τα εν λόγω πληρωτικά υλικά.

Για τη διεργασία της ηλεκτροκροκίδωσης χρησιμοποιήθηκε ένας αντιδραστήρας, ηλεκτρόδια και ένα σύστημα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Ως αντιδραστήρας χρησιμοποιήθηκε ένα ογκομετρημένο γυάλινο δοχείο όγκου 8 L (βλ. Σχήμα 21). Ως ηλεκτρόδια χρησιμοποιήθηκαν πλάκες αλουμινίου και σιδήρου πάχους 2 mm και διαστάσεων 150 mm x 250 mm (βλ. Σχήμα 22). Ως σύστημα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιήθηκε τροφοδοτικό πάγκου με 1 Κανάλι 30V 5A (Uni-T UTP3315TFL-II) (βλ. Σχήμα 23)

Σχήμα 9. *Κωνική φιάλη όγκου 250 ml.*

Σχήμα 10. *Μαγνητικός αναδευτήρας 6 θέσεων τύπου VELP Scientific F203A0177 (80 to 1500 RPM).*

Σχήμα 11. *Ποτήρι ζέσεως 2000 ml.*

Σχήμα 12. *Μαγνητικός αναδευτήρας τύπου VELP AREX heating magnetic stirrer (50 to 1300 rpm)*

Σχήμα 13. *Διηθητικό χαρτί.*

Σχήμα 14. *Χάρτινο φίλτρο (0,45 μm).*

Σχήμα 15. *Κενό δοχείο φίλτρανσης όγκου 0,42 L (11 cm ύψος x 7 cm διάμετρος).*

Σχήμα 16. *Άμμος*

Σχήμα 17. *Χαλαζιακή άμμος*

Σχήμα 18. *Ενεργός Άνθρακας*

Σχήμα 19. *Ζεόλιθος*

Σχήμα 20. *Ψείρα*

Σχήμα 21. *Γυάλινο δοχείο όγκου 9 L .*

Σχήμα 22. *Ηλεκτρόδια αλουμινίου και σιδήρου πάχους 2 mm και διαστάσεων 150 mm x 250 mm.*

Σχήμα 23. *Τροφοδοτικό Πάγκου με 1 Κανάλι 30V 5A (Uni-T UTP3315TFL-II)*

3.1.2. Πιλοτική εφαρμογή

Η πιλοτική εφαρμογή της μεθόδου κροκίδωσης-συσσωμάτωσης και καθίζησης σε συνδυασμό με φίλτρανση έγινε στο απόβλητο απολαστιχοποίησης αεροδιαδρόμου. Ως κροκιδωτικό υλικό χρησιμοποιήθηκε PAC (17-18%). Η φίλτρανση έγινε με φίλτρο βάθους πληρωμένο με 30% χαλαζιακή άμμο, 35% άμμο και 35% ψείρα.

Κατά την εφαρμογή, ως αντιδραστήρας χρησιμοποιήθηκε μια ογκομετρημένη παλετοδεξαμενή όγκου 1 m^3 (βλ. Σχήμα 24). Μια ίδια δεξαμενή χρησιμοποιήθηκε για την αποθήκευση των επεξεργασμένων αποβλήτων. Επίσης χρησιμοποιήθηκε μεταλλικό φίλτρο βάθους, ωφέλιμου όγκου 88 L (0,7m ύψος x 0,4m διάμετρος) (βλ. Σχήμα 25). Για την ανάδευση του αποβλήτου χρησιμοποιήθηκε αναδευτήρας τύπου Einhell TC-MX 1200 E με ηλεκτρονική ρύθμιση στροφών από 0 έως 680 RPM (βλ. Σχήμα 26) ενώ για την άντληση χρησιμοποιήθηκε φυγοκεντρική αντλία επιφάνειας DAB Jet 132 M (βλ. Σχήμα 27).

Σχήμα 24. *Παλετοδεξαμενή όγκου 1 m3.*

Σχήμα 25. *Μεταλλικό φίλτρο βάθους όγκου 88 L (0,7m ύψος x 0,4m διάμετρος).*

Σχήμα 26. *Αναδευτήρας τύπου Einhell TC-MX 1200 E (0 - 680 RPM)*

Σχήμα 27. *Φυγοκεντρική αντλία επιφάνειας DAB Jet 132 M.*

3.1.3. Εφαρμογή πλήρους κλίμακας

Για την εφαρμογή πλήρους κλίμακας επεξεργασίας αποβλήτου απολαστιχοποίησης αεροδιαδρόμου, όπου εφαρμόστηκε η μέθοδος της κροκίδωσης-συσσωμάτωσης και καθίζησης σε συνδυασμό με φίλτρανση, χρησιμοποιήθκε PAC (17-18%) ως κροκιδωτικό υλικό και 30% χαλαζιακή άμμος, 35% άμμος και 35% ψείρα ως πληρωτικό υλικό του φίλτρου.

Κατά την εφαρμογή, χρησιμοποιήθηκαν ως αντιδραστήρες ογκομετρημένες παλετοδεξαμενές όγκου 1 m^3 όπως ακριβώς και στη περίπτωση στην πιλοτικής δοκιμής. Για τη διεργασία της φίλτρανσης χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικά φίλτρα βάθους όγκου 442 L (1,15m ύψος x 0,7m διάμετρος) (βλ. Σχήμα 28). Για την ανάδευση του αποβλήτου χρησιμοποιήθηκαν αναδευτήρες παλετοδεξαμενής ((Fluko IBC-Container stirrer GMEC, 22 to 218 RPM) (βλ. Σχήμα 29). Για την άντληση των υπερκείμενων αποβλήτων χρησιμοποιήθηκε φυγοκεντρική αντλία επιφάνειας DAB Jet 132 M ενώ για την άντληση των ανεπεξέργαστων αποβλήτων και της λάσπης χρησιμοποιήθηκε υποβρύχια αντλία ακαθάρτων DAB FEKA 600 MA SV (βλ. Σχήμα 30). Για τη λειτουργία όλων των παραπάνω χρησιμοποιήθηκε μια πετρελαιοκίνητη κλειστή γεννήτρια (MIYAKE YDS6000TEB1 / 6,5 kVA) (βλ. Σχήμα 31).

Σχήμα 28. *Μεταλλικό φίλτρο βάθους όγκου 442 L (1,15m ύψος x 0,7m διάμετρος).*

Σχήμα 29. *Αναδευτήρας παλετοδεξαμενής (Fluko IBC-Container stirrer GMEC, 22 to 218 RPM)*

Σχήμα 30. *Υποβρύχια αντλία ακαθάρτων DAB FEKA 600 MA SV*

Σχήμα 31. *Πετρελαιοκίνητη κλειστή γεννήτρια (MIYAKE YDS6000TEB1 / 6,5 kVA)*

3.2. Μέθοδοι

3.2.1. Εργαστηριακά πειράματα

Για την απομάκρυνση των ρυπογόνων παραμέτρων από το απόβλητο απολαστιχοποίησης αρχικά εφαρμόστηκε η μέθοδος της φίλτρανσης. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε φίλτρο βάθους το οποίο στη πρώτη περίπτωση ήταν πληρωμένο με ενεργό άνθρακα ενώ στη δεύτερη περίπτωση με άμμο. Επισημαίνεται ότι τα φίλτρα ήταν πληρωμένα με 40% (v/v) του βασικού υλικού (άμμος και ενεργός άνθρακας αντίστοιχα) και 60% (v/v) με χαλίκια και άμμο διαφόρων διαμέτρων εφαρμοσμένης σε στρώματα για την αποφυγή ξεπλύματος του υλικού από το φίλτρο. Σε κάθε φίλτρο εφαρμόστηκε η μέθοδος τρεις (3) φορές, φιλτράροντας κάθε φορά ποσότητα ίση με 1,5 L η οποία είναι τουλάχιστον τρεις (3) φορές ο όγκος του φίλτρου (0,42 L). Ως κριτήριο σύγκρισης των δυο πληρωτικών υλικών χρησιμοποιήθηκε το ποσοστό απομάκρυνσης του COD.

Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε η μέθοδος της οξείδωσης σε συνδυασμό με φίλτρανση μέσω ενεργού άνθρακα. Για την οξείδωση χρησιμοποιήθηκε υπεροξείδιο του υδρογόνου (H_2O_2) συγκέντρωσης 50 % σε συγκεντρώσεις 120 και 240 mg/L. Έπειτα από την οξείδωση το απόβλητο πέρασε από το φίλτρο βάθους πληρωμένο με 40% (v/v) ενεργό άνθρακα και 60% (v/v) χαλίκια και άμμο διαφόρων διαμέτρων εφαρμοσμένη σε στρώματα. Το συγκεκριμένο πείραμα εφαρμόστηκε τρεις (3) φορές για κάθε διαφορετική συγκέντρωση H_2O_2 με 1,5 L αποβλήτου κάθε φορά. Ως κριτήριο σύγκρισης των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το ποσοστό απομάκρυνσης του COD.

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε η μέθοδος της κροκίδωσης – συσσωμάτωσης. Δοκιμές έγιναν με δύο διαφορετικά κροκιδωτικά υλικά Ferrisol (9%) και PAC (17-18%) τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σε διάφορες συγκεντρώσεις. Συγκεκριμένα το Ferrisol (9%) χρησιμοποιήθηκε σε συγκεντρώσεις 0,64 mg/L, 1,28 mg/L, 3,84 mg/L και 5,12 mg/L ενώ το PAC (17-18%) σε συγκεντρώσεις 0,685 mg/L, 1,37 mg/L, 5,48 mg/L και 6,85 mg/L. Ο τρόπος ανάμιξης σε όλες τις περιπτώσεις ήταν ο ίδιος, 2 λεπτά γρήγορη ανάμιξη (200 rpm) και 13 λεπτά αργή (80 rpm). Έπειτα από το τέλος της ανάμιξης το απόβλητο καθίζανε για 45 λεπτά Το συγκεκριμένο πείραμα έγινε μια (1) φορά με ποσότητα αποβλήτου 200 ml σε κάθε κωνική φαύλη όγκου 250 ml (βλ. Σχήμα 9). Ως κριτήριο σύγκρισης των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το ποσοστό απομάκρυνσης του COD και των TSS.

Από τα αποτελέσματα των παραπάνω πειραμάτων προσεγγίστηκε με μεγαλύτερη ακρίβεια το εύρος κατά το οποίο επιτυγχάνεται απομάκρυνση των ρύπων και έγιναν περεταίρω δοκιμές μεταξύ αυτών των συγκεντρώσεων. Συγκεκριμένα οι συγκενρτώσεις που δοκιμάστηκαν ήταν 0,685 mg/L, 0,959 mg/L, 1,233 mg/L, 1,507 mg/L, 1,781 mg/L και 2,055 mg/L. Το πείραμα έγινε σε δοχείο όγκου 2 L (jar test) μια (1) φορά για κάθε δόση κροκιδωτικού σε ποσότητα αποβλήτου 1,5 L.

Για τη περαιτέρω μείωση του COD στο κροκιδωμένο-συσσωματωμένο απόβλητο εφαρμόστηκε η μέθοδος της φίλτρανσης. Δοκιμές έγιναν στα εξής φίλτρα:

- Διηθητικό Χαρτί
- Χάρτινο Φίλτρο (0,45 μm)
- 60% Ενεργός Άνθρακας / 40% Χαλαζιακή Άμμος
- 40% Ενεργός Άνθρακας / 60% Χαλαζιακή Άμμος
- 30% Χαλαζιακή Άμμος / 35% Άμμος / 35% Ψείρα
- 30% Ζεόλιθος / 35% Άμμος / 35% Ψείρα

Σε όλες τις περιπτώσεις η ποσότητα αποβλήτου που περνούσε μέσα από τα φίλτρα βάθους ήταν 1,5 L και για τα επιφανειακά φίλτρα 0,25 L. Το παραπάνω πείραμα εφαρμόστηκε τρεις (3) φορές για κάθε φίλτρο.

Για τα απόβλητα βρώσιμης ελιάς εφαρμόστηκε η μέθοδος της ηλεκτροκροκίδωσης με χρήση ηλεκτροδίων αλουμινίου και σιδήρου. Η παροχή του ηλεκτρικού ρεύματος γινόταν από τροφοδοτικό πάγκου με 1 κανάλι 30V 5A (Uni-T UTP3315TFL-II). Στο πρώτο πείραμα, τοποθετήθηκαν δύο πλάκες πάχους 2 mm και διαστάσεων 150 mm x 250 mm από αλουμίνιο και σίδηρο αντίστοιχα. Οι πλάκες είχαν μεταξύ τους απόσταση ίση με 1 cm. Έπειτα συνδέθηκαν τα ηλεκτρόδια στο τροφοδοτικό και εφαρμόστηκε ρεύμα έντασης I = 5 A και τάσης V = 4.5 V, η πυκνότητα του ρεύματος ήταν ίση με J = 31,3 mA/cm2. Το πείραμα έτρεξε για 180 min.

Στη συνέχεια έγινε το ίδιο πείραμα με χαμηλότερη ένταση ρεύματος ίση με *I = 1,5 A* και τάση ίση με *V = 1,6 V*, η πυκνότητα του ρεύματος ήταν ίση με *J = 9,375 mA/cm2.* Το πείραμα αυτή τη φορά έτρεξε για 120 min.

Στο τρίτο πείραμα που έγινε χρησιμοποιήθηκαν δύο ζευγάρια ηλεκτροδίων αντί για ένα, δηλαδή σύνολο τέσσερεις πλάκες δύο αλουμινίου και δυο σιδερένιες. Η απόσταση μεταξύ των πλακών ανά ζευγάρι ήταν επίσης ίση με 1 cm ενώ οι δύο συστοιχίες είχαν μεταξύ τους απόσταση ίση με 3,7 cm. Η ένταση του ρεύματος ήταν ίση με *I = 5 A και η τάση* ίση με *V = 3,5 V*, η πυκνότητα του ρεύματος ήταν ίση με *J = 13,89 mA/cm2*. Το πείραμα έτρεξε για 120 min. Επιπλέον καταγράφηκε και η θερμοκρασία καθώς στα προηγούμενα πειράματα παρατηρήθηκε αύξηση.

Στο τέταρτο πείραμα μειώθηκε το pH στο 5,5 με προσθήκη 5 ml H_2SO_2. Κατά τα άλλα οι συνθήκες ήταν παρόμοιες με το προηγούμενο πείραμα. Χρησιμοποιήθηκαν δύο ζευγάρια ηλεκτροδίων, με απόσταση μεταξύ των πλακών ανά ζευγάρι ίση με 1 cm και απόσταση μεταξύ των συστοιχιών ίση με 2,9 cm. Η ένταση του ρεύματος ήταν ίση με *I = 5 A και η τάση* ίση με *V = 3,74 V*, η πυκνότητα του ρεύματος ήταν ίση με *J = 13,89 mA/cm2*. Το πείραμα έτρεξε για 120 min.

Στο πέμπτο πείραμα μειώθηκε το pH στο 4 με προσθήκη 5,5 ml H_2SO_2. Κατά τα άλλα οι συνθήκες ήταν παρόμοιες με το προηγούμενο πείραμα. Χρησιμοποιήθηκαν δύο ζευγάρια ηλεκτροδίων, με απόσταση μεταξύ των πλακών ανά ζευγάρι ίση με 1 cm και απόσταση μεταξύ των συστοιχιών ίση με 2,9 cm. Η ένταση του ρεύματος ήταν ίση με *I = 5 A και η τάση* ίση με *V = 4 V*, η πυκνότητα του ρεύματος ήταν ίση με *J = 13,89 mA/cm2*. Το πείραμα έτρεξε για 120 min.

Για τα απόβλητα βυρσοδεψείου αρχικά χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της κροκίδωσης – συσσωμάτωσης. Ως κροκιδωτικό υλικό χρησιμοποιήθηκε PAC (17-18%), το οποίο δοκιμάστηκε στις εξής συγκεντρώσεις: 0,548 mg/L, 1,096 mg/L, 1,644 mg/L, 1,918 mg/L, 2,192 mg/L , 2,740 mg/L και 3,288 mg/L. Ο τρόπος ανάμιξης σε όλες τις περιπτώσεις ήταν ίδιος, 2 λεπτά γρήγορη ανάμιξη και 13 λεπτά αργή.

Έπειτα από τη κροκίδωση-συσσωμάτωση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της φίλτρανσης. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε φίλτρο βάθους πληρωμένο με δυο στρώσεις ψείρα (2 x 15%) και ενδιάμεσα μια στρώση χαλαζιακή άμμο (30%) και μια στρώση ενεργό άνθρακα (40%). Το παραπάνω πείραμα εφαρμόστηκε τρεις (3) φορές με ποσότητα αποβλήτου 1,5 L κάθε φορά.

Τέλος, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ηλεκτροκροκίδωσης η οποία εφαρμόστηκε με συνολικά τέσσερα (4) ηλεκτρόδια, δυο (2) αλουμινίου και δυο (2) σιδήρου. Τα ηλεκτρόδια

τοποθετήθηκαν εναλλάξ σε διπολική (bipolar) διάταξη και ανάμεσα τους τοποθετήθηκε κομμάτι ξύλου πάχους 1 cm για μόνωση. Η τάση ήταν V = 8 V και το αρχικό pH ίσο με 5,3. Το πείραμα έτρεξε για ενενήντα (90) λεπτά

3.2.2. Πιλοτική εφαρμογή

Έπειτα από τον προσδιορισμό των βέλτιστων παραμέτρων επεξεργασίας του αποβλήτου απολαστιχοποίησης στο εργαστήριο, στήθηκε μια πιλοτική μονάδα ενός SBR αντιδραστήρα (Sequencing Batch Reactor = αντιδραστήρας διαλείπουσας λειτουργίας) δυναμικότητας επεξεργασίας 1 m3 ανά κύκλο εργασιών (κροκίδωση-συσσωμάτωση και καθίζηση) και ενός φίλτρου. Σκοπός της συγκεκριμένης μονάδας ήταν ο έλεγχος της απόδοσης της μεθόδου σε μεγαλύτερη κλίμακα και η σύγκριση με τις συνθήκες του εργαστηρίου

Η πιλοτική μονάδα αποτελούταν από δυο (2) παλετοδεξαμενές (IBC) όγκου 1 m3, ένα φίλτρο βάθους όγκου 88 L πληρωμένο με 30% χαλαζιακή άμμο, 35% άμμο και 35% ψείρα, έναν αναδευτήρα τύπου Einhell TC-MX 1200 E και μια φυγοκεντρική αντλία επιφάνειας DAB Jet 132 M.

Για τη λειτουργία της μονάδας τοποθετήθηκε 1 m3 αποβλήτου εντός της πρώτης δεξαμενής το οποίο αναδεύτηκε ώστε να επιτευχθεί ομοιογένεια. Στη συνέχεια προστέθηκε PAC (17-18%) σε συγκέντρωση 0,959 mg/L και αναδεύτηκε στην αρχή γρήγορα (200 rpm) για 2 λεπτά και στη συνέχεια αργά (80 rpm) για 13 λεπτά. Το πλέον κροκιδωμένο-συσσωματωμένο απόβλητο έμεινε σε κατάσταση ηρεμίας για 90 λεπτά μέχρι να καθιζάνει. Στη συνέχεια το υπερκείμενο υγρό αντλήθηκε από τη πρώτη στη δεύτερη δεξαμενή περνώντας μέσα από το φίλτρο.

3.2.3. Εφαρμογές πλήρους κλίμακας

Στη συνέχεια έγινε σχεδιασμός και εφαρμογή της μεθόδου στο πεδίο με σκοπό την επεξεργασία 12 m3 αποβλήτων απολαστιχοποίησης. Για την επεξεργασία χρησιμοποιήθηκαν έξι (6) παλετοδεξαμενές (IBC) όγκου 1 m3, ένα (1) φίλτρο όγκου 442 L πληρωμένο με 30% χαλαζιακή άμμο, 35% άμμο και 35% ψείρα, ένας (1) αναδευτήρας τύπου Einhell TC-MX 1200 E (0 - 680 RPM), δυο (2) φυγοκεντρικές αντλίες επιφάνειας (DAB Jet 132 M), δυο (2) υποβρύχιες αντλίες ακαθάρτων (DAB FEKA 600 MA SV) και μια (1) πετρελαιοκίνητη κλειστή γεννήτρια (MIYAKE YDS6000TEB1 / 6,5 kVA).

Κατά την εφαρμογή προστέθηκε PAC (17-18%) σε συγκέντρωση 0,959 mg/L και αναδεύτηκε στην αρχή γρήγορα (200 rpm) για 2 λεπτά και στη συνέχεια αργά (80 rpm) για 13 λεπτά. Το πλέον κροκιδωμένο-συσσωματωμένο απόβλητο έμεινε σε κατάσταση ηρεμίας για 120 λεπτά μέχρι να καθιζάνει. Στη συνέχεια το υπερκείμενο υγρό αντλήθηκε μέσα από το φίλτρο.

Στη συνέχεια σχεδιάστηκε και εφαρμόστηκε μονάδα για την επεξεργασία 110 m^3 αποβλήτων απολαστιχοποίησης αεροδιαδρόμου. Για την επεξεργασία τους χρησιμοποιήθηκαν τριάντα (30) παλετοδεξαμενές (IBC) όγκου 1 m^3, πέντε (5) φίλτρα όγκου 442 L πληρωμένα με 30% χαλαζιακή άμμο, 35% άμμο και 35% ψείρα, δυο (2) αναδευτήρες παλετοδεξαμενής (Fluko IBC-Container stirrer GMEC, 22 to 218 RPM), τέσσερεις (4) φυγοκεντρικές αντλίες επιφάνειας (DAB Jet 132 M), δυο (2) υποβρύχιες αντλίες ακαθάρτων (DAB FEKA 600 MA SV) και μια πετρελαιοκίνητη κλειστή γεννήτρια (MIYAKE YDS6000TEB1 / 6,5 kVA).

Κατά την εφαρμογή προστέθηκε PAC (17-18%) σε συγκέντρωση 0,959 mg/L και αναδεύτηκε στην αρχή γρήγορα (200 rpm) για 2 λεπτά και στη συνέχεια αργά (80 rpm) για 13 λεπτά. Το

πλέον κροκιδωμένο-συσσωματωμένο απόβλητο έμεινε σε κατάσταση ηρεμίας για 120 λεπτά μέχρι να καθιζάνει. Στη συνέχεια το υπερκείμενο υγρό αντλήθηκε μέσα από το φίλτρο.

3.2.4. Εργαστηριακές αναλύσεις

Κατά τη διάρκεια όλων των παραπάνω πειραμάτων και εφαρμογών, έγιναν εργαστηριακές αναλύσεις για το προσδιορισμό διάφορων φυσικοχημικών παραμέτρων των αποβλήτων. Συγκεκριμένα, οι αναλύσεις αφορούσαν το προσδιορισμό του pH, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC), του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD), των ολικών αιωρούμενων στερεών (TSS), των φαινόλων, του εξασθενούς χρωμίου (Cr^{+6}) και άλλων βαρέων μετάλλων. Παρακάτω παρουσιάζεται πίνακας με τις αναλύσεις και τις αντίστοιχες μεθόδους που εφαρμόστηκαν.

Πίνακας 8. *Εφαρμοζόμενες μέθοδοι προσδιορισμού φυσικοχημικών χαρακτηριστικών αποβλήτων.*

Τύποι δοκιμών / Μετρούμενες ιδιώτιτες	**Εφαρμοζόμενες μέθοδοι / Χρησιμοποιούμενες τεχνικές**
Προσδιορισμός pH	Standard Methods 4500-pH Value B
Προσδιορισμός Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας (EC)	Standard Methods 2510 B Condactivity
Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD)	ΕΛΟΤ EN ISO 15705 : 2002
Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS)	Standard Methods 2540 D
Φαινόλες (phenols)	EPA 420.1
Εξασθενές χρώμιο (Cr6)	APHA 3500-Cr D.
Κάδμιο (Cd)	APHA 3111 Metals by flame atomic absorption
Χαλκός (Cu)	APHA 3111 Metals by flame atomic absorption
Μόλυβδος (Pb)	APHA 3111 Metals by flame atomic absorption
Νικέλιο (Ni)	APHA 3111 Metals by flame atomic absorption
Ψευδάργυρος (Zn)	APHA 3111 Metals by flame atomic absorption

3.2.4.1. pH

Η μέτρηση του pH γινόταν με .τον φορητό μετρητή πολλαπλών παραμέτρων WTW Multi 3620 IDS. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε για την μέτρηση του pH είναι αυτή που αναφέρεται στο πρότυπο Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 4500-pH Value B Electrometric method. Η θερμοκρασία χώρου διατηρούνταν στους 25 ^{o}C (±4). Ξεπλένόταν το ηλεκτρόδιο του pH με απιονισμένο νερό, πάνω από το δοχείο αποβλήτων και ακολουθούταν η διαδικασία βαθμονόμησης του οργάνου.

Έπειτα από τη βαθμονόμηση γινόταν ο έλεγχος του οργάνου. Τα ηλεκτρόδια βυθίζονταν στο buffer 4, (υλικό αναφοράς Buffer solution (citric acid/sodium hydroxide/hydrogen chloride), traceable to SRM from NIST and PTB pH 4,00 (20°C) CertiPUR® / MERCK) και αναμενόταν να σταθεροποιηθεί η ένδειξη. Ομοίως για το buffer 7 (Buffer solution (di-sodium hydrogen phosphate/potassium dihydrogen phosphate), traceable to SRM from NIST and PTB pH 7,00 (20°C) CertiPUR®/ MERCK) και το buffer 10 Buffer solution (boric acid/ potassium chloride/ sodium hydroxide), traceable to SRM from NIST and PTB pH 10,00 (20 °C) CertiPUR®/ MERCK).

Αφού γινόταν ο έλεγχος του οργάνου ήταν έτοιμο για μέτρηση. Η μέτρηση γινόταν βυθίζοντας το ηλεκτρόδιο στο δείγμα, έπειτα από σταθεροποίηση της ένδειξης του οργάνου. Μετά το τέλος των μετρήσεων το ηλεκτρόδιο καθαρίζονταν με υπερκάθαρο νερό και στεγνή χειροπετσέτα και στη συνέχεια τοποθετούταν σε διάλυμα KCl 3 mol/L.

3.2.4.2. Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)

Η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας γινόταν με το πολυόργανο τύπου pH/Cond340i της εταιρείας WTW. Η θερμοκρασία χώρου διατηρούνταν στους 25 ^{o}C (±4). Η μέθοδος που ακολουθούταν για τον έλεγχο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι αυτή που αναφέρεται στο πρότυπο Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 2510 B Conductivity. Ξεπλένόταν το ηλεκτρόδιο EC με απιονισμένο νερό πάνω από το δοχείο αποβλήτων και ακολουθούταν η διαδικασία βαθμονόμησης του οργάνου.

Αφού γινόταν η βαθμονόμηση γινόταν ο έλεγχος του οργάνου. Αρχικά βυθίζονταν το ηλεκτρόδιο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο πρότυπο (υλικό αναφοράς Potassium chloride solution (nominal 0,146 mS/cm) (25°C), certified reference material for the measurement of electrolytic conductivity, traceable to PTB and NIST (c=0,001mol/L) CertiPUR® / MERCK) και αναμενόταν να σταθεροποιηθεί η ένδειξη. Στη συνέχεια βυθίζονταν το ηλεκτρόδιο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο πρότυπο (υλικό αναφοράς Potassium chloride solution (nominal 1,415 mS/cm) (25 ^{o}C), certified reference material for the measurement of electrolytic conductivity (c=0,01mol/l) CertiPUR® / MERCK) και αναμενόταν να σταθεροποιηθεί η ένδειξη

Αφού γινόταν ο έλεγχος του οργάνου ήταν έτοιμο για μέτρηση. Η μέτρηση γινόταν ξεπλένοντας το ηλεκτρόδιο EC με απεσταγμένο νερό και απορροφητικό χαρτί και βυθίζοντας το στο δείγμα το οποίο ήταν σε θερμοκρασία δωματίου 22 - 25 ^{o}C μέχρι να σταθεροποιηθεί η ένδειξη του οργάνου. Μετά το τέλος των μετρήσεων καθαριζόταν καλά με υπερκάθαρο νερό και απορροφητικό χαρτί και συντηρούταν σε υπερκάθαρο νερό. Το ηλεκτρόδιο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι ενεργό και σταθερό μόνο μετά από διύγρανση για το σκοπό αυτό εμβαπτιζόταν για τουλάχιστον δέκα ώρες σε απεσταγμένο νερό.

3.2.4.3. Χημικώς Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD)

Το χημικώς απαιτούμενο οξυγόνο (COD) εκφράζει το ποσό του οξυγόνου που προέρχεται από την οξείδωση ουσιών από διχρωμικό κάλιο, οι οποίες περιέχονται σε 1 λίτρο νερού κάτω από τις συνθήκες εργασίας της διαδικασίας. Το 1 mol $K_2Cr_2O_7$ ισοδυναμεί με 1,5 mol O_2. Τα αποτελέσματα εκφράζονται σε mg/l COD (= mg O_2/l). Κατά την εφαρμογή της μεθόδου το υγρό δείγμα οξειδώνεται με ζεστό θειικό διάλυμα διχρωμικού καλίου, που έχει ως καταλύτη θειικό άργυρο. Τα ιόντα χλωρίου δεσμεύονται με θειικό υδράργυρο. Η περιοχή συγκέντρωσης των ιόντων Cl^- ελέγχεται με το Merckoquant Chloride Test. Δείγματα που περιέχουν περισσότερο χλώριο από αυτό που δηλώνεται ως ανώτατο όριο στο κάθε κιτ, πρέπει να αραιώνονται με υπερκάθαρο νερό πριν τον προσδιορισμό του COD. Η συγκέντρωση των κίτρινων $Cr_2O_7^{2-}$ που δεν καταναλώθηκαν προσδιορίζονται φωτομετρικά. Η μέθοδος είναι ανάλογη με την ISO 15705.

Η μέτρηση γινόταν σε καλά ομογενοποιημένο δείγμα το οποίο τοποθετούνταν εντός κελιού ανάλογα με το εκτιμώμενο εύρος της συγκέντρωσης COD του κάθε δείγματος. Στη συνέχεια ακολουθούσε ζωηρή ανάδευση του περιεχομένου του κελιού, θέρμανση στους 148 ^oC σε προθερμασμένο θερμοαντιδραστήρα για δυο ώρες. Έπειτα αφαιρούνταν από τον θερμοαντιδραστήρα και αφηνόταν να κρυώσει για δέκα λεπτά όπου γινόταν περιδίνηση του κελιού και αφηνόταν να κρυώσει εντελώς. Τέλος γινόταν η μέτρηση στο φωτόμετρο.

3.2.4.4. Ολικά Στερεά (TS) και Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (TSS)

Ολικά στερεά (TS) είναι το στερεό υπόλειμμα που θα παραμείνει σε ένα δοχείο αφού εξατμιστεί το δείγμα και μετέπειτα θα γίνει η ξήρανση σε κλίβανο σε συγκεκριμένη θερμοκρασία. Τα ολικά στερεά περιλαμβάνουν τα ολικά διαλυμένα στερεά (TDS) δηλαδή την ποσότητα που παραμένει πάνω στο φίλτρο και τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS) δηλαδή την ποσότητα που περνάει μέσα από το φίλτρο.

Ο προσδιορισμός των TS γινόταν τοποθετώντας μια κάψα σε φούρνο στους 103-105 oC για τουλάχιστον μια ώρα. Στη συνέχεια η κάψα τοποθετούνταν σε ξηραντήρα μέχρι να κρυώσει. Έπειτα ζυγιζόταν και τοποθετούνταν καλά ομογενοποιημένο δείγμα αποβλήτου τόσο ώστε να δώσει υπόλειμμα από 2,5 έως 200 mg. Έπειτα από τη προσθήκη του δείγματος τοποθετούνταν σε φούρνο στους 103-105 ^oC. Η αύξηση του βάρους πέρα από την προζυγισμένη κάψα εκφράζει τα ολικά στερεά.

Ο προσδιορισμός των TSS γινόταν φιλτράροντας ομογενοποιημένο δείγμα μέσα από προζυγισμένο φίλτρο τύπου glass fiber. Η διαδικασία ζύγισης του φίλτρου ήταν ίδια με αυτή της κάψας στον προσδιορισμό των TS. Στη συνέχεια το φίλτρο με το δείγμα τοποθετούνταν σε φούρνο στους 103-105 oC. Η αύξηση του βάρους του φίλτρου εκφράζει τα ολικά αιωρούμενα στερεά

3.2.4.5. Φαινόλες

Όσο αφορά τον προσδιορισμό των φαινολών αυτές αντιδρούν με 4-αμινοαντιπυρίνη σε ρυθμιστικό διάλυμα, παρουσία οξειδωτικού μέσου, προς σχηματισμό ενός κόκκινου συστατικού το οποίο προσδιορίζεται φωτομετρικά. Επίσης αντιδρούν και οι όρθο- και μετα-υποκατεστημένες ενώσεις τους. Η μέθοδος είναι ανάλογη με την EPA 420.1. Το εύρος της μέτρησης είναι από 0,1 έως 5 mg/L phenol. Σε περίπτωση που χρειαστεί προσαρμογή στη συγκέντρωση χρησιμοποιείται διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου ή θειικό οξύ. Γενικότερα για φωτομετρικές μετρήσεις οι κυψελίδες πρέπει να είναι καθαρές. Αν χρειαστεί, γίνεται

καθαρισμός με ένα καθαρό πανί. Επίσης η μέτρηση θολών διαλυμάτων αποδίδει λανθασμένες υψηλές συγκεντρώσεις επομένως φιλτράρονται.

3.2.4.6. Εξασθενές Χρώμιο (Cr^{6+})

Σε ασθενές φωσφορικό διάλυμα τα ιόντα του εξασθενούς χρωμίου αντιδρούν με διφαινυλκαρβαζίδη προς σχηματισμό χρωμίου (III) και διφαινυλκαρβαζόνης, το οποίο σχηματίζει ένα κόκκινο-βιολετί σύμπλεγμα. Αυτό το σύμπλεγμα μετριέται φωτομετρικά. Η μέθοδος είναι ανάλογη της APHA 3500-Cr D. Το pH πρέπει να βρίσκεται στην περιοχή 1 - 9, εάν δεν είναι εντός των ορίων ρυθμίζεται με υδροξείδιο του νατρίου ή θειικό οξύ. Η μέτρηση θολών διαλυμάτων αποδίδει λανθασμένες υψηλές συγκεντρώσεις επομένως φιλτράρονται.

3.2.4.7. Βαρέα Μέταλλα

Η ανάλυση όλων των μετάλλων με φλόγα γίνεται βασισμένη στις πρότυπες μεθόδους APHA-AWWA-WEF 22nd Edition Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater “3111 Metals by flame atomic absorption” , American Public Health Association, Washington, 2012, και συμφωνούν με τις προϋπάρχουσες αποθηκευμένες στο λογισμικό του οργάνου SpectrAA Software. Ο προσδιορισμός των μετάλλων με φλόγα γίνεται χρησιμοποιώντας καυστήρα AIR/ACETYLENE. Το όργανο που διαθέτει το εργαστήριο για τον προσδιορισμό βαρέων μετάλλων σε φλόγα είναι Ατομική Απορρόφηση μοντέλο: VARIAN AA140/240/28.

Για την ανάλυση υγρών δειγμάτων αρχικά διηθείτε μια μικρή ποσότητα δείγματος 50 έως 100 ml από απλό διηθητικό χαρτί όταν η ζήτηση είναι για ολικά βαρέα μέταλλα και από φίλτρο 0,45 μm όταν η ζήτηση είναι για διαλυμένα βαρέα μέταλλα. Έπειτα γίνεται οξίνηση των δειγμάτων με προσθήκη κατάλληλης ποσότητας (HNO_3) MERCK Nitric Acid Suprapur 65 % στάγδην και εν συνεχεία μέτρηση του pH του δείγματος με pHμετρικό χαρτάκι. Το τελικό pH πρέπει να είναι μικρότερο του 2, με σκοπό να εξαλειφθούν κατά το δυνατό φαινόμενα καθίζησης και προσρόφησης των μετάλλων στο δοχείο δειγματοληψίας. Αν χρειαστεί προστίθενται επιπλέον και σταδιακά, μικροποσότητα HNO_3 65 % με συνεχή έλεγχο του pH, μέχρι να τιμής μικρότερης του 2.

Για την ανάλυση υγρών δειγμάτων που περιέχουν πολλά στερεά χρειάζεται πρώτα να γίνει χώνευση με νιτρικό οξύ. Το δείγμα μετά την χώνευση είναι σχεδόν διαυγές. Πριν τοποθετηθεί για μέτρηση πρέπει να διηθηθεί από διηθητικό χαρτί Σε περίπτωση που το δείγμα είναι στερεό αρχικά ξηραίνεται σε μια προζυγισμένη κάψα στους 105 ^{o}C για 6 ώρες. Στη συνέχεια γίνεται χώνευση με βασιλικό ύδωρ (3 HCl : 1 HNO3). Πριν τοποθετηθεί για μέτρηση πρέπει να διηθηθεί από διηθητικό χαρτί.

4. Ανάλυση αποτελεσμάτων

4.1. Απόβλητο απολαστιχοποίησης

Έπειτα από αναλύσεις που έγιναν στο ανεπεξέργαστο απόβλητο απολαστιχοποίησης, το οποίο προέκυψε από καθαρισμό αεροδιαδρόμου με τη μέθοδο της υδροβολής, βρέθηκε υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών και COD. Το pH ήταν κοντά στο ουδέτερο και η ηλεκτρική αγωγιμότητα περίπου 2 mS/cm. Παρακάτω παρουσιάζεται ο Πίνακας 9 με το σύνολο των αναλύσεων στο ανεπεξέργαστο απόβλητο. Οι εν λόγω αναλύσεις προέκυψαν από μίγμα ανεπεξέργαστων αποβλήτων που συλλέχθηκε από τρεις (3) διαφορετικές δεξαμενές αποθήκευσης και από τρία (3) διαφορετικά βάθη για κάθε δεξαμενή.

Πίνακας 9*. Αναλύσεις ανεπεξέργαστου αποβλήτου απολαστιχοποίησης.*

Παράμετρος	Μέθοδος	Μονάδες	Όριο ανίχνευσης	Αποτέλεσμα
pH (25°C)	Standard Methods 4500-pH Value B	pH units	-	6,6
Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (25°C)	Standard Methods 2510 B Condactivity	μS/cm	10	1775
Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (103–105°C)	Standard Methods 2540 D	mg/l	0,6	540
Χημικώς απαιτούμενο οξυγόνο (COD)	ΕΛΟΤ EN ISO 15705 : 2002	mg/l	10	2680
Κάδμιο (Cd)	APHA 3111 Metals by flame atomic absorption	μg/l	0,002	3,2
Χαλκός (Cu)	APHA 3111 Metals by flame atomic absorption	μg/l	0,025	189
Μόλυβδος (Pb)	APHA 3111 Metals by flame atomic absorption	μg/l	0,002	7,4
Νικέλιο (Ni)	APHA 3111 Metals by flame atomic absorption	μg/l	0,01	63
Ψευδάργυρος (Zn)	APHA 3111 Metals by flame atomic absorption	μg/l	0,1	18864

Για την απομάκρυνση των ρυπογόνων παραμέτρων από το παραπάνω απόβλητο αρχικά εφαρμόστηκε η μέθοδος της φίλτρανσης. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε φίλτρο βάθους το οποίο στη πρώτη περίπτωση ήταν πληρωμένο με ενεργό άνθρακα ενώ στη δεύτερη περίπτωση με άμμο. Ως κριτήριο σύγκρισης των δυο υλικών χρησιμοποιήθηκε το ποσοστό απομάκρυνσης του COD. Παρακάτω στον Πίνακα 10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

***Πίνακας 10**. Ποσοστό απομάκρυνσης COD έπειτα από φίλτρανση μέσω άμμου και μέσω ενεργού άνθρακα.*

Πληρωτικό υλικό φίλτρου βάθους	**Απομάκρυνση COD (%)**
Άμμος	33,8 ± 5,8
Ενεργός άνθρακας	77,2 ± 2,1

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα η απομάκρυνση του COD στη περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε φίλτρο πληρωμένο με άμμο ήταν ίση με 33,8% ενώ με φίλτρο ενεργού άνθρακα ήταν ίση με 77,2 %. Επομένως ως βέλτιστο πληρωτικό υλικό επιλέχθηκε ο ενεργός άνθρακας

Στη συνέχεια, για τη επίτευξη μεγαλύτερης απομάκρυνσης του COD εφαρμόστηκε η μέθοδος της οξείδωσης σε συνδυασμό με φίλτρανση μέσω ενεργού άνθρακα. Για την οξείδωση χρησιμοποιήθηκε υπεροξείδιο του υδρογόνου (H_2O_2) συγκέντρωσης 50 % σε διάφορες συγκεντρώσεις όπως φαίνεται παρακάτω στον Πίνακα 11. Έπειτα από την οξείδωση το απόβλητο πέρασε από το φίλτρο δίνοντας τα παρακάτω αποτελέσματα. Ως κριτήριο σύγκρισης των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το ποσοστό απομάκρυνσης του COD.

***Πίνακας 11**. Ποσοστό απομάκρυνσης COD έπειτα από οξείδωση με χρήση H_2O_2 (50%) σε διάφορες συγκεντρώσεις σε συνδυασμό με φίλτρανση μέσω φίλτρου βάθους πληρωμένο με 40% (v/v) ενεργό άνθρακα και 60% (v/v) άμμο.*

Συγκέντρωση H_2O_2 (50%) (mg/L)	**Απομάκρυνση COD (%)**
0	87,4 ± 4,2
120	77,9 ± 2,1
240	83,8 ± 6,4

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι η χρήση υπεροξειδίου του υδρογόνου δεν βελτίωσε την εκροή αλλά αντιθέτως μείωσε την απόδοση του φίλτρου. Επομένως η μέθοδος της οξείδωσης σε συνδυασμό με φίλτρανση απορρίφθηκε.

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε η μέθοδος της κροκίδωσης – συσσωμάτωσης. Δοκιμές έγιναν με δύο διαφορετικά κροκιδωτικά υλικά Ferrisol (9%) και PAC (17-18%) τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σε διάφορες συγκεντρώσεις. Στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η συγκέντρωση των TSS ήταν μη ανιχνεύσιμη (< 10 mg/L) θεωρήθηκε ίση με το όριο ανίχνευσης (10 mg/L). Παρακάτω στον Πίνακα 12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

***Πίνακας 12**. Ποσοστό απομάκρυνσης COD και TSS έπειτα από κροκίδωση-συσσωμάτωση και καθίζηση με χρήση Ferrisol (9%) και PAC (17-18%) σε διάφορες συγκεντρώσεις .*

Συγκέντρωση κροκιδωτικού (mg/L)	Ferrisol (9%)		PAC (17-18%)	
	Απομάκρυνση COD (%)	Απομάκρυνση TSS (%)	Απομάκρυνση COD (%)	Απομάκρυνση TSS (%)
0,640	70,2	84,3	-	-
0,685			84,7	> 98,1
1,280	75,9	89,1		
1,370	-	-	88,7	97,1
3,840	64,4	78,9	-	-
5,120	42,8	70,1	-	-
5,480	-	-	76,9	93,4
6,850	-	-	46,1	71,7

Από τα παραπάνω αποτελέσματα ως βέλτιστο κροκιδωτικό προέκυψε το PAC (17-18%) όπου σε συγκέντρωση 0,685 mg/L έδωσε απομάκρυνση COD και TSS ίση με 84,7 % και > 98,1 % και σε συγκέντρωση 1,37 mg/L έδωσε απομάκρυνση COD και TSS ίση με 88,7 % και 97,1 % αντίστοιχα. Περεταίρω δοκιμές έγιναν για συγκεντρώσεις μεταξύ 0,685 και 2,055 mg/L σε δοχείο όγκου 2 L (jar test) ώστε να προσεγγιστεί ακόμα καλύτερα η βέλτιστη δόση. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

***Πίνακας 13**. Ποσοστό απομάκρυνσης COD και TSS έπειτα από κροκίδωση-συσσωμάτωση και καθίζηση με χρήση Ferrisol (9%) και PAC (17-18%) σε διάφορες συγκεντρώσεις (jar test).*

Συγκέντρωση κροκιδωτικού (mg/L)	Απομάκρυνση COD (%)	Απομάκρυνση TSS (%)
0,685	85,6	> 97,8
0,959	92,0	> 97,8
1,233	92,2	96,8
1,507	83,5	97,3
1,781	82,8	94,9
2,055	82,4	95,6

Από τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι η βέλτιστη δόση είναι τα 0,959 mg/L, όπου παρατηρήθηκε απομάκρυνση COD και TSS ίση με 92,0 % και > 97,8 % αντίστοιχα.

Για τη περαιτέρω μείωση του COD στο κροκιδωμένο-συσσωματωμένο απόβλητο εφαρμόστηκε η μέθοδος της φίλτρανσης. Παρακάτω στον Πίνακα 14 παρουσιάζονται οι αποδόσεις που προέκυψαν για κάθε φίλτρο με κριτήριο το ποσοστό απομάκρυνσης του COD και των TSS.

***Πίνακας 14**. Ποσοστό απομάκρυνσης COD και TSS έπειτα από κροκίδωση-συσσωμάτωση και καθίζηση με χρήση PAC (17-18%) και φίλτρανση με διάφορα φίλτρα.*

Φίλτρο	**Απομάκρυνση COD (%)**	**Απομάκρυνση TSS (%)**
Διηθητικό Χαρτί	70,3 ± 1,2	91,7 ± 2,1
Χάρτινο Φίλτρο (0,45 μm)	95,3 ± 0,9	> 97,9
60% Ενεργός Άνθρακας / 40% Χαλαζιακή Άμμος	91,8 ± 3,0	94,6 ± 2,8
40% Ενεργός Άνθρακας / 60% Χαλαζιακή Άμμος	88,0 ± 6,7	93,0 ± 3,3
30% Χαλαζιακή Άμμος / 35% Άμμος / 35% Ψείρα	94,1 ± 1,3	> 97,9
30% Ζεόλιθος / 35% Άμμος / 35% Ψείρα	92,8 ± 1,7	> 97,9

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι τη μεγαλύτερη απομάκρυνση έδωσε η φίλτρανση μέσω φίλτρου 0,45 μm όπου το COD μειώθηκε κατά 95,3 % και τα TSS κατά τουλάχιστον 97,9 %. Κατά την εφαρμογή παρατηρήθηκε απότομη μείωση στη ροή του αποβλήτου μέσα από το φίλτρο. Η ίδια μέθοδος εφαρμόστηκε σε συνθήκες υποπίεσης για την επιτάχυνση της διαδικασίας. Παρατηρήθηκε η δημιουργία στρώματος στερεών πάνω στο φίλτρο και υπήρξε σταδιακή μείωση και διακοπή της ροής.

Η εφαρμογή με την αμέσως μεγαλύτερη απομάκρυνση τόσο του COD όσο και των TSS ήταν της φίλτρανσης μέσω φίλτρου βάθους πληρωμένο με 30% χαλαζιακή άμμο, 35% άμμο και 35% ψείρα. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε απομάκρυνση COD ίση 94,1 % και TSS ίση με τουλάχιστον 97,9 %. Κατά τη συγκεκριμένη εφαρμογή δεν υπήρξε πρόβλημα στη ροή του αποβλήτου και η εκροή οπτικά έμοιαζε με το αποτέλεσμα της προηγούμενης εφαρμογής.

Αντίστοιχη απομάκρυνση έδωσε και ή εφαρμογή της φίλτρανσης μέσω φίλτρου βάθους πληρωμένο με 30% ζεόλιθο, 35% άμμο και 35% ψείρα. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε απομάκρυνση COD ίση 92,8 % και TSS ίση με τουλάχιστον 97,9 %. Κατά τη συγκεκριμένη εφαρμογή όμως παρατηρήθηκε γρήγορα κορεσμός του φίλτρου καθώς η ροή σταμάτησε.

Η επόμενη πιο αποδοτική μέθοδος ήταν αυτή της φίλτρανσης μέσω φίλτρου βάθους πληρωμένου με 60% ενεργό άνθρακα και 40% άμμο. Στη συγκεκριμένη μέθοδο παρατηρήθηκε η μείωση της ροής του αποβλήτου σε σύντομο χρονικό διάστημα και σταδιακά ο κορεσμός του. Η απομάκρυνση του COD ήταν ίση με 91,8 % και των TSS ίση με 94,6 %.

Στη συνέχεια έγινε εφαρμογή φίλτρανσης μέσω φίλτρου βάθους πληρωμένου με 40% ενεργό άνθρακα και 60% στρωματοποιημένη άμμο. Σε αυτή τη περίπτωση παρατηρήθηκε μείωση της ροής του αποβλήτου αντίστοιχη με αυτή της προηγούμενης εφαρμογής ενώ ο κορεσμός του φίλτρου χρειάστηκε συγκριτικά μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Η απομάκρυνση του COD ήταν ίση με 88,0 % και των TSS ίση με 93,0 %.

Τη μικρότερη απομάκρυνση COD είχε η φίλτρανση του αποβλήτου μέσω διηθητικού χαρτιού (20 μm), κατά την οποία μειώθηκε σταδιακά η ροή του αποβλήτου αλλά δεν έφραξε. Η συγκεκριμένη μέθοδος είχε απομάκρυνση COD ίση με 70,3 % και TSS ίση με 91,7 %.

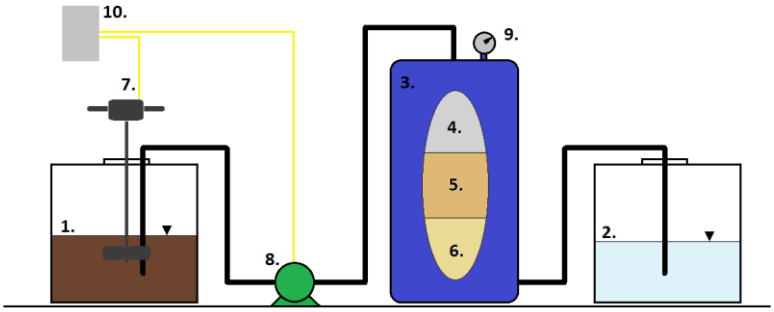
Συνοψίζοντας, όλα τα παραπάνω η βέλτιστη απόδοση επιτεύχθηκε με συνδυασμό μεθόδων επεξεργασίας και συγκεκριμένα με κροκίδωση-συσσωμάτωση-καθίζηση και φίλτρανση. Για τη κροκίδωση-συσσωμάτωση ως κροκιδωτικό υλικό επιλέχθηκε το PAC (17-18%) σε συγκέντρωση 0,959 mg/L. Οι συνθήκες κροκίδωσης-συσσωμάτωσης ήταν 2 λεπτά γρήγορη ανάμιξη (200 rpm) και 13 λεπτά αργή (80 rpm), ενώ η διεργασία της καθίζησης χρειάστηκε περίπου 45 λεπτά. Ως κατάλληλο φίλτρο προέκυψε το φίλτρο βάθους πληρωμένο με 33% ψείρα, 33% άμμο και 33% χαλαζιακή άμμο. Η απομάκρυνση ρύπων που επιτεύχθηκε από

τον παραπάνω συνδυασμό μεθόδων ήταν ίση με 94,1 % για τη περίπτωση του COD και τουλάχιστον ίση με 97,9 % για τη περίπτωση των TSS.

4.1.1. Πιλοτική δοκιμή

Έπειτα από τον προσδιορισμό των βέλτιστων παραμέτρων επεξεργασίας του αποβλήτου στο εργαστήριο, στήθηκε μια πιλοτική μονάδα ενός SBR αντιδραστήρα (Sequencing Batch Reactor = αντιδραστήρας διαλείπουσας λειτουργίας) δυναμικότητας επεξεργασίας 1 m^3 ανά κύκλο εργασιών (κροκίδωση-συσσωμάτωση και καθίζηση) και ενός φίλτρου.

Σκοπός της συγκεκριμένης μονάδας ήταν ο έλεγχος της απόδοσης της μεθόδου σε μεγαλύτερη κλίμακα και η σύγκριση με τις συνθήκες του εργαστηρίου. Παρακάτω στο Σχήμα 32 παρουσιάζεται διάγραμμα ροής με την συστοιχία των δεξαμενών, του φίλτρου και του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού.



1. *Ανεπεξέργαστο απόβλητο*
2. *Επεξεργασμένο απόβλητο*
3. *Φίλτρο βάθους*
4. *Πληρωτικό υλικό: Ψείρα*
5. *Πληρωτικό υλικό: Άμμος*
6. *Πληρωτικό υλικό: Χαλαζιακή άμμος*
7. *Αναδευτήρας*
8. *Αντλία*
9. *Μετρητής πίεσης*
10. *Πηγή ενέργειας*

Σχήμα 32. *Διάγραμμα ροής της πιλοτικής μονάδας αποτελούμενη από έναν αντιδραστήρα SBR 1 m^3 για κροκίδωση-συσσωμάτωση-καθίζηση και ένα φίλτρου βάθους όγκου 88 L.*

Δειγματοληψία και αναλύσεις έγιναν σε τρία σημεία, από το ανεπεξέργαστο απόβλητο, από το υπερκείμενο υγρό μετά τη καθίζηση και από την έξοδο του φίλτρου. Επίσης μετρήθηκε η στάθμη της λάσπης για τον προσδιορισμό του όγκου της. Παρακάτω στον Πίνακα 15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

Πίνακας 15*. Αναλύσεις COD και TSS κατά την εφαρμογή της πιλοτικής μονάδας επεξεργασίας αποβλήτων απολαστιχοποίησης.*

Παράμετρος	Ανεπεξέργαστο Απόβλητο	Υπερκείμενο υγρό έπειτα από καθίζηση	Έξοδος φίλτρου
COD (mg/L)	2402	524	146
TSS (mg/L)	404	15	<10

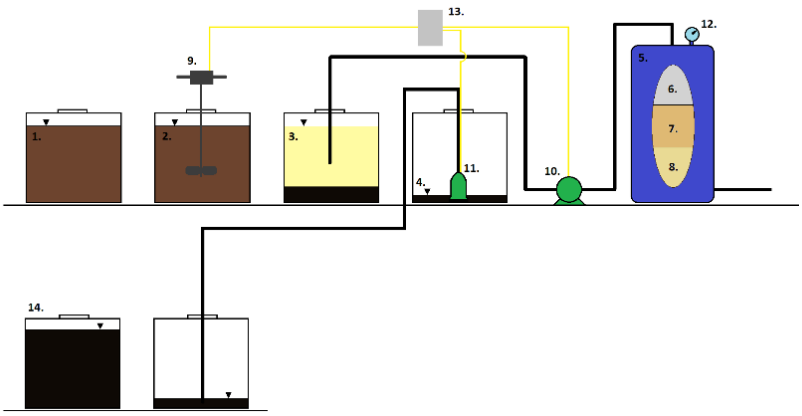
Βάση των παραπάνω αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η απομάκρυνση COD έπειτα από τη κροκίδωση-συσσωμάτωση-καθίζηση ήταν ίση με 78,2 % και έπειτα από τη φίλτρανση έφτασε στο 93,9 %. Αντίστοιχα το ποσοστό απομάκρυνσης TSS μετά τη κροκίδωση-συσσωμάτωση-καθίζηση ήταν ίσο με 96,3 % και έπειτα από τη φίλτρανση έφτασε σε απομάκρυνση τουλάχιστον κατά 97,5 %. Επιπρόσθετα στον πυθμένα της πρώτης δεξαμενής έμειναν 90 L λάσπης.

Συγκρίνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα με τα πειράματα που έγιναν στο εργαστήριο προκύπτει ότι κατά τη πιλοτική εφαρμογή η απομάκρυνση τόσο του COD όσο και των TSS ήταν μικρότερη. Η μέθοδος της κροκίδωσης-συσσωμάτωση και καθίζησης εντός του εργαστηρίου (jar test) έδωσε απομάκρυνση COD και TSS ίση με 92,0 % και τουλάχιστον 97,8 %, ενώ κατά τη πιλοτική εφαρμογή οι αντίστοιχες απομακρύνσεις ήταν 78,2 % και 93,9 %.

Όσο αφορά το συνδυασμό των δυο μεθόδων τα αποτελέσματα εντός του εργαστηρίου έδειξαν απομάκρυνση COD ίση με 94,1 % και TSS ίση με τουλάχιστον 97,9 %, ενώ οι αντίστοιχες απομακρύνσεις κατά τη πιλοτική εφαρμογή ήταν 93,9 % και τουλάχιστον 97,5 %. Το υδραυλικό φορτίου που δέχτηκε το φίλτρο κατά τη συγκεκριμένη εφαρμογή ήταν ίσο με 39,8 $m^3/m^2/hr$.

4.1.2. Εφαρμογές στο πεδίο

Έχοντας λάβει υπόψη τις παραπάνω παρατηρήσεις έγινε σχεδιασμός και εφαρμογή της μεθόδου στο πεδίο με σκοπό την επεξεργασία 12 m^3. Παρακάτω στο Σχήμα 33 παρουσιάζεται διάγραμμα ροής με την συστοιχία των δεξαμενών, του φίλτρου και του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού.



1. *Ανεπεξέργαστο απόβλητο*
2. *Κροκιδ/συσ. απόβλητο*
3. *Υπερκείμενο υγρό*
4. *Λάσπη καθίζησης*
5. *Φίλτρο*
6. *Πληρωτικό υλικό - Ψείρα*
7. *Πληρωτικό υλικό - Άμμος*
8. *Πληρωτικό υλικό - Χαλαζιακή άμμος*
9. *Αναδευτήρας*
10. *Επιφανειακή αντλία*
11. *Υποβρύχια αντλία*
12. *Μετρητής πίεσης*
13. *Πηγή ενέργειας*
14. *Λάσπη καθίζησης*

Σχήμα 33. *Διάγραμμα ροής της μονάδας επεξεργασίας αποβλήτων απολαστιχοποίησης, αποτελούμενη από τέσσερεις (4) αντιδραστήρες SBR 1 m^3 για κροκίδωση-συσσωμάτωση-καθίζηση και ένα (1) φίλτρο βάθους 442 L.*

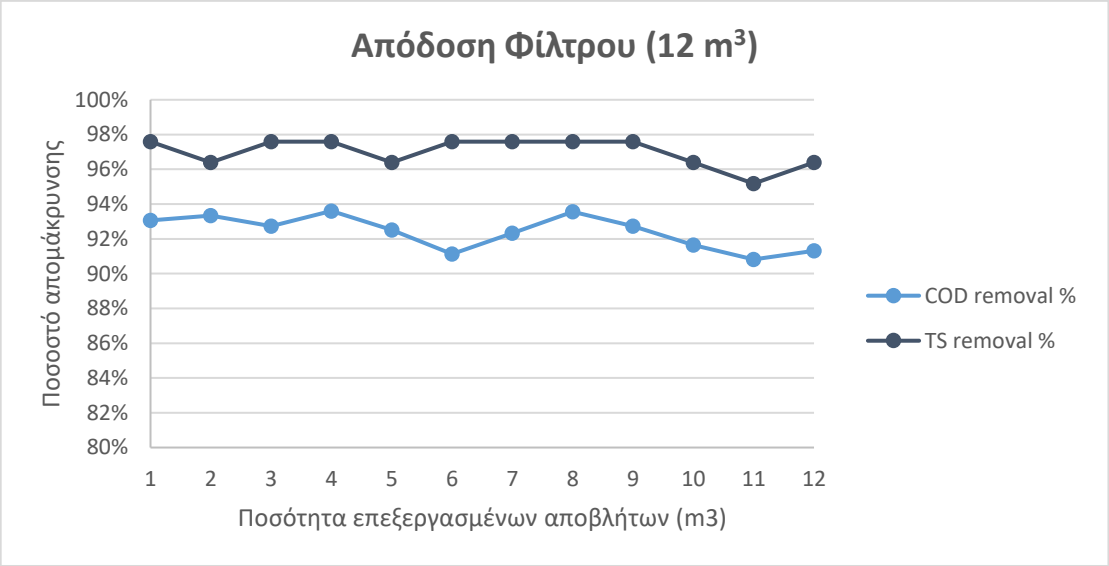
Από το σύνολο των δεξαμενών αρχικά χρησιμοποιήθηκαν και οι έξι (6) για τη διεργασία της κροκίδωσης-συσσωμάτωσης και καθίζησης και σταδιακά σε δύο (2) από αυτές έγινε η συλλογή της λάσπης. Συνολικά παράχθηκε λάσπη όγκου 1,1 m^2.

Δειγματοληψίες και αναλύσεις έγιναν από το ανεπεξέργαστο απόβλητο, από το υπερκείμενο υγρό μετά τη καθίζηση και από την έξοδο του φίλτρου. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

***Πίνακας 16**. Ποσοστό απομάκρυνσης COD και TSS κατά την εφαρμογή πλήρους κλίμακας επεξεργασίας 12 m³ αποβλήτων απολαστιχοποίησης στο πεδίο.*

Κύκλοι εργασιών (1 m³/κύκλο)	Ανεπεξέργαστο Απόβλητο		Υπερκείμενο υγρό έπειτα από καθίζηση		Έξοδος φίλτρου	
	COD (mg/L)	TSS (mg/L)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)
1	2189	415	207	<10	152	<10
2	-	-	-	-	146	15
3	-	-	256	10	159	<10
4	-	-	-	-	140	<10
5	-	-	262	10	164	15
6	2982	433	547	15	194	<10
7	-	-	-	-	168	<10
8	-	-	415	15	141	<10
9	-	-	-	-	159	<10
10	-	-	580	30	183	15
11	3015	651	653	30	201	20
12	-	-	-	-	190	15

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει το Σχήμα 34, στο οποίο απεικονίζεται η απόδοση του φίλτρου σε όρους % απομάκρυνση του COD και των TSS. Για τη δημιουργία του σχήματος στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η συγκέντρωση των TSS ήταν μη ανιχνεύσιμη (< 10 mg/L) θεωρήθηκε ίση με το όριο ανίχνευσης (10 mg/L).

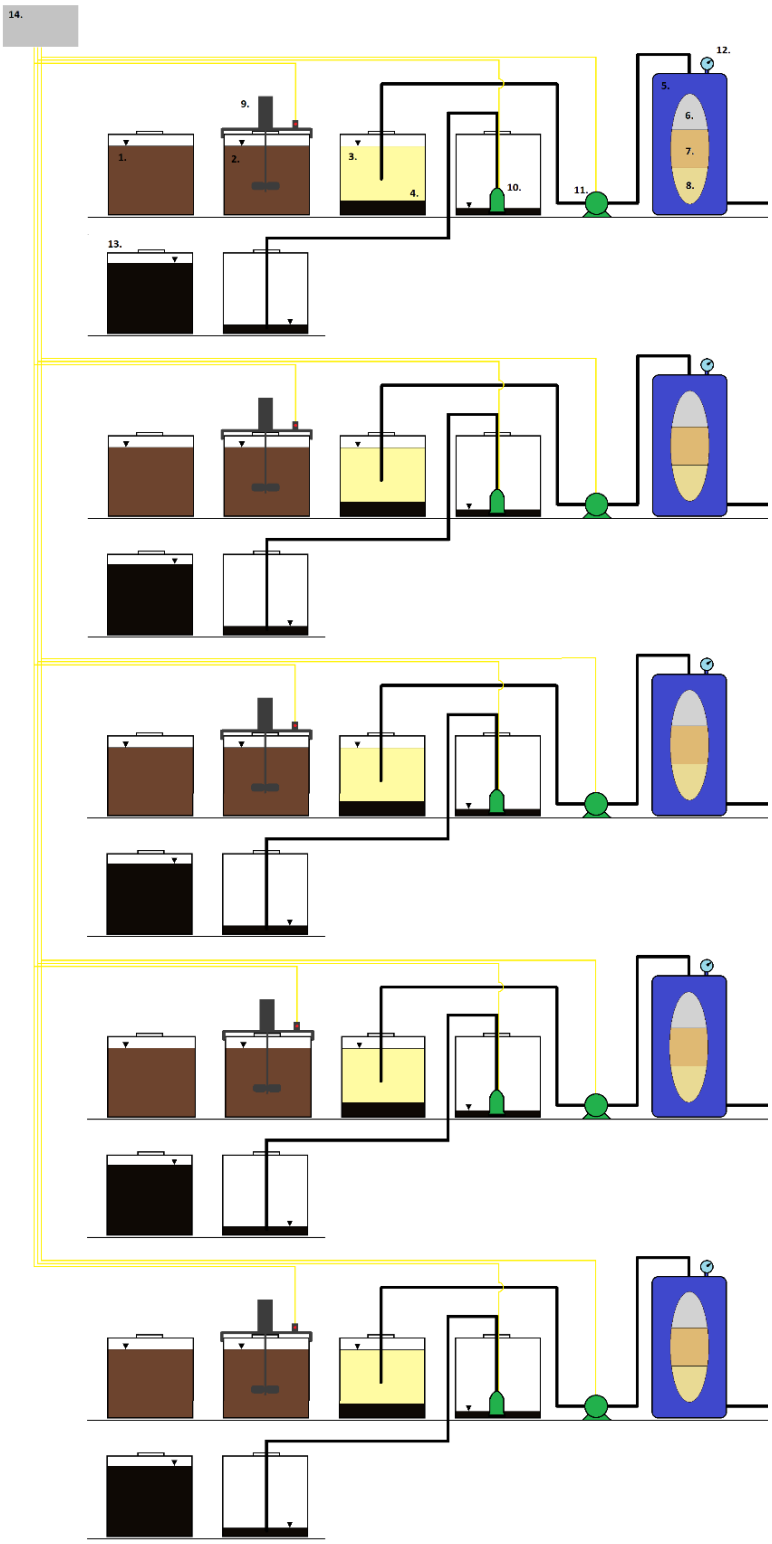


***Σχήμα 34.** Διάγραμμα απόδοσης φίλτρου κατά την επεξεργασία 12 m³.*

Βάση των παραπάνω αποτελεσμάτων προκύπτει ότι έπειτα από την επεξεργασία των αποβλήτων (κροκίδωση-συσσωμάτωση και φίλτρανση) κατά μέσο όρο η απομάκρυνση του COD ήταν ίση με 92,4 %. Αντίστοιχα το ποσοστό απομάκρυνσης των TSS ήταν τουλάχιστον ίσο με 97 %. Σε σύγκριση με τη πιλοτική εφαρμογή η απομάκρυνση του COD ήταν λίγο μικρότερη καθώς έδειξε απομάκρυνση 95,6 % ενώ η απομάκρυνση των TSS ήταν περίπου ίδια καθώς έδειξε απομάκρυνση τουλάχιστον ίση με 97,5 %. Το υδραυλικό φορτίου που δέχτηκε το φίλτρο κατά τη συγκεκριμένη εφαρμογή ήταν ίσο με 13,16 $m^3/m^2/hr$.

Όσο αφορά τις λοιπές παρατηρήσεις δεν παρουσιάστηκε κάποιο πρόβλημα κατά την εφαρμογή, η πίεση εντός του φίλτρου δεν αυξήθηκε και ο υπόλοιπος ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός λειτούργησε ομαλά χωρίς δείγματα υπερθέρμανσης.

Στη συνέχεια σχεδιάστηκε και εφαρμόστηκε μονάδα για την επεξεργασία 110 m^3 αποβλήτων απολαστιχοποίησης αεροδιαδρόμου. Από το σύνολο των δεξαμενών χρησιμοποιήθηκαν οι είκοσι (20) για τη διεργασία της κροκίδωσης-συσσωμάτωσης και καθίζησης και οι υπόλοιπες δέκα (10) για τη συλλογή της λάσπης. Συνολικά παράχθηκε λάσπη όγκου 10 m^2. Οι εργασίες διήρκησαν δέκα (10) ημέρες. Παρακάτω στο Σχήμα 35 παρουσιάζεται διάγραμμα ροής με την συστοιχία των δεξαμενών, του φίλτρου και του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού.



1. *Ανεπεξέργαστο απόβλητο*
2. *Κροκ/συσσωμ. απόβλητο*
3. *Υπερκείμενο υγρό*
4. *Λάσπη καθίζησης*
5. *Φίλτρο*
6. *Πληρωτικό υλικό - Ψείρα*
7. *Πληρωτικό υλικό - Άμμος*
8. *Πληρωτικό υλικό - Χαλαζιακή άμμος*
9. *Αναδευτήρας*
10. *Υποβρύχια αντλία*
11. *Επιφανειακή αντλία*
12. *Μετρητής πίεσης*
13. *Λάσπη καθίζησης*
14. *Γεννήτρια*

Σχήμα 35. *Διάγραμμα ροής της μονάδας επεξεργασίας αποβλήτων απολαστιχοποίησης, αποτελούμενη από είκοσι (20) αντιδραστήρες SBR 1 m^3 για κροκίδωση-συσσωμάτωση-καθίζηση και πέντε (5) φίλτρα βάθους 442 L έκαστο.*

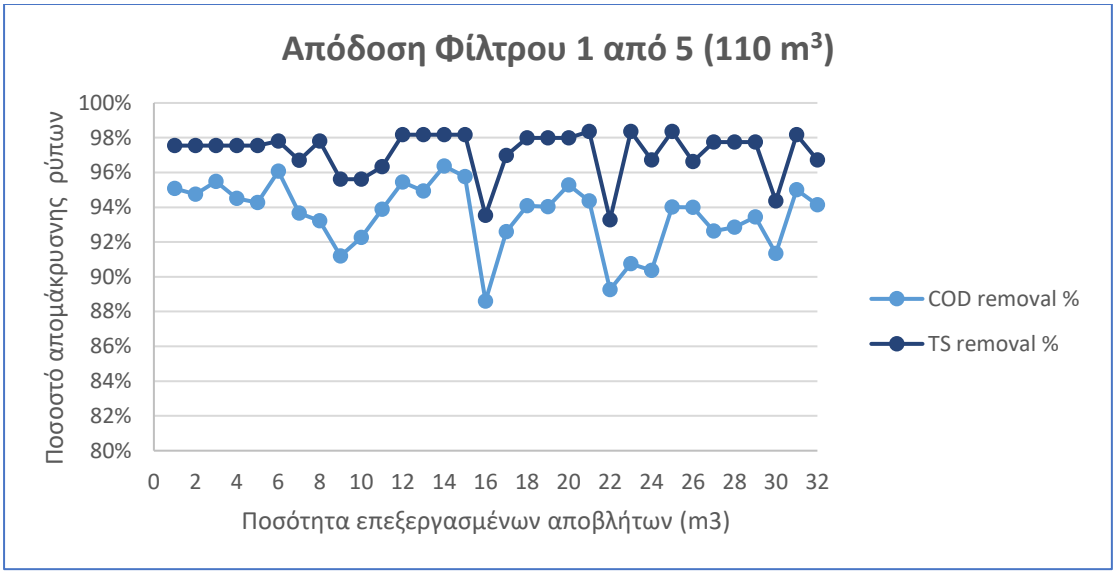
Δειγματοληψίες και αναλύσεις έγιναν σε τρία σημεία. Τα δείγματα λήφθηκαν από το ανεπεξέργαστο απόβλητο, το υπερκείμενο υγρό μετά τη καθίζηση και την έξοδο του φίλτρου. Παρακάτω παρουσιάζονται πίνακες με τα αποτελέσματα ξεχωριστά για κάθε φίλτρο που χρησιμοποιήθηκε.

Πίνακας 17*. Ποσοστό απομάκρυνσης COD και TSS κατά την εφαρμογή πλήρους κλίμακας επεξεργασίας 110 m³ αποβλήτων απολαστιχοποίησης στο πεδίο για το Φίλτρο 1.*

Κύκλοι εργασιών (1 m³/κύκλο)	**Ανεπεξέργαστο Απόβλητο**		**Υπερκείμενο υγρό έπειτα από καθίζηση**		**Έξοδος φίλτρου**	
	COD (mg/L)	**TSS (mg/L)**	**COD (mg/L)**	**TSS (mg/L)**	**COD (mg/L)**	**TSS (mg/L)**
1	3009	409	475	<10	148	<10
2	-	-	-	-	158	<10
3	-	-	460	<10	136	<10
4	-	-	-	-	165	<10
5	-	-	520	15	173	<10
6	2980	455	430	15	117	<10
7	-	-	-	-	189	15
8	-	-	420	<10	202	10
9	-	-	-	-	263	20
10	-	-	539	40	231	20
11	2681	545	495	<10	164	20
12	-	-	-	-	122	<10
13	-	-	590	<10	136	<10
14	-	-	-	-	97	<10
15	-	-	605	30	113	10
16	2478	495	790	<10	282	32
17	-	-	-	-	184	15
18	-	-	745	<10	147	<10
19	-	-	-	-	148	<10
20	-	-	615	20	117	<10
21	2802	610	425	40	158	<10
22	-	-	-	-	301	41
23	-	-	435	25	259	10
24	-	-	-	-	270	20
25	-	-	415	35	168	<10
26	2877	444	350	25	173	15
27	-	-	-	-	212	<10
28	-	-	653	30	206	<10
29	-	-	-	-	189	<10
30	-	-	715	30	249	25
31	2965	549	580	30	148	10
32	-	-	-	-	174	18

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 17 η άντληση των αποβλήτων μέσα από το φίλτρο διακόπηκε έπειτα από την επεξεργασία 32 m^3. Αυτό συνέβη λόγο αύξησης της πίεσης εντός του φίλτρου και ταυτόχρονης μείωσης της ροής. Συγκεκριμένα προτού διακοπεί η λειτουργεία του φίλτρου η αύξηση έφτασε τα 3 bar.

Από τα δεδομένα του παραπάνω πίνακα προκύπτει το Σχήμα 36, στο οποίο απεικονίζεται η απόδοση του φίλτρου σε όρους % απομάκρυνση του COD και των TSS. Για τη δημιουργία του σχήματος στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η συγκέντρωση των TSS ήταν μη ανιχνεύσιμη (< 10 mg/L) θεωρήθηκε ίση με το όριο ανίχνευσης (10 mg/L).



Σχήμα 36. *Διάγραμμα απόδοσης Φίλτρου 1 κατά την επεξεργασία 32 m^3.*

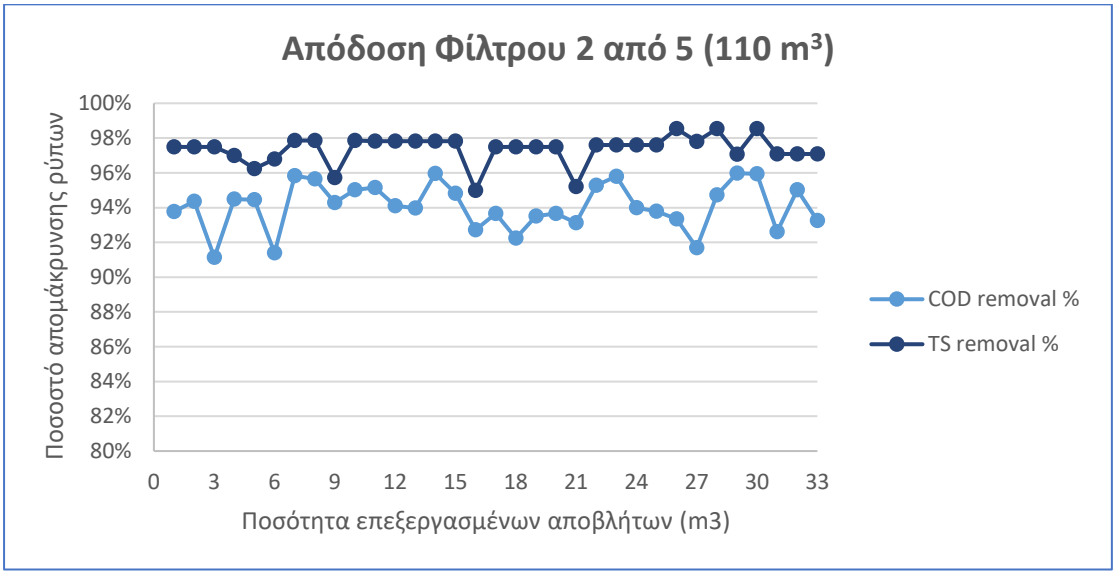
Βάση των παραπάνω αποτελεσμάτων προκύπτει ότι έπειτα από την κροκίδωση-συσσωμάτωση και φίλτρανση 32 m^3 μέσα από το Φίλτρο 1, η απομάκρυνση του COD ήταν , κατά μέσο όρο ίση με 93,6 %. Αντίστοιχα το ποσοστό απομάκρυνσης των TSS ήταν τουλάχιστον ίσο 97,2 %. Το υδραυλικό φορτίου που δέχτηκε το φίλτρο κατά τη συγκεκριμένη εφαρμογή ήταν ίσο με 13,16 $m^3/m^2/hr$.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν κατά την είσοδο και έξοδο από το Φίλτρο 2.

***Πίνακας 18**. Ποσοστό απομάκρυνσης COD και TSS κατά την εφαρμογή πλήρους κλίμακας επεξεργασίας 110 m^3 αποβλήτων απολαστιχοποίησης στο πεδίο για το Φίλτρο 2.*

Κύκλοι εργασιών (1 m^3/κύκλο)	Ανεπεξέργαστο Απόβλητο		Υπερκείμενο υγρό έπειτα από καθίζηση		Έξοδος φίλτρου	
	COD (mg/L)	TSS (mg/L)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)
1	2358	398	547	15	147	<10
2	-	-	-	-	133	<10
3	-	-	517	<10	209	<10
4	-	-	-	-	130	20
5	-	-	467	15	131	15
6	2710	468	399	20	233	15
7	-	-	-	-	113	<10
8	-	-	450	<10	118	<10
9	-	-	-	-	155	20
10	-	-	455	<10	135	<10
11	2455	461	298	<10	119	<10
12	-	-	-	-	145	<10
13	-	-	528	18	148	<10
14	-	-	-	-	99	<10
15	-	-	530	15	127	10
16	2254	399	394	<10	165	20
17	-	-	-	-	143	<10
18	-	-	292	<10	175	<10
19	-	-	-	-	146	10
20	-	-	560	22	143	<10
21	2399	418	455	<10	165	20
22	-	-	-	-	113	<10
23	-	-	516	16	101	<10
24	-	-	-	-	144	<10
25	-	-	602	18	149	<10
26	3108	681	780	28	207	<10
27	-	-	-	-	258	15
28	-	-	515	<10	164	<10
29	-	-	-	-	125	20
30	-	-	384	15	126	10
31	2207	344	530	15	163	<10
32	-	-	-	-	110	<10
33	-	-	523	18	149	10

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει το Σχήμα 37, στο οποίο απεικονίζεται η απόδοση του φίλτρου σε όρους % απομάκρυνση του COD και των TSS. Για τη δημιουργία του σχήματος στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η συγκέντρωση των TSS ήταν μη ανιχνεύσιμη (< 10 mg/L) θεωρήθηκε ίση με το όριο ανίχνευσης (10 mg/L).



Σχήμα 37. *Διάγραμμα απόδοσης Φίλτρου 2 κατά την επεξεργασία 33 m³.*

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 18 η άντληση των αποβλήτων μέσα από το φίλτρο διακόπηκε έπειτα από την επεξεργασία 33 m³. Αυτό συνέβη λόγο αύξησης της πίεσης εντός του φίλτρου και ταυτόχρονης μείωσης της ροής. Συγκεκριμένα προτού διακοπεί η λειτουργεία του φίλτρου η αύξηση έφτασε τα 2,8 bar.

Από τα δεδομένα του Πίνακα 18 προκύπτει ότι έπειτα από την κροκίδωση-συσσωμάτωση και φίλτρανση 33 m³ μέσα από το Φίλτρο 2, η απομάκρυνση του COD ήταν, κατά μέσο όρο ίση με 94,1 %. Αντίστοιχα το ποσοστό απομάκρυνσης των TSS ήταν τουλάχιστον ίσο με 97,4 %. Το υδραυλικό φορτίου που δέχτηκε το φίλτρο κατά τη συγκεκριμένη εφαρμογή ήταν ίσο με 13,16 m³/m²/hr.

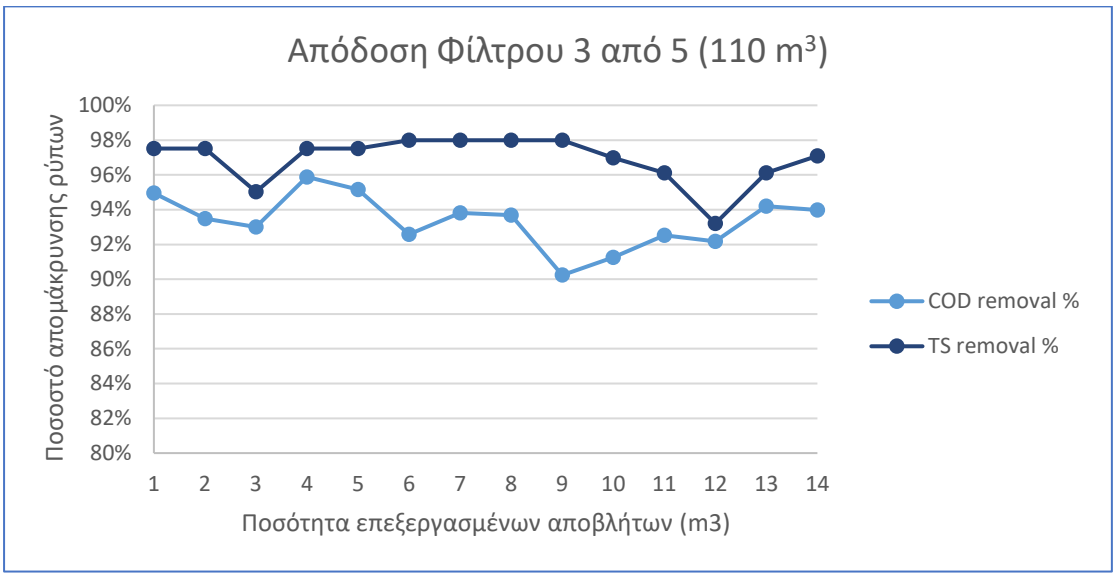
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν κατά την είσοδο και έξοδο από το Φίλτρο 3.

***Πίνακας 19**. Ποσοστό απομάκρυνσης COD και TSS κατά την εφαρμογή πλήρους κλίμακας επεξεργασίας 110 m^3 αποβλήτων απολαστιχοποίησης στο πεδίο για το Φίλτρο 3.*

Κύκλοι εργασιών (1 m^3/κύκλο)	**Ανεπεξέργαστο Απόβλητο**		**Υπερκείμενο υγρό έπειτα από καθίζηση**		**Έξοδος φίλτρου**	
	COD (mg/L)	**TSS (mg/L)**	**COD (mg/L)**	**TSS (mg/L)**	**COD (mg/L)**	**TSS (mg/L)**
1	2502	402	474	18	126	10
2	-	-	-	-	163	<10
3	-	-	430	15	175	20
4	-	-	-	-	103	<10
5	-	-	391	<10	121	<10
6	2345	498	336	15	174	<10
7	-	-	-	-	145	<10
8	-	-	517	<10	148	<10
9	-	-	-	-	229	<10
10	-	-	331	<10	205	15
11	2810	515	1115	20	210	20
12	-	-	-	-	220	35
13	-	-	1200	30	163	20
14	-	-	-	-	169	15

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 19 η άντληση των αποβλήτων μέσα από το φίλτρο διακόπηκε έπειτα από την επεξεργασία 14 m^3. Αυτό συνέβη λόγο αύξησης της πίεσης εντός του φίλτρου και ταυτόχρονης μείωσης της ροής. Συγκεκριμένα προτού διακοπεί η λειτουργεία του φίλτρου η αύξηση έφτασε τα 3,2 bar.

Από τα δεδομένα του πίνακα προκύπτει το Σχήμα 38, στο οποίο απεικονίζεται η απόδοση του φίλτρου σε όρους % απομάκρυνση του COD και των TSS. Για τη δημιουργία του σχήματος, στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η συγκέντρωση των TSS ήταν μη ανιχνεύσιμη (< 10 mg/L) θεωρήθηκε ίση με το όριο ανίχνευσης (10 mg/L).



Σχήμα 38. *Διάγραμμα απόδοσης Φίλτρου 3 κατά την επεξεργασία 14 m^3.*

Βάση των παραπάνω αποτελεσμάτων προκύπτει ότι έπειτα από την κροκίδωση-συσσωμάτωση και φίλτρανση 14 m^3 μέσα από το Φίλτρο 3, η απομάκρυνση του COD ήταν, κατά μέσο όρο ίση με 93,3 %. Αντίστοιχα το ποσοστό απομάκρυνσης των TSS ήταν τουλάχιστον ίσο με 96,9 %. Το υδραυλικό φορτίου που δέχτηκε το φίλτρο κατά τη συγκεκριμένη εφαρμογή ήταν ίσο με 13,16 $m^3/m^2/hr$.

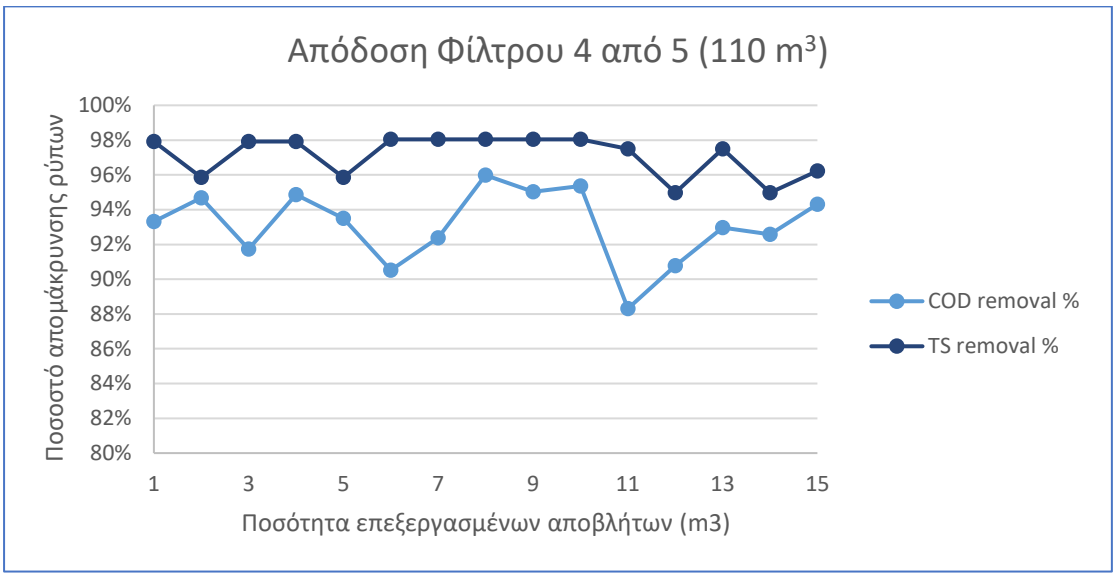
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν κατά την είσοδο και έξοδο από το Φίλτρο 4.

***Πίνακας 20**. Ποσοστό απομάκρυνσης COD και TSS κατά την εφαρμογή πλήρους κλίμακας επεξεργασίας 110 m³ αποβλήτων απολαστιχοποίησης στο πεδίο για το Φίλτρο 4.*

Κύκλοι εργασιών (1 m³/κύκλο)	Ανεπεξέργαστο Απόβλητο		Υπερκείμενο υγρό έπειτα από καθίζηση		Έξοδος φίλτρου	
	COD (mg/L)	TSS (mg/L)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)
1	2105	482	420	<10	141	<10
2	-	-	-	-	112	31
3	-	-	523	18	174	<10
4	-	-	-	-	108	<10
5	-	-	445	22	137	20
6	2096	511	218	16	200	<10
7	-	-	-	-	160	10
8	-	-	363	<10	85	<10
9	-	-	-	-	105	<10
10	-	-	261	19	98	<10
11	1987	398	1330	25	246	<10
12	-	-	-	-	183	20
13	-	-	720	15	140	10
14	-	-	-	-	147	20
15	-	-	745	10	113	15

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 20 η άντληση των αποβλήτων μέσα από το φίλτρο διακόπηκε έπειτα από την επεξεργασία 15 m³. Αυτό συνέβη λόγο αύξησης της πίεσης εντός του φίλτρου και ταυτόχρονης μείωσης της ροής. Συγκεκριμένα προτού διακοπεί η λειτουργεία του φίλτρου η αύξηση έφτασε τα 2 bar.

Από τα δεδομένα του πίνακα προκύπτει το Σχήμα 39, στο οποίο απεικονίζεται η απόδοση του φίλτρου σε όρους % απομάκρυνση του COD και των TSS. Για τη δημιουργία του σχήματος, στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η συγκέντρωση των TSS ήταν μη ανιχνεύσιμη (< 10 mg/L) θεωρήθηκε ίση με το όριο ανίχνευσης (10 mg/L).



Σχήμα 39. *Διάγραμμα απόδοσης Φίλτρου 4 κατά την επεξεργασία 15 m³.*

Βάση των παραπάνω αποτελεσμάτων προκύπτει ότι έπειτα από την κροκίδωση-συσσωμάτωση και φίλτρανση 15 m^3 μέσα από το Φίλτρο 4, η απομάκρυνση του COD ήταν, κατά μέσο όρο ίση με 93,1 %. Αντίστοιχα το ποσοστό απομάκρυνσης των TSS ήταν τουλάχιστον ίσο με 97,1 %. Το υδραυλικό φορτίου που δέχτηκε το φίλτρο κατά τη συγκεκριμένη εφαρμογή ήταν ίσο με 13,16 $m^3/m^2/hr$.

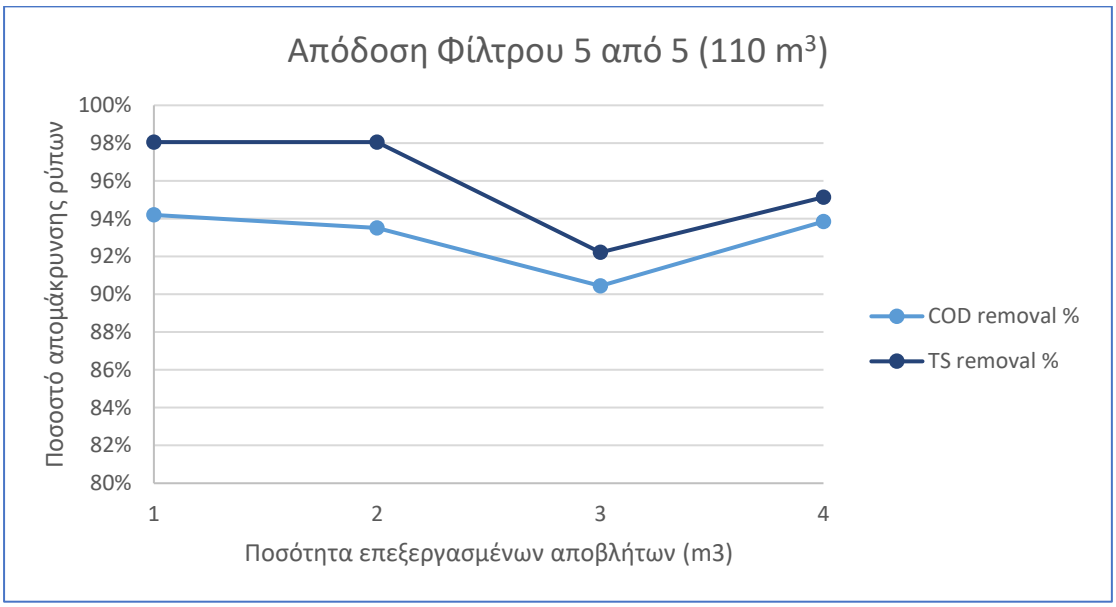
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν κατά την είσοδο και έξοδο από το Φίλτρο 5.

Πίνακας 21*. Ποσοστό απομάκρυνσης COD και TSS κατά την εφαρμογή πλήρους κλίμακας επεξεργασίας 110 m³ αποβλήτων απολαστιχοποίησης στο πεδίο για το Φίλτρο 5.*

Κύκλοι εργασιών (1 m^3/κύκλο)	**Ανεπεξέργαστο Απόβλητο**		**Υπερκείμενο υγρό έπειτα από καθίζηση**		**Έξοδος φίλτρου**	
	COD (mg/L)	**TSS (mg/L)**	**COD (mg/L)**	**TSS (mg/L)**	**COD (mg/L)**	**TSS (mg/L)**
1	2051	514	401	<10	119	<10
2	-	-	-	-	133	<10
3	-	-	1075	390	196	40
4	-	-	-	-	126	25

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει το Σχήμα 40, στο οποίο απεικονίζεται η απόδοση του φίλτρου σε όρους % απομάκρυνση του COD και των TSS. Για τη δημιουργία του σχήματος, στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η συγκέντρωση των TSS ήταν μη ανιχνεύσιμη (< 10 mg/L) θεωρήθηκε ίση με το όριο ανίχνευσης (10 mg/L).

Διευκρινίζεται ότι το συγκεκριμένο φίλτρο επεξεργάστηκε ποσότητα αποβλήτων ίση 4 m^3 όχι λόγο κάποιου προβλήματος του φίλτρου αλλά λόγο συμπλήρωσης των 110 m^3 που προορίζονταν για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.



Σχήμα 40. *Διάγραμμα απόδοσης Φίλτρου 5 κατά την επεξεργασία 4 m³.*

Βάση των παραπάνω αποτελεσμάτων προκύπτει ότι έπειτα από την κροκίδωση-συσσωμάτωση και φίλτρανση 4 m^3 μέσα από το Φίλτρο 5, η απομάκρυνση του COD ήταν, κατά μέσο όρο ίση με 93.0 %. Αντίστοιχα το ποσοστό απομάκρυνσης των TSS ήταν τουλάχιστον ίσο με 95.9 %. Το υδραυλικό φορτίου που δέχτηκε το φίλτρο κατά τη συγκεκριμένη εφαρμογή ήταν ίσο με 13,16 $m^3/m^2/hr$.

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω αποτελέσματα και από τα πέντε φίλτρα προκύπτει ότι έπειτα από τη διεργασία της κροκίδωσης-συσσωμάτωσης-καθίζησης και φίλτρανση των 110 m^3, επιτεύχθηκε κατά μέσο όρο απομάκρυνση COD ίση με 94.3 % και TSS τουλάχιστον ίση με 97.2 %.

Επομένως αν θεωρήσουμε ότι η ελάχιστη ποσότητα αποβλήτων απολαστιχοποίησης που μπορούν να επεξεργαστούν τα συγκεκριμένα φίλτρα κατά τη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι η μικρότερη που παρατηρήθηκε κατά τη προηγούμενη εφαρμογή και η μέγιστη ποσότητα είναι η αντίστοιχα η μεγαλύτερη τότε προκύπτουν τα παρακάτω δεδομένα:

Ελάχιστη ποσότητα επεξεργασίας μέσω φίλτρου: 14 m^3

Μέγιστη ποσότητα επεξεργασίας μέσω φίλτρου: 33 m^3

Από όλα τα παραπάνω δεδομένα θα χρησιμοποιηθεί ο μέσος όρος για τον σχεδιασμό μιας κινητής μονάδας φυσικοχημικής επεξεργασίας αποβλήτων απολαστιχοποίησης. Ο σχεδιασμός παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Επισημαίνεται ότι δεν εξετάστηκε το ενδεχόμενο έκπλυσης των φίλτρων έπειτα από τον κορεσμό τους, με σκοπό την επέκταση του χρόνου λειτουργίας τους, λόγο ιδιαιτεροτήτων του πεδίου εφαρμογής για το οποίο προορίζεται η μονάδα. Συγκεκριμένα εντός αεροδρομίου απαιτείτε ιδιαίτερη προσοχή, αδειοδότηση και επιπλέον χώρος για την αποθήκευση των παραγόμενων αποβλήτων από την εν λόγω διαδικασία. Επομένως επιλέχθηκε η μέθοδος του χειρωνακτικού καθαρισμού εντός της εγκατάστασης της εταιρείας έπειτα από τη λήξη των εργασιών.

4.1.3. Σχεδιασμός μονάδας

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται ο σχεδιασμός της κινητής μονάδας φυσικοχημικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων απολαστιχοποίησης. Η μέθοδος φυσικοχημικής επεξεργασίας βάση της οποίας πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός είναι αυτή της κροκίδωσης-συσσωμάτωσης και καθίζησης σε συνδυασμό με φίλτρανση.

Οι διεργασίες της κροκίδωσης-συσσωμάτωσης και καθίζησης θα εφαρμόζονται με την τεχνολογία SBR (Sequencing Batch Reactor = αντιδραστήρας διαλείπουσας λειτουργίας). Ως αντιδραστήρες θα χρησιμοποιούνται παλετοδεξαμενές όγκου 1 m^3 όπου θα προσαρμόζονται αναδευτήρες (Fluko IBC-Container stirrer GMEC) οι οποίοι θα αναδεύουν για 2 λεπτά στις 218 στροφές ανά λεπτό (rpm) και για άλλα 13 λεπτά στις 22 στροφές ανά λεπτό. Ως κροκιδωτικό υλικό θα χρησιμοποιείται PAC (17-18%). Έπειτα από τη καθίζηση, το υπερκείμενο υγρό θα οδηγείται προς φίλτρανση με φυγοκεντρική αντλία επιφάνειας (DAB Jet 132 M). Για τη διεργασία της φίλτρανσης θα χρησιμοποιούνται φίλτρα βάθους όγκου 442 L τα οποία θα είναι πληρωμένα με 30% χαλαζιακή άμμο, 35% άμμο και 35% ψείρα. Η άντληση των ανεπεξέργαστων αποβλήτων καθώς και της λάσπης θα γίνεται με χρήση υποβρύχιας αντλίας ακαθάρτων (DAB FEKA 600 MA SV). Για την κάλυψη των παραπάνω ενεργειακών απαιτήσεων θα χρησιμοποιείται πετρελαιοκίνητη κλειστή γεννήτρια (MIYAKE YDS6000TEB1 / 6,5 kVA).

Από τα πειράματα που έλαβαν χώρα στο εργαστήριο, τη λειτουργία της πιλοτικής μονάδας και τις εφαρμογές στο πεδίο, προέκυψαν δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό της πλήρους κλίμακας κινητής μονάδας και τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω στον Πίνακα 22.

***Πίνακας 22**. Παράμετροι σχεδιασμού κινητής μονάδας επεξεργασίας αποβλήτων απολαστιχοποίησης αεροδιαδρόμου.*

Παράμετροι Σχεδιασμού	**Τιμή**	**Μονάδα μέτρησης**
Βέλτιστη δόση κροκιδωτικού	0,959	mg/L
Χρόνος κροκίδωσησς/συσσωμάτωσης	15	min
Χρόνος καθίζησης	2	hr
Παραγωγή λάσπης	10	% (v/v)
Μέσος όγκος φίλτρανσης ανά φίλτρο	23,5	m3
Μέγιστος όγκος φίλτρανσης ανά φίλτρο	33	m3
Ελάχιστος όγκος φίλτρανσης ανά φίλτρο	14	m3
Χρόνος άντλησης 1 m3 με υποβρύχια αντλία	5	min
Χρόνος άντλησης 1 m3 με επιφανειακή αντλία	12	min

Από τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει ότι ο βασικός περιοριστικός παράγοντες στο σχεδιασμό είναι η ποσότητα του αποβλήτου που μπορεί να επεξεργαστεί κάθε φίλτρο προτού κορεστεί. Επομένως, ο αριθμός των δεξαμενών θα εξαρτηθεί από τον αριθμό των φίλτρων που θα χρειαστούν ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις ιδιαιτερότητες της κάθε εφαρμογής.

Πολύ σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό έχουν και οι διαστάσεις του εξοπλισμού που θα χρησιμοποιηθεί καθώς το σύστημα θα τοποθετηθεί εντός φορτηγού οχήματος κλειστού τύπου. Το όχημα πάνω στο οποίο έγινε ο σχεδιασμός είναι τριαξονικό φορτηγό, ωφέλιμου βάρους 12 τόνων και οι διαστάσεις της αμάξης είναι 7,30 m μήκος, 2,55 m πλάτος και 2,84 m ύψος. Δεδομένου ότι, ως δεξαμενές κροκίδωσης-συσσωμάτωσης-καθίζησης θα χρησιμοποιηθούν παλετοδεξαμενές διαστάσεων 1,20 m μήκος x 1,00 m πλάτος, τα φίλτρα θα τοποθετηθούν πάνω σε ευροπαλέτες διαστάσεων 1,20 m μήκος x 0,80 m πλάτος και η

γεννήτρια μαζί με τον υπόλοιπο ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό θα δεσμεύσει χώρο ίσο με μια ευροπαλέτα, προκύπτουν διάφοροι πιθανοί συνδυασμοί των αριθμών των φίλτρων και των δεξαμενών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Ένας ακόμα βασικός παράγοντας σχεδιασμού είναι ο τρόπος αποθήκευσης της παραγόμενης λάσπης έπειτα από τη διεργασία της κροκίδωσης-συσσωμάτωσής-καθίζησης. Υπάρχουν δυο τρόποι αποθήκευσης, είτε εκτός του συστήματος σε δεξαμενές στο χώρο της επεξεργασίας είτε εντός των υφιστάμενων δεξαμενών του συστήματος. Σημειώνεται ότι στη δεύτερη περίπτωση θα υπάρχει σταδιακή μείωση των διαθέσιμων προς κροκίδωση-συσσωμάτωση δεξαμενών.

Τα πλεονεκτήματα στη περίπτωση αποθήκευσης εκτός του συστήματος είναι ότι ο διαθέσιμος όγκος προς κροκίδωση-συσσωμάτωση και καθίζηση μένει σταθερός και επομένως ο απαιτούμενος χρόνος της διεργασίας δεν αυξάνεται ανά μονάδα όγκου. Από την άλλη τα πλεονεκτήματα στη περίπτωση αποθήκευσης εντός του συστήματος είναι η άμεση συλλογή και μεταφορά της λάσπης χωρίς την ανάγκη προσωρινής αποθήκευσης

Στη συνέχεια παρουσιάζονται υπολογισμοί για διαφορετικούς συνδυασμούς των αριθμών των δεξαμενών και των φίλτρων. Για κάθε συνδυασμό γίνονται υπολογισμοί και για τις δύο περιπτώσεις αποθήκευσης της παραγόμενης λάσπης εντός και εκτός του συστήματος.

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Α

Στη Περίπτωση Α γίνονται υπολογισμοί για την εφαρμογή της κροκίδωσης- συσσωμάτωσης και καθίζησης των αποβλήτων εντός δώδεκα (12) δεξαμενών και της φίλτρανσης μέσω δύο (2) φίλτρων. Παρακάτω στον Πίνακα 23 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης περίπτωσης ενώ στο Σχήμα 41 παρουσιάζεται σκαρίφημα της κάτοψης της αμάξης του φορτηγού οχήματος με τη διάταξη των δεξαμενών και του λοιπού εξοπλισμού.

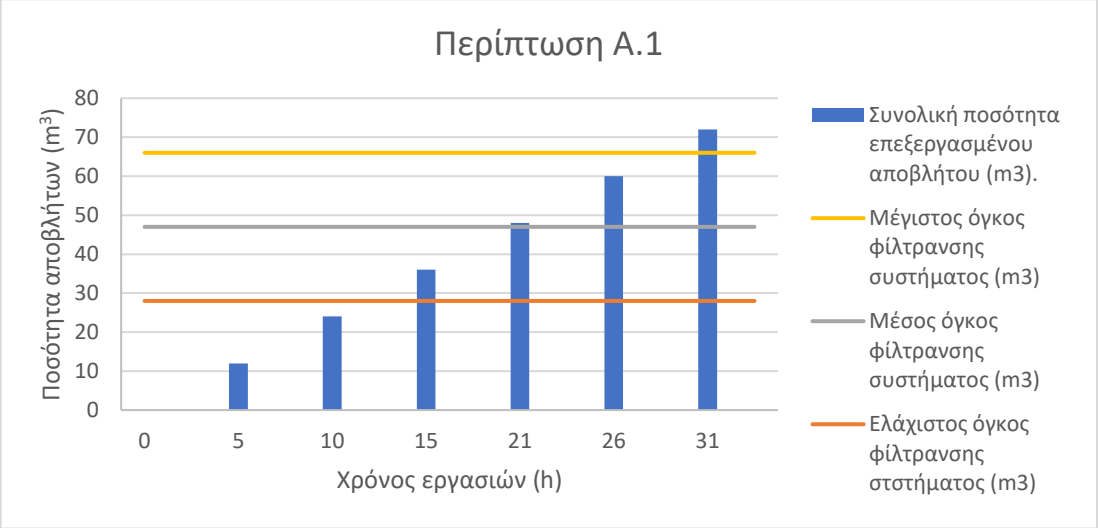
Πίνακας 23*. Τεχνικά χαρακτηριστικά για το σενάριο χρήσης 12 δεξαμενών και 2 φίλτρων για την επεξεργασία των αποβλήτων (Περίπτωση Α).*

Περιγραφή	Αριθμός	Μ.Μ.
Αριθμός δεξαμενών	12	ΤΜΧ
Αριθμός φίλτρων	2	ΤΜΧ
Ελάχιστος συνολικός όγκος επεξεργασίας αποβλήτων	28	m^3
Μέσος συνολικός όγκος επεξεργασίας αποβλήτων	47	m^3
Μέγιστος συνολικός όγκος επεξεργασίας αποβλήτων	66	m^3

Σχήμα 41. *Σκαρίφημα της κινητής μονάδας φυσικοχημικής επεξεργασίας με τη διάταξη των δεξαμενών, των φίλτρων και του λοιπού ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού για τη Περίπτωση Α.*

Λαμβάνοντας υπόψη τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης περίπτωσης καθώς και τα δεδομένα του Πίνακα 22, έγιναν υπολογισμοί με σκοπό το προσδιορισμό της ποσότητας των υγρών αποβλήτων που είναι σε θέση να επεξεργαστεί το συγκεκριμένο σύστημα σε συνάρτηση με τον χρόνο.

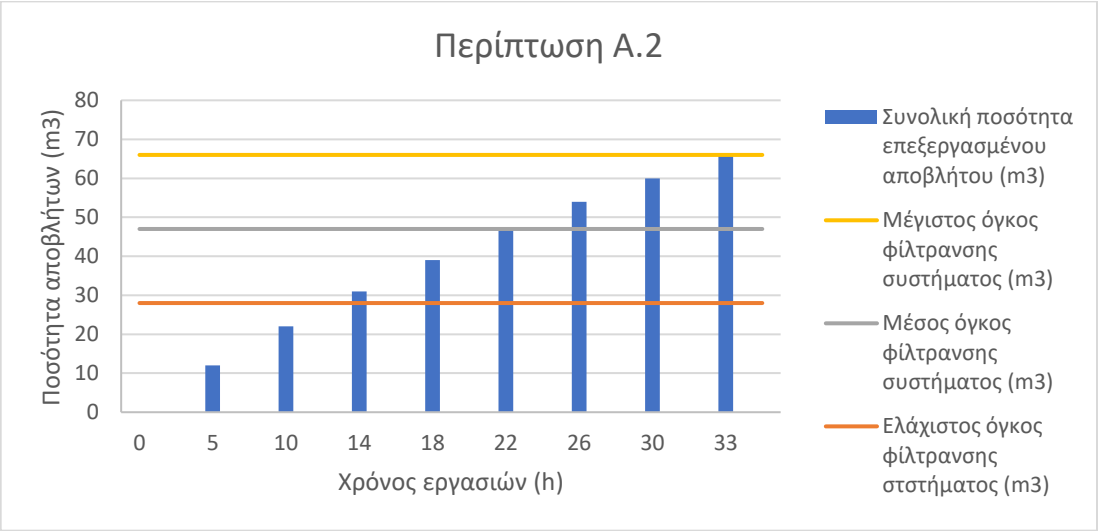
Παρακάτω στο Σχήμα 44 παρουσιάζεται η δυναμικότητα της συγκεκριμένης μονάδας για τη περίπτωση αποθήκευσης της παραγόμενης λάσπης εκτός του συστήματος (Περίπτωση Α.1). Συγκεκριμένα με μπλε χρώμα φαίνεται ο συνολικός όγκος επεξεργασίας των αποβλήτων ανά κύκλο εργασιών. Κάθε κύκλος εργασιών περιλαμβάνει την άντληση των αποβλήτων εντός του συστήματος, τη κροκίδωση-συσσωμάτωση-καθίζηση και τη φίλτρανση. Με κίτρινο, γκρι και κόκκινο χρώμα φαίνεται η μέγιστη, μέση και ελάχιστη ποσότητα αποβλήτων που μπορεί να επεξεργαστεί το συγκεκριμένο σύστημα.



Σχήμα 42. *Επεξεργασία αποβλήτων απολαστιχοποίησης σε συνάρτηση με τον χρόνο για τη Περίπτωση Α.1.*

Όπως φαίνεται στο σχήμα παραπάνω κατά τη Περίπτωση Α.1. η επεξεργασία της ελάχιστης ποσότητας αποβλήτων όσο αφορά τον κορεσμό των φίλτρων, δηλαδή τα 28 m^3, επιτυγχάνεται στον τρίτο (3°) κύκλο εργασιών. Ο μέσος όγκος επεξεργασίας των αποβλήτων, δηλαδή τα 47 m^3 επιτυγχάνεται στον τέταρτο (4°) κύκλο εργασιών. Ενώ ο μέγιστος όγκος επεξεργασίας των αποβλήτων προτού τα φίλτρα κορεστούν, δηλαδή τα 66 m^3, επιτυγχάνεται στον έκτο (6°) κύκλο εργασιών.

Αντίστοιχα στο Σχήμα 45 παρουσιάζεται η δυναμικότητα της συγκεκριμένης μονάδας για τη περίπτωση αποθήκευσης της παραγόμενης λάσπης εντός του συστήματος (Περίπτωση Α.2).



Σχήμα 43. *Επεξεργασία αποβλήτων απολαστιχοποίησης σε συνάρτηση με τον χρόνο για τη Περίπτωση Α.2.*

Όπως φαίνεται στο σχήμα παραπάνω κατά τη Περίπτωση Α.2. η επεξεργασία της ελάχιστης ποσότητας αποβλήτων όσο αφορά τον κορεσμό των φίλτρων, δηλαδή τα 28 m^3, επιτυγχάνεται στον τρίτο (3°) κύκλο εργασιών. Ο μέσος όγκος επεξεργασίας των αποβλήτων, δηλαδή τα 47 m^3 επιτυγχάνεται στον πέμπτο (5°) κύκλο εργασιών. Ενώ ο μέγιστος όγκος επεξεργασίας των αποβλήτων προτού τα φίλτρα κορεστούν, δηλαδή τα 66 m^3, επιτυγχάνεται στο όγδοο (8°) κύκλο εργασιών.

Συγκρίνοντας τις δυο περιπτώσεις Α.1 και Α.2 προκύπτει ότι για την επεξεργασία της μέσης ποσότητας αποβλήτων που μπορούν να επεξεργαστούν συνολικά τα φίλτρα (47 m^3), κατά τη περίπτωση όπου η παραγόμενη λάσπη αποθηκεύεται εντός των δεξαμενών του συστήματος χρειάζεται ένας (1) παραπάνω κύκλος εργασιών.

<u>ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Β</u>

Στη Περίπτωση Β γίνονται υπολογισμοί για την εφαρμογή της κροκίδωσης- συσσωμάτωσης και καθίζησης των αποβλήτων εντός έντεκα (11) δεξαμενών και της φίλτρανσης μέσω τριών (3) φίλτρων. Παρακάτω στον Πίνακα 24 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης περίπτωσης ενώ στο Σχήμα 44 παρουσιάζεται σκαρίφημα της κάτοψης της αμάξης του φορτηγού οχήματος με τη διάταξη των δεξαμενών και του λοιπού εξοπλισμού

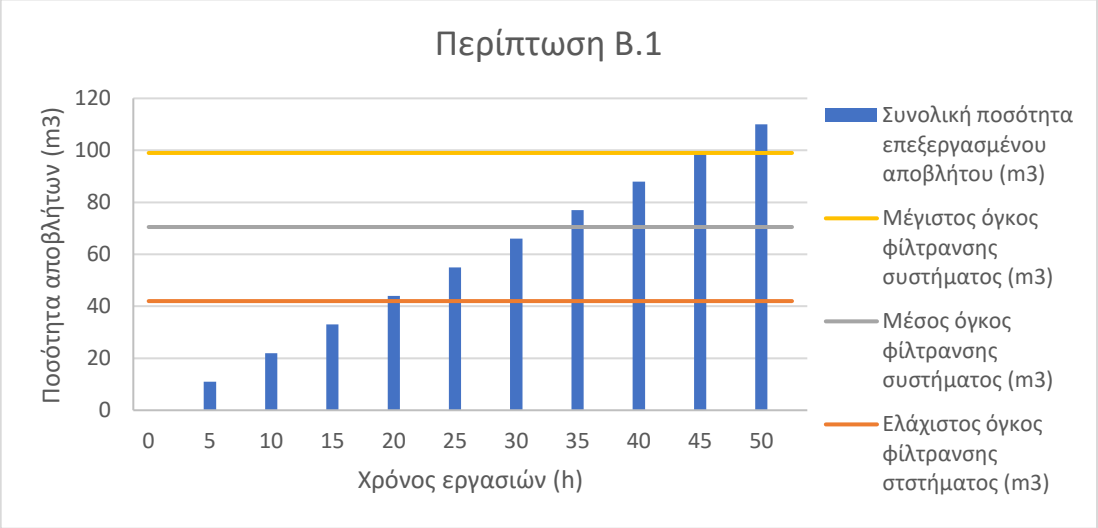
Πίνακας 24*. Τεχνικά χαρακτηριστικά για το σενάριο χρήσης 11 δεξαμενών και 3 φίλτρων για την επεξεργασία των αποβλήτων (Περίπτωση Β).*

Περιγραφή	**Αριθμός**	**Μ.Μ.**
Αριθμός δεξαμενών	11	ΤΜΧ
Αριθμός φίλτρων	3	ΤΜΧ
Ελάχιστος συνολικός όγκος επεξεργασίας αποβλήτων	42	m^3
Μέσος συνολικός όγκος επεξεργασίας αποβλήτων	70,5	m^3
Μέγιστος συνολικός όγκος επεξεργασίας αποβλήτων	99	m^3

Σχήμα 44. *Σκαρίφημα της κινητής μονάδας φυσικοχημικής επεξεργασίας με τη διάταξη των δεξαμενών, των φίλτρων και του λοιπού ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού για τη Περίπτωση Β.*

Λαμβάνοντας υπόψη τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης περίπτωσης καθώς και τα δεδομένα του Πίνακα 22, έγιναν υπολογισμοί με σκοπό το προσδιορισμό της ποσότητας των υγρών αποβλήτων που είναι σε θέση να επεξεργαστεί το συγκεκριμένο σύστημα σε συνάρτηση με τον χρόνο.

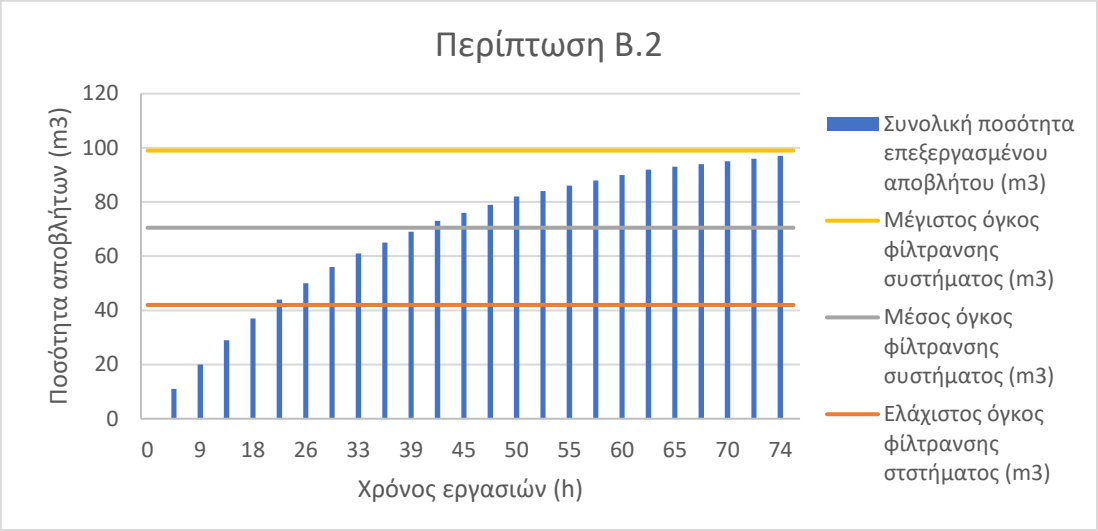
Παρακάτω στο Σχήμα 45 παρουσιάζεται η δυναμικότητα της συγκεκριμένης μονάδας για τη περίπτωση αποθήκευσης της παραγόμενης λάσπης εκτός του συστήματος (Περίπτωση Β.1). Συγκεκριμένα με μπλε χρώμα φαίνεται ο συνολικός όγκος επεξεργασίας των αποβλήτων ανά κύκλο εργασιών. Κάθε κύκλος εργασιών περιλαμβάνει την άντληση των αποβλήτων εντός του συστήματος, τη κροκίδωση-συσσωμάτωση-καθίζηση και τη φίλτρανση. Με κίτρινο, γκρι και κόκκινο χρώμα φαίνεται η μέγιστη, μέση και ελάχιστη ποσότητα αποβλήτων που μπορεί να επεξεργαστεί το συγκεκριμένο σύστημα.



Σχήμα 45. *Επεξεργασία αποβλήτων απολαστιχοποίησης σε συνάρτηση με τον χρόνο για τη Περίπτωση Β.1.*

Όπως φαίνεται παραπάνω κατά τη Περίπτωση Β.1. η επεξεργασία της ελάχιστης ποσότητας αποβλήτων όσο αφορά τον κορεσμό των φίλτρων, δηλαδή τα 42 m^3, επιτυγχάνεται στον τέταρτο (4°) κύκλο εργασιών. Ο μέσος όγκος επεξεργασίας των αποβλήτων, δηλαδή τα 70,5 m^3 επιτυγχάνεται στον έβδομο (7°) κύκλο εργασιών. Ενώ ο μέγιστος όγκος επεξεργασίας των αποβλήτων προτού τα φίλτρα κορεστούν, δηλαδή τα 99 m^3, επιτυγχάνεται στον ένατο (9°) κύκλο εργασιών.

Αντίστοιχα στο Σχήμα 46 παρουσιάζεται η δυναμικότητα της συγκεκριμένης μονάδας για τη περίπτωση αποθήκευσης της παραγόμενης λάσπης εντός του συστήματος (Περίπτωση Β.2).



Σχήμα 46. *Επεξεργασία αποβλήτων απολαστιχοποίησης σε συνάρτηση με τον χρόνο για τη Περίπτωση Β.2.*

Όπως φαίνεται στο σχήμα παραπάνω κατά τη Περίπτωση Β.2. η επεξεργασία της ελάχιστης ποσότητας αποβλήτων όσο αφορά τον κορεσμό των φίλτρων, δηλαδή τα 42 m^3, επιτυγχάνεται στον έκτο (6°) κύκλο εργασιών. Ο μέσος όγκος επεξεργασίας των αποβλήτων, δηλαδή τα 70,5 m^3 επιτυγχάνεται στον εντέκατο (11°) κύκλο εργασιών. Ενώ ο μέγιστος όγκος επεξεργασίας των αποβλήτων προτού τα φίλτρα κορεστούν, δηλαδή τα 99 m^3, επιτυγχάνεται στον δέκατο έβδομο (17°) κύκλο εργασιών.

Συγκρίνοντας τις δυο περιπτώσεις Β.1 και Β.2 προκύπτει ότι για την επεξεργασία της μέσης ποσότητας αποβλήτων που μπορούν να επεξεργαστούν συνολικά τα φίλτρα (70,5 m^3), κατά τη περίπτωση όπου η παραγόμενη λάσπη αποθηκεύεται εντός των δεξαμενών του συστήματος χρειάζεται τέσσερεις (4) παραπάνω κύκλους εργασιών.

<u>ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Γ</u>

Στη Περίπτωση Γ γίνονται υπολογισμοί για την εφαρμογή της κροκίδωσης- συσσωμάτωσης και καθίζησης των αποβλήτων εντός δέκα (10) δεξαμενών και της φίλτρανσης μέσω τεσσάρων (4) φίλτρων. Παρακάτω στον Πίνακα 25 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης περίπτωσης ενώ στο Σχήμα 49 παρουσιάζεται σκαρίφημα της κάτοψης της αμάξης του φορτηγού οχήματος με τη διάταξη των δεξαμενών και του εξοπλισμού

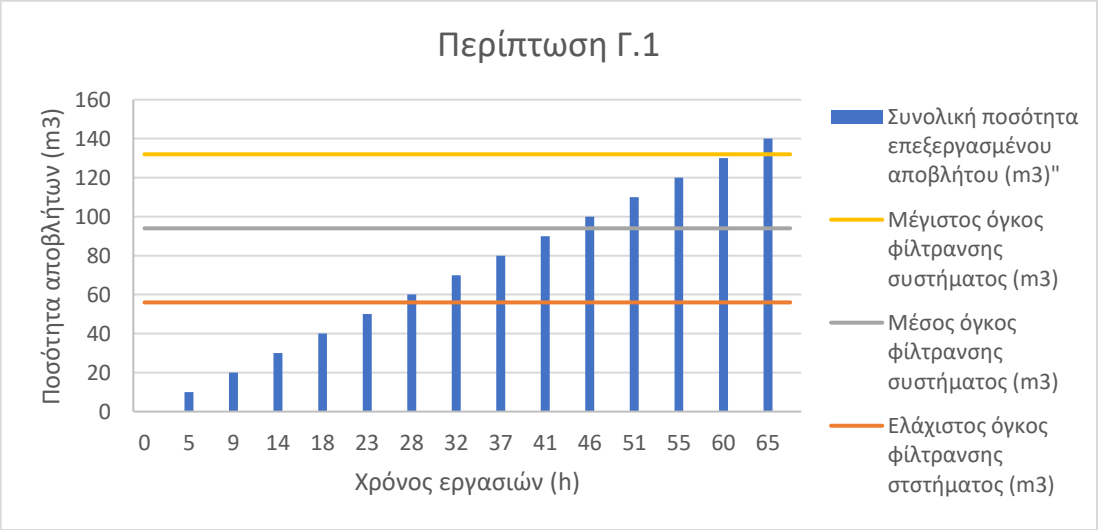
Πίνακας 25*. Τεχνικά χαρακτηριστικά για το σενάριο χρήσης 10 δεξαμενών και 4 φίλτρων για την επεξεργασία των αποβλήτων (Περίπτωση Γ).*

Περιγραφή	**Αριθμός**	**Μ.Μ.**
Αριθμός δεξαμενών	10	ΤΜΧ
Αριθμός φίλτρων	4	ΤΜΧ
Ελάχιστος συνολικός όγκος επεξεργασίας αποβλήτων	56	m^3
Μέσος συνολικός όγκος επεξεργασίας αποβλήτων	94	m^3
Μέγιστος συνολικός όγκος επεξεργασίας αποβλήτων	132	m^3

Σχήμα 49. *Σκαρίφημα της κινητής μονάδας φυσικοχημικής επεξεργασίας με τη διάταξη των δεξαμενών, των φίλτρων και του λοιπού ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού για τη Περίπτωση Γ.*

Λαμβάνοντας υπόψη τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης περίπτωσης καθώς και τα δεδομένα του Πίνακα 22, έγιναν υπολογισμοί με σκοπό το προσδιορισμό της ποσότητας των υγρών αποβλήτων που είναι σε θέση να επεξεργαστεί το συγκεκριμένο σύστημα σε συνάρτηση με τον χρόνο.

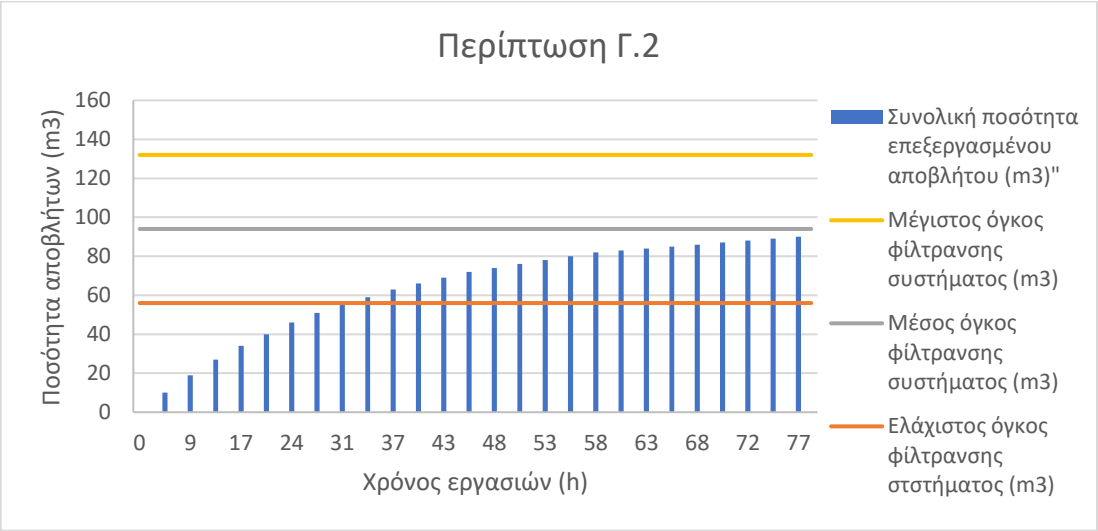
Παρακάτω στο Σχήμα 50 παρουσιάζεται η δυναμικότητα της συγκεκριμένης μονάδας για τη περίπτωση αποθήκευσης της παραγόμενης λάσπης εκτός του συστήματος (Περίπτωση Γ.1). Συγκεκριμένα με μπλε χρώμα φαίνεται ο συνολικός όγκος επεξεργασίας των αποβλήτων ανά κύκλο εργασιών. Κάθε κύκλος εργασιών περιλαμβάνει την άντληση των αποβλήτων εντός του συστήματος, τη κροκίδωση-συσσωμάτωση-καθίζηση και τη φίλτρανση. Με κίτρινο, γκρι και κόκκινο χρώμα φαίνεται η μέγιστη, μέση και ελάχιστη ποσότητα αποβλήτων που μπορεί να επεξεργαστεί το συγκεκριμένο σύστημα.



Σχήμα 48. *Επεξεργασία αποβλήτων απολαστιχοποίησης σε συνάρτηση με τον χρόνο για τη Περίπτωση Γ.1.*

Όπως φαίνεται στο σχήμα παραπάνω κατά τη Περίπτωση Γ.1. η επεξεργασία της ελάχιστης ποσότητας αποβλήτων όσο αφορά τον κορεσμό των φίλτρων, δηλαδή τα 56 m^3, επιτυγχάνεται στον έκτο (6°) κύκλο εργασιών. Ο μέσος όγκος επεξεργασίας των αποβλήτων, δηλαδή τα 94 m^3 επιτυγχάνεται στον δέκατο (10°) κύκλο εργασιών. Ενώ ο μέγιστος όγκος επεξεργασίας των αποβλήτων προτού τα φίλτρα κορεστούν, δηλαδή τα 132 m^3, επιτυγχάνεται στον δέκατο τέταρτο (14°) κύκλο εργασιών.

Αντίστοιχα στο Σχήμα 51 παρουσιάζεται η δυναμικότητα της συγκεκριμένης μονάδας για τη περίπτωση αποθήκευσης της παραγόμενης λάσπης εντός του συστήματος (Περίπτωση Γ.2).



Σχήμα 49. *Επεξεργασία αποβλήτων απολαστιχοποίησης σε συνάρτηση με τον χρόνο για τη Περίπτωση Γ.2.*

Όπως φαίνεται στο σχήμα παραπάνω κατά τη Περίπτωση Γ.2. η επεξεργασία της ελάχιστης ποσότητας αποβλήτων όσο αφορά τον κορεσμό των φίλτρων, δηλαδή τα 56 m^3, επιτυγχάνεται στον όγδοο (8°) κύκλο εργασιών. Ο μέσος όγκος επεξεργασίας των αποβλήτων, δηλαδή τα 94 m^3 δεν επιτυγχάνεται ούτε κατά τον δέκατο έβδομο (17°) κύκλο εργασιών κατά τον οποία έχουν ήδη παραχθεί περισσότερα από 9 m^3 και επομένως δεν υπάρχει διαθέσιμη δεξαμενή για κροκίδωση-συσσωμάτωση και καθίζηση.

Συγκρίνοντας τις δυο περιπτώσεις Γ.1 και Γ.2 προκύπτει ότι για την επεξεργασία της μέσης ποσότητας αποβλήτων που μπορούν να επεξεργαστούν συνολικά τα φίλτρα (94 m^3), κατά τη περίπτωση όπου η παραγόμενη λάσπη αποθηκεύεται εκτός του συστήματος απαιτούνται δέκα (10) κύκλοι εργασιών ενώ κατά τη περίπτωση όπου η παραγόμενη λάσπη αποθηκεύεται εντός των δεξαμενών του συστήματος δεν αρκεί ο όγκος των δεξαμενών για αποθήκευση λάσπης. Επομένως, η μέγιστη ποσότητα αποβλήτων που μπορεί να επεξεργαστεί το σύστημα προτού τοποθετηθεί λάσπη στη δέκατη δεξαμενή είναι 91 m^3.

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Δ

Στη Περίπτωση Δ γίνονται υπολογισμοί για την εφαρμογή της κροκίδωσης- συσσωμάτωσης και καθίζησης των αποβλήτων εντός εννέα (9) δεξαμενών και της φίλτρανσης μέσω πέντε (5) φίλτρων. Παρακάτω στον Πίνακα 26 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης περίπτωσης ενώ στο Σχήμα 50 παρουσιάζεται σκαρίφημα της κάτοψης της αμάξης του φορτηγού οχήματος με τη διάταξη των δεξαμενών και του εξοπλισμού.

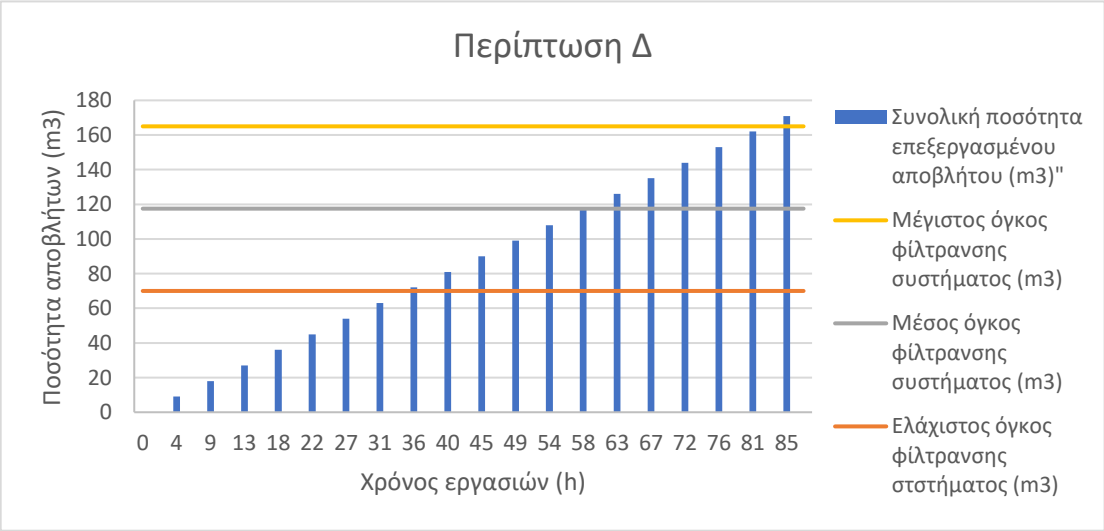
Πίνακας 26*. Τεχνικά χαρακτηριστικά για το σενάριο χρήσης 9 δεξαμενών και 5 φίλτρων για την επεξεργασία των αποβλήτων (Περίπτωση Δ).*

Περιγραφή	**Αριθμός**	**Μ.Μ.**
Αριθμός δεξαμενών	9	ΤΜΧ
Αριθμός φίλτρων	5	ΤΜΧ
Ελάχιστος συνολικός όγκος επεξεργασίας αποβλήτων	70	m^3
Μέσος συνολικός όγκος επεξεργασίας αποβλήτων	117,5	m^3
Μέγιστος συνολικός όγκος επεξεργασίας αποβλήτων	165	m^3

Σχήμα 50. *Σκαρίφημα της κινητής μονάδας φυσικοχημικής επεξεργασίας με τη διάταξη των δεξαμενών, των φίλτρων και του λοιπού ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού για τη Περίπτωση Δ.*

Λαμβάνοντας υπόψη τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης περίπτωσης καθώς και τα δεδομένα του Πίνακα 22, έγιναν υπολογισμοί με σκοπό το προσδιορισμό της ποσότητας των υγρών αποβλήτων που είναι σε θέση να επεξεργαστεί το συγκεκριμένο σύστημα σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Παρακάτω στο Σχήμα 51 παρουσιάζεται η δυναμικότητα της συγκεκριμένης μονάδας για τη περίπτωση αποθήκευσης της παραγόμενης λάσπης εκτός του συστήματος (Περίπτωση Δ). Συγκεκριμένα με μπλε χρώμα φαίνεται ο συνολικός όγκος επεξεργασίας των αποβλήτων ανά κύκλο εργασιών. Κάθε κύκλος εργασιών περιλαμβάνει την άντληση των αποβλήτων εντός του συστήματος, τη κροκίδωση-συσσωμάτωση-καθίζηση και τη φίλτρανση. Με κίτρινο, γκρι και κόκκινο χρώμα φαίνεται η μέγιστη, μέση και ελάχιστη ποσότητα αποβλήτων που μπορεί να επεξεργαστεί το συγκεκριμένο σύστημα.



Σχήμα 51. *Επεξεργασία αποβλήτων απολαστιχοποίησης σε συνάρτηση με τον χρόνο για τη Περίπτωση Δ.*

Όπως φαίνεται στο σχήμα παραπάνω κατά τη Περίπτωση Δ η επεξεργασία της ελάχιστης ποσότητας αποβλήτων όσο αφορά τον κορεσμό των φίλτρων, δηλαδή τα 70 m^3, επιτυγχάνεται στον όγδοο (8°) κύκλο εργασιών. Ο μέσος όγκος επεξεργασίας των αποβλήτων, δηλαδή τα 117,5 m^3 επιτυγχάνεται στον δέκατο τρίτο (13°) κύκλο εργασιών. Ενώ ο μέγιστος όγκος επεξεργασίας των αποβλήτων προτού τα φίλτρα κορεστούν, δηλαδή τα 165 m^3, επιτυγχάνεται στον δέκατο ένατο (19°) κύκλο εργασιών.

Για τη περίπτωση αποθήκευσης της παραγόμενης λάσπης εντός του συστήματος δεν υπάρχει νόημα να γίνουν περεταίρω υπολογισμοί καθώς ο διαθέσιμος όγκος για

αποθήκευση της παραγόμενης λάσπης έχει μειωθεί σε σχέση με τη δυνατότητα φίλτρανσης του συστήματος ήδη από τη Περίπτωση Γ.

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Ε

Στη Περίπτωση Ε γίνονται υπολογισμοί για την εφαρμογή της κροκίδωσης- συσσωμάτωσης και καθίζησης των αποβλήτων εντός οκτώ (8) δεξαμενών και της φίλτρανσης μέσω έξι (6) φίλτρων. Παρακάτω στον Πίνακα 27 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης περίπτωσης ενώ στο Σχήμα 52 παρουσιάζεται σκαρίφημα της κάτοψης της αμάξης του φορτηγού οχήματος με τη διάταξη των δεξαμενών και του εξοπλισμού.

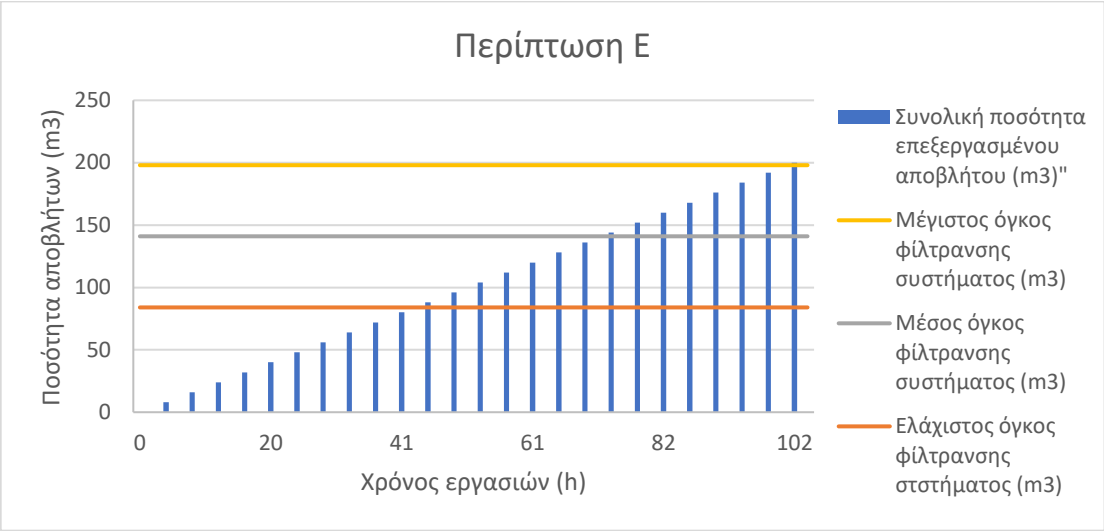
***Πίνακας 27**. Τεχνικά χαρακτηριστικά για το σενάριο χρήσης 8 δεξαμενών και 6 φίλτρων για την επεξεργασία των αποβλήτων (Περίπτωση Ε).*

Περιγραφή	Αριθμός	Μ.Μ.
Αριθμός δεξαμενών	8	ΤΜΧ
Αριθμός φίλτρων	6	ΤΜΧ
Ελάχιστος συνολικός όγκος επεξεργασίας αποβλήτων	84	m^3
Μέσος συνολικός όγκος επεξεργασίας αποβλήτων	141	m^3
Μέγιστος συνολικός όγκος επεξεργασίας αποβλήτων	198	m^3

***Σχήμα 52.** Σκαρίφημα της κινητής μονάδας φυσικοχημικής επεξεργασίας με τη διάταξη των δεξαμενών, των φίλτρων και του λοιπού ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού για τη Περίπτωση Ε.*

Λαμβάνοντας υπόψη τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης περίπτωσης καθώς και τα δεδομένα του Πίνακα 22, έγιναν υπολογισμοί με σκοπό το προσδιορισμό της ποσότητας των υγρών αποβλήτων που είναι σε θέση να επεξεργαστεί το συγκεκριμένο σύστημα σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Παρακάτω στο Σχήμα 53 παρουσιάζεται η δυναμικότητα της συγκεκριμένης μονάδας για τη περίπτωση αποθήκευσης της παραγόμενης λάσπης εκτός του συστήματος (Περίπτωση Ε). Συγκεκριμένα με μπλε χρώμα φαίνεται ο συνολικός όγκος επεξεργασίας των αποβλήτων ανά κύκλο εργασιών. Κάθε κύκλος εργασιών περιλαμβάνει την άντληση των αποβλήτων εντός του συστήματος, τη κροκίδωση-συσσωμάτωση-καθίζηση και τη φίλτρανση. Με κίτρινο, γκρι και κόκκινο χρώμα φαίνεται η μέγιστη, μέση και ελάχιστη ποσότητα αποβλήτων που μπορεί να επεξεργαστεί το συγκεκριμένο σύστημα.

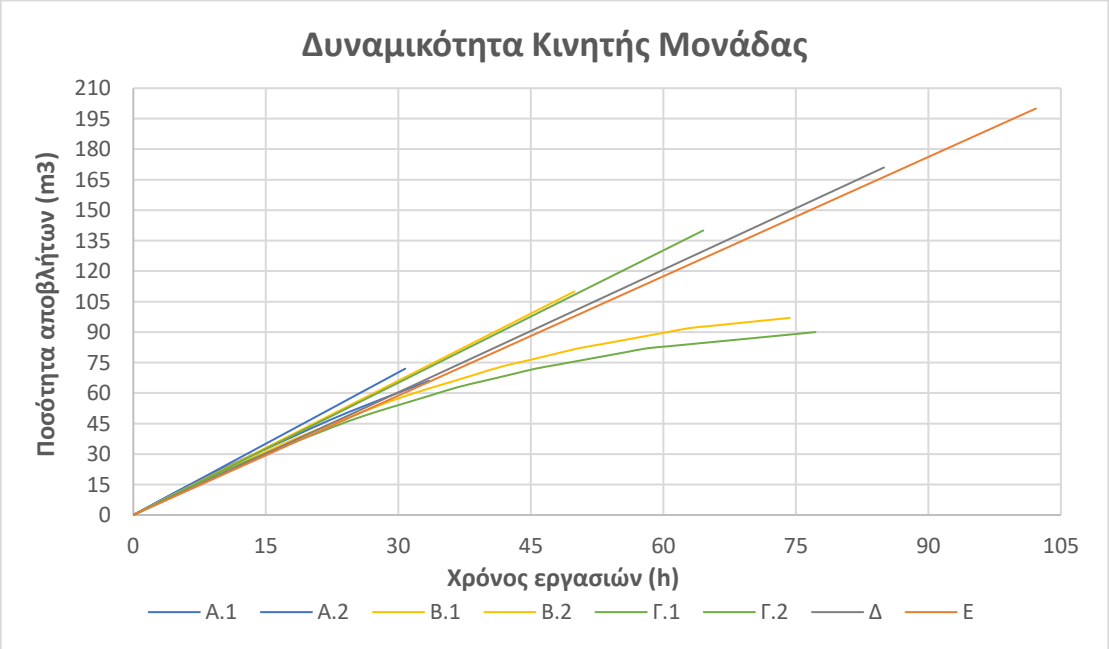


Σχήμα 53. *Επεξεργασία αποβλήτων απολαστιχοποίησης σε συνάρτηση με τον χρόνο για τη Περίπτωση Ε.*

Όπως φαίνεται στο σχήμα παραπάνω κατά τη Περίπτωση Ε η επεξεργασία της ελάχιστης ποσότητας αποβλήτων όσο αφορά τον κορεσμό των φίλτρων, δηλαδή τα 84 m^3, επιτυγχάνεται στον ενδέκατο (11°) κύκλο εργασιών. Ο μέσος όγκος επεξεργασίας των αποβλήτων, δηλαδή τα 141 m^3 επιτυγχάνεται στον δέκατο όγδοο (18°) κύκλο εργασιών. Ενώ ο μέγιστος όγκος επεξεργασίας των αποβλήτων προτού τα φίλτρα κορεστούν, δηλαδή τα 198 m^3, επιτυγχάνεται στον εικοστό πέμπτο (25°) κύκλο εργασιών.

Για τη περίπτωση αποθήκευσης της παραγόμενης λάσπης εντός του συστήματος δεν υπάρχει νόημα να γίνουν περεταίρω υπολογισμοί για τους ίδιους λόγους που δεν έγιναν και κατά τη Περίπτωση Δ.

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω προκύπτει το Σχήμα 54 στο οποίο απεικονίζεται η απόδοση του συστήματος για κάθε συνδυασμό δεξαμενών και φίλτρων που παρουσιάστηκε.



Σχήμα 54. *Απόδοση συστήματος κινητής μονάδας φυσικοχημικής επεξεργασίας για διάφορους συνδυασμούς δεξαμενών και φίλτρων (περιπτώσεις Α, Β, Γ, Δ και Ε).*

Όπως φαίνεται παραπάνω στις περιπτώσεις όπου επιλέγεται μεγάλος αριθμός δεξαμενών ο χρόνος επεξεργασίας των αποβλήτων μειώνεται όπως μειώνεται και ποσότητα που μπορεί να φιλτράρει το σύστημα. Στις περιπτώσεις που επιλέγεται μεγάλος αριθμός φίλτρων ο χρόνος επεξεργασίας των αποβλήτων και η ποσότητα που μπορεί να επεξεργαστεί το σύστημα αυξάνονται. Στις περιπτώσεις όπου επιλέγεται η αποθήκευση της λάσπης εντός του συστήματος ο ρυθμός επεξεργασίας των αποβλήτων μειώνεται και παράλληλα αυξάνεται ο χρόνος των εργασιών. Σε κάθε περίπτωση ο βέλτιστος συνδυασμός προκύπτει ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες της κάθε εφαρμογής.

4.1.3.1. Τεχνικο-οικονομική μελέτη

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί τεχνικο-οικονομική μελέτη για δύο σενάρια εφαρμογής της παραπάνω κινητής μονάδας. Στη πρώτη περίπτωση οι υπολογισμοί έγιναν για κινητοποίηση και επεξεργασία αποβλήτων απολαστιχοποίησης από τον Διεθνή Κρατικό Αερολιμένα Θεσσαλονίκης Μακεδονία (πλησιέστερο αεροδρόμιο) ενώ στη δεύτερη για τον Κρατικό Αερολιμένα Ρόδου Διαγόρα (απομακρυσμένο νησί). Και στις δύο περιπτώσεις οι υπολογισμοί έγιναν για επεξεργασία ποσότητας αποβλήτων 50 m3. Για τη συγκεκριμένη ποσότητα αποβλήτου το κόστος εφαρμογής της μονάδας για οποιοδήποτε περίπτωση αεροδρομίου εντός Ελλάδας αναμένεται να είναι μεταξύ των δύο σεναρίων.

Για την επεξεργασία της παραπάνω ποσότητας αποβλήτων επιλέχθηκε ο συνδυασμός (11) SBR αντιδραστήρων και τριών (3) φίλτρων. Οι υπολογισμοί έγιναν για αποθήκευση της παραγόμενης λάσπης εντός του συστήματος. Από το Σχήμα 46 προκύπτει ότι για την επεξεργασία 50 m^3 απαιτούνται επτά (7) κύκλοι εργασιών όπου κάθε κύκλος διαρκεί τεσσεράμισι (4,5) ώρες.

Για τις παραπάνω εργασίες απαιτούνται πέντε (5) ημέρες εργασιών. Για τη λειτουργεία της μονάδας απαιτείται προσωπικό τριών (3) ατόμων (μηχανικός, οδηγός-χειριστής και τεχνίτης-εργάτης). Η διαφορά μεταξύ των δύο αεροδρομίων έγκειται στον χρόνο και το κόστος μεταφοράς που αυξάνεται σημαντικά στη περίπτωση της Ρόδου. Παρακάτω στους Πίνακες 26 και 27 παρουσιάζονται τα κόστη και για τις δύο περιπτώσεις, στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα.

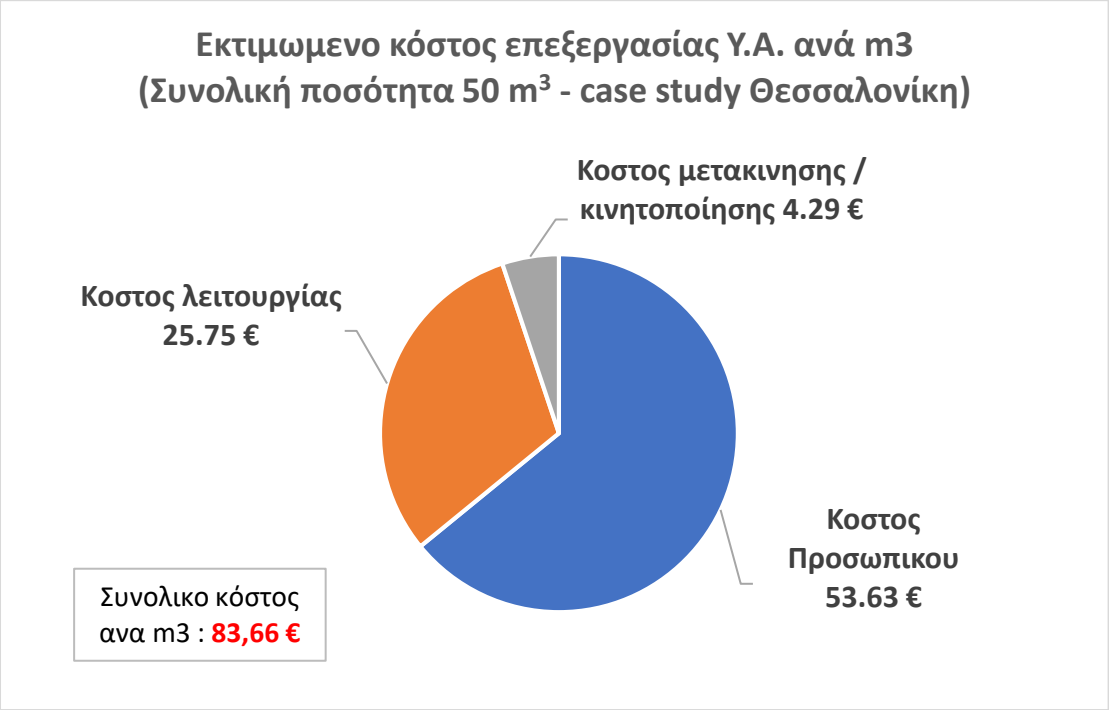
Πίνακας 26. Κόστος επεξεργασίας 50 m^3 αποβλήτων απολαστιχοποίησης για το αεροδρόμιο Θεσσαλονίκης.

Επιμέρους κόστη	Κόστος εργασιών (€)	Κόστος ανά m^3 (€/m3)	Κόστος ανά m^3 με όφελος 30% (€/m3)
Κοστος Προσωπικου	1.875,00	37,50	53,63
Κοστος λειτουργίας	900,18	18,00	25,75
Κοστος μετακίνησης/κινητοποίησης	150,00	3,00	4,29
Σύνολο	**2.925,18**	**58,50**	**83,66**

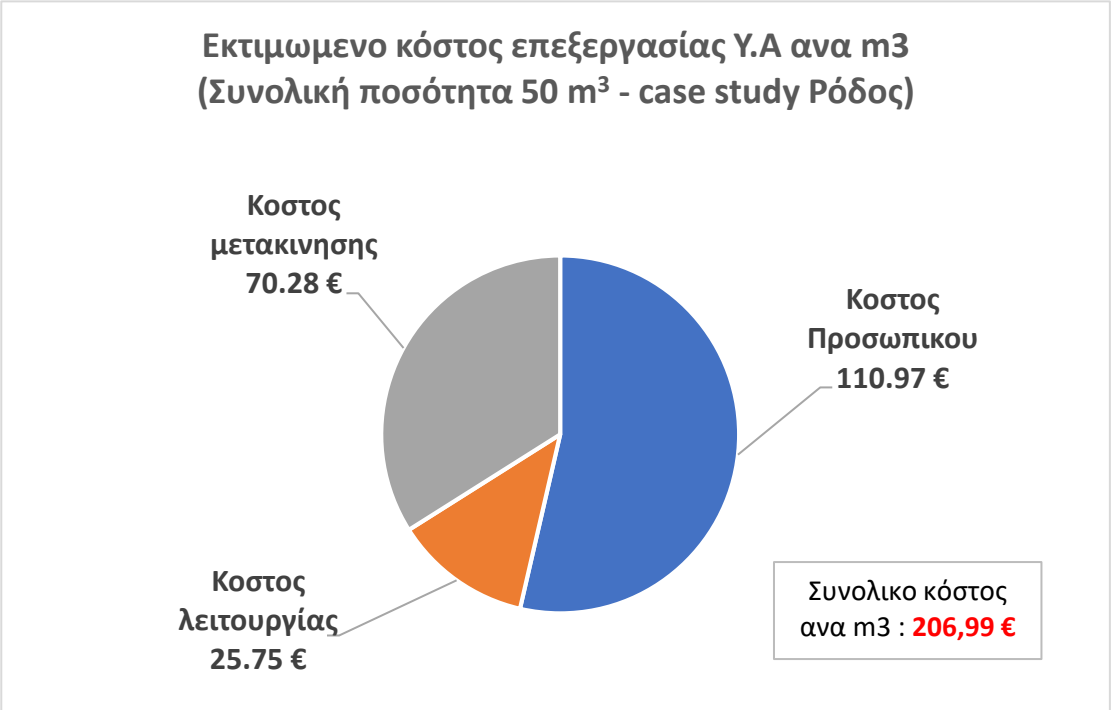
Πίνακας 27. Κόστος επεξεργασίας 50 m^3 αποβλήτων απολαστιχοποίησης για το αεροδρόμιο Ρόδου.

Επιμέρους κόστη	Κόστος εργασιών (€)	Κόστος ανά m^3 (€/m3)	Κόστος ανά m^3 με όφελος 30% (€/m3)
Κοστος Προσωπικου	3.880,00	77,60	110,97
Κοστος λειτουργίας	900,20	18,00	25,75
Κοστος μετακίνησης/κινητοποίησης	2.457,38	49,15	70,28
Σύνολο	**7.237,56**	**144,75**	**206,99**

Σχήμα 55. Κόστος εφαρμογής της κινητής μονάδας για επεξεργασία 50 m^3 αποβλήτων απολαστιχοποίησης για το αεροδρόμιο Θεσσαλονίκης.



Σχήμα 56. Κόστος εφαρμογής της κινητής μονάδας για επεξεργασία 50 m^3 αποβλήτων απολαστιχοποίησης για το αεροδρόμιο Ρόδου.



4.2. Διερεύνηση δυνατότητας επεξεργασίας άλλων αποβλήτων με τη κινητή μονάδα φυσικοχημικής επεξεργασίας

Στα πλαίσια διερεύνησης της δυνατότητας της κινητής μονάδας να επεξεργαστεί και άλλα ρεύματα υγρών αποβλήτων έγιναν επιπλέον πειράματα εντός του εργαστηρίου. Τα ρεύματα αποβλήτων που εξετάστηκαν ήταν α) απόβλητα από την παραγωγική διαδικασία της βρώσιμης ελιάς και β) απόβλητα βυρσοδεψείου.

4.2.1. Απόβλητο παραγωγής βρώσιμης ελιάς

Αρχικά έγιναν μετρήσεις διάφορων παραμέτρων σε δείγματα ανεπεξέργαστου αποβλήτου. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 28 βρέθηκε υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών και COD. Το pH ήταν ουδέτερο προς βασικό και η ηλεκτρική αγωγιμότητα περίπου 11 mS/cm. Επίσης, ανιχνεύτηκε υψηλή συγκέντρωση φαινολών.

***Πίνακας 28**. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά ανεπεξέργαστου αποβλήτου από παραγωγή βρώσιμης ελιάς.*

Παράμετρος	Μέθοδος	Μονάδες	Όριο ανίχνευσης	Αποτέλεσμα
pH	Standard Methods 4500-pH Value B	pH units	-	7,8
Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)	Standard Methods 2510 B Condactivity	mS/cm	10	10,96
Χημικώς απαιτούμενο οξυγόνο (COD)	ΕΛΟΤ EN ISO 15705 : 2002	mg/l	0,6	1775
Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS)	Standard Methods 2540 D	mg/l		259
Φαινόλες (phenols)	EPA 420.1	mg/l		56,7

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο από τη βιβλιογραφία προκύπτει ότι στην επεξεργασία απόβλητων παραγωγής βρώσιμης ελιάς αρκετά καλή απόδοση έχει η μέθοδος της ηλεκτροκροκίδωσης.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου η οποία μπορεί να προσαρμοστεί στη κινητή μονάδα επεξεργασίας έπειτα από ορισμένες τροποποιήσεις του συστήματος. Πιο αναλυτικά στη θέση των αναδευτήρων χρειάζεται να προσαρμοστούν μεταλλικές πλάκες (ηλεκτρόδια) στα οποία θα διοχετεύεται ρεύμα από κατάλληλο τροφοδοτικό.

4.2.1.1. Ηλεκτροκροκίδωση

Η ηλεκτροκροκίδωση είναι μια μέθοδος της οποίας η εφαρμογή έχει μελετηθεί σε απόβλητα παραγωγής βρώσιμης ελιάς και έχει δείξει σημαντικά πλεονεκτήματα. Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί στο σύστημα κινητής μονάδας επεξεργασίας που παρουσιάστηκε παραπάνω αντικαθιστώντας τους αναδευτήρες και τη προσθήκη χημικών με ηλεκτρόδια και παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Παρακάτω παρουσιάζονται τα πειράματα που έγιναν καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Η μέθοδος της ηλεκτροκροκίδωσης εφαρμόστηκε σε γυάλινο δοχείο όγκου 9 λίτρων, με χρήση ηλεκτροδίων αλουμινίου και σιδήρου. Η παροχή του ηλεκτρικού ρεύματος γινόταν από τροφοδοτικό πάγκου με 1 κανάλι 30V 5A (Uni-T UTP3315TFL-II).

Στο πρώτο πείραμα, τοποθετήθηκαν δύο πλάκες πάχους 2 mm και διαστάσεων 150 mm x 250 mm από αλουμίνιο και σίδηρο αντίστοιχα. Οι πλάκες είχαν μεταξύ τους απόσταση ίση με 1 cm. Έπειτα συνδέθηκαν τα ηλεκτρόδια στο τροφοδοτικό και εφαρμόστηκε ρεύμα έντασης *I = 5 A και τάσης V = 4.5 V*, η πυκνότητα του ρεύματος ήταν ίση με $J = 31,3\ mA/cm^2$. Το πείραμα έτρεξε για 180 min.

Από τα πρώτα λεπτά παρατηρήθηκαν φυσαλίδες υδρογόνου από την ηλεκτρόλυση του νερού. Στα δεκαπέντε περίπου λεπτά παρατηρήθηκαν κροκίδες και αφρισμός στην επιφάνεια του υγρού. Μέχρι το τέλος της δοκιμής υπήρχε σταδιακός αποχρωματισμός του υγρού. Παρακάτω στον Πίνακα 29 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δειγμάτων που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Πίνακας 29*. Αποτελέσματα πειράματος ηλεκτροκροκίδωσης για ένταση I = 5 A και τάση V = 4,5 V.*

Α/Α	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	ΜΟΝΑΔΑ	0 min	15 min	30 min	60 min	90 min	120 min	180 min	Filtration
1	pH	St. Met. 4500-pH Value B		7,7	8,4	8,7	9,1	9,4	9,6	10,0	10,4
2	Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)	St. Met. 2510 B	mS/cm	10,5	10,8	10,8	10,9	11,7	12,9	11,7	10,04
3	Χημικώς απαιτούμενο οξυγόνο (COD)	ISO 15705	mg/l	1580	1565	1590	1305	1820	1335	1360	
4	Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS)	Standard Methods 2540 D	mg/l	121						98	
5	Φαινόλες (phenols)	EPA 420.1	mg/l	56,7					47,1	44,4	

Στη συνέχεια έγινε το ίδιο πείραμα με χαμηλότερη ένταση ρεύματος ίση με *I = 1,5 A* και τάση ίση με *V = 1,6 V*, η πυκνότητα του ρεύματος ήταν ίση με *J = 9,375 mA/cm2*. Το πείραμα αυτή τη φορά έτρεξε για 120 min.

Και σε αυτή τη περίπτωση παρατηρήθηκαν φυσαλίδες υδρογόνου από τα πρώτα λεπτά. Στα δεκαπέντε περίπου λεπτά παρατηρήθηκαν κροκίδες και αφρισμός στην επιφάνεια του υγρού. Μέχρι το τέλος της δοκιμής υπήρχε σταδιακός αποχρωματισμός του υγρού. Παρακάτω στον Πίνακα 30 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δειγμάτων που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος.

***Πίνακας 30**. Αποτελέσματα πειράματος ηλεκτροκροκίδωσης για ένταση I = 1,5 A και τάση V = 1,6 V.*

Α/Α	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	ΜΟΝΑΔΑ	0 min	30 min	60 min	120 min
1	pH	St. Met. 4500-pH Value B		7,8	7,9	8,3	8,6
2	Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)	St. Met. 2510 B	mS/cm	10,65	10,80	10,65	10,51
3	Χημικώς απαιτούμενο οξυγόνο (COD)	ISO 15705 *	mg/l	1540	1545	1405	1195
4	Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS)	St. Met. 2540 D	mg/l	327			385

Στο τρίτο πείραμα που έγινε χρησιμοποιήθηκαν δύο ζευγάρια ηλεκτροδίων αντί για ένα, δηλαδή σύνολο τέσσερεις πλάκες δύο αλουμινίου και δυο σιδερένιες. Η απόσταση μεταξύ των πλακών ανά ζευγάρι ήταν επίσης ίση με 1 cm ενώ οι δύο συστοιχίες είχαν μεταξύ τους απόσταση ίση με 3,7 cm. Η ένταση του ρεύματος ήταν ίση με *I = 5 A και η τάση* ίση με *V = 3,5 V*, η πυκνότητα του ρεύματος ήταν ίση με *J = 13,89 mA/cm2*. Το πείραμα έτρεξε για 120 min. Επιπλέον καταγράφηκε και η θερμοκρασία καθώς στα προηγούμενα πειράματα παρατηρήθηκε αύξηση.

Και σε αυτή τη περίπτωση παρατηρήθηκαν φυσαλίδες υδρογόνου από τα πρώτα λεπτά. Στα δεκαπέντε περίπου λεπτά παρατηρήθηκαν κροκίδες και αφρισμός στην επιφάνεια του υγρού. Μέχρι το τέλος της δοκιμής υπήρχε σταδιακός αποχρωματισμός του υγρού. Παρακάτω στον Πίνακα 31 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δειγμάτων που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος.

***Πίνακας 31**. Αποτελέσματα πειράματος ηλεκτροκροκίδωσης για ένταση I = 5 A και τάση V = 3,5 V, με δυο συστοιχίες ηλεκτροδίων.*

Α/Α	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	ΜΟΝΑΔΑ	0 min	30 min	60 min	90 min	120 min	Super-natnt	Filtra-tion
1	pH	St. Met. 4500-pH Value B		7,9			8,4	9,8	10,4	8,1
2	Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)	St. Met. 2510 B	mS/cm	11,1		11,3	11,52	11,63	11,31	11,46
3	Θερμοκρασία		oC	20,1		24,5	26,3	26,5		
4	Χημικώς απαιτούμενο οξυγόνο (COD)	ISO 15705 *	mg/l		1225	1140	1120	1170	1120	420
5	Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS)	St. Met. 2540 D	mg/l					42	53	51

Στο τέταρτο πείραμα μειώθηκε το pH στο 5,5 με προσθήκη 5 ml H_2SO_2. Κατά τα άλλα οι συνθήκες ήταν παρόμοιες με το προηγούμενο πείραμα. Χρησιμοποιήθηκαν δύο ζευγάρια ηλεκτροδίων, με απόσταση μεταξύ των πλακών ανά ζευγάρι ίση με 1 cm και απόσταση

μεταξύ των συστοιχιών ίση με 2,9 cm. Η ένταση του ρεύματος ήταν ίση με *I = 5 A και η τάση* ίση με *V = 3,74 V*, η πυκνότητα του ρεύματος ήταν ίση με *J = 13,89 mA/cm2*. Το πείραμα έτρεξε για 120 min.

Και σε αυτή τη περίπτωση παρατηρήθηκαν φυσαλίδες υδρογόνου από τα πρώτα λεπτά. Στα δεκαπέντε περίπου λεπτά παρατηρήθηκαν κροκίδες και αφρισμός στην επιφάνεια του υγρού. Μέχρι το τέλος της δοκιμής υπήρχε σταδιακός αποχρωματισμός του υγρού. Παρακάτω στον Πίνακα 32 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δειγμάτων που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Πίνακας 32*. Αποτελέσματα πειράματος ηλεκτροκροκίδωσης για ένταση I = 5 A και τάση V = 3,75 V, με δυο συστοιχίες ηλεκτροδίων και αρχικό pH ίσο με 5,5.*

Α/Α	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	ΜΟΝΑΔΑ	0 min	30 min	60 min	90 min	120 min	Super-natnt
1	pH	St. Met. 4500-pH Value B		5,5	6,2	6,7	6,9	7,5	8,1
2	Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)	St. Met. 2510 B	mS/cm	10,66	11,21	11,44	11,57	11,62	11,31
3	Θερμοκρασία		oC	20,3	22,1	23,7	23,8	25,0	
4	Χημικώς απαιτούμενο οξυγόνο (COD)	ISO 15705 *	mg/l	2100	1035	1100	1800	915	885
5	Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS)	St. Met. 2540 D	mg/l	403	230			270	60

Στο πέμπτο πείραμα μειώθηκε το pH στο 4 με προσθήκη 5,5 ml H_2SO_2. Κατά τα άλλα οι συνθήκες ήταν παρόμοιες με το προηγούμενο πείραμα. Χρησιμοποιήθηκαν δύο ζευγάρια ηλεκτροδίων, με απόσταση μεταξύ των πλακών ανά ζευγάρι ίση με 1 cm και απόσταση μεταξύ των συστοιχιών ίση με 2,9 cm. Η ένταση του ρεύματος ήταν ίση με *I = 5 A και η τάση* ίση με *V = 4 V*, η πυκνότητα του ρεύματος ήταν ίση με *J = 13,89 mA/cm2*. Το πείραμα έτρεξε για 120 min.

Και σε αυτή τη περίπτωση παρατηρήθηκαν φυσαλίδες υδρογόνου από τα πρώτα λεπτά. Στα δεκαπέντε περίπου λεπτά παρατηρήθηκαν κροκίδες και αφρισμός στην επιφάνεια του υγρού. Μέχρι το τέλος της δοκιμής υπήρχε σταδιακός αποχρωματισμός του. Παρακάτω στον Πίνακα 33 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δειγμάτων που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος.

***Πίνακας 33**. Αποτελέσματα πειράματος ηλεκτροκροκίδωσης για ένταση I = 5 A και τάση V = 4 V, με δυο συστοιχίες ηλετροδίων και αρχικό pH ίσο με 4.*

Α/Α	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	ΜΟΝΑΔΑ	0 min	30 min	60 min	90 min	120 Min	Super-natnt
1	pH	St. Met. 4500-pH Value B		4,0	5,9	6,7	7,2	7,6	7,8
2	Ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC)	St. Met. 2510 B	mS/cm	11,91	11,80	11,91	12,11	12,33	11,77
3	Θερμοκρασία		oC	20,3				25,6	
4	Χημικώς απαιτούμενο οξυγόνο (COD)	ISO 15705 *	mg/l	1885				575	595
5	Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS)	St. Met. 2540 D	mg/l	183				104	21

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι η μέθοδος της ηλεκτροκροκίδωσης είναι αρκετά αποδοτική μέθοδος επεξεργασίας του συγκεκριμένου αποβλήτου. Συγκεκριμένα, με χρήση δυο συστοιχιών ηλεκτροδίων αλουμινίου και σιδήρου, σε pH=4, ένταση ρεύματος *I* = 5 A, τάση *V* = 4 V, πυκνότητα ρεύματος *J* = 13,89 mA/cm2 και διάρκεια ίση με 120 min, επιτεύχθηκε απομάκρυνση COD ίση με 68,4% και απομάκρυνση TSS ίση με 88,5%.

4.2.2. Απόβλητο βυρσοδεψείου

Εκτός από τα απόβλητα επεξεργασίας βρώσιμης ελιάς, διερεύνηση εφαρμογής στη κινητή μονάδα επεξεργασίας έγινε και για απόβλητα βυρσοδεψείου. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειράματα που έγιναν καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Αρχικά έγιναν μετρήσεις διάφορων παραμέτρων σε δείγματα ανεπεξέργαστου αποβλήτου. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 34 βρέθηκε υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών και COD. Το pH ήταν όξινο και η ηλεκτρική αγωγιμότητα κοντά στα 2000 μS/cm. Επίσης, ανιχνεύτηκε υψηλή συγκέντρωση χρωμίου (Cr).

Πίνακας 34*. Αναλύσεις ανεπεξέργαστου αποβλήτου βυρσοδεψείου*

Παράμετρος	Μέθοδος	Μονάδες	Όριο ανίχνευσης	Αποτέλεσμα
Προσδιορισμός pH	Standard Methods 4500-pH Value B	pH units	-	5,4
Προσδιορισμός Ηλεκτρικής Αγωγιμότητας (EC)	Standard Methods 2510 B Condactivity	μS/cm	10	1908
Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD)	ΕΛΟΤ EN ISO 15705 : 2002	mg/l	10	1860
Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS)	Standard Methods 2540 D	mg/l	10	80
Εξασθενές χρώμιο (Cr6)	APHA 3500-Cr D.	mg/L	0,001	13

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο από τη βιβλιογραφία προκύπτει ότι στην επεξεργασία απόβλητων βυρσοδεψείου αρκετά καλή απόδοση φαίνεται να έχουν η μέθοδος της κροκίδωσης-συσσωμάτωσης, της φίλτρανσης μέσω ενεργού άνθρακα και της ηλεκτροκροκίδωσης.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου της κροκίδωσης-συσσωμάτωσης και καθίζησης σε συνδυασμό με φίλτρανση η οποία μπορεί να εφαρμοστεί στη κινητή μονάδα επεξεργασίας χωρίς τροποποιήσεις του συστήματος.

4.2.2.1. Κροκίδωση – Συσσωμάτωση – Καθίζηση και Φίλτρανση

Για την απομάκρυνση των ρυπογόνων παραμέτρων από το παραπάνω απόβλητο αρχικά χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της κροκίδωσης – συσσωμάτωσης. Ως κροκιδωτικό υλικό χρησιμοποιήθηκε PAC (17-18%), το οποίο δοκιμάστηκε σε διάφορες συγκεντρώσεις. Ο τρόπος ανάμιξης σε όλες τις περιπτώσεις ήταν ίδιος, 2 λεπτά γρήγορη ανάμιξη και 13 λεπτά αργή. Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε ως κριτήριο το ποσοστό απομάκρυνσης του COD και των TSS. Παρακάτω στον Πίνακα 35 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

***Πίνακας 35**. Αποτελέσματα απομάκρυνσης COD και TSS έπειτα από κροκίδωση-συσσωμάτωση και καθίζηση για διάφορες συγκεντρώσεις PAC (17-18%).*

Συγκέντρωση κροκιδωτικού (mg/L) PAC (17-18%)	Απομάκρυνση COD (%)	Απομάκρυνση TSS (%)
0,548	8,60	18,75
1,096	9,95	52,5
1,644	11,29	77,5
1,918	26,88	84,15
2,192	8,06	83,75
2,740	11,29	78,1
3,288	8,87	32,5

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προέκυψε ότι σε συγκέντρωση 1,918 mg/L επιτυγχάνεται απομάκρυνση COD ίση με 26,88 % και απομάκρυνση TSS ίση με 84,15 %. Στη συνέχεια έγιναν ξανά πειράματα με συγκέντρωση PAC (17-18%) 1,918 mg/L σε μεγαλύτερο δοχείο ώστε να προσεγγιστούν καλύτερα οι πραγματικές συνθήκες και να παραχθεί σε μεγάλη ποσότητα επεξεργασμένο απόβλητο ώστε να χρησιμοποιηθεί σε πειράματα φίλτρανσης.

Έπειτα από τη κροκίδωση-συσσωμάτωση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της φίλτρανσης με σκοπό να μειωθούν περεταίρω οι ρυπογόνοι παράγοντες του αποβλήτου. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε φίλτρο βάθους πληρωμένο με δυο στρώσεις ψείρα (2 x 15%) και ενδιάμεσα μια στρώση χαλαζιακή άμμο (30%) και μια στρώση ενεργό άνθρακα (40%). Παρακάτω στον Πίνακα 36 παρουσιάζεται η απόδοση που προέκυψε με κριτήριο την απομάκρυνση του COD και των TSS.

***Πίνακας 36**. Αποτελέσματα απομάκρυνσης COD, TSS και Cr^{+6} έπειτα από φίλτρανση μέσω φίλτρου βάθους, πληρωμένο με λευκό χαλίκι 30%, χαλαζιακή άμμος 30% και ενεργό άνθρακα 40%.*

Φίλτρο	Απομάκρυνση COD (%)	Απομάκρυνση TSS (%)	Απομάκρυνση Cr^{+6} (%)
Φίλτρο βάθους πληρωμένο με λευκό χαλίκι 30%,χαλαζιακή άμμος 30% και ενεργό άνθρακα 40%	51,47	> 87,5	69,2

Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν ότι η μέθοδος της κροκίδωσης-συσσωμάτωσης σε συνδυασμό με φίλτρανση δεν είναι αρκετά αποδοτική μέθοδος επεξεργασίας του συγκεκριμένου αποβλήτου. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτροκροκίδωσης η οποία όπως προαναφέρθηκε μπορεί να εφαρμοστεί στη κινητή μονάδα επεξεργασίας κάνοντας ορισμένες τροποποιήσεις.

4.2.2.2. Ηλεκτροκρακίδωση

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτρκροκίδωσης σε απόβλητο βυρσοδεψείου με χρήση ηλεκτροδίων αλουμινίου και σιδήρου.

Συγκεκριμένα, ή μέθοδος εφαρμόστηκε με συνολικά τέσσερα (4) ηλεκτρόδια, δυο (2) αλουμινίου και δυο (2) σιδήρου. Τα ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν εναλλάξ σε διπολική (bipolar) διάταξη και ανάμεσα τους τοποθετήθηκε κομμάτι ξύλου πάχους 1 cm για μόνωση. Το πείραμα έτρεξε για ενενήντα (90) λεπτά δίνοντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 37.

***Πίνακας 37**. Αποτελέσματα πειράματος ηλεκτροκρακίδωσης απόβλητου βυρσοδεψείου για τάση V = 8 V, με δυο συστοιχίες ηέλτροδίων και αρχικό pH ίσο με 5,3.*

A/A	Παράμετρος/Parameter	Μέθοδος ανάλυσης/Method Of Analysis	Μονάδα/ Unit	0 (min)	15 (min)	30 (min)	60 (min)	90 (min)
1	pH	St. Met. 4500 - pH Value B		5,3	5,6	6,0	8,2	8,9
2	EC	St. Met. 2510 B	mS/cm	2,18	0,19	2,12	0,19	0,19
3	Τάση		V	8,100	7,970	8,010	8,200	8,090
4	Θερμοκρασία		oC	21,7	22,5	23,5		

Στη συνέχεια λήφθηκε δείγμα από το πλέον επεξεργασμένο απόβλητο και έγιναν αναλύσεις οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 38 . Τα αποτελέσματα δεν ήταν ικανοποιητικά καθώς το COD μειώθηκε μόνο κατά 15,8% και τα TSS κατά 8,6%. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται επίσης και οι αναλύσεις που έγιναν στο επεξεργασμένο απόβλητο έπειτα από φίλτρανση μέσω διηθητικού χαρτιού που έγινε με σκοπό τη περεταίρω μείωση των ρυπογόνων παραμέτρων.

***Πίνακας 38**. Αναλύσεις αποβλήτου βυρσοδεψείου έπειτα από τη μέθοδο της ηλεκτροκροκίδωσης και έπειτα από φίλτρανση μέσω διηθητικού χαρτιού.*

Α/Α	Παράμετρος/ Parameter	Μέθοδος ανάλυσης/ Method Of Analysis	Μονάδα/ Unit	Όριο Ανίχνευσης/ Detection Limit	Αρχικό Απόβλητο (0 min)	Επεξερ-γασμένο (90 min)	Επεξερ-γασμένο μετά από Φίλτρανση
1	pH	St. Met. 4500 pH Value B			5,3	8,8	9,0
2	EC	St. Met. 2510 B	mS/cm		2,18	0,17	0,16
3	Τάση		V		8,100		
4	Θερμοκρασία		oC		21,7		
7	COD	ISO 15705	mg/l	10	1860	1510	1565
8	TSS	Standard Methods 2540 D	mg/l	10	80	11	11
9	Εξασθενές χρώμιο (Cr6)	DIN EN ISO 17294-2 : 2005-02	mg/L	0,001		0,021	

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι ούτε η μέθοδος της ηλεκτροκροκίδωσης σε συνδυασμό με τη φίλτρανση μπόρεσε να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα πέρα από μείωση του εξασθενές χρωμίου κατά 99,8%

5. Συμπεράσματα

Από την ανάλυση των δεδομένων και σχημάτων του 4ου κεφαλαίου εξάγονται τα εξής συμπεράσματα σχετικά με την επεξεργασία υγρών αποβλήτων απολαστιχοποίησης μέσω κινητής μονάδας φυσικοχημικής επεξεργασίας (κροκίδωση-συσσωμάτωση και φίλτρανση):

- Η επεξεργασία των αποβλήτων απολαστιχοποίησης μέσω κινητής μονάδας φυσικοχημικής επεξεργασίας είναι μια αποτελεσματική και ενδιαφέρουσα λύση.
- Από τα πειράματα εντός του εργαστηρίου προκύπτει ότι η μέθοδος της κροκίδωσης-συσσωμάτωση και καθίζησης μπορεί να πετύχει απομάκρυνση COD ίση με 92,0 % και TSS > 97,8 %. Ενώ ο συνδυασμός της κροκίδωσης-συσσωμάτωσης και καθίζησης με φίλτρανση μπορεί να πετύχει αντίστοιχα απομάκρυνση COD ίση με 94,1 % και TSS > 97,9 %.
- Από την πιλοτική εφαρμογή προκύπτει ότι η μέθοδος της κροκίδωσης-συσσωμάτωση και καθίζησης μπορεί να πετύχει απομάκρυνση COD ίση με 78,2 % και TSS 93,6 %. Ενώ ο συνδυασμός της κροκίδωσης-συσσωμάτωσης και καθίζησης με φίλτρανση μπορεί να πετύχει αντίστοιχα απομάκρυνση COD ίση με 93,9 % και TSS > 97,5 %.
- Από την εφαρμογή πλήρους κλίμακας προκύπτει ότι η κροκίδωση-συσσωμάτωση και καθίζηση κατά μέσο πετυχαίνει απομάκρυνση COD ίση με 78,21 % και TSS 95,1 %. Ενώ σε συνδυασμό με φίλτρανση κατά μέσο πετυχαίνει απομάκρυνση COD ίση με 94,4 % και TSS < 97,2 %.
- Η διαδικασία της καθίζησης στα πειράματα εντός του εργαστηρίου χρειάζονταν 45 περίπου λεπτά ενώ κατά τις εφαρμογές πλήρους κλίμακας 120 λεπτά.
- Κατά τον κορεσμό των φίλτρων υπήρξε αύξηση της πίεσης από 1 έως 3,2 bar.
- Η κινητή μονάδα φυσικοχημικής επεξεργασίας είναι σε θέση να επεξεργαστεί 47 m^3 μέσα σε 21 ώρες λειτουργείας (Περίπτωση Α.1), 70,5 m^3 μέσα σε 35 ώρες λειτουργείας (Περίπτωση Β.1), 94 m^3 μέσα σε 46 ώρες λειτουργείας (Περίπτωση Γ.1), 117,5 m^3 μέσα σε 58 ώρες λειτουργείας (Περίπτωση Δ) και 141 m^3 μέσα σε 74 ώρες λειτουργείας (Περίπτωση Ε). Οι παραπάνω τιμές αναφέρονται στο Μέσο Όγκο Φίλτρανσης και στις περιπτώσεις όπου η λάσπη αποθηκεύεται εκτός του συστήματος.
- Οι ρυθμοί επεξεργασίας των αποβλήτων για τις περιπτώσεις αποθήκευσης της λάσπης εκτός του συστήματος είναι: Περίπτωση Α.1 = 2,24 m^3/h, Περίπτωση Β.1 = 2,01 m^3/h, Περίπτωση Γ.1 = 2,04 m^3/h, Περίπτωση Δ = 2,02 m^3/h, και Περίπτωση Ε = 1,91 m^3/h.
- Για τις περιπτώσεις αποθήκευσης της λάσπης εντός του συστήματος η μονάδα είναι σε θέση να επεξεργαστεί 47 m^3 σε 22 ώρες λειτουργείας (Περίπτωση Α.2), 70.5 m^3 σε 42 ώρες λειτουργείας (Περίπτωση Β.2) και 90 m^3 σε 77 ώρες λειτουργείας (Περίπτωση Γ.2). Οι παραπάνω τιμές προκύπτουν βάση του Μέσου Όγκου Φίλτρανσης για τις δύο πρώτες περιπτώσεις (Α.2 και Β.2) και για το μέγιστο όγκο επεξεργασίας λόγω πλήρωσης του συστήματος με λάσπη για τη τελευταία (Γ.2).
- Επισημαίνεται ότι στις περιπτώσεις που η λάσπη αποθηκεύεται εντός του συστήματος ο ρυθμός επεξεργασίας δεν είναι σταθερός. Συγκεκριμένα ξεκινάει από 2,24 m3/h για τη Περίπτωση Α.2, από 2,01 m3/h για τη Περίπτωση Β.2 και από 2,04 m^3/h για τη Περίπτωση Γ.2 και σταδιακά μειώνεται.

Αντίστοιχα, από τη διερεύνηση της εφαρμογής της μονάδας επεξεργασίας σε υγρά απόβλητα από παραγωγή βρώσιμης ελιάς και υγρά απόβλητα βυρσοδεψείου εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Η επεξεργασία των αποβλήτων από παραγωγή βρώσιμης ελιάς μέσω της κινητής μονάδας φυσικοχημικής επεξεργασίας είναι πιθανό να αποτελεί μια αποτελεσματική και ενδιαφέρουσα επιλογή, καθώς μέσω της διεργασίας της ηλεκτροκροκίδωσης σε εργαστηριακό επίπεδο επιτεύχθηκε απομάκρυνση COD ίση με 68,4 % και TSS 88,5 %. Παρόλα αυτά οι φαινόλες απομακρύνθηκαν μόλις κατά 21,7 %.
- Η επεξεργασία των αποβλήτων βυρσοδεψείου μέσω της κινητής μονάδας φυσικοχημικής επεξεργασίας δεν είναι πιθανό να αποτελεί αποτελεσματική επιλογή, καθώς μέσω της διεργασίας της κροκίδωσης-συσσωμάτωσης και καθίζησης σε συνδυασμό με φίλτρανση σε εργαστηριακό επίπεδο επιτεύχθηκε απομάκρυνση COD ίση με 51,5 % και TSS > 85,5 %, ενώ μέσω της διεργασίας της ηλεκτροκροκίδωσης σε εργαστηριακό επίπεδο επιτεύχθηκε απομάκρυνση COD ίση με 15,8 % και TSS 8,6 %. Επισημαίνεται ότι το Cr^{6+} κατά την κροκίδωση-συσσωμάτωση και φίλτρανση μειώθηκε κατά 69,2 % και κατά την ηλεκτροκροκίδωση μειώθηκε κατά 99,8 %.

Βιβλιογραφία

Abdelsalam, E. *et al.* (2017) 'Effects of Co and Ni nanoparticles on biogas and methane production from anaerobic digestion of slurry', *Energy Conversion and Management*. doi: 10.1016/j.enconman.2016.05.051.

Abduljabbar, A. S., Salman, N. D. and Jaleel, Z. T. (2020) 'Design of an Expert System for Airport Rubber Removal', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 737(1). doi: 10.1088/1757-899X/737/1/012135.

Adathodi, L., Raja, M. J. and Shanagam, N. K. (2018) 'Recycling of waste tyre rubber deposits in airfield runway: A review', *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(2), pp. 275–285.

Amuda, O.S. and Amoo, I.A., 2007. Coagulation/flocculation process and sludge conditioning in beverage industrial wastewater treatment. Journal of Hazardous Materials, 141(3), pp.778-783.

An, C. *et al.* (2017) 'Emerging usage of electrocoagulation technology for oil removal from wastewater: A review', *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 579, pp. 537–556. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.062.

Appiah-Brempong, M. *et al.* (2022) 'Artisanal tannery wastewater: quantity and characteristics', *Heliyon*. The Author(s), 8(1), p. e08680. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08680.

Arcadio P. Sincero, G. A. S. (2003) *Physical-Chemical Treatment of Water and Wastewater*. doi: 10.1002/j.1551-8833.1928.tb17744.x.

Bablon, G.P., Ventresque, C. and Aïm, R.B., 1988. Developing a Sand-GAC Filter to Achieve High-Rate Biological Filtration. Journal-American Water Works Association, 80(12), pp.47-53.

Badrus, Z., 2018. Potential of natural flocculant in coagulation-flocculation wastewater treatment process. In E3S Web of Conferences (Vol. 73, p. 05006). EDP Sciences.

Benekos, A. K. *et al.* (2019) 'Treatment of table olive processing wastewaters using electrocoagulation in laboratory and pilot-scale reactors', *Process Safety and Environmental Protection*. Institution of Chemical Engineers, 131, pp. 38–47. doi: 10.1016/j.psep.2019.08.036.

Bennett, G. F. (2002) 'Handbook of water and wastewater treatment technology', *Journal of Hazardous Materials*. doi: 10.1016/s0304-3894(96)01848-1.

Cappelletti, G.M., Nicoletti, G.M. and Russo, C., 2011. Wastewater from table olive industries. Waste water-evaluation and management, pp.351-376.

Culková, E. *et al.* (2013) 'Erratum to Boron-Doped diamond electrode as sensitive and selective green electroanalytical tool for heavy metals environmental monitoring: Zinc detection in rubber industry waste (Polish Journal of Environmental Studies, (2013), 22, 5, (1317-1323))', *Polish Journal of Environmental Studies*, 22(6), p. 1891.

Deligiorgis, A. *et al.* (2008) 'Electrochemical oxidation of table olive processing wastewater over boron-doped diamond electrodes: Treatment optimization by factorial design', *Water Research*, 42(4–5), pp. 1229–1237. doi: 10.1016/j.watres.2007.09.014.

Duan, J. and Gregory, J. (2003) 'Coagulation by hydrolysing metal salts', *Advances in Colloid and Interface Science*, 100–102(SUPPL.), pp. 475–502. doi: 10.1016/S0001-8686(02)00067-2.

Feng, J.W., Sun, Y.B., Zheng, Z., Zhang, J.B., Shu, L.I. and Tian, Y.C., 2007. Treatment of tannery wastewater by electrocoagulation. Journal of environmental sciences, 19(12), pp.1409-1415.

Garcia-Garcia, P., Lopez-Lopez, A., Moreno-Baquero, J.M. and Garrido-Fernandez, A., 2011. Treatment of wastewaters from the green table olive packaging industry using electro-coagulation. Chemical engineering journal, 170(1), pp.59-66.

Garcia-Segura, S., Eiband, M.M.S., de Melo, J.V. and Martínez-Huitle, C.A., 2017. Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. Journal of Electroanalytical Chemistry, 801, pp.267-299.

Ghernaout, D. (2015) 'Brownian Motion and Coagulation Process', *American Journal of Environmental Protection*, 4(5), p. 1. doi: 10.11648/j.ajeps.s.2015040501.11.

Giaccherini, F. *et al.* (2017) 'Carbon and energy footprint analysis of tannery wastewater treatment: A Global overview', *Water Resources and Industry*. Elsevier B.V., 17(February), pp. 43–52. doi: 10.1016/j.wri.2017.03.001.

Ginos, A., Manios, T. and Mantzavinos, D., 2006. Treatment of olive mill effluents by coagulation–flocculation–hydrogen peroxide oxidation and effect on phytotoxicity. Journal of Hazardous Materials, 133(1-3), pp.135-142.

Golder, Animes & Chanda, Ajoy & Samanta, Amar & Ray, Subhabrata. (2007). Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution: Electrocoagulation vs Chemical Coagulation. Separation Science and Technology - SEPAR SCI TECHNOL. 42. 2177-2193. 10.1080/01496390701446464.

Gransberg, D. A. (2008) *Impact of Airport Rubber Removal Techniques on Runways*, *Impact of Airport Rubber Removal Techniques on Runways*. doi: 10.17226/2221.

Graese, S.L., Snoeyink, V.L. and Lee, R.G., 1987. Granular Activated Carbon Filter-Adsorber Systems. Journal-American Water Works Association, 79(12), pp.64-74.

Hakizimana, J.N., Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P. and Naja, J., 2017. Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. Desalination, 404, pp.1-21.

Horne, W. B. *et al.* (1975) 'MEMORANDUM : E'.

Hoslett, J. *et al.* (2018) 'Surface water filtration using granular media and membranes: A review', *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 639, pp. 1268–1282. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.247.

Hu, Y. *et al.* (2014) 'Mechanism and experimental investigation of ultra high pressure water jet on rubber cutting', *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 15(9), pp. 1973–1978. doi: 10.1007/s12541-014-0553-0.

Huang, C.P., Dong, C. and Tang, Z., 1993. Advanced chemical oxidation: its present role and potential future in hazardous waste treatment. Waste management, 13(5-7), pp.361-377.

Huang, T. *et al.* (2020) 'Volatilization characteristics and risk evaluation of heavy metals during the pyrolysis and combustion of rubber waste without or with molecular sieves', *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Elsevier Inc., 198(April), p. 110677. doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110677.

Igwe, J. and Abia, A.A., 2006. A bioseparation process for removing heavy metals from waste water using biosorbents. African journal of biotechnology, 5(11).

Inan, H., Dimoglo, A., Şimşek, H. and Karpuzcu, M., 2004. Olive oil mill wastewater treatment by means of electro-coagulation. Separation and purification technology, 36(1), pp.23-31.

Irfan, M., Butt, T., Imtiaz, N., Abbas, N., Khan, R.A. and Shafique, A., 2017. The removal of COD, TSS and colour of black liquor by coagulation–flocculation process at optimized pH,

settling and dosing rate. Arabian Journal of Chemistry, 10, pp.S2307-S2318.

John Bratby (2016) *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*. third edit.

Khaniabadi, Y. O. *et al.* (2015) 'Adsorption of 4-chlorophenol from aqueous solution using activated carbon synthesized from aloe vera green wastes', *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 3(November), pp. 120–129. doi: 10.22102/jaehr.2015.40194.

Kopsidas, G. C. (1992) 'Wastewater from the preparation of table olives', *Water Research*, 26(5), pp. 629–631. doi: 10.1016/0043-1354(92)90237-X.

Kurniawan, T. A. *et al.* (2006) 'Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals', *Chemical Engineering Journal*, 118(1–2), pp. 83–98. doi: 10.1016/j.cej.2006.01.015.

L. K. Wang, Y.-T. Hung, N. K. S. (2005) *Physicochemical Treatment Processes*. volume 3, *in: Environmental chemistry of dyes and pigments*. volume 3. doi: 10.1385/1-59259-820-x:315.

Lofrano, G. *et al.* (2013) 'Chemical and biological treatment technologies for leather tannery chemicals and wastewaters: A review', *Science of the Total Environment*, 461–462, pp. 265–281. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.05.004.

Moezzi, A., McDonagh, A. M. and Cortie, M. B. (2012) 'Zinc oxide particles: Synthesis, properties and applications', *Chemical Engineering Journal*. Elsevier B.V., 185–186, pp. 1–22. doi: 10.1016/j.cej.2012.01.076.

Mohammed, K. (2021) 'Tannery Waste Management : Challenges and Opportunities', (December 2017).

Mostafazadeh, A.K., Zolfaghari, M. and Drogui, P., 2016. Electrofiltration technique for water and wastewater treatment and bio-products management: A review. Journal of Water Process Engineering, 14, pp.28-40.

Moulik, S.P., 1971. Physical aspects of electrofiltration. Environmental Science & Technology, 5(9), pp.771-776.

Murat Eyvaz, Serkan Arslan, E. G. and E. Y. (2016) 'Textile Materials in Liquid Filtration Practices: Current Status and Perspectives in Water and Wastewater Treatment', in, p. 432. doi: 10.5772/66015.

Naje, A. S. *et al.* (2017) 'A review of electrocoagulation technology for the treatment of textile wastewater', *Reviews in Chemical Engineering*, 33(3), pp. 263–292. doi: 10.1515/revce-2016-0019.

Najm, I., Tate, C. and Selby, D., 1998. Optimizing enhanced coagulation with PAC: a case study. Journal-American Water Works Association, 90(10), pp.88-95.

Niazmand, R., Jahani, M. and Kalantarian, S. (2019) 'Treatment of olive processing wastewater by electrocoagulation: An effectiveness and economic assessment', *Journal of Environmental Management*. Elsevier, 248(February), p. 109262. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109262.

Nielsen, P. H. (2015) 'FISH Handbook for Biological Wastewater Treatment', *Water Intelligence Online*. doi: 10.2166/9781780401775.

Nippatla, N. and Philip, L. (2020) 'Electrochemical process employing scrap metal waste as electrodes for dye removal', *Journal of Environmental Management*. Elsevier Ltd, 273(June), p. 111039. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111039.

Nur-E-Alam, M., Mia, M.A.S., Ahmad, F. et al. An overview of chromium removal techniques

from tannery effluent. Appl Water Sci 10, 205 (2020). https://doi.org/10.1007/s13201-020-01286-0

Rameshraja, D. and Suresh, S., 2011. Treatment of tannery wastewater by various oxidation and combined processes. International Journal of Environmental Research, 5(2), pp.349-360.

Panizza, M. and Cerisola, G., 2004. Electrochemical oxidation as a final treatment of synthetic tannery wastewater. Environmental science & technology, 38(20), pp.5470-5475.

Papadaki, E. and Mantzouridou, F.T., 2016. Current status and future challenges of table olive processing wastewater valorization. Biochemical engineering journal, 112, pp.103-113.

Paper, D. I. (2010) 'Rubber Removal Techniques'.

Paramasivam, R., Mhaisalkar, V.A. and Berthouex, P.M., 1981. Slow sand filter design and construction in developing countries. Journal-American Water Works Association, 73(4), pp.178-185.

Rincón-Llorente, B., la Lama-Calvente, D., Fernández-Rodríguez, M.J. and Borja-Padilla, R., 2018. Table olive wastewater: Problem, treatments and future strategy. A review. Frontiers in Microbiology, p.1641.

Saxena, G., Chandra, R. and Bharagava, R.N., 2016. Environmental pollution, toxicity profile and treatment approaches for tannery wastewater and its chemical pollutants. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume 240, pp.31-69.

Servais, P., Billen, G., Bouillot, P. and Benezet, M., 1992. A pilot study of biological GAC filtration in drinking water. Aqua, 41, pp.163-168.

Song, Z., Williams, C.J. and Edyvean, R.G.J., 2004. Treatment of tannery wastewater by chemical coagulation. Desalination, 164(3), pp.249-259.

Sounthararajah, D.P., Loganathan, P., Kandasamy, J. and Vigneswaran, S., 2015. Adsorptive removal of heavy metals from water using sodium titanate nanofibres loaded onto GAC in fixed-bed columns. Journal of hazardous materials, 287, pp.306-316.

Teh, C. Y. *et al.* (2016) 'Recent Advancement of Coagulation-Flocculation and Its Application in Wastewater Treatment', *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 55(16), pp. 4363–4389. doi: 10.1021/acs.iecr.5b04703.

Tetreault, A. (2003) 'Electrocoagulation Process for Wastewater Treatment', 081678364(February), pp. 1–30. Available at: http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=development of combined treatment of electro-coagulation and flocculation for various types of wastewater&source=web&cd=5&ved=0CGcQFjAE&url=http://www.redmeatinnovation.com.au/project-reports/report-categories/environ.

Tomaszewska, M., Mozia, S. and Morawski, A.W., 2004. Removal of organic matter by coagulation enhanced with adsorption on PAC. Desalination, 161(1), pp.79-87.

Tsagaraki, E., Lazarides, H.N. and Petrotos, K.B., 2007. Olive mill wastewater treatment. In Utilization of by-products and treatment of waste in the food industry (pp. 133-157). Springer, Boston, MA.

Tzoupanos, N.D. and Zouboulis, I., 2008, August. Coagulation-flocculation processes in water/wastewater treatment: the application of new generation of chemical reagents. In 6th IASME/WSEAS international conference on heat transfer, thermal engineering and environment (HTE'08), August 20th–22nd, Rhodes, Greece (pp. 309-317).

Urbonas, B.R., 1999. Design of a sand filter for stormwater quality enhancement. Water Environment Research, 71(1), pp.102-113.

Vepsäläinen, M. and Sillanpää, M. (2020) *Electrocoagulation in the treatment of industrial waters and wastewaters*, *Advanced Water Treatment: Electrochemical Methods*. doi: 10.1016/B978-0-12-819227-6.00001-2.

Wilkins, E. and Yang, Q., 1996. Comparison of the heavy metal removal efficiency of biosorbents and granular activated carbons. Journal of Environmental Science & Health Part A, 31(9), pp.2111-2128.

Zailani, L. W. M. and Zin, N. S. M. (2018) 'Application of Electrocoagulation in Various Wastewater and Leachate Treatment-A Review', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 140(1). doi: 10.1088/1755-1315/140/1/012052.

Zhao, C. and Chen, W. (2019) 'A review for tannery wastewater treatment: some thoughts under stricter discharge requirements', *Environmental Science and Pollution Research*. Environmental Science and Pollution Research, 26(25), pp. 26102–26111. doi: 10.1007/s11356-019-05699-6.

'ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΔΕΡΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΑΙΓΑΙΟ ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ : ΠΕΛΑΓΙΑ ΓΙΑΚΟΥΠΗ ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΑΙΓΑΙΟ' (2017).