



**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο**

**Σχολή Χημικών Μηχανικών**

**Τομέας Ι**

**Μονάδα Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Παπαθανάσης Χρήστος

**ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΤΗΣ  
ΚΟΜΠΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ  
ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΘΕΙΚΟΥ  
ΑΜΜΩΝΙΟΥ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Χαμηλάκης Στυλιανός

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2023

## Πρόλογος

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, με θέμα «Παραγωγή θειικού αμμωνίου από τις εκπομπές των διεργασιών κομποστοποίησης και αναερόβιας χώνευσης», πραγματοποιήθηκε στη Μονάδα Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Βιοτεχνολογίας της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του κ. Στυλιανού Χαμηλάκη, Καθηγητή του ΕΜΠ.

Στο σημείο αυτό αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω τις ειλικρινείς και θερμές ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας:

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Χαμηλάκη που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερο και επίκαιρο θέμα το οποίο μου προσέφερε νέες γνώσεις και αποτέλεσε κίνητρο για ενασχόληση με το συγκεκριμένο τομέα.

Η επιτυχής ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής θα ήταν αδύνατη χωρίς τη συνεισφορά των Δρ. Έλλη Μαρία Μπαραμπούτη και Δρ. Σοφία Μάη. Θα ήθελα να τις ευχαριστήσω για τη καθοδήγησή τους, τη βοήθεια και την υποστήριξη που μου προσέφεραν.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Φωτεινή Μέντζου, η οποία με βοήθησε σε κάθε βήμα με μεγάλη υπομονή και δείχνοντας εμπιστοσύνη προς το πρόσωπο μου, καθώς επίσης και τη Δρ. Jelica Novakovic, για όλη τη βοήθεια που μου παρείχε κατά τη διάρκεια των πειραματικών αναλύσεων.

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η πρόοδος της νιτροποίησης και η δυνατότητα συσσώρευσης νιτρικών ιόντων χωρίς παρεμπόδιση της βιολογικής διεργασίας ώστε να εξασφαλιστεί η τροφοδοσία υψηλής συγκέντρωσης νιτρικών που απαιτούνταν για τη βιολογική αποθείωση του βιοαερίου που προέρχεται από χώρο υγειονομικής ταφής στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Προγράμματος Biogasnet. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε εργαστηριακή και πιλοτική κλίμακα. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων στην εργαστηριακή κλίμακα εφαρμόστηκε σταθερή φόρτιση αμμωνιακού αζώτου ( $45 \text{ g/L}_r/\text{d}$ ) και παρατηρήθηκε σταδιακή αύξηση της συγκέντρωσης νιτρικού αζώτου ενώ αντίστοιχα για το αμμωνιακό και νιτρώδες άζωτο παρατηρήθηκε σταδιακή μείωση, γεγονός που υποδεικνύει ότι επιτυγχανόταν νιτροποίηση. Στην πιλοτική κλίμακα αρχικά τροφοδοτήθηκε συνθετικό διάλυμα αμμωνιακού αζώτου και πραγματοποιήθηκε σταδιακή αύξηση της φόρτισης αμμωνιακού αζώτου ( $45 - 100 - 150 \text{ g/L}_r/\text{d}$ ) ανά περίπου είκοσι ημέρες. Αντίστοιχη παρατήρηση για τη συγκέντρωση του νιτρικού αζώτου προέκυψε και από τα πειράματα της πρώτης φάσης στην πιλοτική κλίμακα με τη συγκέντρωση του νιτρικού αζώτου να αυξάνεται ενώ οι συγκεντρώσεις του αμμωνιακού και νιτρώδους αζώτου μειώθηκαν. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων (εργαστηριακή και πιλοτική κλίμακα) μελετήθηκε η συγκέντρωση όλων των μορφών του άνθρακα (οργανικός, ανόργανος, ολικός). Στην εργαστηριακή κλίμακα όλες οι μορφές του άνθρακα δεν παρουσίασαν κάποια συγκεκριμένη τάση αλλά κινούνταν γύρω από μία μέση τιμή ( $28,8 \text{ mg/L TOC}$ ,  $53,6 \text{ mg/L TIC}$ ,  $82,8 \text{ mg/L TC}$ ). Στην πιλοτική κλίμακα αντίστοιχη συμπεριφορά παρουσίαζε ο οργανικός άνθρακας ενώ ο ολικός και ο ανόργανος παρουσίαζαν συνεχή αύξηση της συγκέντρωσής τους. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι η δοσολογία του ανόργανου άνθρακα που προσθέτονταν για την πραγματοποίηση της νιτροποίησης ήταν μεγαλύτερη από αυτήν που χρειαζόταν. Εάν όμως η νιτροποίηση ήταν πλήρης, θα απαιτούνταν μεγαλύτερη ποσότητα ανόργανου άνθρακα. Σχετικά με την απόδοση της νιτροποίησης, στην εργαστηριακή κλίμακα μετά τον εγκλιματισμό του συστήματος ήταν  $71,0\%$  ενώ στο πιλοτικό σύστημα, για φόρτιση  $45 \text{ g/L}_r/\text{d}$  αμμωνιακού αζώτου ήταν  $69\%$ . Η αύξηση της φόρτισης στα  $100 \text{ g/L}_r/\text{d}$  είχε ως αποτέλεσμα μια σταδιακή μείωση της απόδοσης μέχρι περίπου το  $40\%$ . Περαιτέρω αύξηση της φόρτισης δεν επέφερε αντίστοιχη μείωση στην απόδοση αλλά διατηρήθηκε περί το  $40\%$ . Τέλος αναλύθηκε η απόδοση της νιτροποίησης και η σχέση αυτής σε σχέση με το νιτρικό άζωτο και εντοπίστηκε ήπια γραμμική συσχέτιση της συγκέντρωσης νιτρικών ιόντων με τη απόδοση της νιτροποίησης. Στη συνέχεια, εξετάστηκε η δυνατότητα αξιοποίησης των αέριων εκπομπών κομποστοποίησης ως πηγή αμμωνιακού αζώτου. Η φόρτιση που επιλέχθηκε με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα ήταν

45g/L/d. Η τάση των συγκεντρώσεων των θρεπτικών (αζώτου, φωσφόρου) αλλά και του άνθρακα ήταν ανάλογη με τα πειράματα όπου χρησιμοποιούνταν συνθετικό υπόστρωμα. Η απόδοση όμως της νιτροποίησης ήταν σαφώς χαμηλότερη (56,5%). Από τη λειτουργία της πιλοτικής μονάδας νιτροποίησης παρήχθησαν διαλύματα πλούσια σε αμμωνιακά (16,1 g/L NH<sub>4</sub>-N) και νιτρικά ιόντα (740,2 mg/L NO<sub>3</sub>-N) αντίστοιχα. Τα διαλύματα αυτά αξιοποιήθηκαν και διαπιστώθηκε εργαστηριακά η παραγωγή θειικού αμμωνίου με την ισομοριακή ανάμιξη του διαλύματος αμμωνιακών (από τον scrubber) και συνθετικού διαλύματος θειικών ιόντων (1,2M). Συμπερασματικά, στην παρούσα διπλωματική εργασία αποδείχθηκε ότι είναι δυνατό να αξιοποιηθούν οι αέριες εκπομπές της κομποστοποίησης οργανικών αστικών αποβλήτων προς την κατεύθυνση της παραγωγής θειικού αμμωνίου. Περαιτέρω αριστοποίηση των συνθήκων νιτροποίησης μπορεί να οδηγήσει σε ακόμη υψηλότερες αποδόσεις.

## Abstract

In this study, the progress of nitrification and the possibility of accumulation of nitrate ions without hindering the biological process was studied to ensure the supply of high nitrate concentration required for the biological desulphurization of biogas from landfill in the framework of the European Biogasnet Project. Experiments were carried out on a laboratory and pilot scale. During the laboratory scale experiments, a constant loading of ammoniacal nitrogen (45 g/Lr/d) was applied and a gradual increase in nitrate nitrogen concentration was observed, while a gradual decrease was observed for ammoniacal and nitrite nitrogen, respectively, indicating that nitrification was achieved. In the pilot scale, a synthetic ammoniacal nitrogen solution was initially fed and a gradual increase in ammoniacal nitrogen loading (45 - 100- 150 g/Lr/d) was carried out at approximately twenty days intervals. A similar observation for nitrate nitrogen concentration was obtained from the first phase experiments in the pilot scale with the nitrate nitrogen concentration increasing while the ammonia nitrogen and nitrite nitrogen concentrations decreased. During the experiments (laboratory and pilot scale) the concentration of all forms of carbon (organic, inorganic, total) was studied. In the laboratory scale, all carbon forms did not show a specific trend but moved around a mean value (28,8 mg/L TOC, 53,6 mg/L TIC, 82,8 mg/L TC). At the pilot scale, organic carbon showed a similar behaviour, while total and inorganic carbon showed a continuous increase in concentration. This fact indicates that the amount of inorganic carbon added to carry out nitrification was higher than what was needed. However, if nitrification was complete, a larger quantity of inorganic carbon would have been required. Regarding the nitrification efficiency, at the laboratory scale after acclimation of the system was 71,0% while in the pilot system, for a 45g/Lr/d loading of ammoniacal nitrogen it was 69%. Increasing the loading to 100 g/Lr/d resulted in a gradual decrease in efficiency up to about 40%. Further increase in loading did not result in a corresponding decrease in yield but maintained around 40%. Finally, the nitrification efficiency and its relationship with nitrate nitrogen was analysed and a mild linear correlation between nitrate ion concentration and nitrification efficiency was found. Subsequently, the possibility of utilizing composting gas emissions as a source of ammoniacal nitrogen was investigated. The loading selected based on the experimental results was 45g/Lr/d. The trend of nutrient (nitrogen, phosphorus) and carbon concentrations was similar to the experiments where a synthetic substrate was used. However, the nitrification efficiency was significantly lower (56.5%). The operation of the pilot nitrification unit produced ammonia-rich (16,1 g/L NH<sub>4</sub>-N) and nitrate-rich (740,2 mg/L NO<sub>3</sub>-N) solutions, respectively. These solutions were utilized and the production of ammonium sulfate was laboratory verified by isomolecular

mixing of the ammonia solution (from the scrubber) and a synthetic solution of sulfate ions (1,2M). In conclusion, this study demonstrated that it is possible to utilize the gaseous emissions of organic municipal waste composting towards the production of ammonium sulfate. Further optimization of nitrification conditions can lead to even higher yields.

## Περιεχόμενα

Πρόλογος .....	2
Περίληψη .....	3
Θεωρητικό μέρος .....	14
1. Αστικά Στερεά Απόβλητα .....	14
1.1 Αστικά στερεά απόβλητα σε παγκόσμιο επίπεδο .....	14
1.2 Αστικά στερεά απόβλητα σε Ευρωπαϊκό Επίπεδο.....	22
1.3 Αστικά στερεά απόβλητα στην Ελλάδα.....	28
2. Συστήματα διαχείρισης και μέθοδοι επεξεργασίας των αστικών στερεών αποβλήτων.....	33
2.1 Ολοκληρωμένο Σύστημα Διαχείρισης Αστικών Στερεών Αποβλήτων .....	33
2.1.1 Προσωρινή Αποθήκευση.....	34
2.1.2 Συλλογή και Μεταφορά .....	35
2.1.3 Μεταφόρτωση .....	36
2.2 Μέθοδοι Επεξεργασίας των Αστικών Στερεών Αποβλήτων.....	37
2.2.1 Ανακύκλωση (Ανάκτηση και Επαναχρησιμοποίηση).....	37
2.2.2 Βιολογική Επεξεργασία.....	41
2.2.3 Θερμική Επεξεργασία (Καύση/Αποτέφρωση).....	43
2.2.4 Εδαφική Διάθεση (Υγειονομική Ταφή).....	45
3. Κομποστοποίηση.....	47
3.1 Βασικές αρχές και περιγραφή λειτουργίας .....	47
3.2 Συστήματα κομποστοποίησης.....	51
3.2.1 Ανοιχτά Συστήματα.....	52
3.2.2 Κλειστά συστήματα.....	54
3.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.....	54
3.3.1. Αέρια .....	54
3.3.2. Υγρά .....	55
3.3.3. Στερεά.....	55

3.3.4 Παθογόνοι μικροοργανισμοί .....	56
4. Υγειονομική Ταφή.....	57
4.1 Βασικές αρχές και περιγραφή λειτουργίας χώρων υγειονομικής ταφής αστικών στερεών αποβλήτων.....	57
4.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.....	58
4.3 Ανάπτυξη και λειτουργία χώρων υγειονομικής ταφής στην Ελλάδα .....	64
Πειραματικό μέρος .....	67
5. Σκοπός .....	67
6. Πειραματική μεθοδολογία.....	68
6.1 Πρώτες ύλες .....	68
6.2 Πειραματικές διατάξεις.....	68
6.2.1 Εργαστηριακής κλίμακας βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης .....	68
6.2.2 Πιλοτικές μονάδες .....	68
6.3 Πειραματικό πρωτόκολλο .....	80
6.3.1 Πειραματική διαδικασία νιτροποίησης σε εργαστηριακή κλίμακα.....	80
6.3.2 Πειραματική διαδικασία νιτροποίησης σε πιλοτική κλίμακα .....	80
6.4 Μέθοδοι Ανάλυσης .....	81
6.4.1 Προσδιορισμός ολικών στερεών (TS).....	81
6.4.2 Προσδιορισμός πτητικών στερεών (VS) .....	83
6.4.3 Προσδιορισμός Ολικού Οργανικού Άνθρακα (TOC) και Ολικού Αζώτου (TN) .....	84
6.4.4 Προσδιορισμός αμμωνιακού αζώτου (NH <sub>4</sub> -N) .....	85
6.4.5 Προσδιορισμός νιτρικού και νιτρώδους αζώτου .....	87
6.4.6 Προσδιορισμός νιτρικού (NO <sub>3</sub> -N) και νιτρώδους αζώτου (NO <sub>2</sub> -N).....	89
6.4.7 Προσδιορισμός φωσφόρου (TP).....	91
7. Πειραματικά αποτελέσματα .....	93
7.1 Χαρακτηρισμός αερόβιας βιολογικής ιλύος .....	93
7.2 Πειραματικά αποτελέσματα νιτροποίησης σε εργαστηριακή κλίμακα.....	93



7.3 Επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων νιτροποίησης σε εργαστηριακή κλίμακα.....	100
7.4 Πειραματικά αποτελέσματα νιτροποίησης σε πιλοτική κλίμακα .....	103
7.5 Επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων νιτροποίησης σε πιλοτική κλίμακα.....	110
7.6 Πειραματικά αποτελέσματα νιτροποίησης με αξιοποίηση των αέριων εκπομπών της κομποστοποίησης.....	113
8. Συμπεράσματα .....	121
9. Βιβλιογραφία .....	123

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 :Παγκόσμια παραγωγή αστικών στερεών αποβλήτων [4].	16
Εικόνα 2: Τυπική σύνθεση των αστικών στερεών αποβλήτων σε διάφορα επίπεδα εισοδήματος. ....	17
Εικόνα 3: Το σχηματικό σχέδιο που δείχνει την ταξινόμηση των αστικών στερεών αποβλήτων [5].	18
Εικόνα 4: Τάση στα υπολειμματικά αστικά απόβλητα για τα 27 κράτη μέλη της ΕΕ και στόχος για το 2030 [9].	23
Εικόνα 5: Τρέχουσα παραγωγή αστικών απορριμμάτων έναντι τριών μελλοντικών σεναρίων [9].	24
Εικόνα 6: Εξέλιξη του προσωπικού και του κύκλου εργασιών των φορέων διαχείρισης αποβλήτων (2011-2018) [8].	24
Εικόνα 7: Πηγές χρηματοδότησης για τη διαχείριση των ΑΣΑ [8].	25
Εικόνα 8: Σύνθεση των επενδυτικών αναγκών για την επίτευξη των στόχων για τα ΑΣΑ έως το 2035 [8].	26
Εικόνα 9: Ποσοστό ανακύκλωσης στην Ελλάδα μεταξύ 2015 και 2019 [11].	29
Εικόνα 10: Συνοπτική Εικόνα του Συστήματος Διαχείρισης ΑΣΑ [18].	34
Εικόνα 11: Διαχρονική εξέλιξη του ποσοστού ανακύκλωσης [24].	38
Εικόνα 12: Μείωση όγκου απορριμμάτων στους χώρους ταφής [24].	38
Εικόνα 13: Εξοικονόμηση ενέργειας από την ανακύκλωση [24].	39
Εικόνα 14: Μείωση του CO <sub>2</sub> από την ανακύκλωση απορριμμάτων [24].	39
Εικόνα 15: ΚΔΑΥ [17].	41
Εικόνα 16: Τυπική μονάδα αποτέφρωσης ΑΣΑ με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποβλήτων [27].	44
Εικόνα 17: Αναστροφέας σειραδιών [35].	53
Εικόνα 18: Μέθοδος δυναμικά αεριζόμενων σωρών [35].	53
Εικόνα 19: Ποσότητα αστικών στερεών αποβλήτων που διατίθενται σε χώρους υγειονομικής ταφής των ΗΠΑ [39].	61
Εικόνα 20: Αποτελεσματικότητα συλλογής αερίου και περιεκτικότητα σε μεθάνιο του συλλεχθέντος αερίου υγειονομικής ταφής απορριμμάτων [39].	62
Εικόνα 21: Διάγραμμα διεργασιών και εξοπλισμού πιλοτικής μονάδας νιτροποίησης.	71
Εικόνα 22: Διάγραμμα ροής μονάδας νιτροποίησης	72
Εικόνα 23: Απεικόνιση της πιλοτικής μονάδας νιτροποίησης (1).	73
Εικόνα 24: Απεικόνιση της πιλοτικής μονάδας νιτροποίησης (2).	74
Εικόνα 25: Διαστασιολόγηση πλυντρίδας.	74
Εικόνα 26: Διαστασιολόγηση αντιδραστήρα βιολογικής νιτροποίησης.	75

Εικόνα 27: Διαστασιολόγηση δεξαμενής καθίζησης μονάδας νιτροποίησης.....	76
Εικόνα 28: Διάγραμμα διεργασιών και εξοπλισμού πιλοτικής μονάδας αποθείωσης.....	77
Εικόνα 29: Διάγραμμα ροής πιλοτικής μονάδας αποθείωσης.....	78
Εικόνα 30: Απεικόνιση της πιλοτικής μονάδας ανοξικής αποθείωσης (1). ....	79
Εικόνα 31: Απεικόνιση της πιλοτικής μονάδας ανοξικής αποθείωσης (2). Είσοδος – Έξοδος βιοαερίου.....	79
Εικόνα 32: Φούρνος ξήρανσης Carbolite. ....	82
Εικόνα 33: Αφυγραντήρας.....	82
Εικόνα 34: Φούρνος μέτρησης πτητικών στερεών.....	83
Εικόνα 35: Συσκευή μέτρησης TOC. ....	84
Εικόνα 36: Μεταβολή της συγκέντρωσης των μορφών του αζώτου στον εργαστηριακό βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης .....	95
Εικόνα 37: Μεταβολή της συγκέντρωσης του ολικού φωσφόρου στον εργαστηριακό βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης .....	96
Εικόνα 38: Συγκέντρωση άνθρακα (οργανικού, ανόργανου και συνολικού) στον εργαστηριακό βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης .....	99
Εικόνα 39: Απόδοση της διεργασίας νιτροποίησης στον εργαστηριακό βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης.....	102
Εικόνα 40: Συσχέτιση συγκέντρωσης νιτρικού αζώτου με απόδοση νιτροποίησης.....	103
Εικόνα 41: Μεταβολή της συγκέντρωσης των μορφών του αζώτου στον πιλοτικό βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης.....	105
Εικόνα 42: Μεταβολή της συγκέντρωσης του ολικού φωσφόρου στον πιλοτικό βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης.....	106
Εικόνα 43: Συγκέντρωση άνθρακα (οργανικού, ανόργανου και συνολικού) στον πιλοτικό βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης .....	109
Εικόνα 44: Απόδοση της διεργασίας νιτροποίησης στον πιλοτικό βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης	112
Εικόνα 45: Συσχέτιση συγκέντρωσης νιτρικού αζώτου με απόδοση νιτροποίησης.....	113
Εικόνα 46: Μεταβολή της συγκέντρωσης των μορφών του αζώτου στον πιλοτικό βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης με αξιοποίηση των αέριων εκπομπών της κομποστοποίησης.....	115
Εικόνα 47: Μεταβολή της συγκέντρωσης του ολικού φωσφόρου στον πιλοτικό βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης με αξιοποίηση των αέριων εκπομπών της κομποστοποίησης.....	115
Εικόνα 48: Συγκέντρωση άνθρακα (οργανικού, ανόργανου και συνολικού) στον πιλοτικό βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης .....	117

Εικόνα 49: Απόδοση της διεργασίας νιτροποίησης στον πιλοτικό βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης με αξιοποίηση των αέριων εκπομπών της κομποστοποίησης ..... 119

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της θερμικής επεξεργασίας.....	44
Πίνακας 2: Συστήματα κομποστοποίησης [34]. .....	52
Πίνακας 3: Παραγωγή και σύνθεση αστικών στερεών αποβλήτων στις χώρες του Αραβικού Κόλπου σε σύγκριση με τις ΗΠΑ και το Ηνωμένο Βασίλειο [41].....	58
Πίνακας 4: Πειραματικά αποτελέσματα εργαστηριακού βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης ως προς τη συγκέντρωση των μακροθρεπτικών αζώτου και φωσφόρου .....	93
Πίνακας 5: Πειραματικά αποτελέσματα εργαστηριακού βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης ως προς τη συγκέντρωση του άνθρακα (οργανικού, ανόργανου και συνολικού).....	97
Πίνακας 6: Απόδοση της διεργασίας νιτροποίησης στην εργαστηριακή κλίμακα.....	100
Πίνακας 7: Πειραματικά αποτελέσματα πιλοτικού βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης ως προς τη συγκέντρωση των μακροθρεπτικών αζώτου και φωσφόρου .....	103
Πίνακας 8: Πειραματικά αποτελέσματα εργαστηριακού βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης ως προς τη συγκέντρωση του άνθρακα (οργανικού, ανόργανου και συνολικού).....	107
Πίνακας 9: Απόδοση της διεργασίας νιτροποίησης στην εργαστηριακή κλίμακα.....	110
Πίνακας 10: Πειραματικά αποτελέσματα πιλοτικού βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης με αξιοποίηση των αέριων εκπομπών της κομποστοποίησης ως προς τη συγκέντρωση των μακροθρεπτικών αζώτου και φωσφόρου:.....	114
Πίνακας 11: Πειραματικά αποτελέσματα εργαστηριακού βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης ως προς τη συγκέντρωση του άνθρακα (οργανικού, ανόργανου και συνολικού).....	116
Πίνακας 12: Απόδοση της διεργασίας νιτροποίησης στην εργαστηριακή κλίμακα με αξιοποίηση των αέριων εκπομπών της κομποστοποίησης.....	118

## Θεωρητικό μέρος

### 1. Αστικά Στερεά Απόβλητα

#### 1.1 Αστικά στερεά απόβλητα σε παγκόσμιο επίπεδο

Οι υψηλοί ρυθμοί κατανάλωσης ενέργειας και αγαθών σε συνδυασμό με την αύξηση του πληθυσμού και την άνοδο του βιοτικού επιπέδου οδηγούν σε σημαντικά επίπεδα παραγωγής αστικών στερεών αποβλήτων, τα οποία, εάν δεν διατεθούν ή ανακυκλωθούν σωστά, αποτελούν σοβαρούς κινδύνους για το περιβάλλον.

Τα αστικά στερεά απόβλητα, είναι μια σημαντική περιβαλλοντική πρόκληση που αντιμετωπίζουν οι κοινότητες σε όλο τον κόσμο.

Τα αστικά στερεά απόβλητα (ΑΣΑ) περιλαμβάνουν διάφορες μορφές μη επικίνδυνων αποβλήτων που παράγονται από νοικοκυριά, εμπορικές εγκαταστάσεις και ιδρύματα εντός ενός δήμου. Αυτά τα απόβλητα προκύπτουν από καθημερινές δραστηριότητες, όπως συσκευασίες, υπολείμματα τροφίμων, χαρτί, πλαστικά, υφάσματα, γυαλί, μέταλλα και άλλα απορριπτόμενα αντικείμενα.

Τα αστικά στερεά απόβλητα παρουσιάζουν αρκετές ιδιαιτερότητες και προκλήσεις. Τα βασικά σημεία μπορούν να συνοψιστούν ως ακολούθως:

**Σύνθεση:** Τα ΑΣΑ μπορεί να διαφέρουν ως προς τη σύνθεση με βάση παράγοντες όπως η πυκνότητα του πληθυσμού, οι οικονομικές δραστηριότητες και οι πολιτιστικές πρακτικές. Συνήθως αποτελείται από οργανικά απόβλητα (απορρίμματα τροφίμων, απορρίμματα αυλής), ανακυκλώσιμα υλικά (χαρτί, πλαστικά, γυαλί, μέταλλα) και μη ανακυκλώσιμα υλικά (πλαστικές σακούλες, πάνες, είδη υγιεινής).

**Διαχείριση:** Οι δήμοι είναι υπεύθυνοι για τη διαχείριση και τη διάθεση των ΑΣΑ με ασφαλή και περιβαλλοντικά βιώσιμο τρόπο. Αυτό περιλαμβάνει τη συλλογή, τη μεταφορά, την επεξεργασία και τη διάθεση των απορριμμάτων. Οι διάφορες μέθοδοι διαχείρισης απορριμμάτων περιλαμβάνουν την υγειονομική ταφή, την αποτέφρωση, την κομποστοποίηση και την ανακύκλωση.

**Περιβαλλοντικές επιπτώσεις:** Η ακατάλληλη διαχείριση των ΑΣΑ μπορεί να έχει σημαντικές περιβαλλοντικές συνέπειες. Οι χώροι υγειονομικής ταφής μπορούν να απελευθερώσουν αέρια θερμοκηπίου, στραγγίσματα και οσμές, συμβάλλοντας στη ρύπανση του αέρα και του νερού. Η αποτέφρωση μπορεί να απελευθερώσει ατμοσφαιρικούς ρύπους εάν δεν ελεγχθεί σωστά. Η ανακύκλωση και η κομποστοποίηση συμβάλλουν στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των απορριμμάτων με τη διατήρηση των πόρων και τη μείωση της ανάγκης για χώρο υγειονομικής ταφής.

**Μείωση και ανακύκλωση αποβλήτων:** Οι πρωτοβουλίες μείωσης και ανακύκλωσης απορριμμάτων διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διαχείριση των ΑΣΑ. Με τη μείωση των απορριμμάτων στην πηγή, την προώθηση της ανακύκλωσης και την ενθάρρυνση βιώσιμων πρακτικών, οι δήμοι μπορούν να ελαχιστοποιήσουν την ποσότητα των απορριμμάτων που αποστέλλονται σε χώρους υγειονομικής ταφής ή εγκαταστάσεις αποτέφρωσης.

**Προκλήσεις:** Οι δήμοι αντιμετωπίζουν πολλές προκλήσεις στην αποτελεσματική διαχείριση των ΑΣΑ. Αυτά περιλαμβάνουν περιορισμένο χώρο υγειονομικής ταφής, αυξανόμενη παραγωγή απορριμμάτων λόγω της πληθυσμιακής αύξησης και αστικοποίησης, έλλειψη υποδομής για τη συλλογή και επεξεργασία των απορριμμάτων, την ανεπαρκή χρηματοδότηση και την ευαισθητοποίηση και συμμετοχή του κοινού σε πρακτικές διαχείρισης απορριμμάτων.

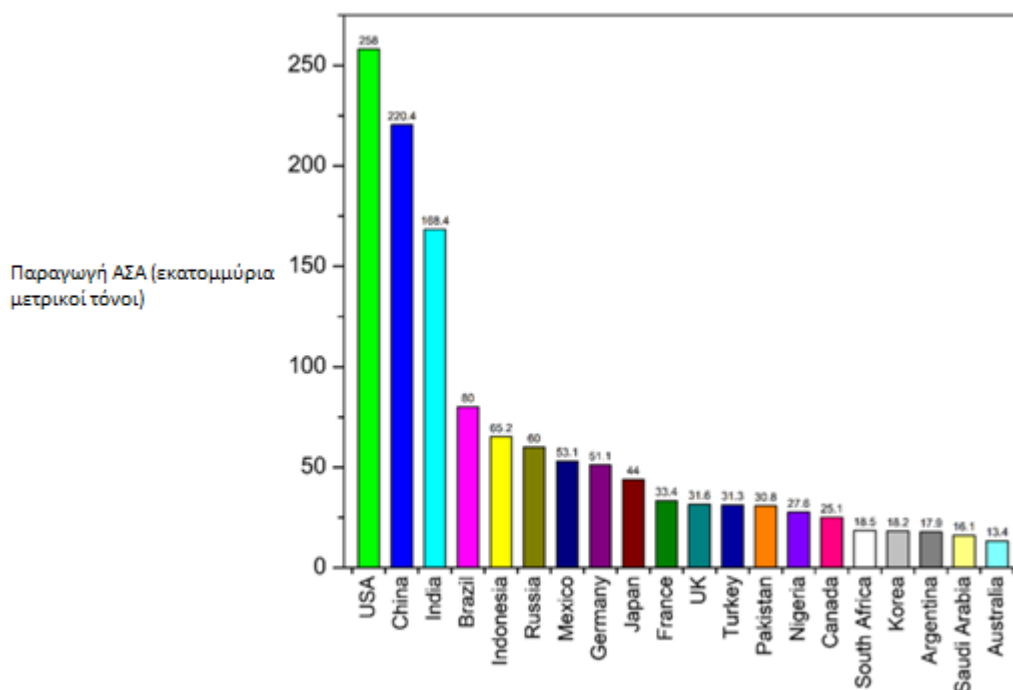
**Βιώσιμες Πρακτικές:** Πολλοί δήμοι υιοθετούν βιώσιμες πρακτικές για την αποτελεσματικότερη διαχείριση των ΑΣΑ. Αυτό περιλαμβάνει την εφαρμογή προγραμμάτων διαχωρισμού και ανακύκλωσης απορριμμάτων, την προώθηση της κομποστοποίησης οργανικών αποβλήτων, την ενθάρρυνση της χρήσης επαναχρησιμοποιήσιμων προϊόντων και τη διερεύνηση εναλλακτικών τεχνολογιών απόβλητα σε ενέργεια.

**Προσέγγιση κυκλικής οικονομίας:** Μια προσέγγιση κυκλικής οικονομίας στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της παραγωγής απορριμμάτων προωθώντας την αποδοτικότητα των πόρων, την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση. Επικεντρώνεται στο σχεδιασμό προϊόντων και συστημάτων που παράγουν λιγότερα απόβλητα και μπορούν εύκολα να ανακυκλωθούν ή να επαναχρησιμοποιηθούν.

Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων περιλαμβάνουν το μέγεθος του πληθυσμού, τα καταναλωτικά πρότυπα, την οικονομική ανάπτυξη, την αστικοποίηση και τα ποσοστά παραγωγής αποβλήτων. Καθώς οι αστικοί πληθυσμοί συνεχίζουν να αυξάνονται και να καταναλώνουν περισσότερα αγαθά, ο όγκος των παραγόμενων αποβλήτων αυξάνεται επίσης με ανησυχητικό ρυθμό. Η τάση αυτή απαιτεί καινοτόμες και βιώσιμες λύσεις για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που σχετίζονται με τη διαχείριση των αποβλήτων. Ενώ τα αστικά στερεά απόβλητα παρουσιάζουν σημαντικές προκλήσεις, εμπεριέχουν επίσης ευκαιρίες. Με την υιοθέτηση αποτελεσματικών στρατηγικών διαχείρισης αποβλήτων, οι κοινότητες μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, να εξοικονομήσουν φυσικούς πόρους, να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και να δημιουργήσουν οικονομική αξία μέσω της ανακύκλωσης και της επαναχρησιμοποίησης των υλικών αποβλήτων. Συνολικά, η αποτελεσματική διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων είναι απαραίτητη για τη διατήρηση ενός καθαρού και βιώσιμου περιβάλλοντος. Απαιτεί έναν συνδυασμό μείωσης των απορριμμάτων, ανακύκλωσης,

σωστής διάθεσης και συμμετοχής του κοινού για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την προώθηση της κυκλικής οικονομίας.

Η συνεχιζόμενη αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού μέχρι τα μέσα αυτού του αιώνα θα πυροδοτήσει την ανάπτυξη των βιομηχανιών, της αστικοποίησης και της οικονομικής δραστηριότητας που οδηγούν στη διάδοση των αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ) [1]. Κάθε χρόνο, δημιουργούνται 2,01 δισεκατομμύρια τόνοι αστικών στερεών απορριμμάτων, με τουλάχιστον το 33% αυτών των απορριμμάτων να μην διαχειρίζονται με περιβαλλοντικά υπεύθυνο τρόπο. Τα απόβλητα που παράγονται ανά άτομο ανά ημέρα στον κόσμο ανέρχονται κατά μέσο όρο σε 0,74 κιλά, αλλά ποικίλλουν σημαντικά και μπορεί να κυμαίνονται από 0,11 έως 4,54 κιλά [2]. Σε παγκόσμιο επίπεδο, το κόστος διαχείρισης στερεών αποβλήτων θα αυξηθεί από τα σημερινά 205,4 δισ. δολάρια ετησίως σε περίπου 375,5 δισ. δολάρια το 2025 [3]. Επειδή ο ρυθμός παραγωγής αποβλήτων εξαρτάται από την οικονομική και κοινωνική ευημερία μιας χώρας, οι ανεπτυγμένες χώρες παράγουν σημαντικά περισσότερα αστικά στερεά απόβλητα ανά κάτοικο από ό,τι οι αναπτυσσόμενες και οι χώρες του τρίτου κόσμου. Ως αποτέλεσμα της παγκοσμιοποίησης, οι αναπτυσσόμενες χώρες υιοθετούν ταχύτατα τον τρόπο ζωής των βιομηχανικών χωρών, με αποτέλεσμα την παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων αστικών στερεών αποβλήτων [4].

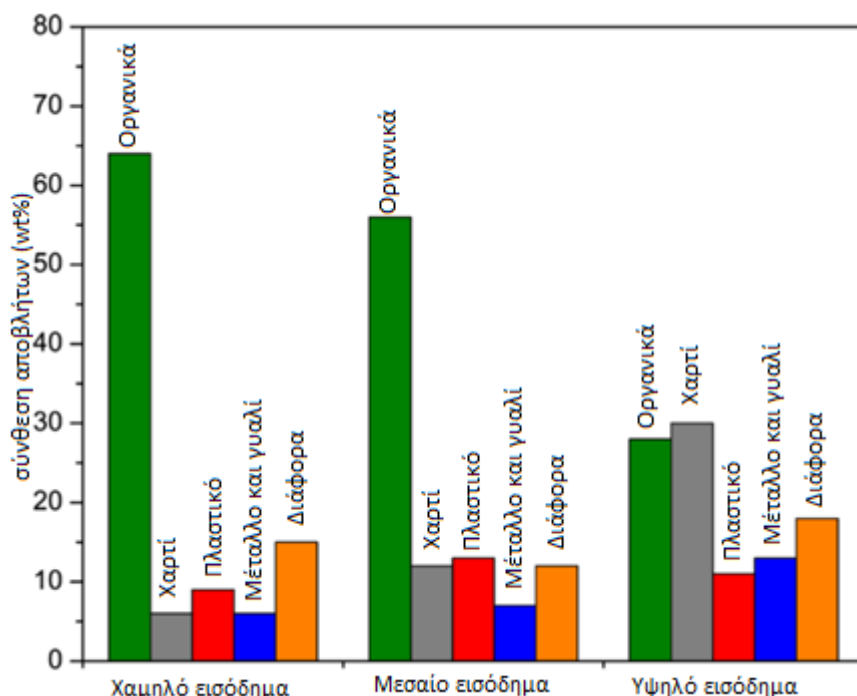


Εικόνα 1 :Παγκόσμια παραγωγή αστικών στερεών αποβλήτων [4].

Ο κύριος κίνδυνος από την ανεπαρκή διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων αντανακλάται συχνά στη δημόσια υγεία. Η μη βιώσιμη διαχείριση των αποβλήτων έχει σημαντικό αντίκτυπο στους ανθρώπους που ζουν κάτω από το όριο της φτώχειας. Τα αστικά στερεά απόβλητα συχνά απορρίπτονται σε ανεξέλεγκτους χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, στις άκρες των



δρόμων και σε ανοικτές περιοχές για φυσική αποσύνθεση ή ανοικτή καύση. Αυτές οι μη βιώσιμες συμπεριφορές θέτουν σε κίνδυνο την υγεία των ανθρώπων, εγείρουν ανησυχίες για την ασφάλεια και προκαλούν ρύπανση. Το γράφημα απεικονίζει τη σύνθεση των αστικών στερεών αποβλήτων σε διάφορες κοινωνικοοικονομικές περιοχές.



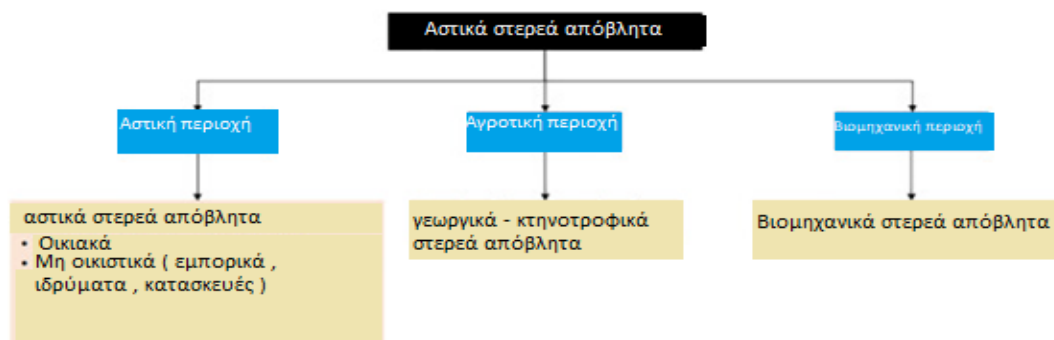
Εικόνα 2: Τυπική σύνθεση των αστικών στερεών αποβλήτων σε διάφορα επίπεδα εισοδήματος.

Η παραγωγή ΑΣΑ και τα χαρακτηριστικά τους διαφέρουν σημαντικά για κάθε χώρα παγκοσμίως. Για μια δεδομένη γεωγραφική περιοχή, η κοινωνικοοικονομική τάση, οι κλιματολογικές συνθήκες, ο βαθμός ανακύκλωσης και η συλλογή των αποβλήτων είναι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή και τη σύνθεση των ΑΣΑ. Επιπλέον, η παραγωγή ΑΣΑ μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου, γεγονός που επιβάλλει βέλτιστες προκλήσεις στρατηγικού και τακτικού σχεδιασμού. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να κατανοηθεί ο όγκος των ΑΣΑ, οι ιδιότητες των αποβλήτων (π.χ. θερμογόνος δύναμη) και η σύνθεση τους προκειμένου να προταθεί μια αποτελεσματική υποδομή επεξεργασίας. Υπάρχουν πολλές πιθανές τεχνολογίες για την επεξεργασία των αστικών στερεών αποβλήτων. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν αρκετές ανησυχίες σχετικά με την επιλογή τεχνολογιών επεξεργασίας που θα βελτιώσουν τις οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις [1].

Οι πηγές των αποβλήτων θα μπορούσαν να είναι οι κατασκευαστικές δραστηριότητες, οι βιομηχανικές διεργασίες και τα αστικά στερεά απόβλητα (ΑΣΑ). Τα απόβλητα θεωρούνται γενικά αιτία για την εισαγωγή ρύπων στο περιβάλλον με τη μορφή οργανικών και ανόργανων ρύπων. Οι οργανικοί ρύποι, όπως τα απόβλητα τροφίμων, μπορούν να θεωρηθούν ως βιοπόροι ή ως πηγή

βιομάζας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως θερμότητα, είτε ως κομπόστ, είτε ως ηλεκτρική ενέργεια, είτε ως βιοκαύσιμο. Οι πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), τα μεταλλοειδή, τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs) και τα ορυκτά εδάφη αποτελούν σημαντική απειλή μεταξύ αυτών των οργανικών και μη οργανικών ρύπων. Το πρόβλημα της ρύπανσης των υδάτων είναι ανησυχητικό λόγω των διαφόρων ρυπαντών αποβλήτων, οι οποίοι έχουν προστεθεί στο πρόβλημα της έλλειψης νερού σε παγκόσμιο επίπεδο. Η παραγωγή αποβλήτων με αναποτελεσματικά συστήματα διαχείρισης αποτελεί μια από τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές προκλήσεις για τις αστικές κοινωνίες και ως εκ τούτου αναγνωρίζεται ως μια από τις πηγές αυτών των ρύπων. Η διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων περιλαμβάνει πολλά στάδια, δηλαδή τη συλλογή, τη διαλογή, την αποθήκευση, τη μεταφορά, την επεξεργασία και την τελική διάθεση των παραγόμενων απορριμμάτων από αστικές πηγές, ακολουθώντας κατευθυντήριες τεχνικές αρχές, με έμφαση στο περιβάλλον, την υγεία και την οικονομία [5].

Τα αστικά στερεά απόβλητα ταξινομούνται με διάφορους τρόπους- ωστόσο, προτείνεται μια ιεραρχική κατηγοριοποίηση στην πηγή. Οι πηγές αστικών στερεών αποβλήτων ταξινομήθηκαν σε τρεις κατηγορίες: Στην αστική περιοχή, στη βιομηχανική και στην αγροτική. Από αυτές τις τρεις κατηγορίες προέκυψαν επτά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 9. Η αστική περιοχή χωρίζεται περαιτέρω σε οικιστικές και μη οικιστικές πηγές, με τον αγροτικό τομέα να περιλαμβάνει όλα τα απόβλητα που παράγονται από γεωργικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες. Επιπλέον, οι βιομηχανικές πηγές περιλαμβάνουν όλες τις εγκαταστάσεις, ανεξαρτήτως μεγέθους [5].



Εικόνα 3: Το σχηματικό σχέδιο που δείχνει την ταξινόμηση των αστικών στερεών αποβλήτων [5].

Η διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων αφορά την παραγωγή αποβλήτων, την παρακολούθηση, την αποθήκευση των αποβλήτων στην πηγή, τη συλλογή, τη μεταφορά, την επεξεργασία και τη διάθεση των στερεών αποβλήτων στον τελικό προορισμό. Γενικά, οι επιπτώσεις των στερεών αποβλήτων στο περιβάλλον και την ανθρώπινη ύπαρξη μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: άμεσες και έμμεσες συνέπειες. Πράγματι, οι άμεσες συνέπειες σχετίζονται με την υποβάθμιση των στερεών υλικών και τη βλάβη της ανθρώπινης υγείας. Οι έμμεσες συνέπειες, από

μόνες τους, έχουν μακροπρόθεσμες συνέπειες που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τα οικολογικά πρότυπα και τα προβλήματα κλιματικής αλλαγής, τα οποία με τη σειρά τους υπαγορεύουν τη δομή της κοινωνίας, την οικονομία και τη βιωσιμότητα των διαφόρων ηπείρων. Οι χώρες του Συμβουλίου Συνεργασίας του Κόλπου (ΣΣΚ), οι οποίες περιλαμβάνουν το Βασίλειο της Σαουδικής Αραβίας, τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα, το Ομάν, το Αλ Κουβέιτ, το Κατάρ και το Μπαχρέιν, αντιμετωπίζουν ζητήματα διαχείρισης αστικών στερεών αποβλήτων ως αποτέλεσμα της επίμονης μεγάλης αύξησης του πληθυσμού, της αυξημένης κοινωνικής δέσμευσης και της οικονομικής ανάπτυξης και επέκτασης. Είναι ενδιαφέρον ότι το Κατάρ, μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες οικονομίες του κόσμου, δεν είναι απρόσβλητο από αυτές τις δυσκολίες, καθώς είχε ταχεία εκβιομηχάνιση, συνεχή πληθυσμιακή επέκταση και επιταχυνόμενη αστικοποίηση, τα οποία συμβάλλουν στην αύξηση της παραγωγής αποβλήτων. Το εκτιμώμενο ημερήσιο παραγόμενο ποσό στερεών αποβλήτων στο Κατάρ ανέρχεται σε 28.000 τόνους, τα οποία διατίθενται με τρεις τρόπους: ανακύκλωση, αποτέφρωση και αποστολή των υπολειμμάτων σε χώρους υγειονομικής ταφής. Επιπλέον, τα συστατικά της ανακύκλωσης είναι κυρίως οικιακά και εμπορικά σκουπίδια, τα οποία συχνά αντιπροσωπεύουν την πλειονότητα των παραγόμενων αποβλήτων [5].

Η Εθνική Στρατηγική Ανάπτυξης (ΕΣΑ) είναι μια νέα πολιτική προσέγγιση που αντιμετωπίζει τις προκλήσεις με υψηλότερες εθνικές προτεραιότητες. Μία από αυτές τις προτεραιότητες είναι η προτεινόμενη εφαρμογή ενός σχεδίου διαχείρισης στερεών αποβλήτων που δίνει προτεραιότητα στην ανακύκλωση. Στο πλαίσιο αυτό, οι χώροι υγειονομικής ταφής προβλέπεται να μειωθούν έως και 53%, ενώ η ανακύκλωση αναμένεται να αυξηθεί από 8% σε 38% των στερεών αποβλήτων. Ως αποτέλεσμα, τα υπολειμματικά απορρίμματα έχουν μετατραπεί σε ενέργεια για διάφορες χρήσεις. Η ρύπανση των εδαφών, της υδάτινης επιφάνειας και των υπόγειων υδάτων από τα απόβλητα αποτελεί σημαντικό κίνδυνο για την υγεία του ανθρώπου. Ως εκ τούτου, οι διαδικασίες και η τεχνολογία που χρησιμοποιούνται στην αποκατάσταση είναι κρίσιμες για την επίτευξη ενδεδειγμένου καθαρισμού, εξάλειψης και αποκατάστασης μιας κατεστραμμένης περιοχής. Η ηλεκτροχημική επεξεργασία, η κροκίδωση και οι αερόβιες και αναερόβιες επεξεργασίες αποτελούν παραδείγματα τέτοιων προσεγγίσεων. Για ένα καλύτερο αποτέλεσμα, πρέπει να πραγματοποιείται έρευνα του χώρου και γνώση όλων των σχετικών κριτηρίων, δηλαδή των χημικών, φυσικών και βιολογικών στοιχείων των ρύπων, πριν από την επιλογή μιας προσέγγισης αποκατάστασης για οποιοδήποτε κατεστραμμένο έδαφος. Ακόμη, πριν αποφασιστεί μια προσέγγιση αποκατάστασης, πρέπει να εξεταστούν διεξοδικά ο προϋπολογισμός, το κανονιστικό πλαίσιο και οι υφιστάμενοι κανονισμοί [5].

Για περισσότερο από μια δεκαετία, πολλές χώρες σε όλο τον κόσμο έχουν χρησιμοποιήσει την καθαρότερη παραγωγή για τη βελτίωση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Η συνεχής ανάπτυξη της παγκόσμιας εκβιομηχάνισης έχει δημιουργήσει ένα είδος περιβαλλοντικής ανησυχίας που πρέπει

να αντιμετωπιστεί άμεσα. Ως αποτέλεσμα, οποιαδήποτε περιβαλλοντική εξάντληση που είναι πιθανό να συμβεί σε οποιοδήποτε μέρος του κόσμου είναι ικανή να επηρεάσει ολόκληρο το κυρίαρχο οικοσύστημα, ενώ η αρνητική της επίδραση μπορεί να γίνει αισθητή σε ολόκληρους τόπους ή περιοχές. Ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος κάθε οργανισμού μπορεί να μειωθεί ή να ελαχιστοποιηθεί με την εφαρμογή διαφόρων στρατηγικών και την εφαρμογή βιώσιμων περιβαλλοντικών πρακτικών, όπως οι τακτικές καθαρότερης παραγωγής. Το Αναπτυξιακό Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών ήταν υπεύθυνο για τη διεξαγωγή ενός προληπτικού προγράμματος που έγινε ευρέως αποδεκτό και εφαρμόστηκε σε πολλά φτωχά έθνη σε όλο τον κόσμο. Η έννοια της καθαρότερης παραγωγής στόχευε στη συνεχή υιοθέτηση οικονομικών αρχών, περιβαλλοντικών και τεχνολογικών μεθοδολογιών στην παραγωγή και τις διαδικασίες για να εξασφαλιστεί η αύξηση της αποδοτικότητας των πρώτων υλών, των υδάτινων πόρων, των καθαρότερων βιολογικών πόρων και της χρήσης της ενέργειας, αποφεύγοντας τη δημιουργία αποβλήτων, εξασφαλίζοντας την ελαχιστοποίηση των αποβλήτων και την ανακύκλωση σε όλες τις γραμμές παραγωγής σε διάφορους τομείς. Έτσι, η χρήση της καθαρότερης παραγωγής προτείνει την εφαρμογή προληπτικών μεθόδων για να διατηρηθούν στο ελάχιστο οι επιπτώσεις στα οικοσυστήματα. Είναι ενδιαφέρον ότι αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι η Καθαρότερη Παραγωγή μπορεί να αποτελέσει αξιόπιστο και σημαντικό παράγοντα για την αντιμετώπιση διαφόρων θεμάτων που αφορούν αποκλειστικά τις προκλήσεις της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας [5].

Η εφοδιαστική διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ) είναι απαραίτητη για τη διαχείριση του αυξανόμενου ρεύματος αποβλήτων και την ανάγκη επαναχρησιμοποίησης των μη ανανεώσιμων πόρων. Η ανακύκλωση συγκαταλέγεται μεταξύ των συνηθέστερων επιλογών επεξεργασίας αποβλήτων που έχουν τη δυνατότητα περαιτέρω βελτίωσης στην Ευρώπη. Η αύξηση της ανακύκλωσης οδηγεί σε μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, χαμηλότερη κατανάλωση ενεργειακών πηγών και χαμηλότερο οικονομικό κόστος. Υπάρχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ των χωρών όσον αφορά την πρακτική και τις επιδόσεις τους στην ανακύκλωση των ΑΣΑ. Τα στατιστικά στοιχεία της EUROSTAT (2015) δείχνουν τα υψηλότερα ποσοστά ανακύκλωσης στη Γερμανία (64%), την Αυστρία (58%) και το Βέλγιο (55%). Αντίθετα, η συλλογή και η ανακύκλωση βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο στα νέα κράτη μέλη της ΕΕ, με τα ποσοστά υγειονομικής ταφής να κυμαίνονται μεταξύ 82% (Εσθονία) και 98% (Βουλγαρία). Κατά μέσο όρο στην ΕΕ, πάνω από το 40% των αποβλήτων καταλήγει σε χώρους υγειονομικής ταφής, γεγονός που υποδηλώνει τη δυνατότητα και την ανάγκη βελτίωσης της ανακύκλωσης των ΑΣΑ [6].

Σύμφωνα με την Αναθεώρηση των Προοπτικών Παγκόσμιου Πληθυσμού του ΟΗΕ για το 2019, τέσσερις παγκόσμιες δημογραφικές μετατάσεις θα επηρεάσουν τόσο την κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη όσο και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα: η αύξηση του πληθυσμού, η γήρανση του

πληθυσμού, η μετανάστευση και η αστικοποίηση. Ο παγκόσμιος πληθυσμός αναμένεται να αυξηθεί σε περίπου 8,5 δισεκατομμύρια ανθρώπους το 2030 και σε 9,7 δισεκατομμύρια το 2050. Στις αστικές περιοχές αναμένεται να ζει το 68% του παγκόσμιου πληθυσμού το 2050. Η ταχεία αύξηση του αστικού πληθυσμού ασκεί αρνητική πίεση στο περιβάλλον. Συνεπάγεται σημαντικότερη διάβρωση των φυσικών ενδιαιτημάτων, ενώ οι μεγαλύτερες ανθρώπινες κοινότητες καταναλώνουν περισσότερους φυσικούς πόρους και προκαλούν περισσότερες γεννήσεις ρύπων, όπως μεγάλες ποσότητες στερεών αποβλήτων. Η διαχείριση των ΑΣΑ είναι μια σύνθετη υπηρεσία της οποίας η αποτελεσματικότητα, η αποδοτικότητα και το κόστος εξαρτώνται από τρεις κύριες κατηγορίες φορέων: τις κυβερνήσεις που καθορίζουν τις πολιτικές διαχείρισης των αποβλήτων, τις εταιρείες που δραστηριοποιούνται στον τομέα των ΑΣΑ και τους πολίτες των οποίων η συμπεριφορά πρέπει να συμμορφώνεται με τις κυβερνητικές οδηγίες [7].

Τα διαφορετικά συστήματα συλλογής αποβλήτων (μέσω κάδων - κοινών ή χωριστών ανά κλάσμα αποβλήτων, συλλογή από πόρτα σε πόρτα ή συλλογή από παράδοση) επηρεάζουν όχι μόνο την ποσότητα του ρεύματος των ΑΣΑ που συλλέγεται αλλά και τη μαζική κατανομή του. Σε αυτό το πλαίσιο, οι μελέτες έχουν προσδιορίσει τρεις κατηγορίες:

Τα οργανικά απόβλητα (πράσινα και βιοδιασπώμενα οικιακά απόβλητα) που διαχωρίζονται στην πηγή,

Τα απόβλητα συσκευασίας διαχωρισμένα στην πηγή: χαρτί και χαρτόνι, πλαστικά, γυαλί, μέταλλα (π.χ. αλουμίνιο, σίδηρος), ξύλο και

RMSW (τα σύμμεικτα απόβλητα που δεν διαχωρίζονται στην πηγή) [3].

Συνεπώς, η ποσότητα των ΑΣΑ που συλλέγονται αποτελεί βασική μεταβλητή για την ανάπτυξη σχεδίων βιώσιμης διαχείρισης αποβλήτων. Το ιδανικό θεωρητικό σενάριο είναι να επιτευχθεί πλήρης χωριστή συλλογή των αποβλήτων, κατά κλάσματα, αν και η περίπτωση αυτή φαίνεται να είναι αδύνατη, πράγμα που σημαίνει ότι τα RMSW αποτελούνται τόσο από ανακυκλώσιμα όσο και από μη ανακυκλώσιμα υλικά, με ή χωρίς ενεργειακό δυναμικό. Η αποτελεσματικότητα της χωριστής συλλογής ΑΣΑ έχει καταγραφεί με επιτυχία σε ορισμένες περιοχές της ΕΕ, φτάνοντας το 65,7 % το 2011 και οδεύοντας προς το 80%. Είναι προφανές ότι η αύξηση του ποσοστού χωριστής συλλογής αντιπροσωπεύει τη μείωση της ροής των ΑΣΑ. Υπό αυτή την έννοια, οι επιλογές επεξεργασίας των RMSW θα πρέπει να αναπτυχθούν λαμβάνοντας υπόψη τους προαναφερθέντες κύριους παράγοντες που υπογραμμίζουν ένα βιώσιμο σχέδιο διαχείρισης αποβλήτων [3].

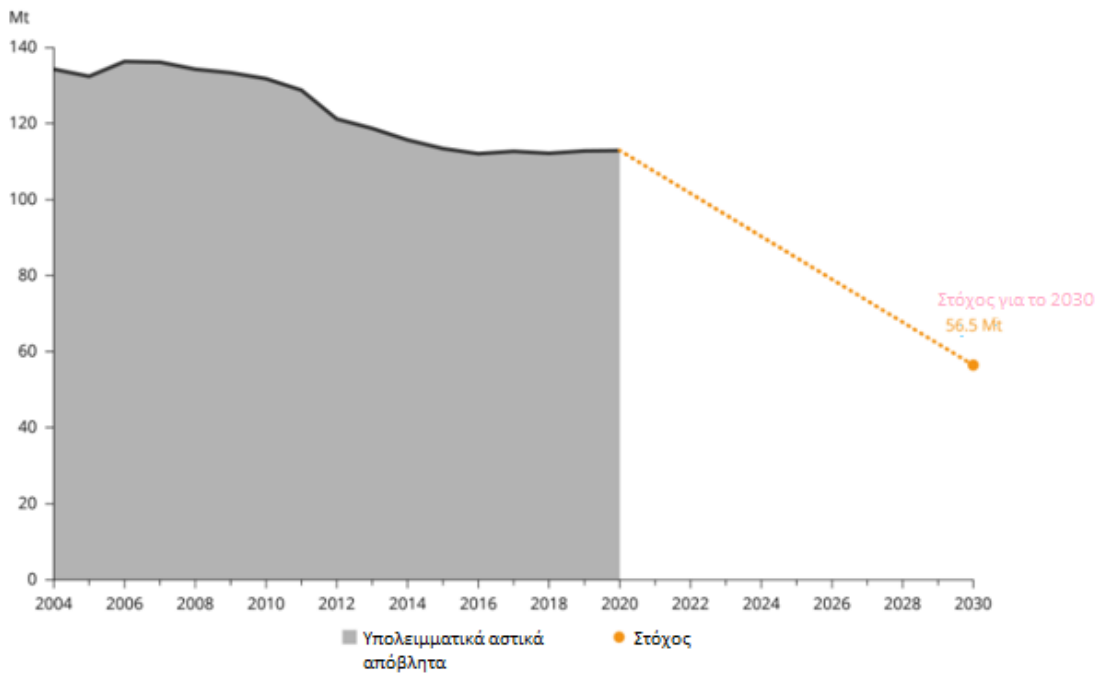
Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά των RMSW (κυρίως τη θερμογόνο δύναμη, την περιεκτικότητα σε χλώριο και υδράργυρο) το ρεύμα αποβλήτων θα μπορούσε να οριστεί δυνητικά ως Απόρριψη Παραγόμενου Καυσίμου (ΑΠΚ) ή Στερεό ανακτηθέν καύσιμο (ΣΑΚ). Η ενεργειακή αξιοποίηση των αποβλήτων είναι η επικρατέστερη τεχνολογία μαζικής καύσης. Το 2013

λειτουργούσαν 520 μονάδες στην Ευρώπη, οι οποίες επεξεργάζονταν περίπου 95 εκατομμύρια τόνους ΑΣΑ και εμπορικών αποβλήτων ετησίως. Στους συμβατικούς αποτεφρωτήρες αποβλήτων η κατώτερη θερμογόνο δύναμη (Lower Heating Value - LHV) σε περιοχές με υψηλό ποσοστό χωριστής συλλογής, είναι περίπου  $13,5 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  με αναμενόμενες κορυφές χαμηλότερης θερμογόνου δύναμης κατά τη διάρκεια της λειτουργίας που μπορεί να φθάσουν τα  $20 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Το ενεργειακό δυναμικό εξαρτάται επίσης από το οργανικό κλάσμα που συλλέγεται χωριστά, το οποίο έχει συνήθως 70% περιεκτικότητα σε νερό, καθιστώντας το ρεύμα αυτό ακατάλληλο για οποιαδήποτε θερμική επεξεργασία [3].

## 1.2 Αστικά στερεά απόβλητα σε Ευρωπαϊκό Επίπεδο

Ο τομέας των αποβλήτων στην Ευρώπη, αν και πολύ διαφορετικός από χώρα σε χώρα, τείνει να έχει κοινά χαρακτηριστικά όσον αφορά τον κατακερματισμό της αγοράς και το χαμηλό επίπεδο ανάκτησης του κόστους. Η κατάσταση αυτή δημιουργεί ανησυχίες, ιδίως ενόψει της τρέχουσας κατάστασης των χωρών της ΕΕ όσον αφορά τους στόχους για τα αστικά στερεά απόβλητα (ΑΣΑ). Σε εθνικό επίπεδο, η ΕΕ εκδίδει οδηγίες και στρατηγικές που θέτουν δεσμευτικούς νομικούς στόχους για τα κράτη μέλη. Παρέχει επίσης επιχορηγήσεις για επενδύσεις μέσω διαφόρων συστημάτων χρηματοδότησης. Αρκετά ευρωπαϊκά χρηματοπιστωτικά ιδρύματα (Ευρωπαϊκή Τράπεζα Επενδύσεων, Ευρωπαϊκή Τράπεζα Ανασυγκρότησης και Ανάπτυξης) παρέχουν επίσης χρηματοδότηση για έργα αστικών αποβλήτων στα κράτη μέλη της ΕΕ. Σε τοπικό επίπεδο, οι δήμοι είναι υπεύθυνοι για την παροχή υπηρεσιών προς τους χρήστες (α) μέσω δημοτικών υπηρεσιών, (β) μέσω δημοτικών εταιρειών διαχείρισης αποβλήτων ή (γ) με ανάθεση σε (συνήθως ιδιωτικούς) παρόχους [8].

Τα αστικά απόβλητα αντιπροσωπεύουν το 27% της συνολικής παραγωγής αποβλήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Εάν δεν γίνει σωστή διαχείριση, μπορεί να έχουν σοβαρές συνέπειες τόσο για την ανθρώπινη υγεία όσο και για το περιβάλλον. Η ποσότητα των εναπομεινάντων αστικών απορριμμάτων έχει μειωθεί κατά 16% από το 2004, φθάνοντας σε ένα τελικό σημείο το 2016 και φτάνοντας συνολικά τους 113 εκατομμύρια τόνους μέχρι το 2020. Εάν το 2020 θεωρηθεί ως έτος αναφοράς, τα εναπομεινάντα δημοτικά απορρίμματα πρέπει να μειωθούν κατά το ήμισυ μέσα σε μια δεκαετία σε 56,5 εκατομμύρια τόνους το πολύ. Αυτό είναι ιδιαίτερα δύσκολο, δεδομένου ότι ο όγκος των υπολειμματικών απορριμμάτων παρέμεινε σταθερός τα τελευταία πέντε χρόνια, παρά την αύξηση του ποσοστού ανακύκλωσης από 45% το 2015 σε 48% το 2020. Με άλλα λόγια, οι αυξήσεις στην παραγωγή αποβλήτων αντισταθμίζουν τις προόδους στην ανακύκλωση όπως βλέπουμε στην Εικόνα 4 [9].

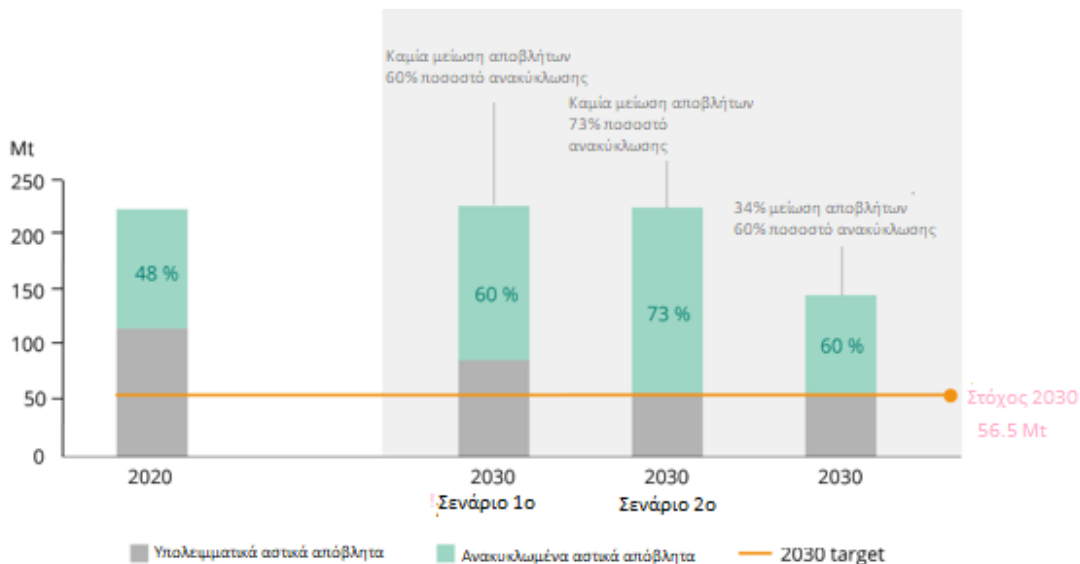


Εικόνα 4: Τάση στα υπολειμματικά αστικά απόβλητα για τα 27 κράτη μέλη της ΕΕ και στόχος για το 2030 [9].

Η οδηγία της ΕΕ για τα απόβλητα θέτει δραστικούς στόχους για την ανακύκλωση και την ανάκτηση απορριμμάτων. Τα κράτη μέλη πρέπει να επιτύχουν ένα ελάχιστο ποσοστό ανακύκλωσης και ανάκτησης 55% των αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ) κατά βάρος έως το 2025, με περαιτέρω αύξηση στο 60% και 65% έως το 2030 και το 2035, αντίστοιχα [10].

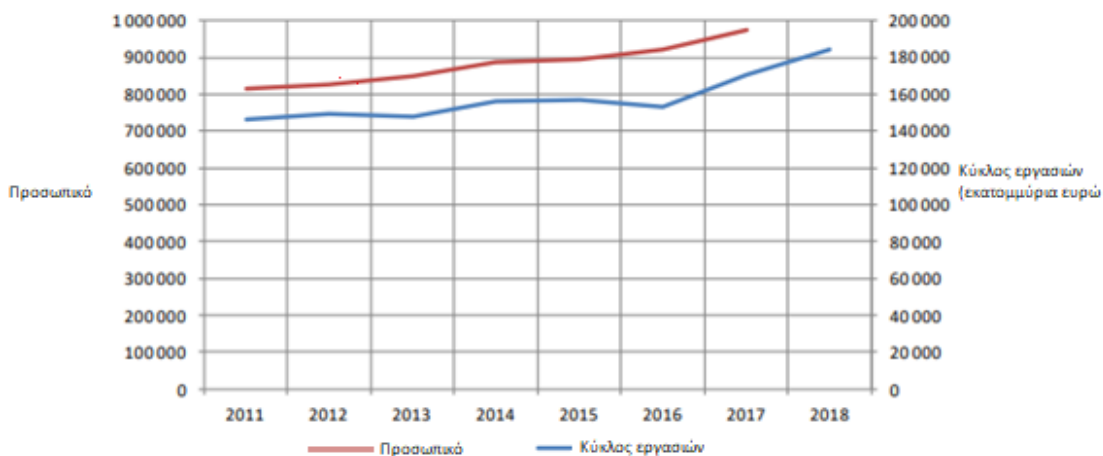
Η επίτευξη αυτών των ποσοστών ανακύκλωσης είναι αμφίβολη, καθώς πολλά κράτη μέλη της ΕΕ έχουν ήδη χάσει τις δεσμεύσεις τους για το 2020. Τέτοια υψηλά ποσοστά ανακύκλωσης είναι πρωτοφανή και απαιτούν σημαντικές βελτιώσεις στις μεθόδους συλλογής και στις υποδομές ανακύκλωσης [9].

Για την ενίσχυση των ποσοστών ανακύκλωσης και ανάκτησης, οι οργανισμοί διαχείρισης αποβλήτων πρέπει να επενδύσουν σε υποδομές, στην τεχνολογία και σε επιχειρησιακές μεθόδους. Η δημιουργία αποτελεσματικών συστημάτων συλλογής και διαλογής, η καθιέρωση αποτελεσματικών διαδικασιών ανακύκλωσης και η ανάπτυξη αγορών για τα ανακτηθέντα υλικά είναι μερικά παραδείγματα. Οι κυβερνήσεις μπορούν να βοηθήσουν παρέχοντας χρηματοδότηση, επιδοτήσεις και κίνητρα στις επιχειρήσεις διαχείρισης απορριμμάτων και ανακύκλωσης [10].



Εικόνα 5: Τρέχουσα παραγωγή αστικών απορριμμάτων έναντι τριών μελλοντικών σεναρίων [9].

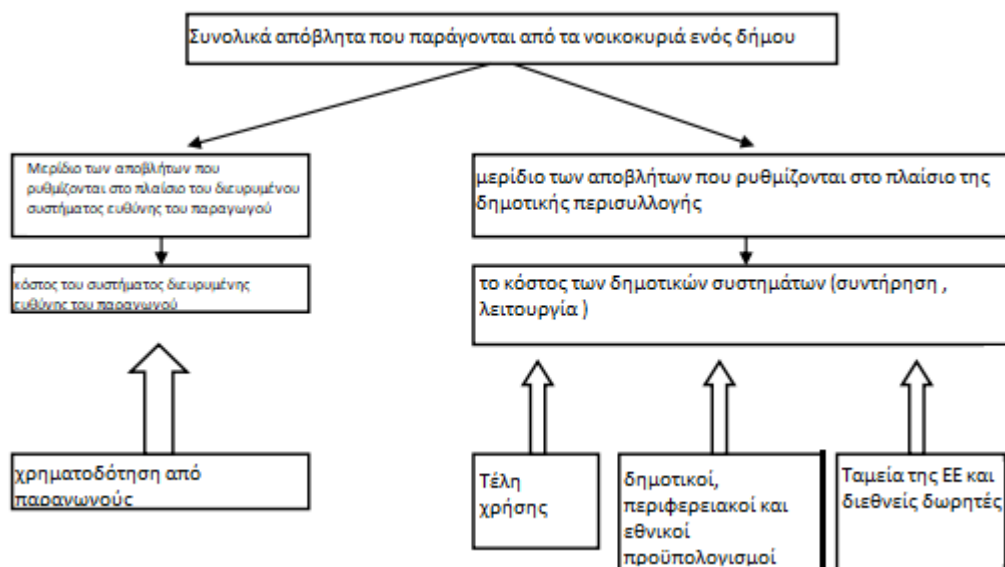
Σύμφωνα με τα στοιχεία της Eurostat (2018), υπάρχουν περίπου 47.700 φορείς διαχείρισης αποβλήτων (δημόσιοι και ιδιωτικοί) που αντιπροσωπεύουν ετήσιο κύκλο εργασιών 184 δισεκατομμυρίων ευρώ, με τη συλλογή αποβλήτων να αντιπροσωπεύει το 41% αυτού του κύκλου εργασιών, την ανάκτηση υλικών το 33% και την επεξεργασία και διάθεση αποβλήτων το 23%. Ο τομέας των αστικών αποβλήτων αποδεικνύεται αρκετά δυναμικός με αύξηση του κύκλου εργασιών κατά 26% από το 2011 έως το 2017. Παράλληλα, ο αριθμός του προσωπικού των δημοτικών αποβλήτων αυξήθηκε κατά 20% και έφθασε περίπου τους 975.000 εργαζόμενους το 2017. Η απασχόληση στον κλάδο της ανακύκλωσης αναμένεται να αυξάνεται σταθερά με τη σταδιακή μετάβαση στην κυκλική οικονομία [8].



Εικόνα 6: Εξέλιξη του προσωπικού και του κύκλου εργασιών των φορέων διαχείρισης αποβλήτων (2011-2018) [8]



Το παρακάτω γράφημα περιγράφει τις διάφορες πηγές χρηματοδότησης για τη διαχείριση των ΑΣΑ. Η χρηματοδότηση μπορεί να προέρχεται από τέλη που καταβάλλουν οι χρήστες, από δημόσιους πόρους (φόρους) από εθνικούς, περιφερειακούς και τοπικούς προϋπολογισμούς, από επιχορηγήσεις που παρέχονται από την ΕΕ ή από ευρωπαϊκά χρηματοπιστωτικά ιδρύματα [8].



Εικόνα 7: Πηγές χρηματοδότησης για τη διαχείριση των ΑΣΑ [8]

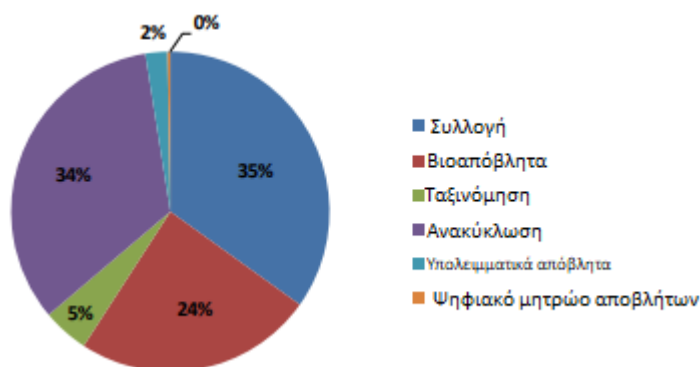
Μεταξύ 2014 και 2018, η ΕΕ διέθεσε 6,4 δισεκατομμύρια ευρώ για πρωτοβουλίες για τα ΑΣΑ μέσω των ταμείων συνοχής της ΕΕ (75,7%), των ευρωπαϊκών ταμείων στρατηγικών επενδύσεων (17,1%), του προγράμματος "Ορίζοντας 2020" (4,7%) και του προγράμματος Life (2,5%). Αυτό αντιστοιχεί σε περίπου 1,3 δισ. ευρώ σε ετήσιες συνεισφορές. Το 2018, οι πολίτες της ΕΕ παρήγαγαν κατά μέσο όρο 489 κιλά απορριμμάτων, τα οποία αντιπροσωπεύουν συνολική ποσότητα 251 εκατομμυρίων τόνων. Σε σύγκριση με το 2005, αυτό αντιπροσωπεύει μείωση κατά 5% για τον μέσο όρο των αποβλήτων που παράγονται από τους πολίτες της ΕΕ και μείωση κατά 2% για τη συνολική ποσότητα των ΑΣΑ. Από το 2005 έως το 2018, 14 χώρες της ΕΕ κατάφεραν να μειώσουν την αναλογία των κατά κεφαλήν ΑΣΑ, ενώ άλλες 13 χώρες σημείωσαν αύξηση και μία παρέμεινε σταθερή. Οι παρατηρούμενες διαφορές μεταξύ των χωρών αντανακλούν κυρίως διαφορετικά καταναλωτικά πρότυπα και οικονομικό πλούτο, καθώς οι πλουσιότερες χώρες τείνουν να παράγουν περισσότερα ΑΣΑ ανά άτομο. Το 2018, το 30% των ΑΣΑ ανακυκλώθηκε, το 28% αποτεφρώθηκε, το 23% αποτέθηκε σε χώρους υγειονομικής ταφής και το 17% κομποστοποιήθηκε. Παρόλο που η υγειονομική ταφή μειώνεται σταθερά από το 1995, πέφτοντας από το 64% στο 23%, εξακολουθεί να υπερβαίνει τον στόχο του 2035 για 10% σε 19 κράτη μέλη της ΕΕ. Η ανακύκλωση και η κομποστοποίηση παραμένουν κάτω από το 50% (στόχος για τα ΑΣΑ για το 2020) σε 20 χώρες, παρά

τη συνεχή αύξηση από το 1995 από 17% σε 47%. Η κατάσταση αυτή δείχνει ότι η πλειονότητα των κρατών μελών πρέπει να καταβάλει ακόμη σημαντικές προσπάθειες για να επιτύχει τη συμμόρφωση με τη νομοθεσία της ΕΕ [8].

Η νομοθεσία και οι κανονισμοί στον τομέα της διαχείρισης αποβλήτων έχουν προσφάτως λάβει μια νέα διάσταση, καθώς δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στη διατήρηση του περιβάλλοντος από παγκόσμια σκοπιά, προκειμένου να διατηρηθεί η βιώσιμη ανάπτυξη. Η Διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη, στόχευε στην επίλυση των παγκόσμιων ελλείψεων που συνδέονται με τη βιώσιμη διαχείριση των αποβλήτων. Υπάρχουν πολυάριθμοι νόμοι και κανονισμοί σε όλο τον κόσμο, αλλά οι διαθέσιμοι πόροι για τη βελτίωση της αναφοράς αυτών των νόμων και κανονισμών είναι περιορισμένοι. Η πλειονότητα της νομοθεσίας για τη διαχείριση των αποβλήτων εφαρμόζεται με μοναδικό στόχο τη διατήρηση του περιβάλλοντος και της υγείας του πληθυσμού μέσω της πρόληψης των αρνητικών επιπτώσεων του σχηματισμού επικίνδυνων και αδρανών αποβλήτων [11].

### **Κεφαλαιακές δαπάνες**

Το χρηματοοικονομικό μοντέλο επικεντρώνεται στις απαιτούμενες αλλαγές στη διαχείριση των αποβλήτων μεταξύ 2020 και 2035, αξιολογώντας τις επενδυτικές ανάγκες για κάθε κράτος μέλος της ΕΕ προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι ανακύκλωσης. Εκτιμάται ότι το συνολικό κόστος των επενδύσεων από το 2020 έως το 2035 για την επίτευξη πλήρους συμμόρφωσης ανέρχεται σε 31,5 δισεκατομμύρια ευρώ (61 ευρώ/κάτοικο), το οποίο αντιπροσωπεύει μια μέση ετήσια κεφαλαιακή δαπάνη ύψους 2,1 δισεκατομμυρίων ευρώ. Η σημαντικότερη οικονομική προσπάθεια θα κατευθυνθεί προς τη συλλογή αποβλήτων, η οποία αντιπροσωπεύει το 35% των συνολικών επενδυτικών αναγκών, ακολουθούμενη από την ανακύκλωση και την επανεπεξεργασία (34%) και τα βιοαπόβλητα (24%) όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα [8].



Εικόνα 8: Σύνοψη των επενδυτικών αναγκών για την επίτευξη των στόχων για τα ΑΣΑ έως το 2035 [8]

Υπάρχουν διάφορες διαδικασίες οικονομικής ρύθμισης για τις υπηρεσίες ΑΣΑ. Επί του παρόντος, η συντριπτική πλειονότητα των ευρωπαϊκών χωρών βασίζεται στην αυτορρύθμιση για τις υπηρεσίες αστικών στερεών αποβλήτων, με τις λειτουργίες οικονομικής ρύθμισης να κατανέμονται σε εθνικούς, περιφερειακούς ή/και τοπικούς φορείς. Ωστόσο, σε ορισμένα κράτη μέλη έχουν καθιερωθεί οικονομικές ρυθμιστικές αρχές. Λαμβάνοντας υπόψη τα τρέχοντα και μελλοντικά ζητήματα για τη βιομηχανία των ΑΣΑ, η ρύθμιση, ανεξάρτητα από τη θεσμική ρύθμιση, θα διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο [8].

Σε ένα πλαίσιο όπου θα πρέπει να γίνουν σημαντικές επενδύσεις για την επίτευξη ολοένα και πιο απαιτητικών στόχων ανακύκλωσης, απαιτείται αποτελεσματική και αποδοτική οικονομική ρύθμιση για:

- Βελτίωση της οικονομικής βιωσιμότητας των υπηρεσιών ΑΣΑ με την προώθηση των τιμών που ανταποκρίνονται στο κόστος και την αύξηση των επιπέδων ανάκτησης του κόστους.
- Παροχή κινήτρων για τεράστιες επενδύσεις σε υποδομές, διεργασίες και τεχνολογίες μέσω της ρύθμισης του οικονομικού συντελεστή απόδοσης και των λεπτομερών κριτηρίων επιλογής και αξιολόγησης των έργων.
- Διασφάλιση της δημιουργίας υγιών διακριτών συστημάτων συλλογής με επαρκή ικανότητα επεξεργασίας για κάθε συλλεγόμενο αντικείμενο, καθώς και επαρκή ικανότητα απορρόφησης από την αγορά για τα ανακυκλωμένα προϊόντα αποβλήτων.
- Βελτίωση της ποιότητας των δεδομένων παρακολούθησης με τη δημιουργία ολοκληρωμένων, συντονισμένων και τακτικά ενημερωμένων βάσεων δεδομένων σχετικά με την παραγωγή, τον προορισμό, τις τιμές και το εμπόριο σκουπιδιών [8]

### 1.3 Αστικά στερεά απόβλητα στην Ελλάδα

Ως πλήρες μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης από το 1981, η Ελλάδα έχει την υποχρέωση να συμμορφώνεται με τις ισχύουσες νομοθεσίες της ΕΕ για τη διαχείριση των αποβλήτων. Η χώρα παράγει σήμερα περίπου 4,5 εκατομμύρια τόνους οικιακών και εμπορικών αποβλήτων. Παραδόξως, παρά την τρέχουσα οικονομική κατάσταση στην Ελλάδα, η παραγωγή αποβλήτων συνεχίζει να αυξάνεται χρόνο με το χρόνο- η κατάσταση αυτή αποδίδεται εν μέρει στην επίδραση της μετανάστευσης από τις χώρες που ανέρχονται στην ΕΕ. Από τη συνολική ποσότητα των αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ) που παρήχθησαν στην Ελλάδα το 2010, το 80% καταλήφθηκε σε χώρους υγειονομικής ταφής. Από το ποσοστό αυτό, περίπου, το 53% διατέθηκε σε τριάντα εννέα αδειοδοτημένους χώρους μηχανικής ταφής που πληρούν τις ελάχιστες προδιαγραφές για υγειονομική ταφή. Το υπόλοιπο 47% απορρίφθηκε σε 155 παράνομους χώρους υγειονομικής ταφής. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η Ελλάδα απέχει προς το παρόν πολύ από το να συμμορφωθεί με τις προσδοκίες της Οδηγίας της ΕΕ για την υγειονομική ταφή για τα ανεπτυγμένα κράτη μέλη. Το 81% των ΑΣΑ που εναποτίθενται στην Ελλάδα είναι βιοαποδομήσιμα αστικά απόβλητα. Συγκεκριμένα, το ρεύμα αυτό αποτελείται κυρίως από, απόβλητα τροφίμων 39,7%, χαρτί 22% και άλλα οργανικά 10,5%. Αξίζει να σημειωθεί ότι η οδηγία της ΕΕ για την υγειονομική ταφή θέτει αυστηρούς στόχους για τη μείωση των βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων που οδηγούνται σε χώρους υγειονομικής ταφής σε όλα τα κράτη μέλη της ΕΕ. Η νομοθεσία ορίζει στόχους μείωσης των βιοαποικοδομήσιμων αστικών αποβλήτων που αποστέλλονται σε χώρους υγειονομικής ταφής [12]. Οι στόχοι αυτοί καθορίζονται ως εξής:

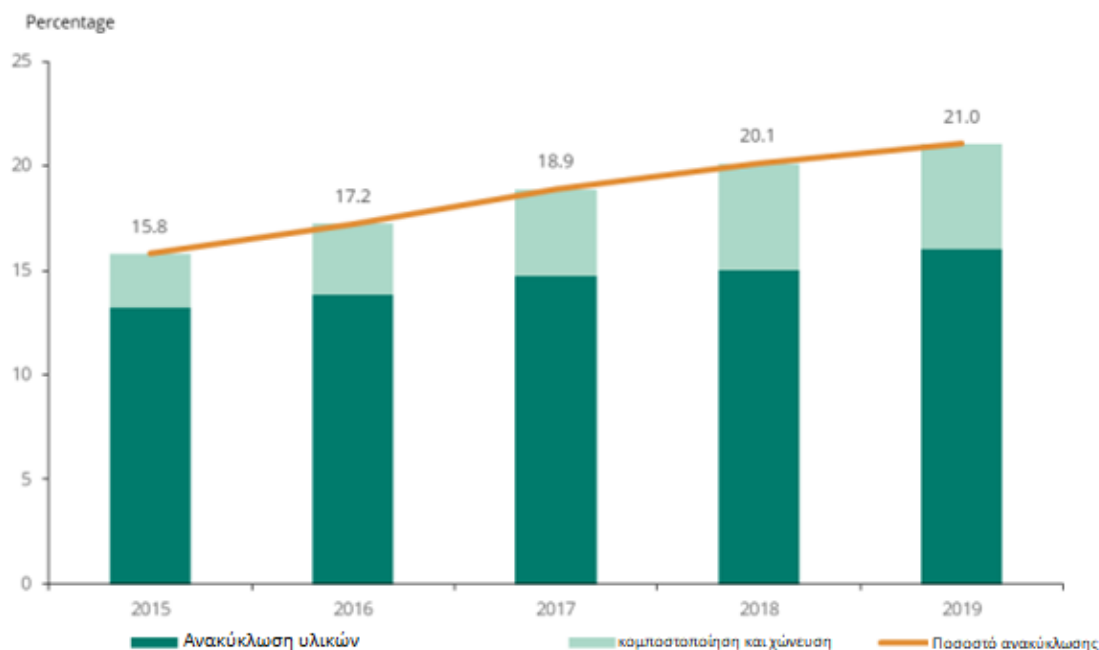
-75% μείωση των βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων που αποστέλλονται σε χώρους υγειονομικής ταφής (κατά βάρος) πέντε έτη μετά την έναρξη ισχύος της οδηγίας: 2006

-μείωση κατά 50% των βιοαποικοδομήσιμων αστικών αποβλήτων που οδηγούνται σε χώρους υγειονομικής ταφής (κατά βάρος) οκτώ έτη μετά την έναρξη ισχύος της οδηγίας: 2009

-35% μείωση των βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων που οδηγούνται σε χώρους υγειονομικής ταφής (κατά βάρος) δεκαπέντε έτη μετά την έναρξη ισχύος της οδηγίας: 2016

Το 2010, η Ελλάδα, μεταξύ μερικών άλλων χωρών της ΕΕ, δεν πέτυχε τον στόχο της εκτροπής του 75% των βιοαποδομήσιμων αποβλήτων από τους χώρους υγειονομικής ταφής, παρά το γεγονός ότι η Ευρωπαϊκή Επιτροπή της έδωσε τετραετή παρέκκλιση για την εφαρμογή εναλλακτικών υποδομών επεξεργασίας αποβλήτων. Έκτοτε, η χώρα αγωνίζεται να επιτύχει τον ελάχιστο στόχο της οδηγίας για τους χώρους υγειονομικής ταφής [13].

Το συνολικό ποσοστό ανακύκλωσης στην Ελλάδα αυξήθηκε σταθερά από 15,8% το 2015 σε 21,0% το 2019, σημαντικά χαμηλότερο όμως από τον στόχο για το 2025. Παρόμοια εικόνα μπορεί να διαπιστωθεί και για την κομποστοποίηση, η οποία αυξήθηκε κατά 2,5 ποσοστιαίες μονάδες, από 2,6 σε 5%. Η διαφορά μεταξύ τώρα και του στόχου του 55% είναι 34 ποσοστιαίες μονάδες. Η επίτευξη του στόχου θα απαιτήσει μια μέση αύξηση 5,7 ποσοστιαίων μονάδων κάθε χρόνο μεταξύ 2019 και 2025, που αντιπροσωπεύει σημαντική επιτάχυνση από τον μέσο όρο της προηγούμενης πενταετίας που ήταν 1,3 ποσοστιαίες μονάδες ανά έτος (2015-2019) [14].



Εικόνα 9: Ποσοστό ανακύκλωσης στην Ελλάδα μεταξύ 2015 και 2019 [11]

Τα συστήματα χωριστής συλλογής είναι ζωτικής σημασίας για την αύξηση των ποσοστών ανακύκλωσης. Για την αξιολόγηση του βαθμού ευκολίας, η μεθοδολογία αξιολόγησης κατηγοριοποιεί τους διάφορους τύπους συστημάτων συλλογής και κάνει διάκριση μεταξύ πόλεων (πυκνοκατοικημένες περιοχές), προαστίων (ενδιάμεσες πυκνοκατοικημένες περιοχές) και αγροτικών περιοχών (αραιοκατοικημένες περιοχές). Η αξιολόγηση βασίζεται στα υλικά και εξετάζει τα διάφορα υλικά με βάση το μέσο ποσοστό τους στα αστικά απόβλητα [14]. Η οδηγία SUP (Single Use Plastic) απαιτεί από την Ελλάδα να ανακυκλώσει το 90% των συσκευασιών μίας χρήσης έως το 2029, ενώ η οδηγία για τις συσκευασίες και τα απόβλητα συσκευασίας απαιτεί από την Ελλάδα να ανακτήσει το 55% των πλαστικών συσκευασιών κατά βάρος έως το 2030 [15]. Τα απόβλητα συσκευασίας συλλέγονται από το σύστημα "μπλε κάδου" της Ελληνικής Εταιρείας Αξιοποίησης Ανακύκλωσης SSED (HERRco). Η HERRco είναι η μεγαλύτερη PRO (Producer Responsibility Organization) στην Ελλάδα. Το 2020, το σύστημα συλλογής της κάλυπτε το 96% της χώρας, ενώ η πλήρης κάλυψη

προβλέπεται για το 2025. Η Rewarding Packaging Recycling, μία ακόμη PRO, σχεδιάζει να ξεκινήσει ένα δίκτυο 600 αντίστροφων αυτόματων πωλητών μέσα στα επόμενα έξι χρόνια, το οποίο θα επιτρέπει τη χωριστή συλλογή αποβλήτων από μέταλλο, γυαλί, χαρτί και πλαστικό συσκευασίας. Τα χαμηλά ποσοστά συλλογής για όλες τις κατηγορίες αποβλήτων (μεταξύ 3-46%) δείχνουν σαφώς ότι η χωριστή συλλογή στην Ελλάδα είναι αναποτελεσματική και ότι χρειάζονται κίνητρα για τη βελτίωση της επιτόπιας διαλογής και της χωριστής συλλογής. Όσον αφορά τις σχετικά χαμηλές επιδόσεις της Ελλάδας στη χωριστή συλλογή και ανακύκλωση, οι αρχές επικαλούνται οργανωτικούς λόγους, όπως αποτυχία στη συλλογή και μεταφορά και αποτυχία των μη οικιακών επιχειρήσεων να διαχωρίσουν τα ΑΣΑ [14].

Ένα νέο εθνικό σχέδιο διαχείρισης αποβλήτων (ΕΣΔΑ) εγκρίθηκε και τέθηκε σε εφαρμογή τον Σεπτέμβριο του 2020, με χρονοδιάγραμμα εφαρμογής από το 2020 έως το 2030. Η νέα στρατηγική θέτει έναν φιλόδοξο στόχο μείωσης των αποβλήτων κατά 10% έως το 2030, πέντε χρόνια νωρίτερα από τα ευρωπαϊκά κριτήρια (10% έως το 2035). Ο προαναφερόμενος στόχος θα επιτευχθεί στο πλαίσιο των εθνικών σχεδίων ανάκτησης ενέργειας. Το σχέδιο προωθεί την ανάπτυξη νέων μονάδων επεξεργασίας που παρέχουν δευτερογενή καύσιμα, βιοαέριο και ηλεκτρική ενέργεια [16].

Επιπλέον:

- \* Μέχρι το 2030, η ποσότητα των αποβλήτων που θάβονται σε χώρους υγειονομικής ταφής θα πρέπει να μειωθεί σε λιγότερο από 10%.
- \* Από τις 31 Δεκεμβρίου 2022, τα βιολογικά απόβλητα θα διαχωρίζονται και θα ανακυκλώνονται στην πηγή ή θα συλλέγονται χωριστά και δεν θα συνδυάζονται με άλλα είδη απορριμμάτων. Κατά συνέπεια, απαιτείται πλέον η χωριστή συλλογή των βιολογικών αποβλήτων.
- \* Μέχρι το τέλος του 2022, η δημιουργία δικτύου συλλογής οργανικών αποβλήτων (καφέ κάδος).
- \* Ανάκτηση ενέργειας από την επεξεργασία των οργανικών αποβλήτων (βιομάζα) καθώς και παραγωγή δευτερογενών υλικών (κομπόστ).
- \* Κατασκευή και λειτουργία Μονάδων Επεξεργασίας Απορριμμάτων και Μονάδων Επεξεργασίας Βιοαποβλήτων [12].

Το νέο ΕΣΔΑ αξιολογεί δύο πιθανά σενάρια για την ανάπτυξη μονάδων ενεργειακής αξιοποίησης που θα διαχειρίζονται υπολείμματα ΑΣΑ, υπολείμματα από άλλα ρεύματα (ογκώδη απόβλητα, ΑΗΗΕ, ξύλο και ύφασμα) και ίσως δευτερογενή καύσιμα. Η εκτιμώμενη ποσότητα αποβλήτων που θα μετατραπούν σε ηλεκτρική ενέργεια είναι 5.301.499 τόνοι ετησίως (έως το 2030) [16].

Το Σενάριο 1 προβλέπει ότι τα υπολείμματα από την επεξεργασία των ΑΣΑ σε μονάδες Μηχανικής Βιολογικής Επεξεργασίας, τα υπολείμματα από την επεξεργασία άλλων ρευμάτων και τα δευτερογενή καύσιμα που παράγονται σε όλες τις ελληνικές περιφέρειες (εκτός των νησιωτικών) θα ανέρχονται σε 1.429.752 τόνους και θα οδηγούνται σε μονάδες ενεργειακής αξιοποίησης.

Το Σενάριο 2 προβλέπει ότι τα δευτερογενή καύσιμα που παράγονται σε όλη τη χώρα (401.930 τόνοι) θα εκτρέπονται για χρήση σε κατάλληλες βιομηχανίες, όπως η τσιμεντοβιομηχανία, αντικαθιστώντας τα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα, ενώ τα υπολείμματα που παράγονται από άλλα ρεύματα σε όλες τις ελληνικές περιφέρειες (πλην των νησιωτικών) θα ανέρχονται συνολικά σε 1.027.821 τόνους και θα οδηγούνται σε μονάδες ενεργειακής αξιοποίησης [16].

Παρά την υιοθέτηση της οδηγίας-πλαίσου για τα απόβλητα στο νόμο, υπήρξε μεγάλη καθυστέρηση στην προσαρμογή της ιεράρχησης των αποβλήτων στην ελληνική νομοθεσία, έτσι ώστε να καθοδηγείται και να στηρίζεται η εφαρμογή των εθνικών προγραμμάτων ανακύκλωσης και η εκτροπή των βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων από την υγειονομική ταφή. Η αρχική αποτυχία της διακυβέρνησης των αποβλήτων στην Ελλάδα εντοπίζεται στην αδυναμία της κεντρικής κυβέρνησης να παράσχει τα απαιτούμενα εθνικά σχέδια και στόχους διαχείρισης αποβλήτων. Η κατάσταση αυτή άφησε στις διάφορες Νομαρχιακές Αυτοδιοικήσεις πρόσθετες αρμοδιότητες σχεδιασμού, πέραν της κύριας ευθύνης τους για την παραγωγή περιφερειακών εκθέσεων διαχείρισης αποβλήτων, οι οποίες απαιτείται να αναθεωρούνται κάθε πέντε χρόνια. Όταν προτείνεται η κατασκευή νέων χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, το Υπουργείο Περιβάλλοντος είναι υποχρεωμένο να διενεργεί εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων για την αξιολόγηση της καταλληλότητας του προτεινόμενου χώρου. Εάν το Υπουργείο Περιβάλλοντος κρίνει ότι ο χώρος είναι κατάλληλος για χρήση ως χώρος υγειονομικής ταφής, είναι επίσης υπεύθυνο για την έκδοση άδειας εγκατάστασης και περιβαλλοντικής άδειας για την επεξεργασία βιοαποικοδομήσιμων αστικών αποβλήτων [13].

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι απαιτούνται επείγοντως δραστικά μέτρα για τη μείωση της ποσότητας των αποβλήτων που οδηγούνται σε χώρους υγειονομικής ταφής στην Ελλάδα. Μια δεύτερη αλλά εξίσου σημαντική πρόκληση που αντιμετωπίζει η χώρα είναι ότι, έχοντας ενσωματώσει στην εθνική της νομοθεσία την αναθεωρημένη Οδηγία Πλαίσιο για τα απόβλητα, είναι πλέον επιτακτική η ανάγκη να ξεκινήσουν μέτρα εφαρμογής, τα οποία τοποθετούν το νέο μοντέλο ιεράρχησης των αποβλήτων, με την πρόληψη των αποβλήτων και την προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση στην κορυφή, ακολουθούμενη από την ανακύκλωση, την ανάκτηση ενέργειας από την αποτέφρωση χαμηλότερα και την υγειονομική ταφή των αποβλήτων ως τη λιγότερο ευνοημένη και τελική λύση, στο κάτω μέρος της ιεράρχησης των αποβλήτων. Μέχρι σήμερα, η Ελλάδα έχει προσπαθήσει να διαχειριστεί την εκτροπή των βιοαποικοδομήσιμων αστικών αποβλήτων από τους χώρους υγειονομικής ταφής με την κατασκευή μονάδων μηχανικής βιολογικής επεξεργασίας. Επί του παρόντος λειτουργούν πέντε μονάδες στην Ελλάδα: Άνω Λιόσια που έχει δυναμικότητα 300.000 τόνων αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ) ετησίως. Η μονάδα εξάγει επίσης

201.000 τόνους οργανικών αποβλήτων από τη συνολική διακίνηση αποβλήτων. Η δεύτερη εγκατάσταση έχει κατασκευαστεί στα Χανιά, με ετήσια δυναμικότητα 70.000 τόνων ΑΣΑ, ενώ εξάγονται 53.600 τόνοι οργανικών αποβλήτων. Η τρίτη εγκατάσταση έχει κατασκευαστεί στην Καλαμάτα με ετήσια δυναμικότητα επεξεργασίας ΑΣΑ 32.000 τόνων και ετήσιο ρυθμό εκχύλισης οργανικών 21.440 τόνων. Έχουν προγραμματιστεί να κατασκευαστούν άλλες επτά μονάδες, μία εκ των οποίων στη Ημαθία, η οποία θα έχει δυναμικότητα 70.000 τόνων ΑΣΑ ετησίως και θα μπορεί να ανακτήσει 46.900 τόνους οργανικού κλάσματος. Μια δεύτερη μονάδα έχει προγραμματιστεί να κατασκευαστεί στην Αχαΐα, η οποία θα έχει ετήσια απόδοση ΑΣΑ 120.000 τόνων ετησίως και θα μπορεί να ανακτήσει οργανικό κλάσμα 80.400 τόνων. Άλλες μονάδες που έχουν προγραμματιστεί να κατασκευαστούν στο εγγύς μέλλον είναι στη Θεσσαλονίκη, η οποία θα έχει δυνατότητα επεξεργασίας 450.000 τόνων αποβλήτων ετησίως και ανάκτησης 301.500 τόνων οργανικού κλάσματος. Αυτή τη στιγμή η μονάδα στα Άνω Λιόσια στην Αθήνα είναι μία από τις μεγαλύτερες στην Ευρώπη. Η μονάδα εξάγει ξηρά ανακυκλώσιμα υλικά, καύσιμα που προέρχονται από απορρίμματα. Σήμερα λειτουργούν δεκαπέντε μονάδες ανακύκλωσης σε όλη την Ελλάδα [13].



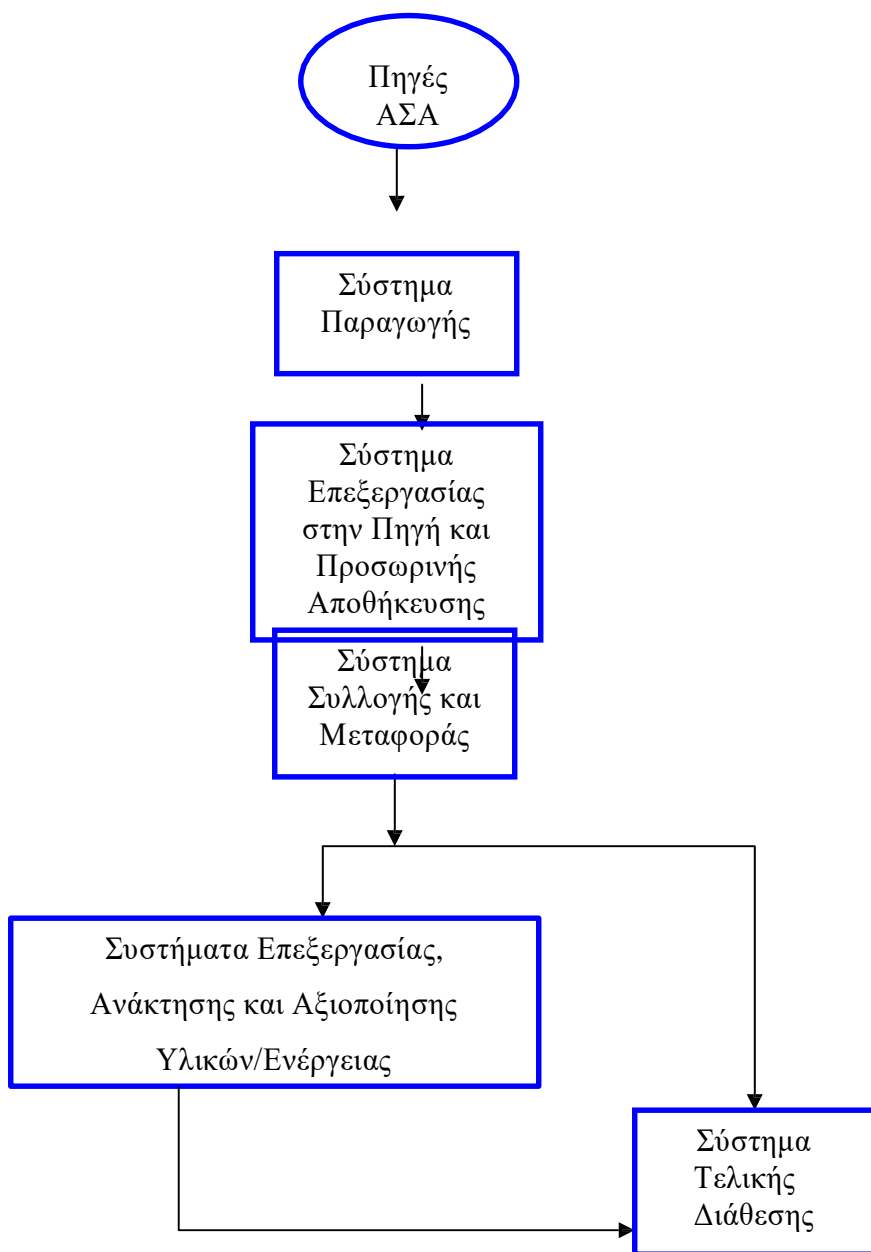
## 2. Συστήματα διαχείρισης και μέθοδοι επεξεργασίας των αστικών στερεών αποβλήτων

Η διαχείριση των ΑΣΑ, αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα της πολιτικής προστασίας του περιβάλλοντος που καλείται να λύσει κάθε σύγχρονη κοινωνία και για το σκοπό αυτό, έχουν αναπτυχθεί διάφορα Συστήματα Διαχείρισης ΑΣΑ (ΣΔΑΣΑ).

### 2.1 Ολοκληρωμένο Σύστημα Διαχείρισης Αστικών Στερεών Αποβλήτων

Ένα ολοκληρωμένο ΣΔΑΣΑ, αποτελείται από τη συλλογή, μεταφορά, αξιοποίηση και διάθεση των ΣΑ, την εποπτεία και επίβλεψη των εργασιών και των χώρων απόρριψης. Περιλαμβάνει την εφαρμογή προγραμμάτων για τον περιορισμό της παραγωγής αποβλήτων, τη βελτίωση του συστήματος συλλογής, τη διαλογή στην πηγή και την ανακύκλωση, τη μεταφόρτωση, την εφαρμογή μεθόδων επεξεργασίας για την ενεργειακή αξιοποίηση ή την επαναχρησιμοποίηση των υλικών και τη διάθεση του τελικού υπολείμματος σε σύγχρονους χώρους υγειονομικής ταφής [17].

Για τη διαχείριση των ΑΣΑ, δεν υπάρχει μόνο μία ορθή πρακτική, αλλά ένας συνδυασμός επιλογών. Δεδομένου ότι κάθε ΣΔΑΣΑ είναι ένας συνδυασμός επεξεργασιών, κάθε εναλλακτική επεξεργασία χαρακτηρίζεται από τη συμβολή της στην επίδοση του ΣΔΑΣΑ, βάσει της οποίας θα επιλεγεί ή όχι να συμπεριληφθεί σε αυτό [18]. Επιπλέον, κάθε περιοχή χαρακτηρίζεται από διαφορετικά προβλήματα και η απόφαση για το ποιος είναι ο ιδανικός συνδυασμός των επεξεργασιών απαιτεί την εξέταση πολλών παραγόντων, όπως την ποσότητα και τον τύπο των ΑΣΑ, τις ιδιαίτερες γεωγραφικές και μορφολογικές συνθήκες της περιοχής κλπ [17]. Στην Εικόνα 10 παρουσιάζεται μια συνοπτική εικόνα του ΣΔΑΣΑ, αποτυπώνοντας τα βασικά του στάδια, τα οποία αναλύονται στη συνέχεια.



Εικόνα 10: Συνοπτική Εικόνα του Συστήματος Διαχείρισης ΑΣΑ [18]

### 2.1.1 Προσωρινή Αποθήκευση

Η προσωρινή αποθήκευση των ΑΣΑ διαρκεί από τη στιγμή που οι χρήστες τα μεταφέρουν εκτός του χώρου παραγωγής μέχρι την ώρα συλλογής τους από τα απορριμματοφόρα (Α/Φ). Αποτελεί βασικό

στάδιο του ΣΔΑΣΑ, όπου απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή προκειμένου να αποφεύγεται η δημιουργία προβλημάτων (δυσοσμία, προσέλκυση τρωκτικών, κλπ) και να διευκολύνεται η συλλογή των ΑΣΑ [19].

Βασικά μέσα προσωρινής αποθήκευσης είναι οι κάδοι και οι σάκοι. Οι σάκοι παρέχουν ευκολία χρήσης και ταχύτητα συλλογής, ωστόσο βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι οι σάκοι κακής ποιότητας καταστρέφονται εύκολα, δημιουργώντας εστίες μόλυνσης [20]

Οι κάδοι διακρίνονται σε συρόμενους και στάσιμους. Οι συρόμενοι, οι οποίοι δεν είναι διαδεδομένοι στην Ελλάδα, σύρονται στο χώρο απόθεσης, εκκενώνονται και οδηγούνται στην αρχική τους θέση και συχνά η χρήση τους συνδυάζεται με σταθερή πρέσα για τη συμπίεση των ΣΑ. Βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι σχετίζονται με τη μείωση του χρόνου διαχείρισης και του προσωπικού, ενώ μειονεκτήματα αποτελούν ο μικρός βαθμός πλήρωσής τους και το χειρωνακτικό τους γέμισμα. Οι στάσιμοι, παραμένουν στη θέση τους εκτός από τη μετακίνηση μέχρι το Α/Φ και διακρίνονται σε κυλιόμενους [21], οι οποίοι είναι συνηθέστεροι και σε σταθερούς. Οι κυλιόμενοι, χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με μηχανική συλλογή, τοποθετούνται σε επιλεγμένες θέσεις και αδειάζονται με ειδικό μηχανισμό. Εξασφαλίζουν καλές συνθήκες υγιεινής και απαιτούν μικρό χρόνο συλλογής, ωστόσο έχουν υψηλό κόστος και απαιτείται πρόσθετος εξοπλισμός. Οι σταθεροί, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιοχές όπου δεν είναι εύκολη η πρόσβαση Α/Φ, ωστόσο βασικά τους μειονεκτήματα αποτελούν η αδυναμία μηχανικής πλήρωσης και το χειρωνακτικό άδειασμα. Πέρα όμως από τους παραπάνω κάδους, υπάρχουν και πιο σύνθετες κατασκευές που ταυτόχρονα επεξεργάζονται και αποθηκεύουν τα απόβλητα και χρησιμοποιούνται συνήθως σε νοσοκομεία και ξενοδοχεία [19]. Τέλος, για την προσωρινή αποθήκευση των ογκωδών ΣΑ (έπιπλα, ηλεκτρικές συσκευές κλπ.), χρησιμοποιούνται μεγάλοι υποδοχείς, οι οποίοι τοποθετούνται σε συγκεκριμένες θέσεις και όταν πληρωθούν, μεταφέρονται με ειδικά οχήματα στους χώρους διάθεσης [20].

### 2.1.2 Συλλογή και Μεταφορά

Μετά την προσωρινή αποθήκευση, ακολουθεί το στάδιο της συλλογής και μεταφοράς των απορριμμάτων. Αποτελεί σημαντικότατο στάδιο, διότι αφενός επηρεάζει την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών στους πολίτες και αφετέρου αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού κόστους διαχείρισης, αγγίζοντας το 85% [19].

Σε αυτό το στάδιο, πρέπει να εξετάζονται οι εναλλακτικές επιλογές του φορέα διαχείρισης, ώστε να

διεξάγεται με τον πλέον βέλτιστο τρόπο. Οι επιλογές αυτές αφορούν: τη συχνότητα και τα σημεία συλλογής, το απαιτούμενο προσωπικό και μηχανολογικό εξοπλισμό, το χρονοπρογραμματισμό των δρομολογίων και την προσαρμογή του εξοπλισμού στη υφιστάμενη τεχνολογία [18] [19].

Για τη συλλογή των ΑΣΑ, υπάρχουν διάφοροι τύποι Α/Φ [22]. Τα σύγχρονα Α/Φ, είναι κλειστού τύπου και διαθέτουν συστήματα συμπίεσης των ΣΑ και ανύψωσης των κάδων. Τα ανοικτού τύπου, χρησιμοποιούνται πλέον μόνο για τη συλλογή ογκωδών απορριμμάτων. Τα κλειστού τύπου, με βάση το σύστημα εισαγωγής και συμπίεσης των ΣΑ μπορεί να είναι: α) τύπου μύλου, με τα οποία επιτυγχάνεται σημαντική ομογενοποίηση των απορριμμάτων, ενδείκνυται για τη συμπίεση απορριμμάτων με υψηλή υγρασία και έχουν χαμηλό κόστος αγοράς και συντήρησης και β) τύπου πρέσα τα οποία είναι ενδεδειγμένα για αντικείμενα μεγάλου όγκου και για τη συλλογή απορριμμάτων τις νυχτερινές ώρες, καθώς είναι λιγότερο θορυβώδη [22]. Η αποτελεσματικότητα του εν λόγω σταδίου, πέρα από συγκεκριμένους παράγοντες (διαδρομές, ώρες συλλογής, αριθμός κάδων κλπ.) οι οποίοι επηρεάζουν την οικονομική επίδοσή του, εξαρτάται σημαντικά και από την συνεργασία των κατοίκων, καθώς μέσω συγκεκριμένων ενεργειών όπως για παράδειγμα τη σωστή τοποθέτηση των ΣΑ για συλλογή, συντελούν στην αποδοτική ή όχι εφαρμογή του συστήματος [22].

### 2.1.3 Μεταφόρτωση

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της συλλογής, τα απορρίμματα είτε μεταφέρονται απευθείας στους χώρους επεξεργασίας, είτε στους λεγόμενους Σταθμούς Μεταφόρτωσης Απορριμμάτων (ΣΜΑ) Πρόκειται για χώρους όπου το φορτίο των Α/Φ μεταφορτώνεται σε ειδικούς υποδοχείς/ οχήματα, οι οποίοι στη συνέχεια μεταφέρονται στους χώρους τελικής διάθεσης [20]. Ο ΣΜΑ, μπορεί να είναι είτε σταθερός [21], όπου όλες οι διαδικασίες εκτελούνται σε συγκεκριμένο χώρο με την κατάλληλη πάγια εγκατάσταση και τεχνική υποδομή, είτε κινητός [21], δηλ. οποιοσδήποτε τύπος οχήματος ή συνδυασμός οχημάτων, που διαθέτει τον κατάλληλο εξοπλισμό για την υποδοχή ΣΑ χωρίς τη μεσολάβηση πάγιων εγκαταστάσεων. Κατά τη διαδικασία αυτή, τα απορρίμματα συνήθως υφίστανται συμπίεση, με στόχο την επίτευξη του μέγιστου επιτρεπόμενου ωφέλιμου φορτίου για την περαιτέρω μεταφορά τους. Η συμπίεση συνήθως γίνεται στα ειδικά οχήματα ή εναλλακτικά, μπορεί και να πραγματοποιείται δεματοποίηση των απορριμμάτων, με χρήση εγκαταστάσεων υψηλού βαθμού συμπίεσης [17]. Οι ΣΜΑ απαιτείται να χωροθετούνται σε κεντροβαρικά σημεία ως προς τις πηγές δημιουργίας των ΣΑ, ώστε τα Α/Φ να διανύουν την ελάχιστη δυνατή απόσταση μέχρι τον ΣΜΑ,

επιτυγχάνοντας τη μέγιστη δυνατή οικονομική αποδοτικότητα. Αποδοτική θεωρείται η εγκατάσταση του ΣΜΑ, όταν η απόσταση του χώρου διάθεσης είναι μεγαλύτερη των 30km και η ημερήσια ποσότητα των ΣΑ ξεπερνά τους 20 τόνους[23].

## 2.2 Μέθοδοι Επεξεργασίας των Αστικών Στερεών Αποβλήτων

Για την επεξεργασία των ΑΣΑ εφαρμόζονται διάφορες μέθοδοι, χωρίς ωστόσο να υπάρχει βέλτιστη μέθοδος για το σύνολο των ΑΣΑ. Κάθε μέθοδος, παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία απαιτείται να λαμβάνονται υπόψη από τους φορείς διαχείρισης. Επίσης, η επιλογή των μεθόδων απαιτείται να τεκμηριώνεται μέσω της εκπόνησης ειδικών μελετών.

### 2.2.1 Ανακύκλωση (Ανάκτηση και Επαναχρησιμοποίηση)

Τα τελευταία χρόνια, η ανακύκλωση κατέχει εξέχουσα θέση στα ΣΔΑΣΑ και πρωτοστατεί στην υφιστάμενη ευρωπαϊκή και εθνική πολιτική.

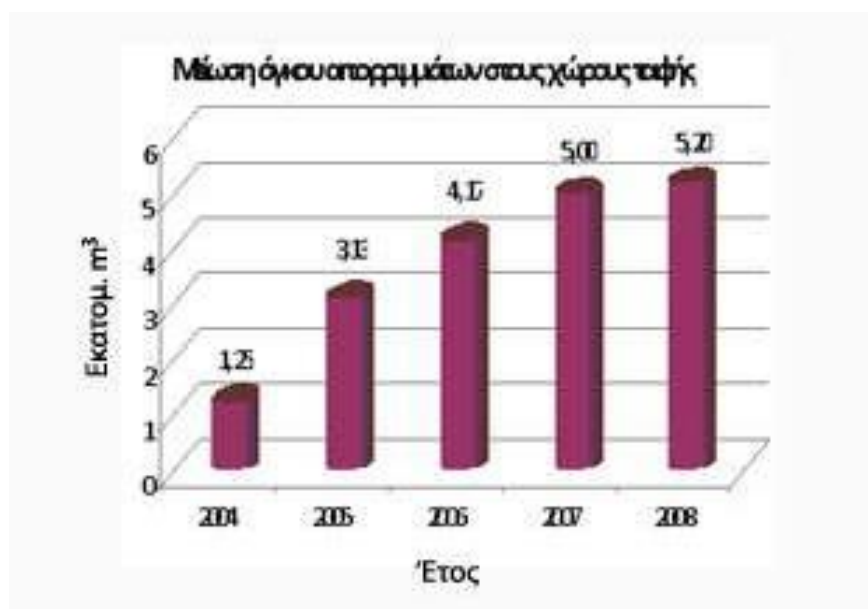
Η ανακύκλωση συνεπάγεται διαχωρισμό των ΑΣΑ σε ομοιογενείς κατηγορίες των συστατικών τους, ανάκτηση των υλικών και επαναχρησιμοποίησή τους (ενδεχομένως μετά από επεξεργασία). Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί, πως δεν υπάρχει σαφής νομικός ορισμός του όρου και επίσης δεν είναι το ίδιο εύκολο να διαχωριστούν όλα τα υλικά των ΑΣΑ, ούτε και η αξιοποίηση τους είναι εξίσου αποτελεσματική [18]. Για ένα σύστημα ανακύκλωσης, καθοριστικοί παράγοντες είναι το σύστημα διαλογής των ΑΣΑ, η ποιότητα των ανακτώμενων υλικών, η διάθεση στην αγορά ανακυκλωμένων προϊόντων και η οργανωτική, οικονομική και θεσμική στήριξη [17] [19].

Η εξέλιξη του ποσοστού ανακύκλωσης των οικιακών απορριμμάτων, στην Ελλάδα, σύμφωνα με στοιχεία του ΥΠΕΚΑ (πρώην ΥΠΕΧΩΔΕ), παρουσιάζει σημαντική αύξηση μεταξύ των ετών 2004-2008, καθώς το 2008 ήταν 25%, έναντι 6% που ήταν το 2004 ( Εικόνα 11).



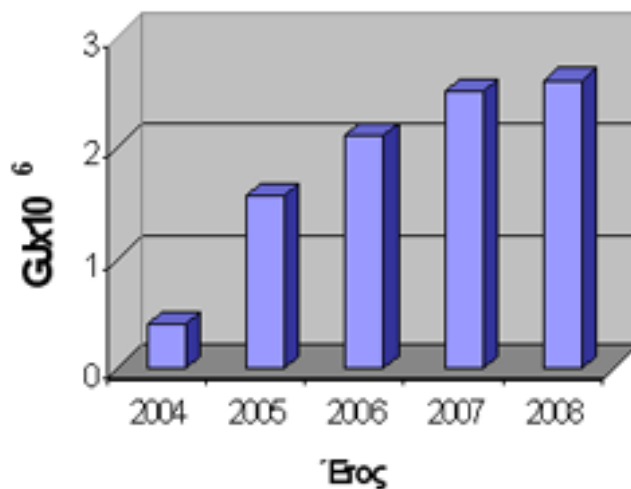
Εικόνα 11: Διαχρονική εξέλιξη του ποσοστού ανακύκλωσης [24]

Επιπλέον, από την ανακύκλωση των οικιακών καθώς και άλλων ρευμάτων (λάστιχα, λιπαντικά έλαια, συσσωρευτές) έχει σημειωθεί μείωση του όγκου των αποβλήτων που καταλήγουν στους χώρους ταφής, η οποία εκτιμάται σε 5,2 εκατομμύρια κυβικά μέτρα ετησίως (Εικόνα 12). Η ανακύκλωση, έχει επίσης συμβάλλει στην εξοικονόμηση ενέργειας η οποία εκτιμάται σε 2.600.000 GJ (Εικόνα 13), καθώς και στη μείωση των εκπομπών (ιδιαίτερα του διοξειδίου του άνθρακα), η οποία ανέρχεται σε 360.000 τόνων ανά έτος (Εικόνα 14).



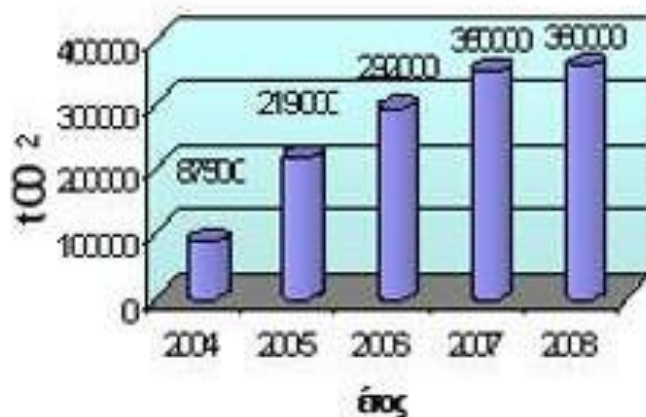
Εικόνα 12: Μείωση όγκου απορριμμάτων στους χώρους ταφής [24].

Εξοικονόμηση ενέργειας από την ανακύκλωση



Εικόνα 13: Εξοικονόμηση ενέργειας από την ανακύκλωση [24].

Μείωση του CO<sub>2</sub> από την ανακύκλωση απορριμμάτων



Εικόνα 14: Μείωση του CO<sub>2</sub> από την ανακύκλωση απορριμμάτων [24].

Για το διαχωρισμό των ΑΣΑ, υπάρχουν οι εξής μέθοδοι διαλογής:

#### Διαλογή στην πηγή (ΔσΠ)

Η ΔσΠ αφορά το διαχωρισμό των ανακυκλωμένων υλικών στην πηγή παραγωγής των ΣΑ. Μέσω αυτής επιτυγχάνεται μείωση της ποσότητας που οδηγείται προς επεξεργασία/τελική διάθεση και οργανώνεται είτε σε μόνιμα, είτε σε εθελοντικά σχήματα. Η μέθοδος αυτή, προϋποθέτει την ενεργό συμμετοχή των

πολιτών, δεδομένου ότι η διαλογή γίνεται από τον παραγωγό των αποβλήτων, τους πολίτες ή τις επιχειρήσεις [18] και αποτελεί εναλλακτικό και συμπληρωματικό στάδιο του ΣΔΑΣΑ. Στη συνέχεια, η μεταφορά των διαχωρισμένων αποβλήτων, πραγματοποιείται εναλλακτικά: α) με ευθύνη των πολιτών σε κέντρα συλλογής ή σε ειδικούς κάδους [25] και β) με ευθύνη των φορέων διαχείρισης, έπειτα από συνεννόηση με τους πολίτες ή εφαρμόζοντας το σύστημα τακτικής περιοδικής συλλογής «από πόρτα σε πόρτα» [18].

### Μηχανική Διαλογή

Πραγματοποιείται στις εγκαταστάσεις μηχανικής ανακύκλωσης, όπου γίνεται διαχείριση των μικτών ΑΣΑ και επιτυγχάνεται μηχανικός διαχωρισμός, ανάκτηση και περαιτέρω επεξεργασία των υλικών που περιέχονται σε αυτά. Τα συνήθη ανακτώμενα υλικά είναι: βιοαποδομήσιμα οργανικά, χαρτί, πλαστικό, μίγμα χαρτιού και πλαστικού, σιδηρούχα μέταλλα, αλουμίνιο. Με εξαίρεση το μίγμα χαρτιού και πλαστικού που χρησιμοποιείται ως καύσιμο υλικό, τα υπόλοιπα υλικά, εφόσον υποστούν περαιτέρω επεξεργασία ανακυκλώνονται [17]. Η μηχανική διαλογή περιλαμβάνει δύο βασικές κατηγορίες μηχανικής επεξεργασίας: α) την προετοιμασία των απορριμμάτων για τη διάνοιξη των σάκων, την ελάττωση του μεγέθους και την αποκατάσταση της ομοιομορφίας των απορριμμάτων και β) το διαχωρισμό των απορριμμάτων, με τον οποίο επιτυγχάνεται διαχωρισμός της εισερχόμενης μάζας των απορριμμάτων σε δύο ρεύματα, εκ των οποίων στο ένα περιέχεται το προς ανάκτηση υλικό σε υψηλή συγκέντρωση ενώ το άλλο είναι σε μεγάλο βαθμό απαλλαγμένο από την παρουσία του [23].

Αξίζει να σημειωθεί, ότι ιδιαίτερη συμβολή στην ανακύκλωση, έχουν τα Κέντρα Διαλογής Ανακυκλώσιμων Υλικών (ΚΔΑΥ). Η ροή των διαδικασιών στα πλαίσια λειτουργίας ενός ΚΔΑΥ, παρουσιάζεται στην Εικόνα 15. Πρόκειται για εγκαταστάσεις στις οποίες με συνδυασμό μεθόδων μηχανικής και χειρωνακτικής διαλογής, διαχωρίζονται ομάδες ανακυκλώσιμων υλικών, υλικών δηλαδή που προέρχονται μόνο από ΔσΠ. Έπειτα, τα υλικά χωρίζονται σε επιμέρους ποιότητες, ώστε στη συνέχεια να δεματοποιηθούν και να οδηγηθούν στις αντίστοιχες βιομηχανίες για ανακύκλωση. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να επιτευχθεί η απαιτούμενη ποιότητα για την απορρόφησή τους από την αγορά και εξασφαλίζονται υψηλότερες τιμές πώλησης. Τόσο ο σχεδιασμός ενός ΚΔΑΥ, όσο και η επιλογή του απαιτούμενου εξοπλισμού εξαρτώνται από τις ποσότητες και το είδος των εισερχόμενων υλικών καθώς και από τις απαιτήσεις της αγοράς ως προς τα ανακτώμενα προϊόντα. Το ποσοστό των μη ανακυκλώσιμων υλικών που λόγω της ποιότητάς τους ή του μικρού μεγέθους τους δεν μπορούν να δεματοποιηθούν και να οδηγηθούν προς ανακύκλωση, ανέρχεται στο 30% της συνολικής ποσότητας



των υλικών που οδηγούνται στο ΚΔΑΥ [17].



Εικόνα 15: ΚΔΑΥ [17].

Στην Ελλάδα, από ορισμένους ΦοΔΣΑ όπως ο Ενιαίος Σύνδεσμος Δήμων και Κοινοτήτων Νομού Αττικής (ΕΣΔΚΝΑ), εφαρμόζονται προγράμματα για την ξεχωριστή συλλογή του έντυπου χαρτιού, ενώ από κάποιους ΟΤΑ προωθούνται πρωτοβουλίες για την εφαρμογή της διαλογής του οργανικού κλάσματος, μέσω της χρήσης οικιακών κάδων κομποστοποίησης. Ωστόσο, αν και η διαλογή στη πηγή του οργανικού κλάσματος προβλέπεται από τους περιφερειακούς σχεδιασμούς, μέχρι στιγμής δεν έχει εφαρμοστεί σε κάποια διαχειριστική ενότητα. Σε κάθε περίπτωση, η διαλογή στην πηγή χρειάζεται να επεκταθεί, όχι μόνο διότι συμβάλει στην αύξηση του βαθμού ανακύκλωσης των υλικών, αλλά επιπλέον συνάδει με τις κατευθύνσεις της Ε.Ε. για τη διαχείριση των απορριμμάτων. Σύμφωνα μάλιστα και με τη νέα Οδηγία-πλαίσιο 2008/98/ΕΚ, προβλέπεται η χωριστή συλλογή τουλάχιστον 4 ρευμάτων υλικών (χαρτί, πλαστικό, γυαλί, μέταλλο), μέχρι το 2015 [23].

### 2.2.2 Βιολογική Επεξεργασία

Η βιολογική επεξεργασία, εφαρμόζεται μόνο σε ΣΑ που την επιδέχονται, δηλαδή σε βιοαποδομήσιμα ή οργανικά απόβλητα. Στις μεθόδους βιολογικής επεξεργασίας περιλαμβάνεται η αερόβια (κομποστοποίηση ή λιπασματοποίηση) και η αναερόβια (χώνευση ή ζύμωση).

### Κομποστοποίηση / Λιπασματοποίηση

Κομποστοποίηση ή λιπασματοποίηση είναι «η ελεγχόμενη βιολογική οξείδωση ετερογενών οργανικών υλικών με τη βοήθεια ετερότροφων μικροοργανισμών (βακτήρια, μύκητες), οι οποίοι αποδομούν τα οργανικά συστατικά παρουσία οξυγόνου» [17].

Τελικό προϊόν είναι το κομπόστ, ενώ παράλληλα παράγεται νερό και διοξείδιο του άνθρακα. Το κομπόστ, είναι ένα πλούσιο σε οργανική ουσία υλικό, με υψηλό χουμικό περιεχόμενο, το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως ως εδαφοβελτιωτικό ή ως υπόστρωμα για την καλλιέργεια φυτών [18]. Η διαδικασία της κομποστοποίησης περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

Βιοσταθεροποίηση ή βιοαποδόμηση, το οποίο ανάλογα με τα χρησιμοποιούμενα τεχνικά μέσα διαρκεί 2-8 εβδομάδες και περιλαμβάνει όλες τις μικροβιολογικές δραστηριότητες για την αποδόμηση και σταθεροποίηση των οργανικών ουσιών.

Ωρίμανση, όπου το παραγόμενο υλικό του προηγούμενου σταδίου αφήνεται να ωριμάσει για 4-12 εβδομάδες.

Εξευγενισμός, όπου το προϊόν καθαρίζεται με μηχανικούς διαχωριστές από ξένες προσμίξεις και μη αποδομημένα οργανικά. και προκύπτει το τελικό προϊόν [18] [23].

### Αναερόβια ζύμωση

Αναερόβια ζύμωση είναι η διεργασία μέσω της οποίας πραγματοποιείται αποδόμηση των οργανικών ουσιών με τη βοήθεια μικροοργανισμών απουσία οξυγόνου με αποτέλεσμα την παραγωγή σταθεροποιημένου οργανικού υλικού και αερίου υψηλής περιεκτικότητας σε μεθάνιο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ενέργειας π.χ. σε συστήματα θερμικής επεξεργασίας ΣΑ. Η επεξεργασία αυτή, πραγματοποιείται σε κλειστούς αντιδραστήρες σε ελεγχόμενες συνθήκες, με στόχο την ανάκτηση ενέργειας, τη μείωση του όγκου των ΑΣΑ και τη βιολογική σταθεροποίησή τους [17] [18]. Η επεξεργασία σε μονάδες αναερόβιας ζύμωσης περιλαμβάνει τέσσερα κύρια στάδια, τα οποία είναι:

- η προεπεξεργασία του ρεύματος των αποβλήτων
- η αναερόβια χώνευση στον αντιδραστήρα
- η ανάκτηση του βιοαερίου
- η επεξεργασία των υπολειμμάτων της ζύμωσης

Η κομποστοποίηση είναι η πλέον εφαρμοζόμενη μέθοδος, ωστόσο τελευταία αναπτύσσεται ραγδαία

και η εφαρμογή της αναερόβιας επεξεργασίας. Στην Ευρώπη, λειτουργούν 26 μονάδες αναερόβιας χώνευσης [23]. Ωστόσο, από την εφαρμογή και των δύο μεθόδων, προκύπτουν ορισμένα περιβαλλοντικά θέματα, όπως οι αέριες εκπομπές, ο θόρυβος και η διάδοση παθογόνων οργανισμών [26]. Αξίζει επίσης να σημειωθεί, πως οι μονάδες μηχανικής ανακύκλωσης και οι μονάδες βιολογικής επεξεργασίας, μπορούν να λειτουργούν σε συνδυασμό, αποτελώντας τις μονάδες Μηχανικής και Βιολογικής Επεξεργασίας (MBE). Οι MBE, έχουν τη δυνατότητα επεξεργασίας και σύμμεικτων ΑΣΑ, αλλά και επιλεγμένων για παραγωγή ανακυκλώσιμων υλικών. Τελικά προϊόντα των MBE είναι το RDF, το SRF και το κομπόστ [17].

Τα τελευταία χρόνια, οι εγκαταστάσεις MBE αυξάνονται με γοργούς ρυθμούς, ενώ σήμερα λειτουργούν διεθνώς 80 μονάδες MBE συνολικής δυναμικότητας 8.500.000 τόνων ετησίως [23].

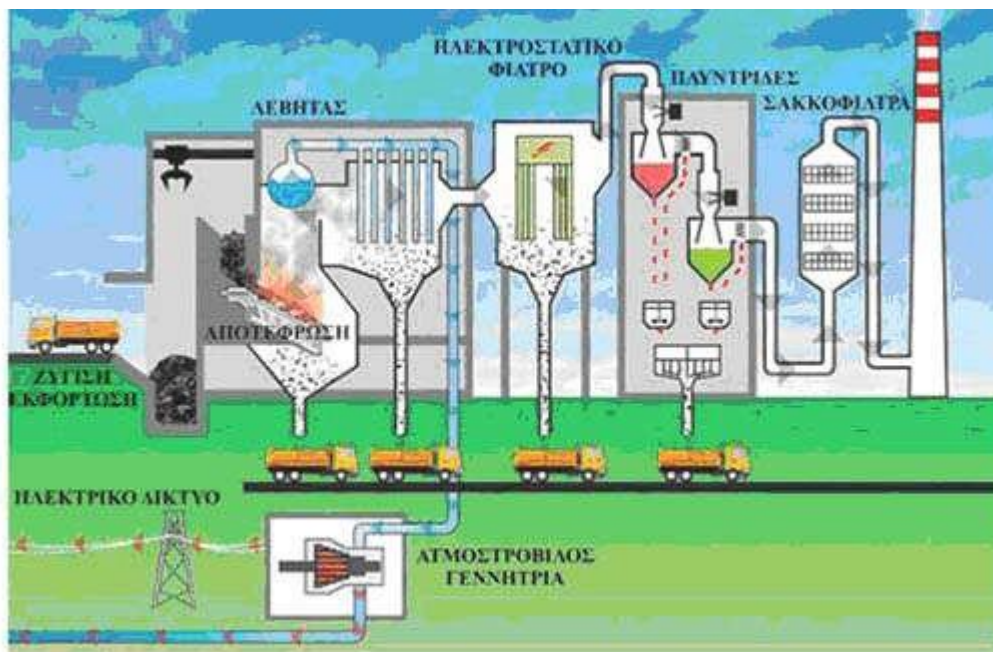
### 2.2.3 Θερμική Επεξεργασία (Καύση/Αποτέφρωση)

Η θερμική επεξεργασία των ΑΣΑ «περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες μετατροπής του περιεχομένου τους σε αέρια, υγρά και στερεά προϊόντα, με ταυτόχρονη ή συνεπακόλουθη αποδέσμευση θερμικής ενέργειας». Η καύση ή αποτέφρωση των ΣΑ, η οποία αποτελεί μια αρκετά παλιά διεργασία, είναι η οξείδωση, δηλ. η ένωση των χημικών στοιχείων των ΣΑ με οξυγόνο [17]. Αυτό πραγματοποιείται είτε με τη χρήση συγκεκριμένης ποσότητας οξυγόνου που απαιτείται για την πλήρη καύση (στοιχειομετρική καύση), είτε με περισσότερο από το αναγκαίο για τη στοιχειομετρική καύση οξυγόνο (περίσσεια καύση) [19]. Οι μονάδες αποτέφρωσης, ως καύσιμη ύλη χρησιμοποιούν α) σύμμεικτα ΑΣΑ ή β) εναλλακτικά καύσιμα που προκύπτουν από το διαχωρισμό των ΑΣΑ, όπως το RDF, τα συστατικά του οποίου ελέγχονται, καθιστώντας έτσι τις μονάδες της δεύτερης κατηγορίας αποτελεσματικότερες στη λειτουργία και τον έλεγχο των εκπομπών [18].

Εκτός από την αποτέφρωση η οποία είναι η πιο συνηθισμένη, μεθόδους θερμικής επεξεργασίας αποτελούν επίσης: η πυρόλυση, η οποία γίνεται απουσία οξυγόνου και η αεριοποίηση, η οποία αποτελεί μια ενδιάμεση κατάσταση.

Τα προϊόντα της καύσης είναι: α) αέριες εκπομπές, που περιέχουν μονοξείδιο του άνθρακα, ατμούς, διοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του αζώτου κλπ. και υφίστανται επεξεργασία ώστε να ικανοποιούν τα ανώτατα όρια εκπομπών και β) στερεά υπολείμματα, όπως τέφρα από τους λέβητες, σκόνη των καπναερίων και υπολείμματα καθαρισμού των αερίων, που αντιστοιχούν στο 20-40% του αρχικού βάρους των ΑΣΑ [18]. Σημαντικό επίσης προϊόν της καύσης, αποτελεί η θερμότητα. Για την αξιοποίηση της παραγόμενης θερμότητας και την ανάκτηση ενέργειας στους σύγχρονους

αποτεφρωτές, υπάρχουν ειδικοί λέβητες, όπου η παραγόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού και στη συνέχεια για παραγωγή θερμικής ή ηλεκτρικής ενέργειας [27]. Στην Εικόνα 16, αποτυπώνεται μια τυπική μονάδα αποτέφρωσης ΑΣΑ με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας:



Εικόνα 16: Τυπική μονάδα αποτέφρωσης ΑΣΑ με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποβλήτων [27]

Οι θερμικές μέθοδοι επεξεργασίας, χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της θερμικής επεξεργασίας

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Αποδεδειγμένη εφαρμογή, πολυάριθμες μονάδες σε όλη την Ευρώπη	Περιορισμένη κοινωνική αποδοχή
Δυνατότητα επεξεργασίας μεγάλου εύρους υλικών	Εξάρτηση από τη σύνθεση / χαρακτηριστικά των ΑΣΑ
Οι τεχνολογικές εξελίξεις επέτρεψαν την εγκατάσταση μονάδων καύσης σε μικρότερη κλίμακα	Αυξημένη οπτική όχληση

Χωροθέτηση μικρότερης έκτασης συγκριτικά με ΧΥΤΑ για τη λειτουργία της μονάδας	Μέρος της τέφρας είναι επικίνδυνο και απαιτεί ξεχωριστή επεξεργασία και χώρο διάθεσης επικίνδυνων αποβλήτων
Ανάκτηση ενέργειας	Υψηλό κόστος επένδυσης και λειτουργίας

Στην Ε.Ε. η θερμική επεξεργασία, προωθείται μέσω της νομοθεσίας ως αποτελεσματικός τρόπος για τη μείωση της ποσότητας των ΑΣΑ που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής και τον περιορισμό του ενεργειακού προβλήματος, μέσω της ανάκτησης ενέργειας [29]. Παγκοσμίως λειτουργούν περίπου 600 μονάδες αποτέφρωσης αποβλήτων, από τις οποίες περισσότερες από 400 βρίσκονται στην Ε.Ε. Ωστόσο, λόγω των παραγόμενων αέριων εκπομπών η λειτουργία τους διέπεται από αυστηρό πλαίσιο ελέγχου, με στόχο την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων [23].

#### 2.2.4. Εδαφική Διάθεση (Υγειονομική Ταφή)

Η εδαφική διάθεση ή υγειονομική ταφή, αποτελεί αναπόφευκτο τμήμα κάθε συστήματος διαχείρισης των ΑΣΑ, καθώς από όλες τις μεθόδους επεξεργασίας παράγονται υπολείμματα. Κάθε σύγχρονος χώρος διάθεσης απαιτείται να σχεδιάζεται με βάση τη διασφάλιση συνθηκών ευστάθειας, να διαθέτει δίκτυο απορροής όμβριων υδάτων, συστήματα αντιτυρικής προστασίας, διαχείρισης των στραγγισμάτων, μόνωσης/στεγανοποίησης, αξιοποίησης του παραγόμενου βιοαερίου καθώς και σύστημα παρακολούθησης [17]. Σύμφωνα με στοιχεία του ΥΠΕΚΑ (πρώην ΥΠΕΧΩΔΕ), σήμερα λειτουργούν 63 ΧΥΤΑ σε όλη την Ελλάδα [25]. Ωστόσο, η πλειοψηφία των εν λόγω ΧΥΤΑ, θα είναι παράνομοι από το 2012 και έπειτα, διότι δεν μπορούν να μετατραπούν σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής Υπολειμμάτων (ΧΥΤΥ), σύμφωνα με την υφιστάμενη νομοθεσία της ΕΕ [23].

Αξιοσημείωτο είναι ότι παραδοσιακά, σε παγκόσμιο επίπεδο η εδαφική διάθεση των απορριμμάτων γινόταν στους Χώρους Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Αποβλήτων (ΧΑΔΑ), τις γνωστές χωματερές. Σταδιακά όμως, η ανάγκη προστασίας της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος συνέβαλε στη μετάβαση από τους ΧΑΔΑ στους ΧΥΤΑ, χωρίς ωστόσο οι πρώτοι να πάντως να υφίστανται. Η ανεξέλεγκτη απόθεση των απορριμμάτων στις χωματερές, εγκυμονεί σοβαρούς κινδύνους για τη δημόσια υγεία και το περιβάλλον, οι οποίοι επιδεινώνονται από την έλλειψη ορθολογικών σχεδιασμών [28]. Οι ΧΑΔΑ, υπάρχουν κυρίως σε επαρχιακές – αγροτικές περιοχές, όπου τα ΣΑ, διατίθενται παράνομα, χωρίς καμία επεξεργασία, σε φυσικές εδαφικές κοιλότητες, παλαιά λατομεία, ρεματιές

κλπ. και μολονότι η μέθοδος αυτή δεν είναι αποδεκτή, εξακολουθεί να εφαρμόζεται στην Ελλάδα [17]. Ήδη από το 2005, η Ελλάδα καταδικάστηκε στο ΔΕΚ για τη λειτουργία των τότε 1.125 ΧΑΔΑ (Απόφαση ΔΕΚ της 6/10/2008). Στόχος του Εθνικού Σχεδιασμού ήταν το κλείσιμο όλων των παράνομων χώρων διάθεσης και η κάλυψη του συνόλου του πληθυσμού με σύγχρονους ΧΥΤΑ μέχρι τις 21/12/2008 (καταληκτική προθεσμία της καταδικαστικής απόφασης του ΔΕΚ), ο οποίος όμως δεν επιτεύχθηκε. Αν εντός των επόμενων μηνών υπάρξει εκ νέου καταδίκη, θα επιβληθεί υψηλότατο ημερήσιο πρόστιμο ύψους 34.000€ για κάθε ΧΑΔΑ που συνεχίζει να λειτουργεί. Αν και το ζήτημα του κλεισίματος των ΧΑΔΑ αποτελεί αρμοδιότητα των ΟΤΑ, σύμφωνα με πρόσφατη ανακοίνωση του Υπουργείου Εσωτερικών Αποκέντρωσης και Ηλεκτρονικής Διακυβέρνησης στόχος είναι εντός δύο μηνών να βρεθούν προσωρινές αποδεκτές λύσεις για τους περισσότερους ΧΑΔΑ και να προχωρήσουν όλα τα έργα, ώστε εντός δύο ετών να έχουν ολοκληρωθεί οι Περιφερειακοί Σχεδιασμοί Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων. Σύμφωνα με στοιχεία του ΥΠΕΣ από τους 316 ΧΑΔΑ της χώρας, οι περισσότεροι (79) λειτουργούν στην Πελοπόννησο και ακολουθούν οι λοιπές περιφέρειες, με εξαίρεση τη Δυτική Μακεδονία και τη Θεσσαλία, όπου δεν καταγράφονται ενεργοί ΧΑΔΑ [21]. Επίσης, 429 ΧΑΔΑ βρίσκονται σε διαδικασία αποκατάστασης, εκ των οποίων οι 371 έχουν σχετική άδεια. Από αυτούς οι 206 έχουν ενταχθεί σε χρηματοδοτικά προγράμματα, 16 υλοποιούνται με ίδιους πόρους, 3 περιλαμβάνονται χρηματοδοτικές προτάσεις και για τους υπολοίπους 146 αναζητούνται πόροι [29].

Το ζήτημα της αποκατάστασης των ΧΑΔΑ στην Ελλάδα, έχει καθυστερήσει σημαντικά και προβλήματα όπως οι αντιδράσεις των κατοίκων, η ελλιπής χρηματοδότηση, οι αδικαιολόγητες καθυστερήσεις για την έκδοση των σχετικών αδειών και η απροθυμία τοπικών παραγόντων να δυσανεστήσουν τους ψηφοφόρους τους, απαιτείται να αντιμετωπισθούν το συντομότερο δυνατό, ώστε να μην βρεθεί η χώρα αντιμέτωπη με τα υπέρογκα πρόστιμα, αλλά κυρίως, διότι το περιβάλλον αποτελεί αναφαίρετο ατομικό και συλλογικό δικαίωμα των πολιτών.

### 3. Κομποστοποίηση

#### 3.1 Βασικές αρχές και περιγραφή λειτουργίας

Με τον όρο κομποστοποίηση περιγράφεται η ελεγχόμενη αερόβια, βιολογική, οξειδωτική διαδικασία αποικοδόμησης και σταθεροποίησης οργανικών υλικών, η οποία λαμβάνει χώρα κάτω από συνθήκες που οδηγούν στην ανάπτυξη θερμοκρασιών της θερμοφιλης περιοχής. Το κομπόστ, ως τελικό προϊόν, πρέπει να είναι αρκετά σταθεροποιημένο ώστε να μπορεί να αποθηκεύεται και να διατίθεται στο έδαφος χωρίς ανεπιθύμητες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Μέσω της δημιουργίας συνθηκών υγρασίας και αερισμού, τέτοιων ώστε να εξασφαλίζεται η ανάπτυξη θερμοφίλων μικροοργανισμών, η κομποστοποίηση συντελεί στη βιοσταθεροποίηση των αποβλήτων [30]. Αποτελεί μια ελεγχόμενη βιο-οξειδωτική διεργασία, η οποία:

- Αφορά ετερογενή υλικά σε στερεή κατάσταση.
- Περνάει από μία αρχική φάση αποικοδόμησης κατά την οποία αναπτύσσονται θερμοκρασίες της θερμοφιλης περιοχής και παράγονται πρόσκαιρα φυτοτοξικές ουσίες.
- Οδηγεί σε μια κατάσταση σταθεροποίησης, το τελικό προϊόν της οποίας χαρακτηρίζεται ως ώριμο κομπόστ.

Κατά την κομποστοποίηση με τη βοήθεια της μικροβιακής κοινότητας (βακτήρια, μύκητες) και της μεταβολικής δραστηριότητας με τη βοήθεια ενδοκυτταρικών και εξωκυτταρικών ενζύμων, επιτυγχάνεται η τροποποίηση και αποικοδόμηση της οργανικής ύλης που οδηγεί [31]:

- Στο σχηματισμό ενός πλήθους μεταβολικών προϊόντων και κλασμάτων, όπως χουμικών ενώσεων και λιγνο – πρωτεϊνών,
- Στην απελευθέρωση θρεπτικών στοιχείων από οργανικές ενώσεις και μεταφορά τους σε διαλυτά ή αδιάλυτα ανόργανα άλατα,
- Στην έκλυση αερίων, όπως διοξειδίου του άνθρακα, υδρατμών, αμμωνίας, οξειδίων του αζώτου, και από πιθανούς αναερόβιους θύλακες, μεθανίου και υδρόθειου.

Οι κυριότερες ομάδες οργανικών ουσιών που βρίσκονται στο οργανικό κλάσμα των στερεών αποβλήτων είναι οι πρωτεΐνες (3-4%), τα σάκχαρα (8-10%), οι κυτταρίνες και ημικυτταρίνες (44-50%) και οι λιγνίνες (12-15%). Ανάλογα με το βαθμό αποδόμησης, τα υλικά που αποτελούν τα ΒΑΑ



χωρίζονται στις εξής κατηγορίες [30]:

- Εύκολα αποδομήσιμα, όπως σάκχαρο, άμυλο, ημικυτταρίνες, κάποιες πρωτεΐνες.
- Αυτά που απαιτούν αρκετό διάστημα και κατάλληλες συνθήκες για την αποδόμηση, όπως κυτταρίνες, λίπη και ορισμένες πρωτεΐνες.
- Σε εκείνα τα οποία είναι αρκετά ανθεκτικά στην αποδόμηση όπως οι λιγνίνες και οι κερατίνες.

Οι διακριτές φάσεις κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης είναι οι εξής [32]:

1. Δραστηριοποίηση των μεσόφιλων οργανισμών, φθάνοντας τη θερμοκρασία στους 50<sup>0</sup> C.
2. Περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας στους 65<sup>0</sup> C και επικράτηση των θερμοφίλων οργανισμών. Πρέπει να λαμβάνονται μέτρα αερισμού της οργανικής μάζας, αφού η φάση αυτή εξαρτάται από τα αποθέματα οξυγόνου. Για τη διασφάλιση της διεργασίας πρέπει να υπάρχει μέριμνα για την απομάκρυνση της θερμότητας που παράγεται, είτε με συχνή ανάδευση είτε με πρόσθετο αερισμό, για την αποφυγή του θανάτου των μικροοργανισμών. Το παραγόμενο προϊόν που προκύπτει χαρακτηρίζεται ως ‘φρέσκο κομπόστ’, είναι υγιεινοποιημένο (sanitized), ενώ σχεδόν όλοι οι μικροοργανισμοί καταστρέφονται. Το ‘φρέσκο κομπόστ’ έχει αποδομηθεί μόνο μερικώς, δεν είναι σταθεροποιημένο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί όμως με κατάλληλο τρόπο για καλλιέργειες (σαν εδαφοβελτιωτικό, για προετοιμασία εδάφους). Η συνέχιση της αποδόμησης και σταθεροποίησης συνεχίζεται στο έδαφος.
3. Κατά τη φάση αυτή η οργανική μάζα σταθεροποιείται, η θερμοκρασία πέφτει βαθμιαία και η δράση των μικροοργανισμών σταματά. Εξαιτίας του ότι η μικροβιακή δραστηριότητα μπορεί να ανασταλεί από αρκετούς παράγοντες, όπως η χαμηλή υγρασία, η πτώση της θερμοκρασίας δεν αποτελεί ασφαλές κριτήριο ένδειξης σταθεροποίησης του υλικού. Το παραγόμενο σταθεροποιημένο κομπόστ βρίσκεται σε κατάσταση χουμοποίησης και μπορεί να διατεθεί στο έδαφος, αφού δεν υπάρχει κίνδυνος φυτοτοξικότητας.
4. Το κομπόστ ωριμάζει μέσω μιας μεγάλης περιόδου χουμοποίησης. Το ‘ώριμο κομπόστ’ που προκύπτει είναι υγειονομικά ασφαλές και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε φυτώρια και καλλιεργήσιμες εκτάσεις.

Οι τρεις πρώτες φάσεις εκτυλίσσονται εντός μικρών χρονικών διαστημάτων, συνήθως από 2 έως 8 εβδομάδες, ενώ η ωρίμανση απαιτεί περίπου 3 με 6 μήνες.



Ο ρυθμός της μικροβιακής δραστηριότητας ή της αποικοδόμησης στη μάζα κομποστοποίησης εξαρτάται από ορισμένους σημαντικούς φυσικούς και χημικούς παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό και τη λειτουργία μιας διεργασίας κομποστοποίησης [33].

### Μικροοργανισμοί

Οι μικροοργανισμοί αποσυνθέτουν ή οξειδώνουν τις οργανικές ενώσεις σε απλά, σταθεροποιημένα τελικά προϊόντα, με την παραγωγή θερμότητας. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας καταναλώνεται οξυγόνο και απελευθερώνεται διοξείδιο του άνθρακα, νερό και συχνά αμμωνία. Η θερμική ενέργεια χρησιμοποιείται εν μέρει για τη σύνθεση των κυττάρων των μικροοργανισμών. Ωστόσο, η παραγωγή θερμότητας είναι επαρκής για την αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι τη θερμοφιλή περιοχή. Η μορφή της καμπύλης θερμοκρασίας εξαρτάται από τα αρχικά απόβλητα που κομποστοποιούνται και τις μεθόδους κομποστοποίησης. Ωστόσο, σε ένα ελεγχόμενο σύστημα αντιδραστήρα διακύμανση της κατανομής της θερμοκρασίας μπορεί να βελτιωθεί. Τα βιολογικά υλικά αποβλήτων περιέχουν μεγάλο αριθμό διαφορετικών τύπων βακτηρίων και μυκήτων. Το κομπόστ υψηλής θερμοκρασίας φαίνεται να είναι μια πολλά υποσχόμενη πηγή για την απομόνωση νέων θερμοφίλων οργανισμών καθώς και θερμοσταθερών ενζύμων βιομηχανικής αξίας. Οι κύριοι μικροοργανισμοί που είναι υπεύθυνοι για τη βιολογική αποικοδόμηση στην κομποστοποίηση είναι βακτήρια της μεσόφιλης και της θερμοφιλής ομάδας.

### Αερισμός

Τα συστήματα κομποστοποίησης διακρίνονται με βάση τη χρήση οξυγόνου (αερόβια και αναερόβια). Η αερόβια αποσύνθεση, σε αντίθεση με τους αναερόβιους τύπους, είναι ταχύτερη, εξελίσσεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες και δεν παράγει δυσάρεστες οσμές. Η επίδραση του αερισμού αξιολογήθηκε από την καμπύλη θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης. Για τον έλεγχο του ρυθμού αερισμού έχουν σχεδιαστεί και εφαρμοστεί διάφορες στρατηγικές για τη διαδικασία κομποστοποίησης. Αυτές κυμαίνονται από απλά χειροκίνητα συστήματα ελέγχου έως πιο εξελιγμένα συστήματα ελέγχου μέσω υπολογιστή που χρησιμοποιούν τη θερμοκρασία, την ανατροφοδότηση οξυγόνου ή διοξειδίου του άνθρακα ως μεταβλητές ελέγχου και την παροχή αέρα ως μεταβλητή χειρισμού. Ωστόσο, το σύστημα ελέγχου θα πρέπει να είναι σε θέση να ικανοποιεί τις απαιτήσεις μέγιστου, μέσου και ελάχιστου αερισμού.

### Λόγος C/N

Ο λόγος άνθρακα προς άζωτο (C/N) είναι ένας από τους σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία κομποστοποίησης καθώς και τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Μια αναλογία C/N μεταξύ 25 και 30 θεωρείται συνήθως η βέλτιστη αναλογία για την κομποστοποίηση. Κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης οι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν το C ως πηγή ενέργειας και το N για τη δόμηση της κυτταρικής δομής.

Οι υψηλοί ή χαμηλοί λόγοι C/N μπορούν να ρυθμιστούν με την προσθήκη αποβλήτων πλούσιων σε άζωτο ή άνθρακα, αντίστοιχα. Το άχυρο σιταριού, τα κομμένα χόρτα, τα ξηρά φύλλα κ.λπ. είναι παραδείγματα υλικών πλούσιων σε άνθρακα, ενώ η κοπριά πουλερικών, τα απόβλητα σφαγείων, η ιλύς λυμάτων κ.λπ. είναι πλούσια σε άζωτο. Ο λόγος C/N μειώνεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κομποστοποίησης, καθώς ο άνθρακας χάνεται με τη μορφή διοξειδίου του άνθρακα.

### Θερμοκρασία

Η υψηλή θερμοκρασία που διατηρείται κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης προάγει την αποδοτικότητα και την αποτελεσματικότητα του κομπόστ επιταχύνοντας τη διαδικασία και καταστρέφοντας τους παθογόνους μικροοργανισμούς. Η υψηλή θερμοκρασία του σωρού κομποστοποίησης, σε συνδυασμό με ικανοποιητικά επίπεδα άλλων σημαντικών παραγόντων κομποστοποίησης, υποδηλώνει την πιθανότητα επιτυχούς κομποστοποίησης, ενώ οι χαμηλές θερμοκρασίες καθυστερούν την κομποστοποίηση και μπορεί ακόμη και να σταματήσουν τη διαδικασία. Οι χαμηλές θερμοκρασίες είναι ένδειξη μειωμένης μικροβιακής δραστηριότητας και μπορεί να υποδηλώνουν έλλειψη οξυγόνου ή ανεπαρκείς συνθήκες υγρασίας. Για να αποφευχθούν θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 60°C που αποδυναμώνουν τη μικροβιακή μάζα καταστέλλοντας την αποσύνθεση, την παραγωγή θερμότητας και την απομάκρυνση της υγρασίας, είναι απαραίτητη μια ενισχυμένη απομάκρυνση θερμότητας με ελεγχόμενο τρόπο (π.χ. έλεγχος ανατροφοδότησης). Κατά τα αρχικά στάδια της κομποστοποίησης ο ενεργός μικροβιακός πληθυσμός αυξάνεται εκθετικά έως ότου το διαθέσιμο υπόστρωμα ή άλλοι παράγοντες περιορίσουν την ανάπτυξη.

### pH

Αρχικά, ο σχηματισμός οργανικών οξέων και διοξειδίου του άνθρακα μειώνει την τιμή του pH σε 5,0 ή λιγότερο, ενώ καθώς η διαδικασία εξελίσσεται, η τιμή του pH φτάνει έως και 8,0-8,5. Το pH του κομποστοποιήσιμου υλικού επηρεάζει το είδος των οργανισμών που συμμετέχουν στη διαδικασία

κομποστοποίησης. Οι μύκητες ανέχονται ένα ευρύτερο εύρος pH από ό,τι τα βακτήρια. Το βέλτιστο εύρος pH για τα περισσότερα βακτήρια είναι μεταξύ 6,0 και 7,5, ενώ για τους μύκητες μπορεί να είναι μεταξύ 5,5 και 8,0. Τα περισσότερα από τα διαθέσιμα για κομποστοποίηση απόβλητα βρίσκονται εντός του παραπάνω εύρους pH. Το επιθυμητό επίπεδο pH για τη μικροβιακή δραστηριότητα είναι μεταξύ 5,0 και 7,0. Ωστόσο, για την κομποστοποίηση συνιστάται στην πλειονότητα της βιβλιογραφίας ένα βέλτιστο pH από 5,5 έως 8,5, με μικρή διακύμανση.

### Υγρασία

Η περιεκτικότητα σε υγρασία 40 έως 60 τοις εκατό έχει βρεθεί ως βέλτιστη για μια καλή διαδικασία κομποστοποίησης. Ενώ ένα υγρό μείγμα είναι απαραίτητο για τη διατήρηση της βιολογικής αποσύνθεσης που είναι ζωτικής σημασίας για τη διαδικασία κομποστοποίησης, το ξηρό κομπόστ είναι ευκολότερο να χειριστεί και να αποθηκευτεί χωρίς να προκαλεί προβλήματα. Από την άλλη πλευρά, η πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία στερεί από τους οργανισμούς το νερό που απαιτείται για το μεταβολισμό τους και αναστέλλει τη δραστηριότητά τους. Η υπερβολική υγρασία μπορεί να έχει διάφορες δυσμενείς επιπτώσεις στις επόμενες διεργασίες μετά την τελική φάση αποσύνθεσης.

### Μέγεθος σωματιδίων

Το μέγεθος των σωματιδίων επηρεάζει την κίνηση του οξυγόνου στο σωρό, καθώς και τη μικροβιακή και ενζυμική πρόσβαση στο υπόστρωμα. Τα μικρότερα σε μέγεθος σωματίδια οργανικού υλικού αυξάνουν τη διαθέσιμη επιφάνεια για μικροβιακή προσβολή. Ωστόσο, τα πολύ μικρά σωματίδια συσσωρεύονται σφιχτά μεταξύ τους, εμποδίζοντας την κίνηση του αέρα μέσα στο σωρό κομποστοποίησης και την κίνηση του διοξειδίου του άνθρακα έξω από το σωρό. Τα σωματίδια μεγάλου μεγέθους μειώνουν την επιφάνεια για μικροβιακή προσβολή, γεγονός που επιβραδύνει ή μπορεί να σταματήσει εντελώς τη διαδικασία κομποστοποίησης [33].

## 3.2 Συστήματα κομποστοποίησης

Η κομποστοποίηση πραγματοποιείται με κλειστά ή ανοιχτά συστήματα, όπως παρουσιάζεται και στον πίνακα που ακολουθεί :

Πίνακας 2: Συστήματα κομποστοποίησης [34].

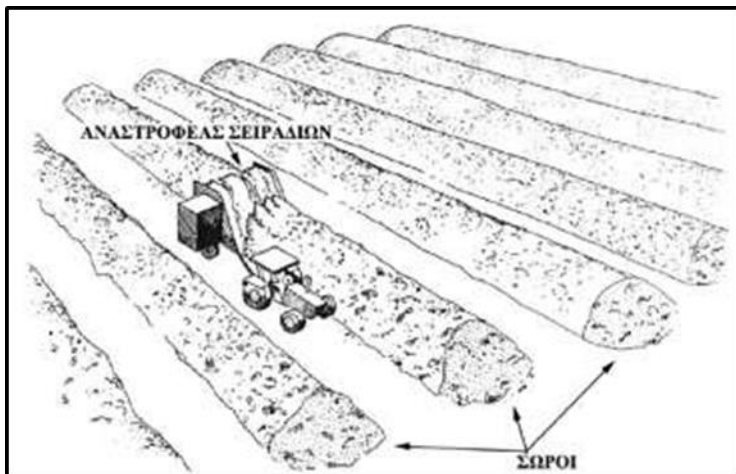
Ανοιχτά Συστήματα (σειράδια - σωροί)	Κλειστά Συστήματα (βιοαντιδραστήρες και κλειστά κτήρια)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αναδεδυόμενοι σωροί (windrows)</li> <li>• Στατικοί σωροί (aerated static piles - ASP)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ με απορρόφηση αέρα</li> <li>▪ με εμφύσηση αέρα</li> <li>▪ με μεταβαλλόμενο αερισμό (απορρόφηση και εμφύσηση)</li> <li>▪ με εμφύσηση ή/και απορρόφηση αέρα σε συνδυασμό με έλεγχο θερμοκρασίας</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Κάθετοι αντιδραστήρες                             <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ συνεχούς ροής</li> <li>▪ ασυνεχούς ροής</li> </ul> </li> <li>• Οριζόντιοι αντιδραστήρες                             <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ στατικοί</li> <li>▪ με κίνηση υλικού</li> </ul> </li> </ul>

### 3.2.1 Ανοιχτά Συστήματα

Στα ανοιχτά συστήματα η κομποστοποίηση πραγματοποιείται στην ύπαιθρο ή σε ημίκλειστους χώρους. Υπάρχουν δύο κατηγορίες ανοιχτών συστημάτων : οι αναδεδυόμενοι σωροί και οι στατικοί σωροί.

#### Αναδεδυόμενοι σωροί

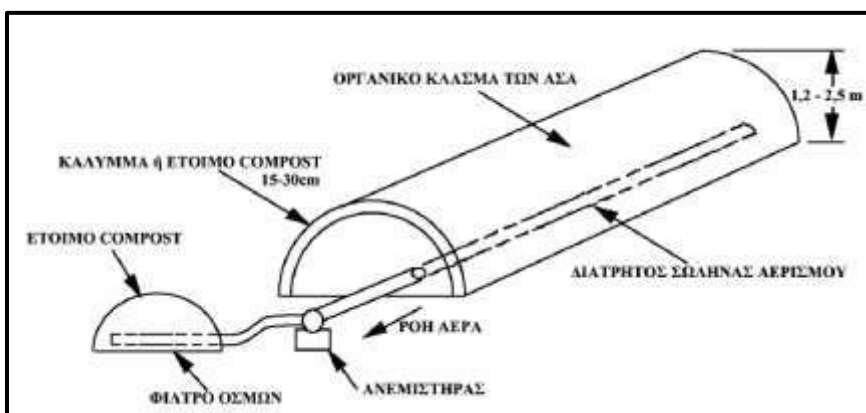
Οι σωροί – σειράδια, βρίσκονται πάνω σε επιφάνεια η οποία είναι επιστρωμένη και εξοπλισμένη με σύστημα ύδρευσης και αποχέτευσης. Το ύψος των σωρών κυμαίνεται από 1,5m έως 3 m, έτσι ώστε να διασφαλίζονται οι ιδανικές θερμοκρασίες και να αποφεύγεται ο κίνδυνος δημιουργίας αναερόβιων συνθηκών. Μια συνηθισμένη διάταξη σωρών φτάνει μέχρι 100m μήκος και 5m πλάτος και η διατομή τους είναι τριγωνική με λόγο βάση/ύψος = 2. Για την παροχή οξυγόνου και τον έλεγχο της θερμοκρασίας γίνεται ανάδευση των σωρών (1-2 φορές κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας) είτε με φορτωτές είτε με ειδικά μηχανήματα αναστροφής [35].



Εικόνα 17: Αναστροφείας σειραδιών [35]

### Στατικοί σωροί

Κατά τη μέθοδο αυτή, οι σωροί των υλικών προς κομποστοποίηση τοποθετούνται πάνω σε ένα δίκτυο αεριστήρων οι οποίοι παρέχουν τον απαραίτητο αέρα, είτε με θετική πίεση (παροχή αέρα στο σωρό) είτε με αρνητική πίεση (αναρρόφηση αέρα από το σωρό). Μέσω της απορρόφησης ή εμφύσησης αέρα ελέγχεται και η θερμοκρασία των σωρών. Εξαιτίας της έλλειψης της διαδικασίας ανάδευσης, και για τη διατήρηση επιθυμητής θερμοκρασίας σε ολόκληρο το σώμα των σωρών, αυτοί σκεπάζονται εξωτερικά με ένα στρώμα έτοιμου κομποστ, το οποίο λειτουργεί θερμομονωτικά. Η περίοδος της διαδικασίας κυμαίνεται από 6 έως 12 βδομάδες [35].



Εικόνα 18: Μέθοδος δυναμικά αεριζόμενων σωρών [35].

### 3.2.2 Κλειστά συστήματα

Το προς κομποστοποίηση οργανικό κλάσμα των αποβλήτων τοποθετείται μέσα σε βιοαντιδραστήρα, όπου και πραγματοποιείται η διαδικασία της αποδόμησης κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες αερισμού, υγρασίας, και ανάδευσης. Οι αντιδραστήρες μπορούν να περιλαμβάνουν περισσότερα του ενός διαμερίσματα, να περιστρέφονται ή να έχουν μηχανισμούς περιστροφής και ανάδευσης των υλικών. Η όλη διαδικασία λαμβάνει χώρα υπό ελεγχόμενες συνθήκες, ενώ και οι οσμές και τα στραγγίσματα που παράγονται είναι σαφώς λιγότερα σε σχέση με τη μέθοδο των σωρών. Με χρήση αισθητήρων οξυγόνου ο αέρας κατευθύνεται στις περιοχές όπου υπάρχει έλλειμμα. Ο χρόνος ωρίμανσης του κομποστ είναι από 1 έως 4 εβδομάδες [35].

### 3.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Τα κυριότερα περιβαλλοντικά θέματα που σχετίζονται με την αερόβια επεξεργασία αφορούν στις αέριες εκπομπές (και τις οσμές), στα στραγγίσματα που παράγονται (κίνδυνος για τη ρύπανση των υδάτων), στο τελικό προϊόν – κομποστ, στους παθογόνους μικροοργανισμούς και στην κατανάλωση ενέργειας [36] [26] [37].

#### 3.3.1. Αέρια

Το υπόστρωμα το οποίο προορίζεται για την παραγωγή του κομποστ μπορεί να είναι πράσινα απόβλητα, βιοαπόβλητα με διαλογή στην πηγή, οργανικό κλάσμα που προέκυψε από τη μηχανική διαλογή. Οποιαδήποτε από τα παραπάνω μπορούν να είναι συστατικά του υποστρώματος, δεν επηρεάζουν τις αέριες εκπομπές. Αυτό που παίζει ρόλο στις αέριες εκπομπές είναι το είδος της χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας, π.χ. στα ανοιχτά συστήματα παρατηρούνται οι περισσότερες ανεξέλεγκτες εκπομπές. Οι εκπομπές είναι συνήθως βιοαερολύματα (bioaerosols), πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs), οσμές και σκόνη.

Τα βιοαερολύματα είναι αιωρούμενα στον αέρα σωματίδια, βιολογικής προέλευσης και αποτελούνται από ζωντανούς ή νεκρούς μικροοργανισμούς που αυτοί παράγουν. Όλες οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων παράγουν βιοαερολύματα, τα οποία αποτελούν κίνδυνο, ιδιαίτερα για τη υγεία των εργαζομένων, αφού μπορούν να προκαλέσουν αλλεργίες ή και ασθένειες του αναπνευστικού συστήματος. Οι εκπομπές είναι σαφώς πιο έντονες στα ανοιχτά συστήματα, όπου γίνεται ανάδευση

των σωρών. Οι οσμές μπορούν να περιοριστούν ως ένα βαθμό μόνο όταν εφαρμόζονται πιστά πρακτικές ορθής χρήσης της διεργασίας, ιδιαίτερα όταν υπάρχει ο κίνδυνος δημιουργίας αναερόβιων συνθηκών σε κατά τα άλλα ανοιχτά συστήματα. Ακόμα και σε αυτή την περίπτωση όμως οι εκπομπές οσμών είναι συνήθως κάτι αναπόφευκτο. Υπάρχουν πάντως και συστήματα, όπως τα κλειστά, στα οποία τα απαέρια της διεργασίας συγκεντρώνονται και επεξεργάζονται ελαχιστοποιώντας και το πρόβλημα των ανεξέλεγκτων οσμών.

### 3.3.2. Υγρά

Τα υγρά που παράγονται κατά την αερόβια επεξεργασία είναι είτε στραγγίσματα, που προέρχονται από τη μάζα του οργανικού κλάσματος είτε νερά της βροχής που εισέρχονται στη μάζα. Τα υγρά αυτά πρέπει να υφίστανται επεξεργασία για την αποφυγή της ρύπανσης των υδάτων. Η κομποστοποίηση είναι μια διεργασία που εξελίσσεται πάνω σε αδιαπέρατη επιφάνεια από σκυρόδεμα ή άσφαλτο με κατάλληλη κλίση ώστε να συγκεντρώνονται όλα τα υγρά που παράγονται. Από εκεί και πέρα ένα μέρος των υγρών οδηγείται για επεξεργασία, ενώ ένα άλλο επαναχρησιμοποιείται για τη διαβροχή της μάζας των αποβλήτων, ώστε να διασφαλιστεί υγρασία η οποία αποτελεί και απαραίτητη προϋπόθεση για την διεργασία.

### 3.3.3. Στερεά

Το παραγόμενο κομπόστ μπορεί να αποτελέσει αιτία ρύπανσης του εδάφους εξαιτίας ρύπων και προσμίξεων που ίσως περιέχει, γι' αυτό και υπάρχουν προβλέψεις τόσο στη νομοθεσία των κρατών μελών της ΕΕ, όσο και στη θεματική στρατηγική για το έδαφος (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2006). Στις προβλέψεις αυτές ορίζονται τα ανώτατα επιτρεπόμενα όρια για ανεπιθύμητες ουσίες, όπως βαρέα μέταλλα, ξένες προσμίξεις (π.χ. γυαλί, πλαστικό), καθώς και τα κατώτατα όρια για επιθυμητά χαρακτηριστικά όπως η οργανική ουσία. Οι προδιαγραφές γενικά διαφέρουν από χώρα σε χώρα, π.χ. στη βόρεια και κεντρική Ευρώπη (όπου τα εδάφη είναι πιο πλούσια σε οργανική ύλη) υπάρχει μια πιο αυστηρή προσέγγιση, ενώ στη νότια Ευρώπη το κομπόστ, ως μέσο αντιμετώπισης της ερημοποίησης, αντιμετωπίζεται με πιο ανεκτικά όρια [37] [30].

Η ποιότητα του αρχικού υλικού που προορίζεται για την παραγωγή του κομπόστ παίζει σημαντικό ρόλο στη συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων και προσμίξεων. Πράσινα απόβλητα και γενικά το

βιοαποδομήσιμο κλάσμα των ΑΣΑ που διαχωρίζεται στην πηγή περιέχουν χαμηλά ποσοστά σε ρύπους και ξένες προσμίξεις, γι' αυτό και το κομπόστ που παράγεται έχει ευκολότερη εφαρμογή στη γεωργία. Από την άλλη, το κομπόστ που παράγεται από το οργανικό κλάσμα σύμμεικτων αποβλήτων, είναι περισσότερο επιβαρυνμένο, καθιστώντας το χαμηλής ποιότητας, γι' αυτό και συνήθως καταλήγει πάλι στο ΧΥΤΑ, ως υλικό επικάλυψης.

Σε γενικές γραμμές η οργανική ουσία του κομπόστ βελτιώνει την υδατο-ικανότητα του εδάφους, ενισχύει τη δράση των χημικών λιπασμάτων, καταστέλλει τους φυτοπαθογόνους οργανισμούς και αυξάνει την παραγωγικότητα των εδαφών [30].

#### 3.3.4 Παθογόνοι μικροοργανισμοί

Στα υγειονομικά κριτήρια ποιότητας του κομπόστ περιλαμβάνεται η παρουσία των παθογόνων μικροοργανισμών οι οποίοι, εκτός από τον άνθρωπο, μπορούν να είναι επικίνδυνοι για τα ζώα και τα φυτά. Ένα μεγάλο μέρος των μικροοργανισμών αυτών καταστρέφεται μέσω της διεργασίας της κομποστοποίησης εξαιτίας του ότι είναι κατά βάση θερμοφιλή, οδηγώντας τους σε θερμικό θάνατο.

Τα κριτήρια που ορίζονται μέσω των προδιαγραφών απαιτούν από το τελικό προϊόν την απουσία σαλμονέλας, εντεροβακτηρίων, περιττωματικών στρεπτόκοκκων, νηματοειδών, κυστοειδών καθώς και άλλων φυτοπαθογόνων μικροοργανισμών. Η διαδικασία της υγειανοποίησης του κομπόστ επιτυγχάνεται μέσω της παραμονής του υλικού πάνω από μία θερμοκρασία και συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (συνήθως  $55^{\circ}\text{C}$  –  $60^{\circ}\text{C}$ , για 3 έως 5 ημέρες) [37]. Οι απαιτήσεις αυτές αναφέρονται συνήθως σε συστήματα αναστρεφόμενων σωρών, όπου η έκθεση του υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες δεν γίνεται ομοιόμορφα, καθυστερώντας τη διαδικασία της ομογενοποίησης.

Για την καλύτερη καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών που περιέχονται στο οργανικό κλάσμα των σύμμεικτων ΑΣΑ, χρησιμοποιούνται κλειστοί βιοαντιδραστήρες, οι οποίοι παρέχουν καλύτερο έλεγχο και ομοιογένεια της θερμοκρασίας. Η ποικιλία των πιθανών παθογόνων μικροοργανισμών στα σύμμεικτα ΑΣΑ είναι μεγάλη, γι' αυτό και θα πρέπει να τηρούνται σχολαστικά οι απαιτούμενες προφυλάξεις [38].



## 4. Υγειονομική Ταφή

### 4.1 Βασικές αρχές και περιγραφή λειτουργίας χώρων υγειονομικής ταφής αστικών στερεών αποβλήτων

Οι χώροι υγειονομικής ταφής αστικών στερεών αποβλήτων είναι εγκαταστάσεις σχεδιασμένες για την αποτέφρωση ή τον θάλαμο καταφύγιο των απορριμμάτων που παράγονται από τις αστικές περιοχές. Οι βασικές αρχές και η λειτουργία τους περιλαμβάνουν τα εξής:

1. Επιλογή του χώρου: Η επιλογή του χώρου για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων είναι σημαντική και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πολλοί παράγοντες, όπως η ασφάλεια του υπόγειου νερού, οι γεωτεχνικές συνθήκες, η απόσταση από τις κατοικημένες περιοχές και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις.
2. Προετοιμασία του χώρου: Πριν την έναρξη της λειτουργίας, ο χώρος υγειονομικής ταφής πρέπει να προετοιμαστεί. Αυτό περιλαμβάνει την επιφανειακή αποκατάσταση του εδάφους, την κατασκευή δρόμων, την εγκατάσταση απορροφητικού υλικού για την αποτροπή της ρύπανσης του νερού, και την εγκατάσταση αποχετευτικών συστημάτων για τη διαχείριση των υγρών αποβλήτων.
3. Διαχείριση των αποβλήτων: Οι απόβλητοι που προέρχονται από τις αστικές περιοχές συλλέγονται και μεταφέρονται στον χώρο υγειονομικής ταφής. Συνήθως, αυτοί οι αποβάλλοντα είναι περιορισμένοι σε ορισμένα είδη απορριμμάτων, ενώ τα επικίνδυνα απόβλητα απομακρύνονται σε ειδικές εγκαταστάσεις.
4. Ταφή των αποβλήτων: Οι απόβλητοι τοποθετούνται στον χώρο υγειονομικής ταφής με τρόπο που να μειώνει την επίδρασή τους στο περιβάλλον. Συνήθως, οι αποβλήτων καλύπτονται με ένα στρώμα χώματος για να προστατευθούν από την εκπομπή οσμών, την εξάπλωση των επιβλαβών οργανισμών και την αποτροπή της εισροής νερού.
5. Παρακολούθηση και συντήρηση: Οι χώροι υγειονομικής ταφής απαιτούν συνεχή παρακολούθηση και συντήρηση για τη διασφάλιση της ασφάλειας και της αποτελεσματικότητάς τους. Αυτό περιλαμβάνει την παρακολούθηση των υδάτων, του αέρα και του εδάφους για την πρόληψη της ρύπανσης, καθώς και τη συντήρηση των υποδομών και των εγκαταστάσεων.

Οι χώροι υγειονομικής ταφής αστικών στερεών αποβλήτων είναι σημαντικοί για τη διαχείριση των αποβλήτων στις αστικές περιοχές. Η σωστή λειτουργία τους εξασφαλίζει την ασφάλεια του περιβάλλοντος και την προστασία της δημόσιας υγείας.

## 4.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Η αποσύνθεση των αστικών αποβλήτων στους χώρους υγειονομικής ταφής αναγνωρίζεται ως μία από τις μεγαλύτερες πηγές παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών μεθανίου. Σύμφωνα με στοιχεία του 2021, το 49,6% όλων των αστικών απορριμμάτων στην ΕΕ ανακυκλώνονται ή κομποστοποιούνται, σημειώνοντας αύξηση 3,6 ποσοστιαίων μονάδων από το 2017. Ακόμα το ποσοστό υγειονομικής ταφής της ΕΕ μειώθηκε από 24% το 2017 σε 18% το 2020. Η οδηγία της ΕΕ για τους ΧΥΤΑ απαιτεί από τις χώρες να μειώσουν έως το 2035 στο 10% ή λιγότερο τα δημοτικά απόβλητα που αποστέλλονται στους ΧΥΤΑ. Η υγειονομική ταφή εξακολουθεί να είναι μια ευρέως διαδεδομένη τεχνική σε όλη την ανατολική και νότια Ευρώπη. Η ΕΕ έχει ως στόχο τον περιορισμό της ποσότητας των δημοτικών απορριμμάτων που οδηγούνται σε χώρους υγειονομικής ταφής, ώστε να μειωθούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που σχετίζονται με τη διαχείριση των αποβλήτων, αλλά και για να βοηθηθεί η κυκλική οικονομία και η μετατόπιση των αποβλήτων προς την ανακύκλωση. Πολλές χώρες, ιδίως οι αναπτυσσόμενες, απορρίπτουν τα απόβλητα αλόγιστα πριν από την εφαρμογή ρυθμιστικών κανόνων και διαδικασιών, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τους τις πιθανές επιπτώσεις από την παραγωγή στραγγισμάτων ή τις εκπομπές αερίων στην ατμόσφαιρα [40].

Πίνακας 3: Παραγωγή και σύνθεση αστικών στερεών αποβλήτων στις χώρες του Αραβικού Κόλπου σε σύγκριση με τις ΗΠΑ και το Ηνωμένο Βασίλειο [40].

Χώρα	Οργανικά (%)	Πλαστικό (%)	Χαρτί (%)	Γυαλί (%)	Μέταλλο (%)
Qatar	57	11	14	4	9
Bahrain	59.1	12.8	7.4	3.4	2.1
Kuwait	51	19	13	4.5	5
Oman	60	8	12	10	9
UAE (Dubai)	42	6	10	3	3
Abu Dhabi	49	6	12	6	6
USA	11.2	37.4	11	8	8
UK	20	7	7	10	10

### Εκπομπές αερίων

Παρόλο που το διοξείδιο του άνθρακα και το μεθάνιο αντιπροσωπεύουν περίπου το 60% των εκπομπών αερίων από μολυσμένους χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, άλλα αέρια όπως "μονοξείδιο του άνθρακα, άζωτο, οξυγόνο, υδρογόνο και υδρόθειο" είναι επίσης παρόντα σε διαφορετικές συγκεντρώσεις και θεωρούνται επικίνδυνα για το περιβάλλον. Αν και το μεθάνιο έχει βρεθεί ότι δεν είναι τοξικό για τα φυτά, οι εκπομπές αερίων έχει αποδειχθεί ότι έχουν αρνητικές επιπτώσεις στα φυτά που καλλιεργούνται για τη βλάστηση των μολυσμένων εδαφών. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια της διάσπασης των αποβλήτων των χώρων υγειονομικής ταφής, το οξυγόνο αντικαθίσταται από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, με αποτέλεσμα την "ασφυξία των φυτών" [40].

### Διαρροές

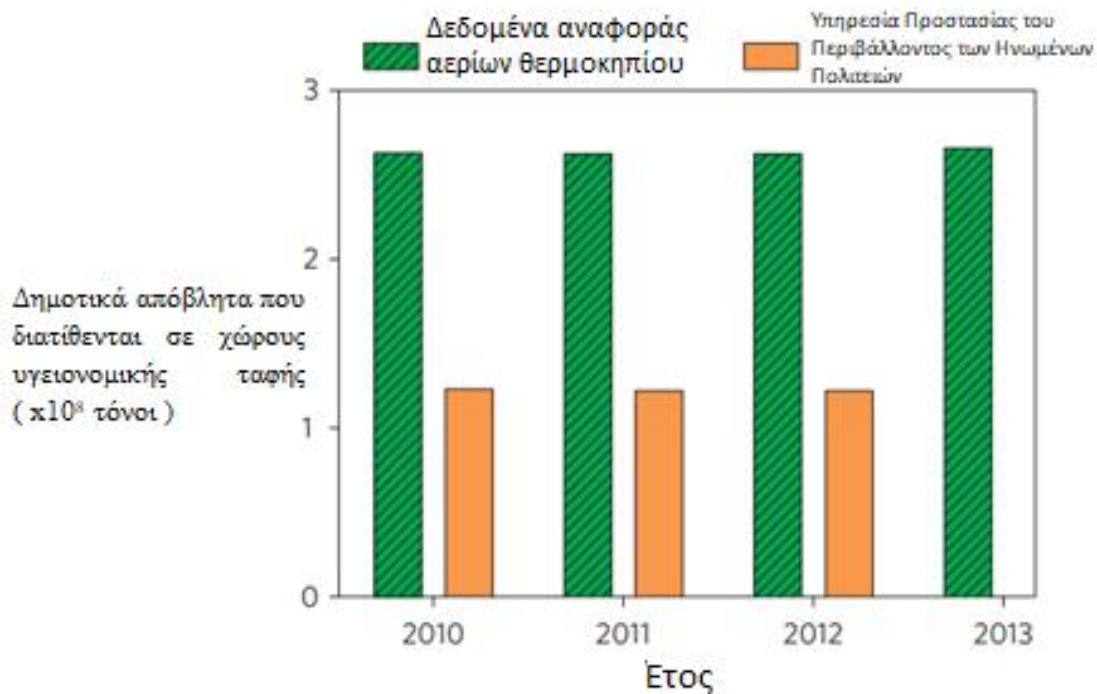
Τα στραγγίσματα χωματερής είναι κάθε είδους υγρό απόβλητο που αποτελείται από ανεπιθύμητα στοιχεία, το οποίο έχει διηθηθεί από σωρούς αποβλήτων και απορρίπτεται από έναν χώρο υγειονομικής ταφής. Με άλλα λόγια, τα στραγγίσματα σχηματίζονται από την αποσύνθεση των οργανικών συστατικών των απορριμμάτων και μεταφέρονται μέσω του εδάφους από μια υδατική φάση. Τα στραγγίσματα είναι ένα δυνητικά επιβλαβές υγρό, επειδή περιέχουν σημαντικά επίπεδα οργανικών και ανόργανων ενώσεων, διαλυμένων και αιωρούμενων οργανικών υλικών και βαρέων μετάλλων. Επιπλέον, οι υψηλές βιολογικές και χημικές απαιτήσεις σε οξυγόνο είναι επίσης χαρακτηριστικές της φύσης των στραγγισμάτων, τα οποία τελικά διαχωρίζουν τη φάση του εδάφους και του υπόγειου νερού και δημιουργούν σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα [40].

Ένα σύνθετο μείγμα στραγγισμάτων των ΧΥΤΑ περιείχε εκατοντάδες επικίνδυνες χημικές ουσίες, συμπεριλαμβανομένων "φαινολών, φυτοφαρμάκων, αλογονωμένων ενώσεων, πολυαρωματικών υδρογονανθράκων, αμμωνίου και βαρέων μετάλλων". Αυτοί οι ρύποι θέτουν σε κίνδυνο τους υδρόβιους βιότοπους καθώς και την τροφική αλυσίδα, επηρεάζοντας σημαντικά τη δημόσια υγεία και προκαλώντας σοβαρά προβλήματα υγείας, όπως καρκινογένεση και γονιδοτοξικότητα. Βασικά χαρακτηριστικά όπως το pH, τα αιωρούμενα στερεά (SS), η χημική ζήτηση οξυγόνου (COD), η βιολογική ζήτηση οξυγόνου (BOD5), ο λόγος BOD5/COD, το αμμωνιακό άζωτο (NH<sub>4</sub>-N) και τα βαρέα μέταλλα (HM) χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των στραγγισμάτων των χώρων υγειονομικής ταφής. Η ηλικία του χώρου υγειονομικής ταφής έχει σημαντική επίδραση στη συγκέντρωση οργανικών ουσιών, στη συγκέντρωση στραγγισμάτων και στην αποικοδομησιμότητα, η οποία μειώνεται με την ηλικία. Τα νεότερα στραγγίσματα περιέχουν συχνά μόρια χαμηλού μοριακού βάρους, αλλά τα

παλαιότερα έχουν ενώσεις υψηλότερου μοριακού βάρους, ενώ για τον μοριακό χαρακτηρισμό χρησιμοποιείται φασματομετρία μαζών υψηλής ανάλυσης [40].

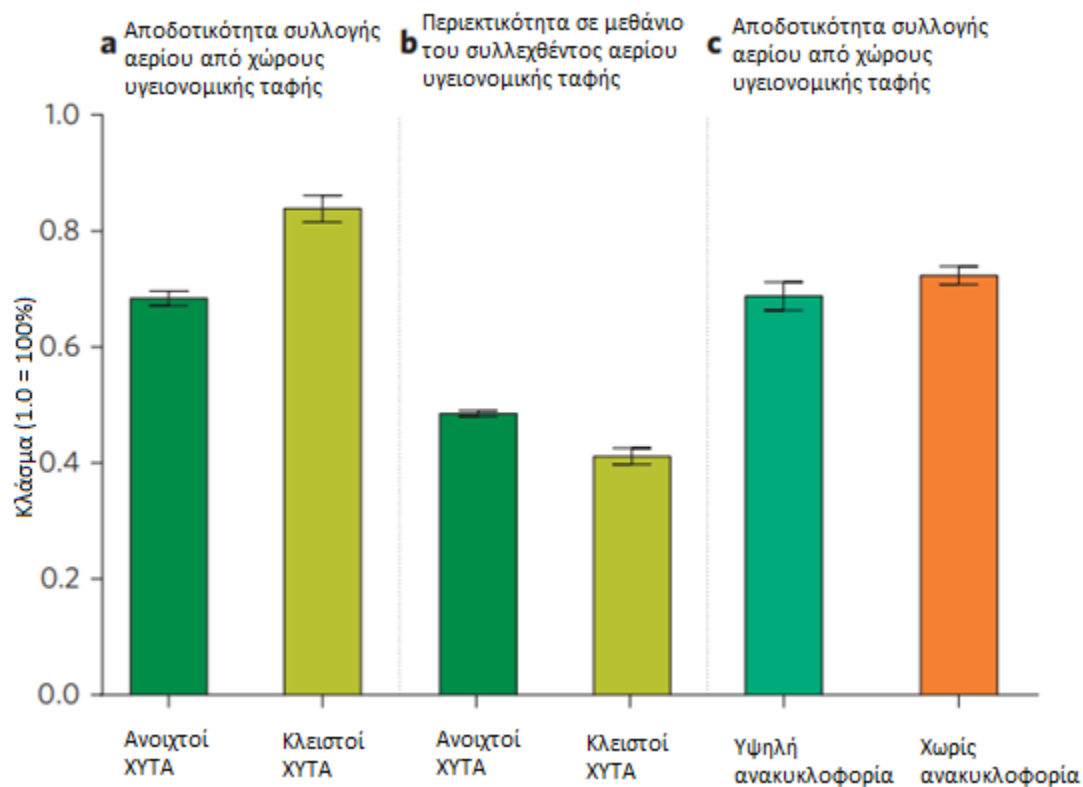
Σε αντίθεση με το παρελθόν, έχουν ανακαλυφθεί πολλές τεχνολογίες για την επεξεργασία των στραγγισμάτων των χώρων υγειονομικής ταφής, οι οποίες συμμορφώνονται με διάφορες υφιστάμενες νομοθετικές διατάξεις για την τήρηση και διατήρηση των προτύπων. Παραδόξως, οι επιλογές επεξεργασίας των στραγγισμάτων των χώρων υγειονομικής ταφής περιλαμβάνουν βιολογικές και φυσικοχημικές διεργασίες, διήθηση με μεμβράνες και εξελιγμένες οξειδωτικές επεξεργασίες. Η οργανική σύνθεση έχει μεγάλη επιρροή στη σωστή διαδικασία που πρέπει να χρησιμοποιηθεί, και όταν υπερβαίνει τα  $1,0 \times 10^4$  mg/L, η βιολογική επεξεργασία είναι η καλύτερη επιλογή. Ομοίως, εάν το στραγγισματικό υγρό του ΧΥΤΑ περιέχει υψηλή συγκέντρωση αμμωνιακού αζώτου και έχει περιορισμένο δυναμικό βιοαποικοδόμησης, μια φυσικοχημική διαδικασία είναι η καλύτερη επιλογή. Ομοίως, η ηλικία των στραγγισμάτων παίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της καλύτερης στρατηγικής επεξεργασίας που πρέπει να υιοθετηθεί. Σε γενικές γραμμές, οι ηλικίες κατατάσσονται σε νεαρές (λιγότερο από πέντε έτη), μεσαίες (πέντε έως δέκα έτη) και παλαιές (περισσότερα από δέκα έτη) [40].

Η δέσμευση και η καύση του μεθανίου των χώρων υγειονομικής ταφής θεωρείται ως μια κρίσιμη και βιώσιμη βραχυπρόθεσμη στρατηγική για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου (GHG) που συνδέονται με τον τομέα των αποβλήτων. Πρόκειται για μια ιδιαίτερα σημαντική στρατηγική στα αναπτυσσόμενα έθνη με χαμηλό και μεσαίο εισόδημα, όπου η παραγωγή αποβλήτων αναμένεται να αυξηθεί κατά 185% και 158%, αντίστοιχα, σε σχέση με τους σημερινούς ρυθμούς έως το 2025. Παρόλο που οι ΗΠΑ και πολλά κράτη της ΕΕ απαιτούν ενεργή σύλληψη των αερίων ταφής για περισσότερο από μια δεκαετία, τα εκτενή δεδομένα που αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα αυτών των συστημάτων είναι περιορισμένα. Το πρόγραμμα αναφοράς αερίων του θερμοκηπίου απαιτεί από τους δημοτικούς χώρους υγειονομικής ταφής που εκπέμπουν περισσότερους από 25.000 τόνους ισοδυνάμων διοξειδίου του άνθρακα να υποβάλλουν ηλεκτρονικά στην Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (US EPA) ετησίως σημαντικό αριθμό λειτουργικών δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων των εξής: μετρούμενα ποσοστά αποδοχής αποβλήτων, δεδομένα τοποθεσίας, προβλεπόμενη διάρκεια ζωής διάθεσης και λειτουργικά δεδομένα για ενεργά συστήματα συλλογής αερίων (για παράδειγμα, συνολικές ώρες λειτουργίας, περιεκτικότητα σε συλλεγόμενο μεθάνιο), εφόσον υπάρχουν [39].



Εικόνα 19: Ποσότητα αστικών στερεών αποβλήτων που διατίθενται σε χώρους υγειονομικής ταφής των ΗΠΑ [39].

Η αποδοτικότητα του συστήματος συλλογής αερίου από τους χώρους υγειονομικής ταφής, η οποία γενικά αντικατοπτρίζει την ποσότητα του συλλεγόμενου αερίου σε σχέση με την παραγόμενη ποσότητα, υπολογίστηκε στο πλαίσιο του συνόλου δεδομένων του προγράμματος αναφοράς αερίων του θερμοκηπίου του Οργανισμού Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ, χρησιμοποιώντας πληροφορίες που παρέχονται από τις εγκαταστάσεις σχετικά με την έκταση της υποδομής συλλογής αερίου και τον τύπο του υλικού κάλυψης (για παράδειγμα, λεπτό στρώμα εδάφους, παχύτερο στρώμα αργίλου ή συνθετική μεμβράνη). Αν και η προσέγγιση αυτή μπορεί να μην παρέχει την ακρίβεια των άμεσων μετρήσεων στο χώρο, είναι χρήσιμη για την κατανόηση του βαθμού ανάπτυξης της υποδομής του συστήματος συλλογής αερίων σε ένα μεγάλο πληθυσμό χώρων. Αναπτύχθηκε ένα γενικευμένο γραμμικό μοντέλο για να εξεταστούν οι παράγοντες που συμβάλλουν στις διαφορές μεταξύ της αποδοτικότητας συλλογής αερίου από τους χώρους υγειονομικής ταφής και ο πιο κρίσιμος διαφοροποιητικός παράγοντας ήταν το αν ο χώρος υγειονομικής ταφής ήταν ανοικτός ή κλειστός. Η σύγκριση της απόδοσης συλλογής αερίου για ανοικτούς και κλειστούς χώρους υγειονομικής ταφής δείχνει ότι η απόδοση στους κλειστούς χώρους είναι 17 ποσοστιαίες μονάδες μεγαλύτερη από τους ανοικτούς χώρους υγειονομικής ταφής [39].



Εικόνα 20: Αποτελεσματικότητα συλλογής αερίου και περιεκτικότητα σε μεθάνιο του συλλεχθέντος αερίου υγειονομικής ταφής απορριμμάτων [39]

Οι συγκρίσεις ανά έτος αποκάλυψαν στατιστικά σημαντικά μεγαλύτερη αποδοτικότητα συλλογής αερίων ταφής σε κλειστούς χώρους υγειονομικής ταφής και για τα τέσσερα έτη αναφοράς που αναλύθηκαν. Η αποτελεσματικότητα συλλογής αερίου ταφής σε ανοικτούς χώρους υγειονομικής ταφής βρέθηκε να είναι ανεξάρτητη από το ποσοστό αποδοχής αποβλήτων. Η ανισότητα στις αποδόσεις μεταξύ ανοικτών και κλειστών χώρων αντανάκλα το γεγονός ότι οι ανοικτοί χώροι διαθέτουν περιοχές που δεν διαθέτουν στρώμα φραγμού χαμηλής διαπερατότητας, το οποίο συχνά εγκαθίσταται όταν ο χώρος υγειονομικής ταφής φτάσει στη χωρητικότάτά του και αντικατοπτρίζεται στις παραμέτρους απόδοσης που επιλέγονται από κάθε χώρο κατά την υποβολή στοιχείων στην ΕΡΑ των ΗΠΑ. Η αποδοτικότητα συλλογής αερίων στους χώρους υγειονομικής ταφής που ανακυκλώνουν στραγγίσματα, δηλαδή η πρακτική της σκόπιμης προσθήκης υγρών στα απόβλητα για την επιτάχυνση της αποσύνθεσης των αποβλήτων ως δυνητικά πιο βιώσιμη μέθοδος υγειονομικής ταφής, δείχνει ότι οι χώροι υγειονομικής ταφής που δεν ανακυκλώνουν στραγγίσματα έχουν στατιστικά σημαντικά μεγαλύτερη

αποδοτικότητα συλλογής αερίων κατά 4%. Αυτό υποδηλώνει ότι η ανάπτυξη της υποδομής συλλογής αερίου από τους χώρους υγειονομικής ταφής σε χώρους που ανακυκλώνουν υγρά είναι περιορισμένη σε σχέση με τους χώρους που δεν ανακυκλώνουν υγρά. Επιπλέον αναλύθηκαν οι εκπομπές μεθανίου από ανοικτούς και κλειστούς χώρους υγειονομικής ταφής για να διαπιστωθεί αν υπάρχουν παρόμοιες τάσεις. Οι εκπομπές μεθανίου υπολογίζονται με τη χρήση δεδομένων μέτρησης και δεδομένων μοντελοποίησης σε κάθε χώρο. Η ανάλυση αυτή έδειξε ότι το  $91,0 \pm 0,5\%$  του συνόλου των εκπομπών μεθανίου κατά μάζα προέρχεται από ανοικτούς χώρους υγειονομικής ταφής σύμφωνα με τα δεδομένα από το 2010 έως το 2013. Συγκρίθηκε επίσης η μετρούμενη περιεκτικότητα σε μεθάνιο του συλλεγόμενου αερίου σε κλειστούς και ανοικτούς χώρους υγειονομικής ταφής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η περιεκτικότητα σε μεθάνιο που συλλέχθηκε σε ανοικτούς χώρους ήταν πλουσιότερη (48,5%) σε σύγκριση με εκείνη που συλλέχθηκε σε κλειστούς χώρους υγειονομικής ταφής (41,1%), με μέση διαφορά  $6,2 \pm 1,1\%$ . Η σύγκριση αυτή δείχνει ότι η περιεκτικότητα σε μεθάνιο που συλλέγεται είναι μεγαλύτερη στους ανοικτούς χώρους υγειονομικής ταφής, αλλά η αποτελεσματικότητα των συστημάτων συλλογής αερίου είναι σημαντικά μικρότερη στους ανοικτούς χώρους υγειονομικής ταφής. Τα αποτελέσματα αυτά, σε συνδυασμό με τις ποσότητες διάθεσης και τις τάσεις αύξησης, καταδεικνύουν περαιτέρω ότι οι βραχυπρόθεσμες προσπάθειες για τη μείωση των εκπομπών μεθανίου πρέπει να επικεντρωθούν στην εφαρμογή βελτιωμένων τεχνολογιών και προσεγγίσεων συλλογής στους ανοικτούς χώρους υγειονομικής ταφής. Μια πρόκληση για τη βελτίωση της συλλογής αερίων στους χώρους υγειονομικής ταφής είναι το ενδεχόμενο, οι επιθετικές πρακτικές συλλογής αερίων να συμβάλλουν στο σχηματισμό ή τη διατήρηση πυρκαγιών ή αντιδράσεων που μοιάζουν με πυρόλυση, περιορίζοντας την αποτελεσματικότητα της συλλογής αερίων και απελευθερώνοντας ενδεχομένως άλλες επιβλαβείς ενώσεις στην ατμόσφαιρα. Αυτό προκαλεί ιδιαίτερη ανησυχία στους ανοικτούς χώρους υγειονομικής ταφής, επειδή συνήθως δεν υπάρχουν συστήματα τελικής κάλυψης, τα οποία εγκαθίστανται όταν ένας χώρος υγειονομικής ταφής κλείνει. Οι πυρκαγιές και οι αντιδράσεις που δημιουργούν θερμότητα συχνά ξεκινούν ή επιδεινώνονται με την εισαγωγή αέρα στη μάζα των αποβλήτων, δημιουργώντας εξώθερμες αντιδράσεις αποσύνθεσης και δυνητικά εκρηκτικές συνθήκες [39].

Στην ΕΕ και στις αναπτυσσόμενες χώρες έχει παρατηρηθεί μεγάλη εξάρτηση από την υγειονομική ταφή, παρόμοια με τις ΗΠΑ. Το 2010, οι περισσότερες χώρες της ΕΕ εναπόθεσαν σε χώρους υγειονομικής ταφής περισσότερο από το 50% των παραγόμενων αστικών αποβλήτων, παρά τις μακροχρόνιες πολιτικές για την εκτροπή των αποβλήτων από τους χώρους υγειονομικής ταφής, όπως η οδηγία για τους χώρους υγειονομικής ταφής του 1999 και η οδηγία-πλαίσιο για τα απόβλητα του 2008.

Η Παγκόσμια Τράπεζα προβλέπει ότι ο ρυθμός παραγωγής αστικών αποβλήτων θα αυξηθεί σχεδόν σε όλα τα μέρη του κόσμου, με τις μεγαλύτερες αυξήσεις να σημειώνονται στις χώρες χαμηλού εισοδήματος, οι οποίες αναμένεται να διπλασιάσουν τους ρυθμούς παραγωγής αποβλήτων σε σχέση με τα επίπεδα του 2010 έως το 2025.

Η συλλογική, συνεπής παγκόσμια τάση προς σταθερά ή ίσως και αυξανόμενα ποσοστά υγειονομικής ταφής αποδεικνύει σαφώς ότι ο τομέας των αποβλήτων χρήζει πρόσθετου ελέγχου για τον εντοπισμό ευκαιριών μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στους χώρους υγειονομικής ταφής. Η βελτίωση της συλλογής του αερίου ταφής σε ανοικτούς χώρους υγειονομικής ταφής πρέπει να αποτελέσει στόχο για τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, τους ερευνητές και τους επαγγελματίες, ώστε να επιτευχθεί βραχυπρόθεσμη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στον τομέα των αποβλήτων. Παρόλο που πρέπει να ενισχυθούν οι προσπάθειες για την προώθηση βιώσιμων προσεγγίσεων διαχείρισης αποβλήτων και υλικών, όπως η μείωση των αποβλήτων, η κομποστοποίηση και η ανακύκλωση στις ανεπτυγμένες και αναπτυσσόμενες χώρες, οι τάσεις δείχνουν σαφώς ότι η υγειονομική ταφή αποτελεί σημαντικό στοιχείο της διαχείρισης των αποβλήτων για τις επόμενες δεκαετίες. Έτσι, καθώς τα ποσοστά παραγωγής αστικών αποβλήτων συνεχίζουν να αυξάνονται, οι πολιτικές προσεγγίσεις στις ανεπτυγμένες και αναπτυσσόμενες χώρες πρέπει να παρέχουν ευελιξία ώστε να επιτρέπουν την καινοτόμο εφαρμογή νέων τεχνολογιών που θα επιτρέψουν τη μεγαλύτερη δυνατή μείωση του μεθανίου από τους χώρους υγειονομικής ταφής [39].

#### 4.3 Ανάπτυξη και λειτουργία χώρων υγειονομικής ταφής στην Ελλάδα

Οι πρώτοι χώροι υγειονομικής ταφής στην Ελλάδα κατασκευάστηκαν γύρω στις αρχές της δεκαετίας του 1990 (34), ενώ μέχρι το 1999 ο αριθμός αυτός είχε αυξηθεί σε 43 χώρους υγειονομικής ταφής που κατασκευάστηκαν για να συμμορφωθούν με την οδηγία της ΕΕ για τους χώρους υγειονομικής ταφής (1999/31/EK). Αυτοί οι χώροι εξυπηρετούσαν το 55% του πληθυσμού. Με βάση τα στοιχεία του 2010, στην Ελλάδα λειτουργούν σήμερα πάνω από 72 υγειονομικοί χώροι υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, ενώ επιπλέον 16 υγειονομικοί χώροι βρίσκονται υπό κατασκευή. Έχουν επίσης κατασκευαστεί μονάδες επεξεργασίας στραγγισμάτων για τη διαχείριση των επιπέδων βιοχημικής ζήτησης οξυγόνου, χημικής ζήτησης οξυγόνου, αμμωνίας και αζώτου που υπάρχουν στα στραγγίσματα. Ο μεγαλύτερος εν λειτουργία χώρος υγειονομικής ταφής απορριμμάτων στην Ελλάδα βρίσκεται στα Άνω Λιόσια Φυλής στην Αθήνα. Εξυπηρετεί το 93% του τοπικού πληθυσμού και δέχεται απόβλητα από 70 δήμους, ενώ στη



Θεσσαλονίκη, ο πρώην χώρος υγειονομικής ταφής των Ταγαρέδων εξυπηρετούσε το 71% του πληθυσμού και επεξεργαζόταν απόβλητα από 23 δήμους. Έκλεισε στις αρχές του 2008, αφού έφθασε τη σχεδιασμένη χωρητικότητά του. Παρά τα θετικά βήματα που έχουν γίνει προς την κατεύθυνση της αύξησης του αριθμού των υγειονομικών χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, αυξάνονται τα κρούσματα μη συμμόρφωσης των νέων χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων και παραβίασης της άδειας ολοκληρωμένου ελέγχου της ρύπανσης και πρόληψης [13].

Παρόλο που η Ελλάδα έχει μεταφέρει την οδηγία της ΕΕ για την υγειονομική ταφή στην εθνική της νομοθεσία, ελάχιστα φαίνεται να έχουν γίνει είτε για την ορθή εφαρμογή της οδηγίας, είτε για την επίτευξη οποιουδήποτε από τους θεσμοθετημένους στόχους της. Οι χώροι υγειονομικής ταφής απορριμμάτων εξακολουθούν να λειτουργούν, ενώ έχουν δυσμενείς επιπτώσεις στη ρύπανση των υδάτων, καθώς και στην ατμοσφαιρική ρύπανση και στις δασικές πυρκαγιές. Αυτές οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις αποτελούν παραβίαση της οδηγίας για τα υπόγεια ύδατα. Η έκλυση μεθανίου που προκαλείται από την αποσύνθεση των αποβλήτων, καθώς και η αυτανάφλεξη των αποβλήτων και η πρόκληση δασικών πυρκαγιών αποτελεί πλήρη παραβίαση της άδειας λειτουργίας του χώρου και της άδειας ολοκληρωμένης πρόληψης και ελέγχου της ρύπανσης [12].

Η ελληνική ταξινόμηση των χώρων απόρριψης δεν σημαίνει πάντα απόθεση αποβλήτων σε έδαφος. Τα βιοαποδομήσιμα αστικά απόβλητα έχουν απορριφθεί σε γκρεμούς, σε όχθες χειμάρρων, ποταμών, κοίτες ρεμάτων, στις ακτές, σε πηγές όπου το νερό χρησιμοποιείται για ανθρώπινη κατανάλωση, σε εγκαταλελειμμένα λατομεία, δασικές περιοχές και αρχαιολογικούς χώρους. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος, υπάρχει σοβαρή ανησυχία για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που έχουν αυτές οι χωματερές στην Ελλάδα τόσο ως χώρα όσο και στον τουρισμό. Οι επιπτώσεις τόσο στους κατοίκους όσο και στους τουρίστες σε σχέση με την ανεξέλεγκτη απόθεση αποβλήτων στο έδαφος έχουν επίσης προκαλέσει ανησυχία, τόσο όσον αφορά τις βλαβερές επιπτώσεις που μπορεί να έχει στην ανθρώπινη υγεία όσο και τις μακροπρόθεσμες επακόλουθες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνδέονται με αυτές τις παράνομες δραστηριότητες απόρριψης. Επιπλέον, κανένας από τους υφιστάμενους χώρους υγειονομικής ταφής δεν μπορεί να αναβαθμιστεί ώστε να πληροί τις απαιτήσεις ενός ελεγχόμενου ή υγειονομικού χώρου υγειονομικής ταφής σύμφωνα με την οδηγία της ΕΕ για τους χώρους υγειονομικής ταφής. Μακροπρόθεσμα, οι δραστηριότητες αυτές καταστρέφουν συνεχώς το περιβάλλον γύρω τους και δεν έχει ληφθεί κανένα μέτρο επιβολής από το Υπουργείο Περιβάλλοντος ή την κυβέρνηση τόσο σε εθνικό όσο και σε τοπικό επίπεδο για την παύση της λειτουργίας αυτών των εγκαταστάσεων. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας για τον οποίο η Ελλάδα συνεχίζει να στέλνει ένα σημαντικό ποσοστό των

αποβλήτων της στις χωματερές είναι ότι αποτελεί μια εύκολη και φθηνή λύση. Δεν υπάρχει εισφορά φόρου υγειονομικής ταφής σε σύγκριση με άλλα κράτη της ΕΕ, όπως το Ηνωμένο Βασίλειο, όπου τα τοπικά συμβούλια πληρώνουν το κόστος με βάση το βάρος των αποβλήτων. Δεδομένου ότι το κόστος εφαρμογής εναλλακτικών υποδομών για την εκτροπή των βιοαποικοδομήσιμων αστικών αποβλήτων από την υγειονομική ταφή μπορεί να είναι σημαντικό, οι τοπικοί πολιτικοί ενδέχεται να μην είναι πρόθυμοι να το αναλάβουν, δεδομένου ότι γνωρίζουν ότι η επένδυση σε εναλλακτικές υποδομές αποβλήτων θα έχει ως αποτέλεσμα ένα σημαντικό κόστος το οποίο θα πρέπει να μετακυλιστεί στους τοπικούς φορολογούμενους. Τα μέτρα που έχουν τεθεί σε εφαρμογή περιλαμβάνουν την περίφραξη, την τοποθέτηση υλικού κάλυψης πάνω από τα απόβλητα για να μειωθεί ο κίνδυνος πυρκαγιάς και ο κίνδυνος εκτόξευσης των αποβλήτων από το χώρο απόρριψης, καθώς και την πυροπροστασία [13].

## Πειραματικό μέρος

### 5. Σκοπός

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν να μελετηθεί η δυνατότητα αέριων εκπομπών κομποστοποίησης οργανικών αστικών αποβλήτων προς την κατεύθυνση παραγωγής θειικού αμμωνίου, το οποίο αποτελεί ένα από τα πλέον χρησιμοποιούμενα λιπάσματα στη γεωργία. Προς τούτο, αρχικά πραγματοποιήθηκαν πειράματα νιτροποίησης σε εργαστηριακή κλίμακα με συνθετικό υπόστρωμα αμμωνιακού αζώτου. Ακολούθως τα αποτελέσματα αυτά ανακλιμακώθηκαν σε πιλοτική κλίμακα και εν συνεχεία εξετάστηκε η δυνατότητα αύξησης της φόρτισης του συστήματος. Τέλος, στο πιλοτικό σύστημα τροφοδοτήθηκαν οι αέριες εκπομπές της μονάδας κομποστοποίησης οργανικών αστικών αποβλήτων του Εργοστασίου Μηχανικής Ανακύκλωσης του ΧΥΤΑ Φυλής οι οποίες είναι πλούσιες σε αμμωνιακά ιόντα.

## 6. Πειραματική μεθοδολογία

### 6.1 Πρώτες ύλες

Αερόβια βιολογική ιλύ: Για την πραγματοποίηση των εργαστηριακών δοκιμών νιτροποίησης χρησιμοποιήθηκε αερόβια βιολογική ιλύς από την μονάδα αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας αστικών λυμάτων της Ψυττάλειας, η οποία χαρακτηρίστηκε φυσικοχημικά.

Συνθετικό υπόστρωμα νιτροποίησης: Για την πραγματοποίηση των εργαστηριακών δοκιμών νιτροποίησης χρησιμοποιήθηκε συνθετικό υπόστρωμα το οποίο προετοιμαζόταν συστηματικά. Η σύστασή του ως προς το άζωτο και τον ανόργανο άνθρακα ήταν αντίστοιχα σε g/L:  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (16.8) και  $\text{NaHCO}_3$  (59.37). Επιπλέον προσθέτονταν 100μL από εμπορικό λίπασμα NPK 7:7:7 προκειμένου να εξασφαλιστούν οι ανάγκες της βιομάζας σε φώσφορο.

### 6.2 Πειραματικές διατάξεις

#### 6.2.1 Εργαστηριακής κλίμακας βιοαντιδραστήρας νιτροποίησης

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων νιτροποίησης στήθηκε μια διάταξη η οποία αποτελούνταν από ένα κυλινδρικό δοχείο ενεργού όγκου 10L το οποίο είχε τη δυνατότητα ανάδευσης μέσω μηχανικού αναδευτήρα. Ο απαιτούμενος αερισμός για την εξασφάλιση των αναγκών σε οξυγόνο της αερόβιας βιολογικής ιλύος εξασφαλιζόταν από την έντονη μηχανική ανάδευση.

#### 6.2.2 Πιλοτικές μονάδες

Το ερευνητικό έργο Biogasnet (<https://biogasnet.eu/el/>) έχει ως κύριο στόχο την ανάπτυξη και επίδειξη ενός αιεφορικού συστήματος καθαρισμού βιοαερίου σε χώρους υγειονομικής ταφής και σε Μονάδες Επεξεργασίας Αστικών Στερεών Αποβλήτων. Το έργο χρηματοδοτείται από το μηχανισμό LIFE που είναι ένα χρηματοδοτικό μέσο της ΕΕ που υποστηρίζει έργα δράσης για το περιβάλλον, τη διατήρηση της φύσης και το κλίμα σε ολόκληρη την Ευρώπη. Το έργο BIOGASNET ξεκίνησε την υλοποίησή του το 2019 και σύντομα θα ολοκληρωθεί εντός του 2024. Η κοινοπραξία του BIOGASNET απαρτίζεται από 5 εταίρους από την Ισπανία και 1 από την Ελλάδα, καλύπτοντας όλη την αξιακή αλυσίδα, από πανεπιστήμια, ερευνητικά/τεχνολογικά κέντρα, και τελικούς χρήστες.

Η χρήση βιοαερίου για την παραγωγή ενέργειας αυξάνεται σε επίπεδο ΕΕ λόγω του χαμηλότερου κόστους και της σχετικής μείωσης των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG) σε σύγκριση με τα

ορυκτά καύσιμα. Σε επίπεδο ΕΕ, η συνολική εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς από μονάδες βιοαερίου ήταν 11.082MW σύμφωνα με τα τελευταία διαθέσιμα στατιστικά δεδομένα, σημειώνοντας αύξηση άνω του 5% ετησίως τα τελευταία 3 χρόνια. Ωστόσο, η χρήση βιοαερίου ως καυσίμου απαιτεί την απομάκρυνση του υδρόθειου ( $H_2S$ ) που προκαλεί σωρεία προβλημάτων: διάβρωση, βλάβες στον εξοπλισμό και εκπομπή διοξειδίου του θείου ( $SO_2$ ) κατά την καύση βιοαερίου. Επομένως, η περιεκτικότητα σε  $H_2S$  εμποδίζει τη χρήση αυτού του αερίου για παραγωγή ενέργειας και, ως εκ τούτου, απαιτείται αποθείωση για τη μείωση ή την αποφυγή του προβλήματος.

Οι τρέχουσες τεχνολογίες αποθείωσης στοχεύουν είτε στην αναστολή παραγωγής του υδρόθειου κατά την αναερόβια χώνευση, είτε στην απομάκρυνσή του σε μετέπειτα στάδιο. Οι τεχνολογικές επιλογές που έχουν παρουσιαστεί κατά καιρούς για τον καθαρισμό του βιοαερίου από το υδρόθειο περιλαμβάνουν χημικές μεθόδους, φυσικοχημικές μεθόδους με χρήση μεμβρανών ή προσροφητικών μέσων, αλλά και βιολογικές. Όμως οι χημικές και φυσικοχημικές μέθοδοι παρουσιάζουν υψηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Για παράδειγμα, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της αποθείωσης μέσω χημικού καθαρισμού είναι 30 kg  $CO_2$  ανά kg θείου που απομακρύνεται και της προσρόφησης με ενεργό άνθρακα 42,1 kg ανά kg αντίστοιχα. Αντίθετα, οι νέες βιολογικές μέθοδοι εκπέμπουν μόλις 19 kg  $CO_2$  ανά kg θείου που απομακρύνεται.

Έτσι, υπό το πρίσμα αυτό οι βασικοί στόχοι του προγράμματος Biogasnet είναι να επιδείξει νέες και αποδοτικές τεχνολογίες αποθείωσης βιοαερίου και έτσι να εξασφαλίσει ένα ενεργειακά πλούσιο ρεύμα βιοαερίου με χαμηλές συγκεντρώσεις υδρόθειου αλλά και την παραγωγή δευτερογενών πρώτων υλών από ροές αποβλήτων, προάγοντας μία αειφορική, και τεχνολογικά προηγμένη βιοοικονομία.

Κατά τη διάρκεια του έργου σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένα πρωτότυπο σύστημα με σκοπό να λειτουργήσει σε δύο ευρωπαϊκές εγκαταστάσεις με διαφορετικές πηγές βιοαερίου.

Αρχικά το πρωτότυπο σύστημα εγκαταστάθηκε και λειτούργησε για 12 μήνες σε ένα περιβαλλοντικό οικολογικό πάρκο στην πόλη Cadiz της Ισπανίας. Το σύστημα αυτό αποτελείται από ένα βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης, που τροφοδοτείται από τα στραγγίσματα του χώρου υγειονομικής ταφής και ένα ανοξικό bioscrubber, που τροφοδοτείται από την εκροή του βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης και από το βιοαέριο από τα πηγάδια του χώρου υγειονομικής ταφής. Στο βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης τα περιεχόμενα αμμωνιακά ιόντα των στραγγισμάτων βιομετατρέπονται σε νιτρικά ιόντα, ενώ στην πλυντρίδα το υδρόθειο μεταφέρεται από την αέρια φάση στην υγρή. Τέλος, στον ανοξικό βιοαντιδραστήρα παράγεται στοιχειακό θείο ως τελικό προϊόν και απελευθερώνεται αέριο άζωτο.

Συνολικά, ως τελικά προϊόντα λαμβάνονται καθαρό βιοαέριο απαλλαγμένο από υδρόθειο και στοιχειακό θείο, ενώ ταυτόχρονα γίνεται και επεξεργασία των στραγγισμάτων.

Κατά τη λειτουργία της μονάδας τροφοδοτήθηκαν στο σύστημα σχεδόν 7,5m<sup>3</sup> στραγγισμάτων, επιτυγχάνοντας υψηλές ημερήσιες φορτίσεις. Η διεργασία βελτιστοποιήθηκε για διάφορες λειτουργικές παραμέτρους.

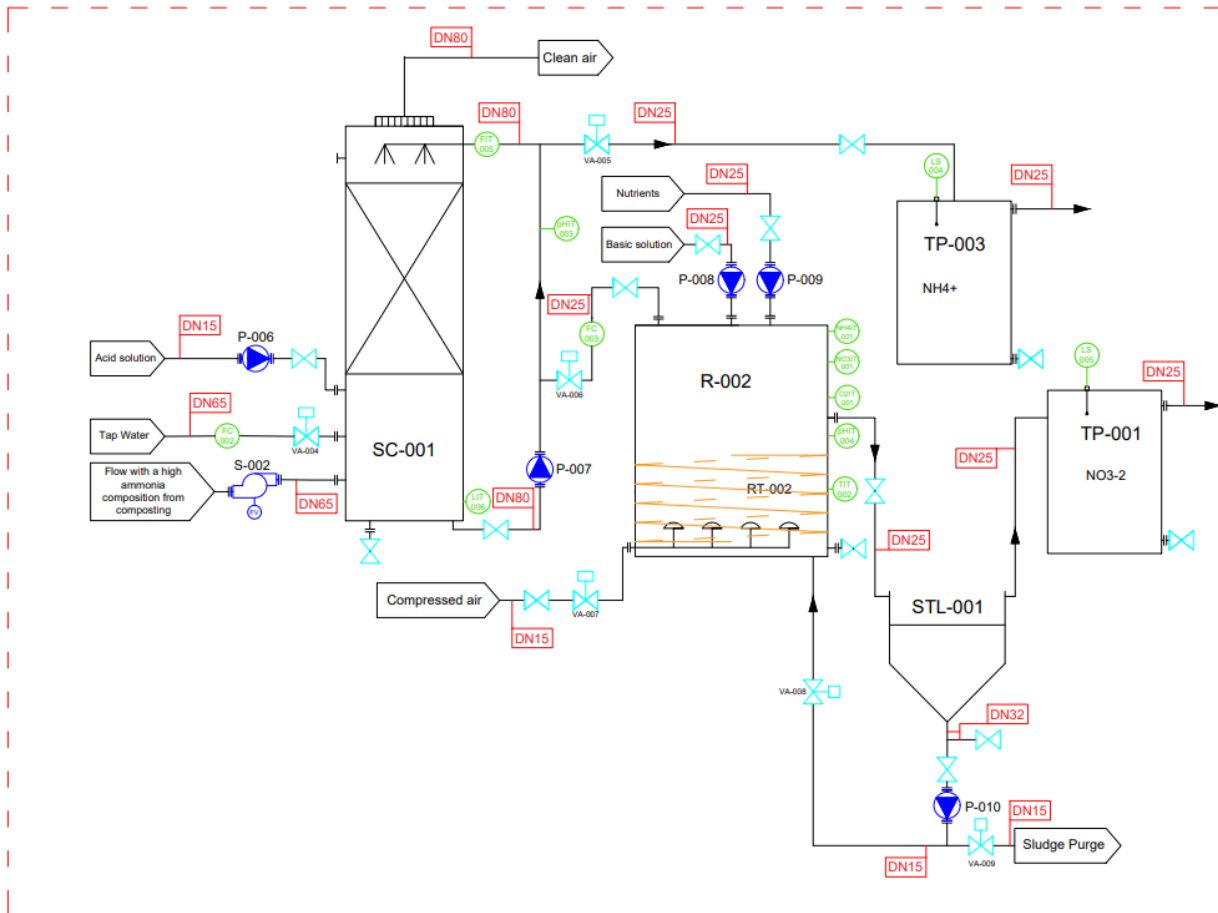
Το πρωτότυπο σύστημα, αφού λειτούργησε για 12 μήνες στο εργοστάσιο του Cadiz, μεταφέρθηκε στην Αθήνα όπου θα λειτουργήσει με στόχο να συλλεχθούν πληροφορίες για την απόδοση της τεχνολογίας Biogasnet σε ένα άλλο διαφορετικό σενάριο. Στην περίπτωση αυτή, η πιλοτική μονάδα αποτελείται από δύο ξεχωριστές επιμέρους μονάδες. Η πρώτη μονάδα είναι εγκατεστημένη στη μονάδα Μηχανικής Ανακύκλωσης και Κομποστοποίησης Στερεών Αποβλήτων στα Άνω Λιόσια και τροφοδοτείται από τις εκπομπές της μονάδας κομποστοποίησης που είναι πλούσιες σε αμμωνιακό άζωτο. Η δεύτερη μονάδα συνδέεται με τους αγωγούς του βιοαερίου που συλλέγεται από τον ΧΥΤΑ.

Η συνολική λειτουργία των μονάδων έχει να στόχο να:

1. Καθαρίσει τις εκπομπές κομποστοποίησης από την αμμωνία
2. Καθαρίσει το βιοαέριο από υδρόθειο
3. Δημιουργήσει έναν δευτερεύοντα πόρο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη γεωργία, προωθώντας τους στόχους της ΕΕ για την κυκλικότητα και την αποδοτικότητα των πόρων.

#### Πειραματική διάταξη Πιλοτικής μονάδας Νιτροποίησης

Η πρώτη μονάδα αποτελείται από μια πλυντρίδα και έναν βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης (Εικόνα 21). Στην πλυντρίδα πραγματοποιείται η μεταφορά της περιεχόμενης αμμωνίας των εκπομπών της μονάδας κομποστοποίησης στην υδατική φάση. Η εκροή της πλυντρίδας οδηγείται στον βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης για τη βιολογική μετατροπή της αμμωνίας σε νιτρικά ιόντα υπό αερόβιες συνθήκες.



Εικόνα 21: Διάγραμμα διεργασιών και εξοπλισμού πιλοτικής μονάδας νιτροποίησης.

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται αναλυτικότερη περιγραφή της μονάδας αυτής.

Στην Εικόνα 22 παρουσιάζεται αναλυτικό διάγραμμα ροής της μονάδας νιτροποίησης.

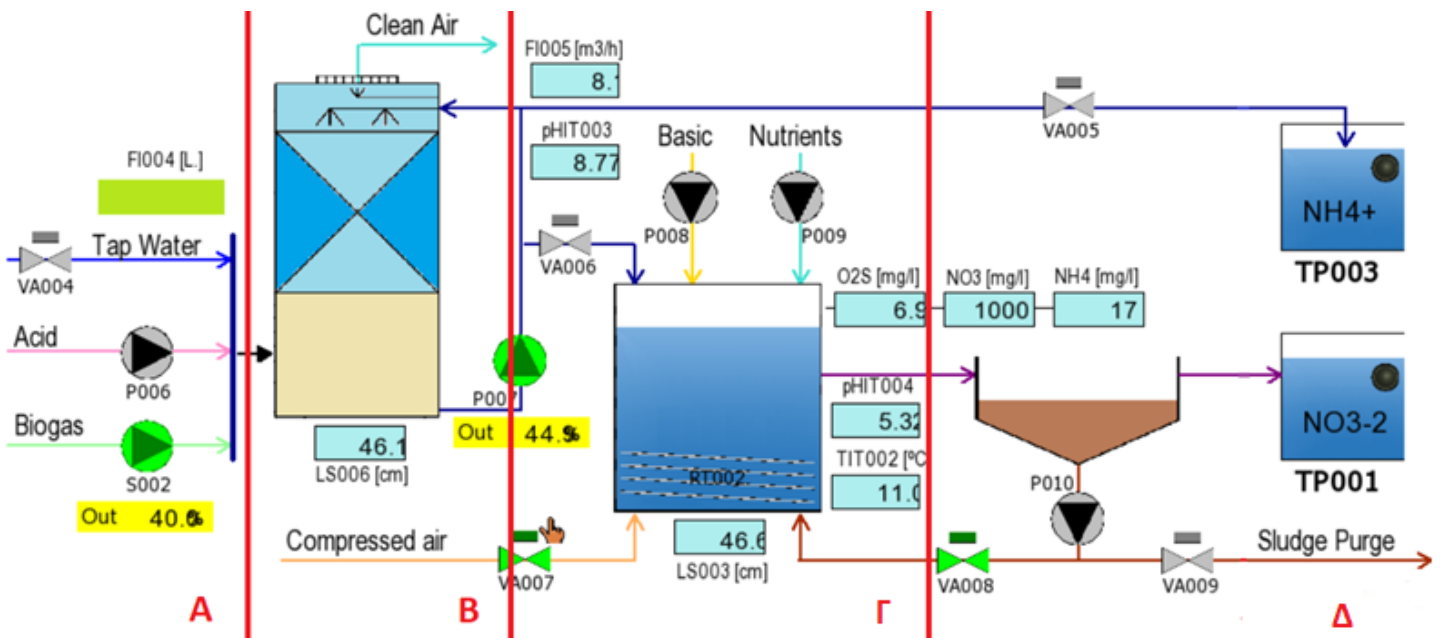
Η **ζώνη Α** περιλαμβάνει όλα τα εισερχόμενα ρεύματα τροφοδοσίας της πλυντρίδας. Πιο συγκεκριμένα, το οξύ για τη ρύθμιση του pH, το νερό καθώς και το ρεύμα των αέριων εκπομπών από τη μονάδα κομποστοποίησης των ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων. Αυτό το αέριο ρεύμα είναι πλούσιο σε αμμωνία, με συγκέντρωση η οποία μεταβάλλεται μεταξύ 70 – 120 ppm.

Η **ζώνη Β** αντιστοιχεί στην πλυντρίδα συγκράτησης των εκπομπών αμμωνίας. Η αμμωνία εισέρχεται στην πλυντρίδα σε αέρια μορφή και έρχεται σε επαφή με το υγρό διάλυμα θειικού οξέος. Με τον τρόπο αυτό μεταφέρεται στην υγρή φάση. Σε αυτό το στάδιο, οι παράμετροι που ρυθμίζονται μέσω του συστήματος είναι: το επίπεδο του υγρού (LS006), η ροή ανακυκλοφορίας του υγρού % μέσω της

αντλίας (P007), το pH (pHIT003) και η ροή εισόδου του αερίου κομποστοποίησης % μέσω του κομπρέσορα (S002).

Η ζώνη Γ αντιστοιχεί στον αντιδραστήρα βιολογικής νιτροποίησης 1m<sup>3</sup>, ο οποίος ένας πλήρους ανάδευσης αντιδραστήρας με δυνατότητα ρύθμισης του pH και της θερμοκρασίας και παροχή αέρα για επαρκή αερισμό της βιομάζας. Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιούνται μετρήσεις τόσο εντός του αντιδραστήρα, όσο και εργαστηριακά. Οι παράμετροι που ρυθμίζονται αυτόματα είναι το pH (pHIT004), η θερμοκρασία (TIT002), η στάθμη του υγρού (LS003), η συγκέντρωση αζώτου νιτρικών ιόντων (NO<sub>3</sub>-N), η συγκέντρωση αζώτου αμμωνιακών ιόντων (NH<sub>4</sub>-N) και η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου (O<sub>2s</sub>).

Η ζώνη Δ αποτελείται από τη μονάδα καθίζησης και τις δεξαμενές αποθήκευσης των παραγόμενων προϊόντων. Η δεξαμενή καθίζησης δίνει τη δυνατότητα στην αερόβια λάσπη που βγαίνει από το βιοαντιδραστήρα να επαναφέρεται στο σύστημα, μέσω πνευματικής βαλβίδας. Το υπερκείμενο υγρό, το οποίο είναι τα νιτρικά που έχουν παραχθεί οδηγούνται στην δεξαμενή αποθήκευσης TP001. Αντίστοιχα στην TP003 οδηγούνται τα αμμωνιακά που έχουν παραχθεί στην πλυντρίδα, για χρήση στο επόμενο στάδιο του συστήματος.



Εικόνα 22: Διάγραμμα ροής μονάδας νιτροποίησης



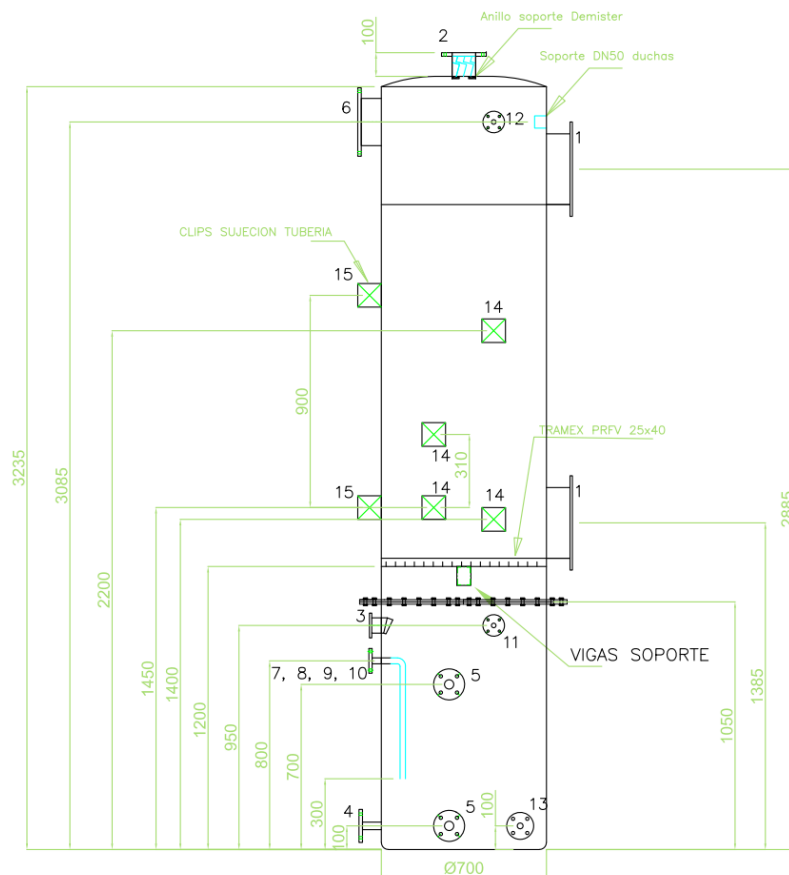
Όπως απεικονίζεται παρακάτω, στην Εικόνα 23 οι 2 μαύρες δεξαμενές αντιστοιχούν στις δεξαμενές αποθήκευσης των προϊόντων του συστήματος όγκου 1 m<sup>3</sup> η κάθε μια. Πίσω από τις δεξαμενές φαίνεται η πλυντρίδα αμμωνιακών, συνολικού ύψους 3,2 μέτρων. Πιο αναλυτικά οι διαστάσεις αυτής φαίνονται στην Εικόνα 25. Στη συνέχεια, στην Εικόνα 24 φαίνεται πιο ξεκάθαρα ο κομπρέσορας, ο οποίος παρέχει αέρα σε όλο το σύστημα και κυρίως στον αντιδραστήρα βιολογικής νιτροποίησης που έχει αυξημένες απαιτήσεις σε αερισμό λόγω της αερόβιας διεργασίας που επιτελείται. Η διαστασιολόγηση αυτού, καθώς και της δεξαμενής καθίζησης φαίνεται στην Εικόνα 26 και 27 αντίστοιχα.



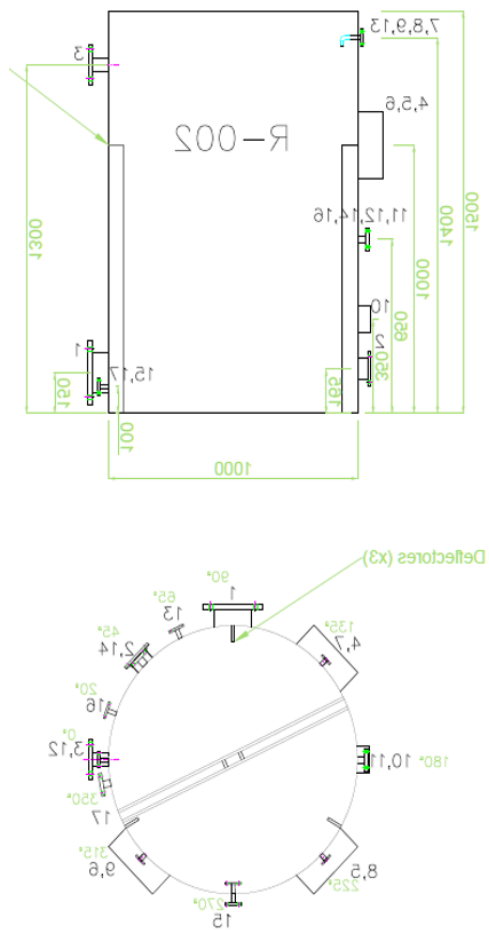
Εικόνα 23: Απεικόνιση της πιλοτικής μονάδας νιτροποίησης (1).



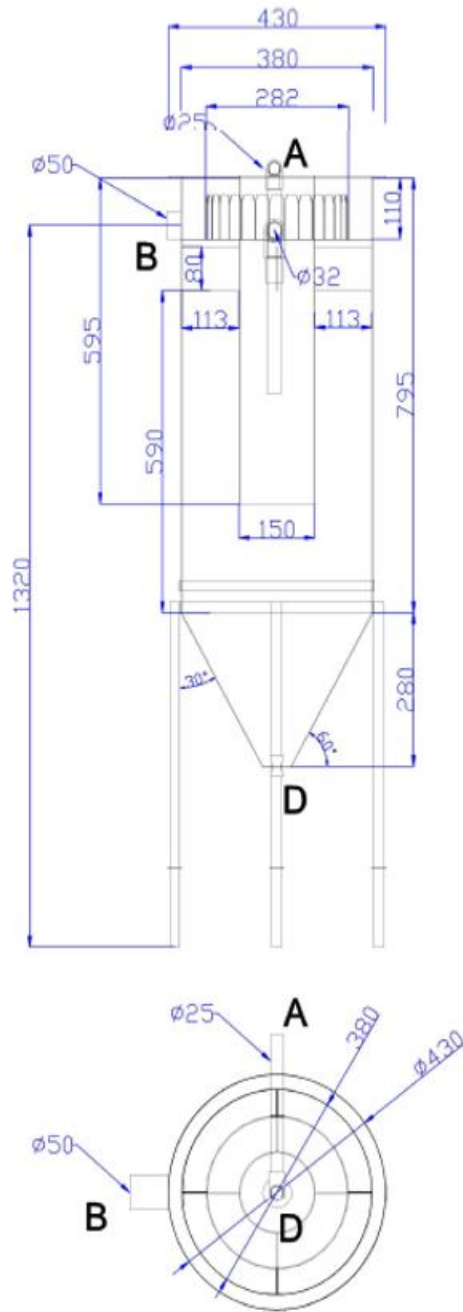
Εικόνα 24: Απεικόνιση της πιλοτικής μονάδας νιτροποίησης (2).



Εικόνα 25: Διαστασιολόγηση πλυντρίδας.



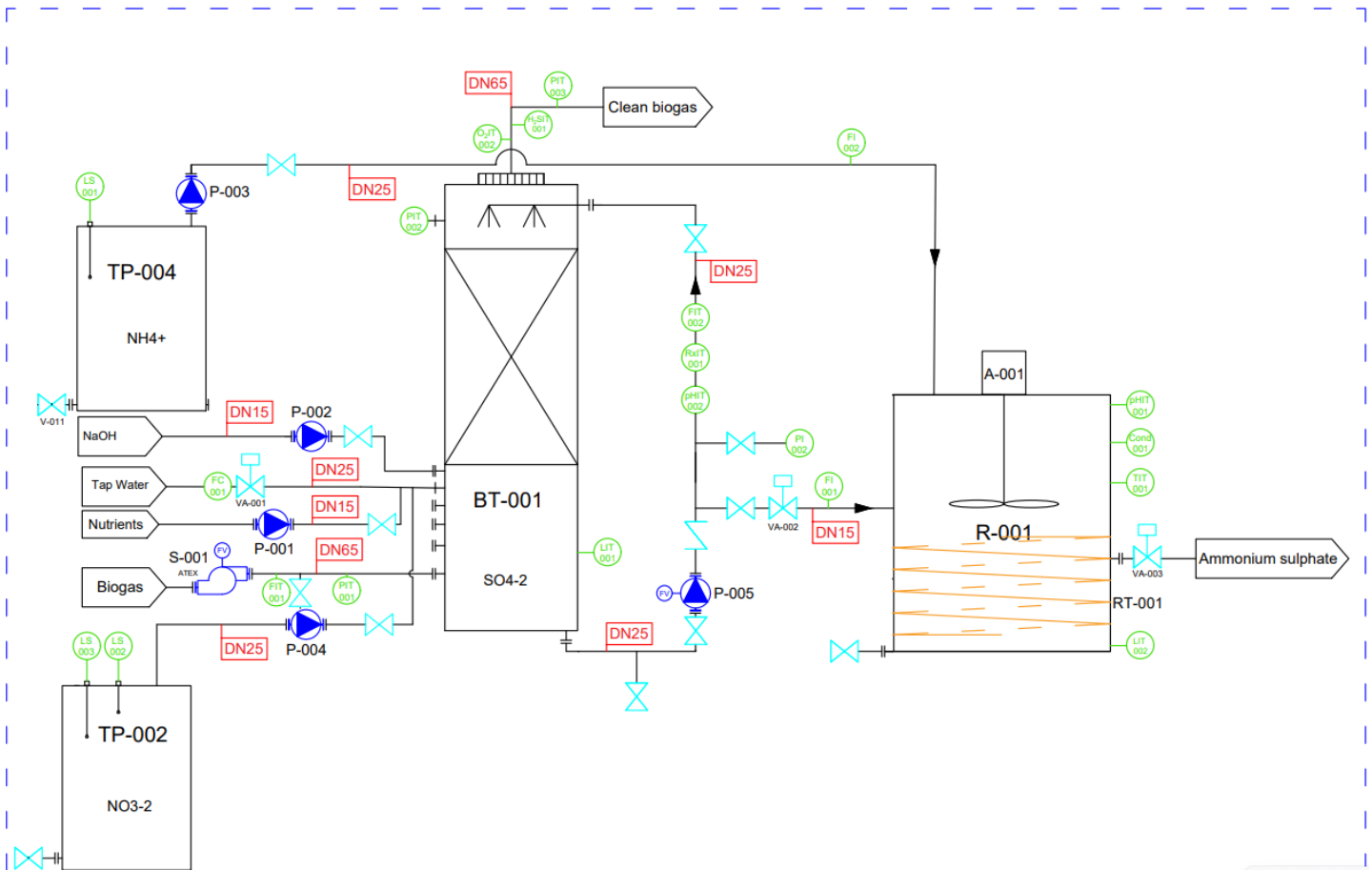
Εικόνα 26: Διαστασιολόγηση αντιδραστήρα βιολογικής νιτροποίησης.



Εικόνα 27: Διαστασιολόγηση δεξαμενής καθίζησης μονάδας νιτροποίησης.

### Πειραματική διάταξη πιλοτικής μονάδας αποθείωσης

Η δεύτερη μονάδα περιλαμβάνει ένα ανοξικό βιοφίλτρο που τροφοδοτείται με το βιοαέριο που παράγεται από τον χώρο υγειονομικής ταφής και το διάλυμα πλούσιο σε νιτρικά ιόντα από την πρώτη μονάδα (Εικόνα 28). Το υδρόθειο του βιοαερίου βιομετατρέπεται σε θειικά ιόντα. Το ρεύμα θειικών ιόντων αναμιγνύεται με το διάλυμα αμμωνιακών ιόντων της πρώτης μονάδας για να παραχθεί ένα προϊόν προστιθέμενης αξίας, το θειικό αμμώνιο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα.



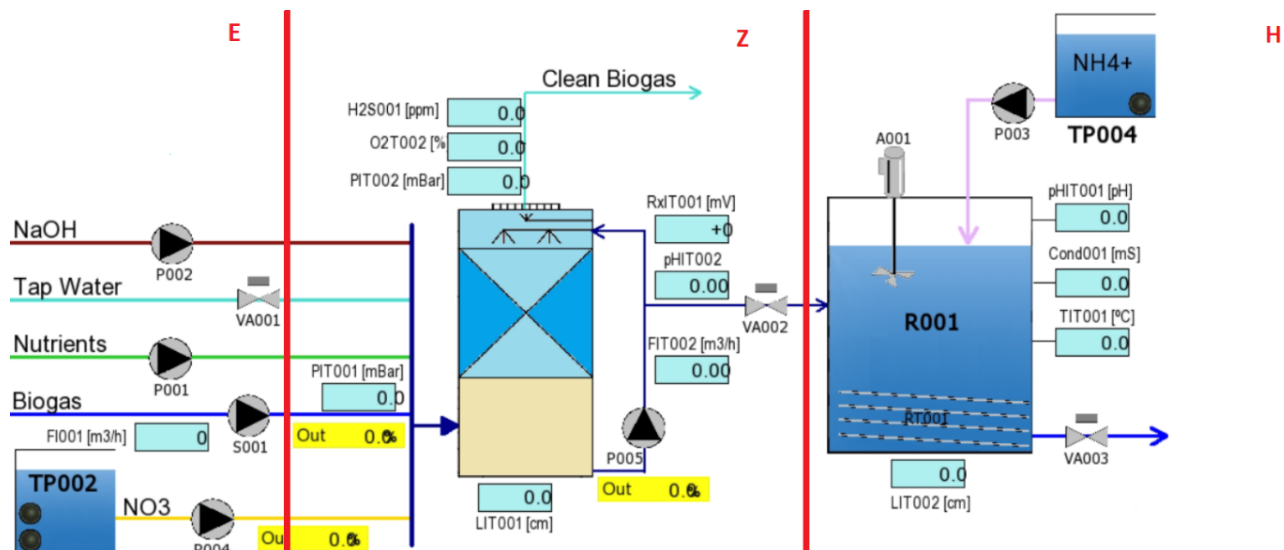
Εικόνα 28: Διάγραμμα διεργασιών και εξοπλισμού πιλοτικής μονάδας αποθείωσης.

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται αναλυτικότερη περιγραφή της μονάδας αυτής (Εικόνα 29).

Η **Ζώνη Ε** περιλαμβάνει τα εισερχόμενα ρεύματα στο βιοφίλτρο και πιο συγκεκριμένα την παροχή του βιοαερίου που προέρχεται από τη κύτταρο των ΧΥΤΑ, το νερό, το διάλυμα θρεπτικών για τη βιομάζα, το διάλυμα NaOH για τη ρύθμιση του pH και το διάλυμα των νιτρικών ιόντων που παράγεται στη μονάδα νιτροποίησης από τις αέριες εκπομπές της κομποστοποίησης.

Η **Ζώνη Ζ** αντιστοιχεί στην πλυντρίδα αποθείωσης. Υπό ανοξικές συνθήκες το υδρόθειο ( $H_2S$ ) που περιέχεται στο βιοαέριο μετατρέπεται σε θειικά ιόντα. Οι παράμετροι που ελέγχονται αυτόματα σε αυτό το στάδιο της διαδικασίας είναι οι ακόλουθες: ροή βιοαερίου % (FL001), Πίεση εισόδου (PI001), επίπεδο στάθμης υγρού στην πλυντρίδα (LI001), ροή ανακυκλοφορίας (FIL002), pH (pHIT002), redox (RxIT001), πίεση εξόδου (PI002), συγκέντρωση οξυγόνου στην έξοδο του βιοαερίου (O2T002), συγκέντρωση  $H_2S$  στην έξοδο του βιοαερίου (H2S001).

Η **Ζώνη Η** αντιστοιχεί στη δεξαμενή ανάμιξης. Σε αυτό το στάδιο παράγεται το τελικό προϊόν της διεργασίας, το θειικό αμμώνιο, που είναι λίπασμα. Τα αμμωνιακά ιόντα ( $NH_4^+$ ) που παράχθηκαν στην πλυντρίδα του πρώτου σταδίου αναμιγνύονται με τα θειικά που παράχθηκαν στην πλυντρίδα του δεύτερου σταδίου ώστε να παραχθεί το επιθυμητό προϊόν. Οι παράμετροι που ελέγχονται σε αυτό το στάδιο είναι οι ακόλουθες: pH (pHIT001), αγωγιμότητα (Cond001), στάθμη του υγρού στη δεξαμενή (LIT002).



Εικόνα 29: Διάγραμμα ροής πιλοτικής μονάδας αποθείωσης



Στις ακόλουθες εικόνες (Εικόνα 30 και 31) παρουσιάζονται φωτογραφίες της πιλοτικής μονάδας ανοξικής αποθείωσης.



Εικόνα 30: Απεικόνιση της πιλοτικής μονάδας ανοξικής αποθείωσης (1).



Εικόνα 31: Απεικόνιση της πιλοτικής μονάδας ανοξικής αποθείωσης (2). Είσοδος – Έξοδος βιοαερίου.

## 6.3 Πειραματικό πρωτόκολλο

### 6.3.1 Πειραματική διαδικασία νιτροποίησης σε εργαστηριακή κλίμακα

Ο εργαστηριακής κλίμακας βιοαντιδραστήρας νιτροποίησης λειτουργούσε ως αντιδραστήρας ημι-διαλείποντος έργου. Αρχικά προστέθηκαν στον αντιδραστήρα 5L αερόβιας βιολογικής ιλύος και 5L νερό, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ενεργός όγκος αντιδραστήρα 10L. Επιπλέον, σε ημερήσια βάση προσθέτονταν 100mL από το συνθετικό υπόστρωμα νιτροποίησης, ώστε να εφαρμόζεται σταθερή φόρτιση σε αμμωνιακά ιόντα 45g/L<sub>r</sub>/d. Επιπλέον, ρυθμιζόταν το pH στο 7,5 και εφαρμόζοταν συνεχής ανάδευση εξασφαλίζοντας τον απαιτούμενο αερισμό. Μετά από 24 ώρες γινόταν δειγματοληψία και χαρακτηρισμός του δείγματος για τις ακόλουθες παραμέτρους.

- pH
- Ολικό άζωτο (TN)
- Αμμωνιακό άζωτο (NH<sub>4</sub>-N)
- Νιτρικό άζωτο (NO<sub>3</sub>-N)
- Νιτρώδες άζωτο (NO<sub>2</sub>-N)
- Ολικός φώσφορος (TP)
- Ολικός άνθρακας (TC)
- Ολικός οργανικός άνθρακας (TOC)
- Ολικός ανόργανος άνθρακας (TIC)
- Ολικό άζωτο (TN)

Τα πειράματα νιτροποίησης στον εργαστηριακό αντιδραστήρα νιτροποίησης διήρκησαν περίπου 2 μήνες.

### 6.3.2 Πειραματική διαδικασία νιτροποίησης σε πιλοτική κλίμακα

Αρχικά προστέθηκαν στον αντιδραστήρα νιτροποίησης 150L αερόβιας βιολογικής ιλύος τα οποία αραιώθηκαν με νερό, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ενεργός όγκος αντιδραστήρα 600L. Στην πρώτη φάση λειτουργίας του αντιδραστήρα η τροφοδοσία των αμμωνιακών ιόντων πραγματοποιούνταν με συνθετικό διάλυμα αμμωνίας ακολουθώντας το πρωτόκολλο που εφαρμόστηκε και στην εργαστηριακή μελέτη. Σε ημερήσια βάση, προσθέτονταν παροχή συνθετικού υπόστρωμα αμμωνιακών ώστε να εξασφαλιστεί η επιθυμητή φόρτιση αμμωνιακών εντός του συστήματος (45g/L<sub>r</sub>/d). Το pH ρυθμιζόταν στο 7,5 και το αυτοματοποιημένο σύστημα αερισμού εξασφάλιζε την απαιτούμενη συγκέντρωση



διαλυμένου οξυγόνου. Καθημερινά γινόταν δειγματοληψία και χαρακτηρισμός του δείγματος για τις ακόλουθες παραμέτρους.

- pH
- Ολικό άζωτο (TN)
- Αμμωνιακό άζωτο (NH<sub>4</sub>-N)
- Νιτρικό άζωτο (NO<sub>3</sub>-N)
- Νιτρώδες άζωτο (NO<sub>2</sub>-N)
- Ολικός φώσφορος (TP)
- Ολικός άνθρακας (TC)
- Ολικός οργανικός άνθρακας (TOC)
- Ολικός ανόργανος άνθρακας (TIC)
- Ολικό άζωτο (TN)

Στη συνέχεια μελετήθηκε η επίδραση της αύξησης της φόρτισης των αμμωνιακών ιόντων στον αντιδραστήρα (100g/L<sub>T</sub>/d και 150g/L<sub>T</sub>/d) στην απόδοση της νιτροποίησης. Η πρώτη φάση λειτουργίας διήρκησε περίπου 2 μήνες.

Στη δεύτερη φάση λειτουργίας του αντιδραστήρα, δεδομένου ότι είχαν συσσωρευτεί πολλά νιτρικά αλλά και αμμωνιακά ιόντα και πιθανώς να είχαν τοξικοποιηθεί τα νιτροποιητικά βακτήρια της ιλύος, άδειασε ο αντιδραστήρας και προστέθηκαν εκ νέου 150L αερόβιας βιολογικής ιλύος τα οποία αραιώθηκαν με νερό μέχρι τελικού όγκου 600L. Η παροχή των αμμωνιακών ιόντων σε αυτή τη φάση εξασφαλιζόταν από τις αέριες εκπομπές της κομποστοποίησης, οι οποίες τροφοδοτούνταν με σταθερή παροχή 100m<sup>3</sup>/d στην πλυντρίδα. Για να εξασφαλιστεί η βέλτιστη φόρτιση σε αμμωνιακά ιόντα σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προηγούμενης φάσης, λαμβανόταν υπόψη η συγκέντρωση των αμμωνιακών ιόντων μέσα στην πλυντρίδα και οριζόταν ανάλογα ο χρόνος λειτουργίας της αντλίας τροφοδοσίας του αντιδραστήρα νιτροποίησης. Η δεύτερη φάση λειτουργίας διήρκησε περίπου 20 ημέρες.

## 6.4 Μέθοδοι Ανάλυσης

### 6.4.1 Προσδιορισμός ολικών στερεών (TS)

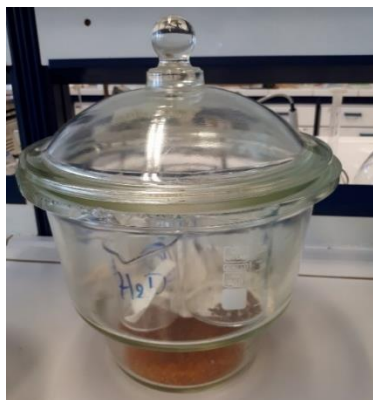
Για τον προσδιορισμό των ολικών στερεών TS ζυγίστηκε ποσότητα 10 g για κάθε δείγμα βιοαποβλήτου σε ζυγό ακριβείας τριών δεκαδικών ψηφίων. Στη συνέχεια, τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε

προζυγισμένες κάβες πορσελάνης και μπόκαν σε φούρνο ξήρανσης Carbolite στους 105°C για 24 ώρες (Εικόνα 32).



Εικόνα 32: Φούρνος ξήρανσης Carbolite.

Μετά το πέρας των 24 ωρών τα δείγματα τοποθετήθηκαν στον αφυγραντήρα (Εικόνα 33) για περίπου 15 λεπτά, ώστε να αποκτήσουν θερμοκρασία δωματίου, και ζυγίστηκαν ξανά.



Εικόνα 33: Αφυγραντήρας.

Το ποσοστό των ολικών στερεών υπολογίζεται από το λόγο της τελικής μάζας προς την αρχική σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\%TS = \frac{\text{τελική μάζα δείγματος}}{\text{αρχική μάζα δείγματος}} * 100$$

#### 6.4.2 Προσδιορισμός πτητικών στερεών (VS)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του περιεχόμενου οργανικού φορτίου ενός στερεού δείγματος μέσω της καύσης του σε υψηλή θερμοκρασία για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε αναλύεται παρακάτω.

Αρχικά, ζυγίστηκε περίπου 0,5-1 g για κάθε δείγμα TS και αυτά τοποθετήθηκαν σε προζυγισμένες κάψες. Μετά, τα δείγματα μπήκαν στο φούρνο Barnstead Thermolyne στους 550 °C για 4 ώρες. Ο φούρνος που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των πτητικών στερεών απεικονίζεται στην παρακάτω Εικόνα 34.



Εικόνα 34: Φούρνος μέτρησης πτητικών στερεών.

Μετά το πέρας των 4 ωρών, οι κάψες αφήνονται στον αφυγραντήρα για περίπου 15 λεπτά, ώστε να έρθουν σε θερμοκρασία δωματίου. Τέλος ζυγίζονται ξανά οι κάψες μαζί με τα περιεχόμενα δείγματα.

Η εκτίμηση του περιεχόμενου οργανικού φορτίου έγινε με τον υπολογισμό της απώλειας βάρους πριν και μετά την εισαγωγή του δείγματος στο φούρνο. Κατά την καύση πραγματοποιείται οξείδωση των οργανικών ουσιών για αυτό και η απώλεια βάρους που υπολογίζεται αποτελεί στην ουσία μέτρο των οργανικών ουσιών που περιέχονται στα στερεά, παρόλο που κατά την καύση απομακρύνονται μερικές φορές και ορισμένα ανόργανα πτητικά συστατικά του δείγματος.

Ο υπολογισμός των πτητικών στερεών προκύπτει με βάση την αρχική και την τελική μάζα του ξηρού δείγματος και υπολογίζεται για όλα τα δείγματα όπως ακριβώς και με την υγρασία με βάση τη σχέση:

$$\%κ.β. VS = \left( \frac{m_i - m_f}{m_i} \right) * 100$$

όπου:

$m_i$ = αρχική μάζα ξηρού δείγματος

$m_f$ = τελική μάζα μετά από 4 ώρες στους 550°C

#### 6.4.3 Προσδιορισμός Ολικού Οργανικού Άνθρακα (TOC) και Ολικού Αζώτου (TN)

Για τον προσδιορισμό της επί της εκατό κατά όγκο περιεκτικότητας ολικού οργανικού άνθρακα TOC και αζώτου TN χρησιμοποιήθηκε η συσκευή TOC της εταιρείας Shimadzu η οποία απεικονίζεται στην παρακάτω Εικόνα 35.



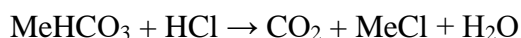
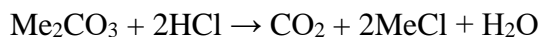
Εικόνα 35: Συσκευή μέτρησης TOC.

##### Αρχή προσδιορισμού ολικού άνθρακα (TC)

Το σκαφίδιο με το προετοιμαζόμενο στερεό δείγμα εισάγεται στο σωλήνα καύσης που περιέχει τον καταλύτη. Ο ολικός άνθρακας του δείγματος οξειδώνεται (καίγεται στους 900 °C) στον σωλήνα καύσης και σχηματίζεται διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Το φέρον αέριο (υπερκάθαρος αέρας) ρέει μέσα από το σωλήνα καύσης και παραλαμβάνει το διοξείδιο του άνθρακα και τα υπόλοιπα προϊόντα της καύσης τα οποία μεταφέρει σε ένα αφυγραντήρα όπου απομακρύνεται η υγρασία ενώ ταυτόχρονα ψύχονται τα αέρια της καύσης. Ακολούθως το φέρον αέριο διέρχεται μέσα από μια παγίδα αλογόνων (όπου κατακρατούνται τα αλογόνα που ίσως περιέχει) για να καταλήξει στην κυψελίδα του ανιχνευτή NDIR (Non Dispersive Infra Red gas analyzer), όπου ανιχνεύεται το διοξείδιο του άνθρακα. Το εύρος μετρήσεων είναι από 0,2 mg C έως 30 mg C.

##### Αρχή προσδιορισμού ανόργανου άνθρακα (TIC)

Το δείγμα οξυνίζεται με φωσφορικό οξύ (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 85%) και εισάγεται στον φούρνο στους 200 °C. Τα ανθρακικά άλατα που περιέχονται στο δείγμα μετατρέπονται σε διοξείδιο του άνθρακα σύμφωνα με τις παρακάτω αντιδράσεις:



Κατόπιν διαβιβάζεται από το δείγμα το φέρον αέριο (υπερκάθαρος αέρας), οπότε το διοξείδιο του άνθρακα που παράχθηκε οδηγείται σε ένα αφυγραντήρα όπου απομακρύνεται η υγρασία. Ακολούθως το φέρον αέριο διέρχεται μέσα από μια παγίδα αλογόνων, (όπου κατακρατούνται τα αλογόνα που ίσως περιέχει το δείγμα) για να καταλήξει στην κυψελίδα του ανιχνευτή NDIR (Non Dispersive Infra Red gas analyzer), όπου το διοξείδιο του άνθρακα ανιχνεύεται.

Το εύρος μετρήσεων είναι από 0,1 mg C έως 20 mg C.

#### 6.4.4 Προσδιορισμός αμμωνιακού αζώτου (NH<sub>4</sub>-N)

Στα νερά και στα απόβλητα οι μορφές του αζώτου που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι, με σειρά ελαττούμενης κατάστασης οξείδωσης: νιτρικά, νιτρώδη, αμμωνία και οργανικό άζωτο. Το οργανικό άζωτο περιλαμβάνει ενώσεις όπως πρωτεΐνες, πεπτίδια, νουκλεϊκά οξέα και ουρία και πολλές συνθετικές ενώσεις. Το οργανικό άζωτο και η αμμωνία μπορούν να προσδιοριστούν μαζί και αναφέρονται ως ολικό άζωτο ή άζωτο κατά Kjeldahl. Ο τελευταίος όρος αναφέρεται στην αντίστοιχη μέθοδο προσδιορισμού. Το ολικό οξειδωμένο άζωτο είναι το άθροισμα του νιτρικού και του νιτρώδους αζώτου. Όλες οι παραπάνω μορφές του αζώτου, καθώς και το αέριο άζωτο, μπορούν να μετατραπούν βιοχημικά από τη μία στην άλλη και αποτελούν συστατικά του κύκλου του αζώτου.

Η αμμωνία υπάρχει σε φυσική κατάσταση στα επιφανειακά νερά και στα απόβλητα. Παράγεται κατά μεγάλο μέρος από την αποαμίνωση των ενώσεων που περιέχουν οργανικό άζωτο και από την υδρόλυση της ουρίας. Μπορεί επίσης να παραχθεί φυσικά από την αναγωγή των νιτρικών κάτω από αναερόβιες συνθήκες. Για τον προσδιορισμό του αμμωνιακού αζώτου χρησιμοποιείται η φασματοφωτομετρική μέθοδος Nessler.

#### Αρχή της μεθόδου

Η μέθοδος Nessler βασίζεται στην έντονη απορρόφηση των χρωμάτων (κίτρινο ως πορτοκαλί) που παράγονται κατά την αντίδραση Nessler – αμμωνίας σε μία ευρεία περιοχή μήκους κύματος (400 – 500nm) και σε συγκεκριμένο χρόνο μετά την προσθήκη.

#### Αντιδραστήρια

Αντιδραστήριο Nessler

Διαλύονται 100gr HgI<sub>2</sub> (No 188) και 70g KI (No 110) σε μικρή ποσότητα απιονισμένου νερού και το μίγμα αυτό προστίθεται αργά και υπό ανάδευση σ' ένα κρύο διάλυμα 160gr NaOH (No 134) σε 500ml

νερό. Ακολουθεί αραιώση στο 1l. Διατηρείται στο ψυγείο, σε σκουρόχρωμη γυάλινη φιάλη με πλαστικό ή λαστιχένιο πώμα και μακριά από το φως, προκειμένου να παραμείνει σταθερό για περίπου ένα χρόνο κάτω από φυσιολογικές εργαστηριακές συνθήκες. Χρειάζεται προσοχή στο χειρισμό του γιατί είναι τοξικό.

#### Διάλυμα άλατος Rochelle

Διαλύονται 50gr  $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (No 115) σε 100ml απιονισμένο νερό. Απομακρύνεται η αμμωνία που συνήθως υπάρχει στο άλας, εξατμίζοντας στο διάλυμα μέχρι όγκο 70ml. Αφού αυτό κρυώσει, ακολουθεί αραιώση στα 100ml. Το διάλυμα άλατος Rochelle εμποδίζει την καθίζηση των ιόντων ασβεστίου και μαγνησίου παρουσία του αλκαλικού αντιδραστήριου Nessler και έχει ρόλο σταθεροποιητή.

#### Διάλυμα $\text{ZnSO}_4$

Διαλύονται 100g  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (No 154) σε απιονισμένο νερό και αραιώνονται στο 1l. Η προεπεξεργασία με  $\text{ZnSO}_4$  και άλκαλι πριν την άμεση εφαρμογή της μεθόδου καταβυθίζει τα άλατα των Ca, Fe, Mg, και S, τα οποία σχηματίζουν θολερότητα όταν αντιδρούν με το αντιδραστήριο Nessler κι εμποδίζουν έτσι τη φασματοφωτομετρική μέτρηση του δείγματος.

#### Αμμωνιακό διάλυμα stock

3,819g άνυδρου  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (No 61), ξηραμένου στους 100°C, διαλύονται σε απιονισμένο νερό και αραιώνονται σε 1L (1.000ppm N). Ισχύει 1ml=1mg N=1,22mg  $\text{NH}_3$ .

#### Πρότυπο αμμωνιακό διάλυμα

10ml αμμωνιακού stock διαλύματος αραιώνονται με απιονισμένο νερό μέχρι 1L (10ppm N). Ισχύει 1ml = 10μg N = 12,2μg  $\text{NH}_3$ . Από το διάλυμα αυτό με κατάλληλες αραιώσεις παρασκευάζονται τα πρότυπα διαλύματα για την κατασκευή της καμπύλης αναφοράς. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν πρότυπα διαλύματα συγκέντρωσης 1, 2, 3, 4 και 5ppm N.

#### Διαδικασία

Αν το δείγμα είναι θολό ή χρωματισμένο, λαμβάνουμε 50ml δείγματος ή αραιωμένου δείγματος –ώστε να είμαστε μέσα στα όρια ευαισθησίας της μεθόδου- προσθέτουμε 0,5ml διαλύματος  $\text{ZnSO}_4$  και αναμιγνύουμε καλά. Προσθέτουμε λίγες σταγόνες διαλύματος  $\text{NaOH}$  (0,2 – 0,25ml) (συνήθως 1-4N),

ώστε το pH να φτάσει στην τιμή 10,5. Αφήνουμε το μίγμα για λίγα λεπτά (έως 10min) μέχρις ότου καταβυθιστεί ένα βαρύ ίζημα και μείνει ένα καθαρό και άχρωμο υπερκείμενο υγρό. Ακολουθεί φυγοκέντρηση ή διήθηση.

- Η τιμή pH του προς μέτρηση διαλύματος δεν θα πρέπει να είναι ακραία και σε κάθε περίπτωση νέου είδος δείγματος θα πρέπει να ελέγχεται η επίδρασή της στο αποτέλεσμα
- Λαμβάνονται 10ml από το προεπεξεργασμένο (ή μη) δείγμα, το οποίο δεν πρέπει να παρουσιάζει θολερότητα ή χρώμα.
- Προστίθεται 1 σταγόνα (0,05ml) διαλύματος Rochelle και ακολουθεί ανάδευση (Vortex)
- Προστίθεται 0,2ml του αντιδραστήριου Nessler και ακολουθεί ανάδευση (Vortex)
- Μετά από ακριβώς 12 λεπτά, μετράται η απορρόφηση με το φασματοφωτόμετρο Hitachi 2000 σε μήκος κύματος 415nm (Πρόγραμμα 13).
- Καταγράφεται τόσο η απορρόφηση, όσο και η τιμή της συγκέντρωσης.

#### Υπολογισμοί

Η μέθοδος βασίζεται στο νόμο Lambert – Beer (η απορρόφηση μιας ακτινοβολίας, όταν περνά μέσα από ένα διάλυμα, είναι ανάλογη της συγκέντρωσης του διαλύματος). Ισχύει δηλαδή η σχέση:  $C = K (ABS-A_0)$ . Με τη βοήθεια κατάλληλου προγράμματος που χρησιμοποιεί την καμπύλη αναφοράς, η περιεκτικότητα του δείγματος σε αμμωνιακού αζώτου δίνεται κατευθείαν από το όργανο. Η τιμή αυτή πολλαπλασιάζεται με την αραιώση.

#### Παρατηρήσεις

Κατά τον χειρισμό του  $HgI_2$ , για την Παρασκευή του αντιδραστήριου Nessler πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή. Παρατηρήθηκε ότι ο  $HgI_2$  διαβρώνει το αλουμινόχαρτο, όταν αυτό χρησιμοποιείται για τη ζύγιση. Επίσης το αντιδραστήριο Nessler διαβρώνει τον μεταλλικό δακτύλιο του πάματος της φιάλης στην οποία τοποθετείται, ενώ οι ατμοί του και μόνο προκαλούν διάβρωση στο αλουμινόχαρτο.

Η καμπύλη αναφοράς πρέπει να επανακαθορίζεται για κάθε νέο αντιδραστήριο Nessler.

#### 6.4.5 Προσδιορισμός νιτρικού και νιτρώδους αζώτου

Ο προσδιορισμός των νιτρικών ( $NO_3^-$ ) γίνεται με βάση το πρότυπο ISO 7890/1-1986, Water quality – Determination of Nitrate - Part 1: 2,6 Dimethylphenol spectrometric method.

### Εύρος Συγκεντρώσεων:

Μπορούν να προσδιοριστούν συγκεντρώσεις νιτρικών ιόντων από 0,06 μέχρι 25mg/L στο δείγμα. Πρέπει να αναφερθεί ότι η μέθοδος δεν προτείνεται για προσδιορισμό ρυπασμένου νερού και ως εκ τούτου η ακρίβειά της πρέπει να ελεγχθεί.

### Παρεμποδίσεις:

- Η παρουσία νιτρώδων ιόντων σε συγκεντρώσεις τουλάχιστον μέχρι 5mg/L ελέγχονται από την προσθήκη amidosulfonic acid.
- Οι παρεμποδίσεις από την παρουσία χλωριόντων μπορεί να παρακαμφθεί χρησιμοποιώντας διάλυμα θεικού αργύρου (βλ. μέθοδο)

### Αρχή της μεθόδου

Τα νιτρικά ιόντα αντιδρούν με την 2,6-dimethylphenol, παρουσία θεικού και φωσφορικού οξέος για παραγωγή 4-nitro-2,6-dimethylphenol. Ο χρόνος της αντίδρασης είναι περίπου 5 λεπτά. Ο φωτομετρικός προσδιορισμός της απορρόφησης του προϊόντος της αντίδρασης στα 324nm γίνεται χρησιμοποιώντας καμπύλη αναφοράς.

### Αντιδραστήρια

Διάλυμα 2,6-Dimethylphenol 1,2g/L

0,12±0,01g 2,6-Dimethylphenol (2,6-Xylenol) διαλύονται σε 100±1ml οξικού οξέος (glacial acetic acid, ρ=1,05g/mL No 10). Το διάλυμα αποθηκεύεται σε γυάλινη φιάλη και είναι σταθερό για μία εβδομάδα.

### Οξίνο διάλυμα

Προσεκτικά αναμιγνύονται 500±5mL θεικού οξέος (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) (ρ=1,84g/mL) με 500±5mL ορθοφωσφορικού οξέος (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) (ρ=1,69 g/mL), σε ποτήρι ζέσεως των 2L. Προστίθενται 0,040±0,005ml amidosulfonic acid (NH<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>H) στο μίγμα. Το διάλυμα αποθηκεύεται σε γυάλινη φιάλη και είναι σταθερό για απεριόριστο χρονικό διάστημα.

### Stock διάλυμα Νιτρικών Ιόντων, [N]=1000mg/L



Διαλύονται  $7,218 \pm 0,001$ g νιτρικού καλίου (Potassium Nitrate  $\text{KNO}_3$  – No 111), το οποίο θα πρέπει πρώτα να έχει ξηρανθεί στους  $105^\circ\text{C}$  για τουλάχιστον 2 ώρες, σε περίπου 750mL νερού. Συμπληρώνεται νερό μέχρι τη χαραγή του 1L. Να αποθηκεύεται σε γυάλινη φιάλη για μέχρι 2 μήνες.

#### Νιτρικά – Πρότυπα διαλύματα

50mL του stock διαλύματος αραιώνονται σε ογκομετρική φιάλη των 500mL για παρασκευή standard διαλύματος νιτρικών. Στη συνέχεια, σε ογκομετρικές φιάλες των 100mL αραιώνονται 1, 5, 10, 15, 20 και 25mL του standard διαλύματος για παρασκευή διαλυμάτων  $\text{NO}_3\text{-N}$  1, 5, 10, 15, 20 και 25mg/L αντίστοιχα.

Τα διαλύματα αυτά διατηρούνται για μέχρι μία εβδομάδα σε γυάλινα δοχεία.

#### Διαδικασία

7mL του όξινου διαλύματος τοποθετούνται σε δοκιμαστικό σωλήνα των 20mL. Προστίθεται 1mL του δείγματος (το οποίο θα πρέπει πρώτα να έχει φυγοκεντριστεί), 1mL του διαλύματος 2,6-Dimethylphenol και το μείγμα αναδεύεται και αφήνεται για 10 με 60 λεπτά.

Μετά το πέρας του προκαθορισμένου χρόνου, ο οποίος θα πρέπει να διατηρείται σταθερός για όλα τα δείγματα (πχ 30 λεπτά), μετράται η απορρόφηση του διαλύματος στα 324nm.

#### 6.4.6 Προσδιορισμός νιτρικού ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) και νιτρώδους αζώτου ( $\text{NO}_2\text{-N}$ )

Ο προσδιορισμός των νιτρικών ( $\text{NO}_3^-$ ) γίνεται με βάση το πρότυπο ISO 7890/1-1986, Water quality – Determination of Nitrate - Part 1: 2,6 Dimethylphenol spectrometric method.

#### Εύρος Συγκεντρώσεων:

Μπορούν να προσδιοριστούν συγκεντρώσεις νιτρικών ιόντων από 0,06 μέχρι 25mg/L στο δείγμα. Πρέπει να αναφερθεί ότι η μέθοδος δεν προτείνεται για προσδιορισμό ρυπασμένου νερού και ως εκ τούτου η ακρίβειά της πρέπει να ελεγχθεί.

#### Παρεμποδίσεις:

- Η παρουσία νιτρώδων ιόντων σε συγκεντρώσεις τουλάχιστον μέχρι 5mg/L ελέγχονται από την προσθήκη amidosulfonic acid.

- Οι παρεμποδίσεις από την παρουσία χλωριόντων μπορεί να παρακαμφθεί χρησιμοποιώντας διάλυμα θεικού αργύρου (βλ. μέθοδο)

Αρχή της μεθόδου

Τα νιτρικά ιόντα αντιδρούν με την 2,6-dimethylphenol, παρουσία θεικού και φωσφορικού οξέος για παραγωγή 4-nitro-2,6-dimethylphenol. Ο χρόνος της αντίδρασης είναι περίπου 5 λεπτά. Ο φωτομετρικός προσδιορισμός της απορρόφησης του προϊόντος της αντίδρασης στα 324nm γίνεται χρησιμοποιώντας καμπύλη αναφοράς.

#### Αντιδραστήρια

Διάλυμα 2,6-Dimethylphenol 1,2g/L

0,12±0,01g 2,6-Dimethylphenol (2,6-Xylenol) διαλύονται σε 100±1ml οξικού οξέος (glacial acetic acid, ρ=1,05g/mL No 10). Το διάλυμα αποθηκεύεται σε γυάλινη φιάλη και είναι σταθερό για μία εβδομάδα.

#### Οξίνο διάλυμα

Προσεκτικά αναμιγνύονται 500±5mL θεικού οξέος (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) (ρ=1,84g/mL) με 500±5mL ορθοφωσφορικού οξέος (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) (ρ=1,69 g/mL), σε ποτήρι ζέσεως των 2L. Προστίθενται 0,040±0,005ml amidosulfonic acid (NH<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>H) στο μίγμα. Το διάλυμα αποθηκεύεται σε γυάλινη φιάλη και είναι σταθερό για απεριόριστο χρονικό διάστημα.

#### Stock διάλυμα Νιτρικών Ιόντων, [N]=1000mg/L

Διαλύονται 7,218 ± 0,001g νιτρικού καλίου (Potassium Nitrate KNO<sub>3</sub> – No 111), το οποίο θα πρέπει πρώτα να έχει ξηρανθεί στους 105°C για τουλάχιστον 2 ώρες, σε περίπου 750mL νερού. Συμπληρώνεται νερό μέχρι τη χαραγή του 1L. Να αποθηκεύεται σε γυάλινη φιάλη για μέχρι 2 μήνες.

#### Νιτρικά – Πρότυπα διαλύματα

50mL του stock διαλύματος αραιώνονται σε ογκομετρική φιάλη των 500mL για παρασκευή standard διαλύματος νιτρικών. Στη συνέχεια, σε ογκομετρικές φιάλες των 100mL αραιώνονται 1, 5, 10, 15, 20 και 25mL του standard διαλύματος για παρασκευή διαλυμάτων NO<sub>3</sub>-N 1, 5, 10, 15, 20 και 25mg/L αντίστοιχα.

Τα διαλύματα αυτά διατηρούνται για μέχρι μία εβδομάδα σε γυάλινα δοχεία.

### Διαδικασία

7mL του όξινου διαλύματος τοποθετούνται σε δοκιμαστικό σωλήνα των 20mL. Προστίθεται 1mL του δείγματος (το οποίο θα πρέπει πρώτα να έχει φυγοκεντριστεί), 1mL του διαλύματος 2,6-Dimethylphenol και το μείγμα αναδεύεται και αφήνεται για 10 με 60 λεπτά.

Μετά το πέρας του προκαθορισμένου χρόνου, ο οποίος θα πρέπει να διατηρείται σταθερός για όλα τα δείγματα (πχ 30 λεπτά), μετράται η απορρόφηση του διαλύματος στα 324nm.

### 6.4.7 Προσδιορισμός φωσφόρου (TP)

Ο φώσφορος στα φυσικά νερά και στα απόβλητα βρίσκεται συνήθως με την μορφή διαφόρων τύπων φωσφορικών. Αυτές οι μορφές συνήθως διακρίνονται σε ορθοφωσφορικά, σε συμπυκνωμένα φωσφορικά( πύρο-, μετά- και πολυφωσφορικά) και οργανικά ενωμένα φωσφορικά. Ο προσδιορισμός του P ολοκληρώνεται σε δύο στάδια:

1. Μετατροπή της μορφής του P που μας ενδιαφέρει σε ευδιάλυτα ορθοφωσφορικά
2. Χρωματομετρικό προσδιορισμό των ευδιάλυτων ορθοφωσφορικών

Τα φωσφορικά που ανταποκρίνονται στις φωτομετρικές αναλύσεις χωρίς προκαταρκτική υδρόλυση ή οξειδωτική χώνευση του δείγματος αναφέρονται ως ορθοφωσφορικά. Τα κλάσματα των φωσφορικών που μετατρέπονται σε ορθοφωσφορικά μόνο με οξειδωτική αποσύνθεση του οργανικού υλικού, αναφέρονται ως οργανικά ή οργανικά ενωμένα φωσφορικά. Για τα συμπυκνωμένα φωσφορικά προτιμάται ο όρος φωσφορικά υδρολυόμενα με οξύ, γιατί με όξινη υδρόλυση στα θερμοκρασία βρασμού του νερού μετατρέπονται σε ορθοφωσφορικά.

Εφαρμόζεται η μέθοδος  $\text{SnCl}_2$  για τον προσδιορισμό μόνο των ορθοφωσφορικών και όχι του ολικού P. Συνήθως παραλείπεται το στάδιο της χώνευσης και γίνεται απευθείας χρωματομετρικός προσδιορισμός.

### Αρχή της μεθόδου

Σε ένα αραιωμένο διάλυμα ορθοφωσφορικών, το μολυβδαινικό αμμώνιο αντιδρά κάτω από όξινες συνθήκες και σχηματίζει ένα ετεροπολικό οξύ το μολυβδοφωσφορικό οξύ. Αυτό ανάγεται μέσω του  $\text{SnCl}_2$  στο έντονα έγχρωμα μπλε σύμπλοκο του μολυβδαινίου.

### Αντιδραστήρια

- Διάλυμα μολυβδαινικού αμμωνίου  $(\text{NH}_4)_6 \text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ : 25 γρ  $(\text{NH}_4)_6 \text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  σε 175 mL απιονισμένο νερό( Διάλυμα Α). 280 mL π.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  προσθέτονται προσεκτικά σε 400 mL

απιονισμένο νερό και το μίγμα αφήνεται να κρυώσει (Διάλυμα Β). Τα δύο διαλύματα αναμιγνύονται και αραιώνονται στο 1 L.

- Διάλυμα  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ : 2,5 γρ  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  διαλύονται σε 100 mL γλυκερόλης. Η διάλυση επιταχύνεται με την θέρμανση σε υδρόλουτρο και ανάδευση. Αυτό το αντιδραστήριο είναι σταθερό και δεν απαιτεί ούτε ειδική ούτε συντηρητική αποθήκευση.
- Πρότυπο διάλυμα φωσφορικών: 219,5 mg άνυδρου  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  διαλύονται στο απιονισμένο νερό και αραιώνονται στο 1 L (50 ppm). Σημ:  $\text{MB}_{\text{KH}_2\text{PO}_4} = 136,1$ ,  $\text{MB}_\text{P} = 31$ .

### Διαδικασία

Σε 50 mL αραιωμένου ή όχι δείγματος προσθέτουμε μια σταγόνα δείκτη φαινολοφθαλεΐνης. Αν το δείγμα γίνει ροζ τότε προσθέτουμε  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1 N ώσπου το δείγμα να αλλάξει χρώμα. Αυτό συμβαίνει όταν το pH γίνει όξινο. Λαμβάνουμε 10 mL από το δείγμα. Προσθέτουμε αναδεύοντας 0,4 mL μολυβδαινικού αμμωνίου και 0,05 mL διαλύματος  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (2 σταγόνες με το σιφόνι των 2 mL). Μετά από ανάδευση 10 λεπτών (όχι παραπάνω από 12 και πάντα ο ίδιος χρόνος) μετράμε την απορρόφηση στα 705 nm.

### Υπολογισμοί

Με την βοήθεια κατάλληλου προγράμματος που χρησιμοποιεί την καμπύλη αναφοράς, η περιεκτικότητα του δείγματος σε ppm P- $\text{PO}_4$  δίνεται απευθείας από το όργανο.

## 7. Πειραματικά αποτελέσματα

### 7.1 Χαρακτηρισμός αερόβιας βιολογικής ιλύος

Η βιολογική ιλύς που παραλήφθηκε από την Ψυττάλεια χαρακτηρίστηκε φυσικοχημικά και προέκυψε ότι είχε τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Υγρασία 78% (w.b.)

Ολικά στερεά 22% (w.b.)

Πτητικά στερεά 62% (d.b.)

Τέφρα 38% (d.b.)

TN 102mg/L

TP 54mg/L

TOC 76mg/L

pH 8,18

Αγωγιμότητα 820μS/cm

### 7.2 Πειραματικά αποτελέσματα νιτροποίησης σε εργαστηριακή κλίμακα

Σκοπός των πειραμάτων νιτροποίησης σε εργαστηριακή κλίμακα ήταν να ελεγχθεί η πρόοδος της νιτροποίησης και η δυνατότητα συσσώρευσης των νιτρικών ιόντων χωρίς παρεμπόδιση της βιολογικής διεργασίας ώστε να εξασφαλιστεί η τροφοδοσία υψηλής συγκέντρωσης νιτρικών που απαιτείται για τη βιολογική αποθείωση.

Τα αποτελέσματα της καθημερινής παρακολούθησης του εργαστηριακού βιολογικού αντιδραστήρα παρουσιάζονται στους ακόλουθους Πίνακες.

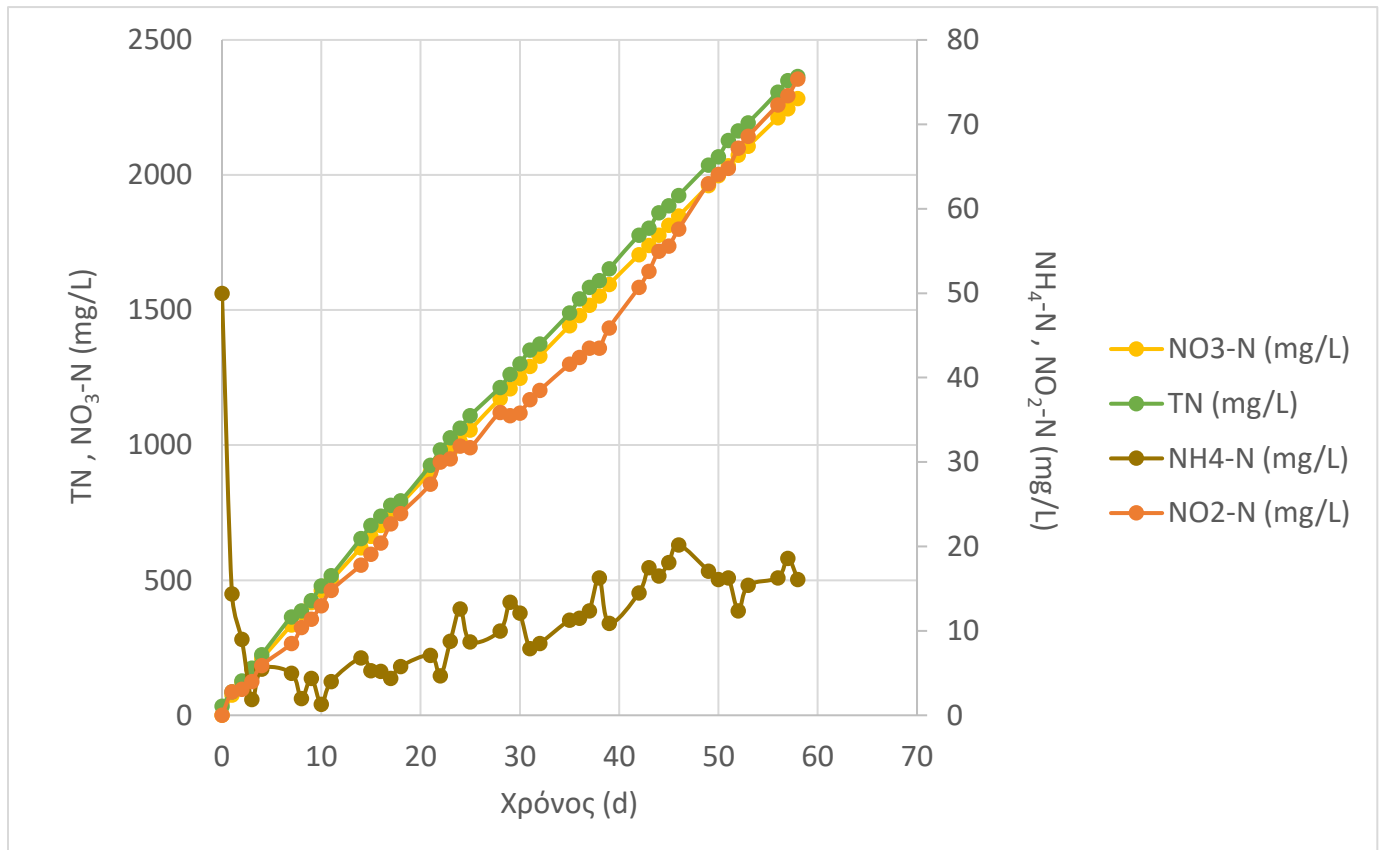
Πίνακας 4: Πειραματικά αποτελέσματα εργαστηριακού βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης ως προς τη συγκέντρωση των μακροθρεπτικών αζώτου και φωσφόρου

Χρόνος (d)	NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	NO <sub>2</sub> -N (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
0	50.0	0.2	0.01	34.4	27.0
1	14.4	75.9	2.8	87.4	26.1
2	9.0	123.0	3.1	127.4	25.9

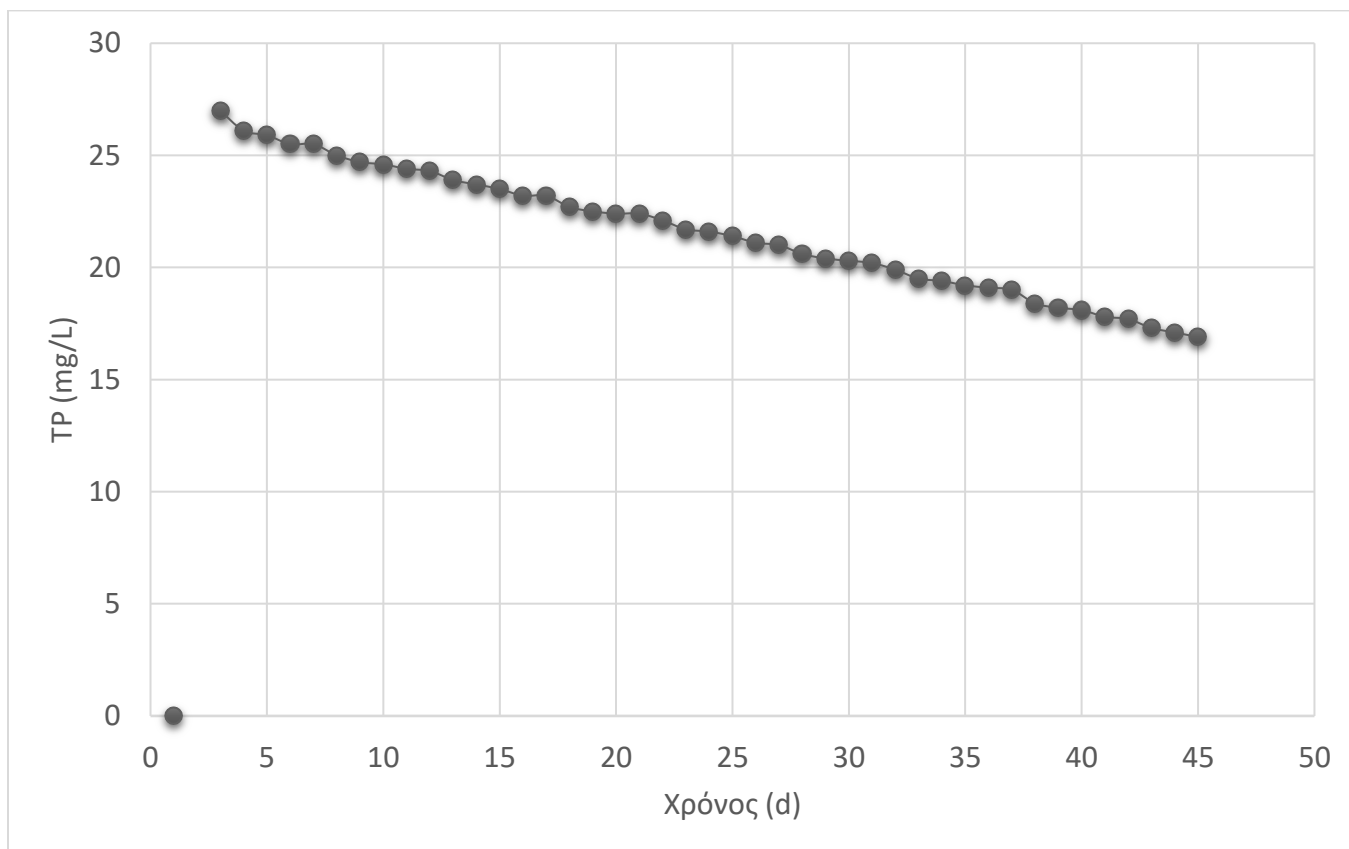
3	1.9	171.6	4.0	175.0	25.5
4	5.5	210.0	5.9	224.2	25.5
7	5.0	335.2	8.5	365.0	25.0
8	2.0	379.4	10.4	386.8	24.7
9	4.4	418.3	11.4	424.6	24.6
10	1.3	462.4	13.0	478.9	24.4
11	4.0	500.7	14.8	516.7	24.3
14	6.8	620.5	17.8	654.9	23.9
15	5.3	662.4	19.1	703.2	23.7
16	5.2	702.9	20.4	737.0	23.5
17	4.4	743.8	22.7	777.6	23.3
18	5.8	782.5	23.9	794.0	23.2
21	7.1	900.8	27.4	926.2	22.7
22	4.7	942.5	30.0	983.3	22.5
23	8.8	978.1	30.4	1027.5	22.4
24	12.6	1013.8	31.9	1062.8	22.4
25	8.7	1056.8	31.7	1109.1	22.1
28	10.0	1172.8	35.9	1213.9	21.7
29	13.4	1208.6	35.5	1262.4	21.6
30	12.1	1248.7	35.8	1301.3	21.4
31	7.9	1291.5	37.4	1352.6	21.1
32	8.5	1329.6	38.5	1374.9	21.0
35	11.3	1442.4	41.6	1489.3	20.6
36	11.5	1480.5	42.4	1541.3	20.4
37	12.4	1517.9	43.5	1584.3	20.3
38	16.3	1552.4	43.5	1609.9	20.2
39	10.9	1595.4	45.9	1652.8	19.9
42	14.5	1705.2	50.7	1777.8	19.5
43	17.5	1739.7	52.6	1803.5	19.4
44	16.5	1777.8	55.0	1860.8	19.2

45	18.1	1813.3	55.6	1886.6	19.1
46	20.0	1848.4	57.6	1924.7	19.0
49	17.1	1961.0	63.0	2037.4	18.4
50	16.1	1998.2	64.1	2067.6	18.2
51	16.3	2034.2	64.8	2128.6	18.1
52	12.4	2073.9	67.2	2164.2	17.8
53	15.4	2106.8	68.6	2193.6	17.7
56	16.3	2212.7	72.3	2307.6	17.3
57	18.6	2245.9	73.4	2350.0	17.1
58	16.1	2283.5	75.4	2364.7	16.9

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 4 παριστάνονται και διαγραμματικά στα ακόλουθα σχήματα (Εικόνα 36 και Εικόνα 37).



Εικόνα 36: Μεταβολή της συγκέντρωσης των μορφών του αζώτου στον εργαστηριακό βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης



Εικόνα 37: Μεταβολή της συγκέντρωσης του ολικού φωσφόρου στον εργαστηριακό βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης

Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρούμε μια σταδιακή συσσώρευση νιτρικού αζώτου μέχρι συγκέντρωσης 2,3 g/L. Η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου επίσης αυξάνεται αλλά η αύξηση αυτή είναι όμως πολύ μικρή από 1,3 έως 48,7 mg/L. Συσσώρευση παρατηρείται και στη συγκέντρωση του νιτρώδους αζώτου, με μέγιστη παρατηρούμενη συγκέντρωση 75,4 mg/L μετά από 2 μήνες λειτουργίας της μονάδας. Από τα αποτελέσματα αυτά μπορεί κανείς να διακρίνει πρωτογενώς ότι επιτυγχάνεται η μετατροπή του αμμωνιακού αζώτου σε νιτρικό, επιτυγχάνεται δηλαδή νιτροποίηση.

Όσον αφορά τη συγκέντρωση του ολικού φωσφόρου, παρατηρήθηκε μια ελάχιστη σταδιακή μείωση της συγκέντρωσης αυτής από 27 έως 16,9 mg/L. Ο φώσφορος καταναλώνεται κατά την παραγωγή βιομάζας και επομένως είναι απαραίτητος και για την πρόοδο της νιτροποίησης. Αυτός άλλωστε ήταν ο λόγος που είχαμε επιλέξει να προσθέτουμε και το εμπορικό λίπασμα NPK, για να καλύψουμε τις



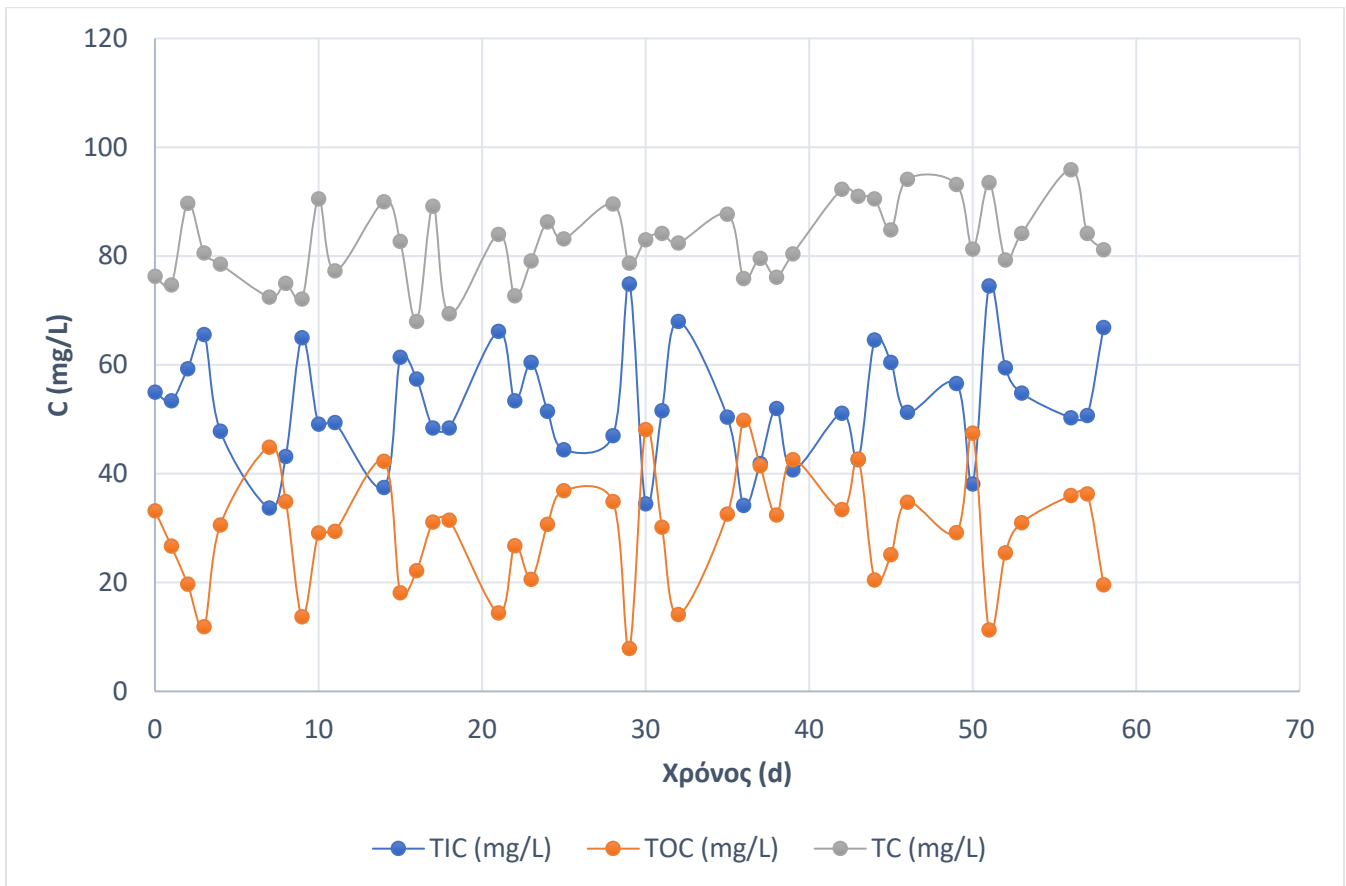
ανάγκες της βιομάζας σε φώσφορο. Προκύπτει λοιπόν ότι η δοσολογία που είχαμε επιλέξει ήταν κατάλληλη.

Στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 5) και Εικόνα 38 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του εργαστηριακού βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης ως προς τη συγκέντρωση του άνθρακα (οργανικού, ανόργανου και συνολικού).

Πίνακας 5: Πειραματικά αποτελέσματα εργαστηριακού βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης ως προς τη συγκέντρωση του άνθρακα (οργανικού, ανόργανου και συνολικού)

<b>Χρόνος (d)</b>	<b>TIC (mg/L)</b>	<b>TOC (mg/L)</b>	<b>TC (mg/L)</b>
0	55.0	33.2	76.3
1	53.4	26.7	74.7
2	59.3	19.7	89.7
3	65.6	11.9	80.6
4	47.8	30.6	78.5
7	33.7	44.9	72.5
8	43.2	34.9	75.0
9	65.0	13.7	72.1
10	49.1	29.1	90.5
11	49.4	29.4	77.3
14	37.5	42.3	90.0
15	61.4	18.1	82.7
16	57.4	22.2	68.0
17	48.4	31.1	89.2
18	48.4	31.5	69.4
21	66.2	14.4	84.0
22	53.4	26.8	72.7
23	60.5	20.6	79.1
24	51.5	30.7	86.3
25	44.4	36.9	83.2
28	47.0	34.9	89.6

29	74.9	7.9	78.7
30	34.5	48.1	83.3
31	51.6	30.2	84.2
32	68.0	14.1	82.4
35	50.4	32.6	87.7
36	34.2	48.9	75.9
37	41.9	41.5	79.6
38	52.0	32.4	76.1
39	40.7	42.6	80.4
42	51.1	33.4	92.3
43	42.6	42.7	91.0
44	64.6	20.5	90.5
45	60.5	25.1	84.8
46	51.3	34.8	94.1
49	56.6	29.2	93.2
50	38.1	47.5	81.3
51	74.5	11.3	93.5
52	59.5	25.5	79.3
53	54.8	31.0	84.2
56	50.3	36.0	95.9
57	50.7	36.3	84.2
58	66.9	19.6	81.2



Εικόνα 38: Συγκέντρωση άνθρακα (οργανικού, ανόργανου και συνολικού) στον εργαστηριακό βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης

Από τις τιμές του ανωτέρω πίνακα (Πίνακας 5) και της παραπάνω εικόνας (Εικόνα 38), παρατηρούμε ότι οι συγκεντρώσεις όλων των μορφών του άνθρακα δεν παρουσιάζουν κάποια συγκεκριμένη τάση αλλά κινούνται γύρω από μια μέση τιμή. Πιο συγκεκριμένα οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων είναι:

Ανόργανος άνθρακας:  $53,6 \pm 10,6 \text{ mg/L}$

Οργανικός άνθρακας:  $28,8 \pm 10,6 \text{ mg/L}$

Ολικός άνθρακας:  $82,8 \pm 6,9 \text{ mg/L}$ .

Η συγκέντρωση του ολικού άνθρακα παρουσιάζει τη μικρότερη διακύμανση, γεγονός που υποδεικνύει ότι κατά την πρόοδο της νιτροποίησης αλλά και της κατανάλωσης οργανικού άνθρακα από τους ετερότροφους οργανισμούς που είναι παρόντες στο οικοσύστημα του αντιδραστήρα ο άνθρακας αλλάζει μορφή, δηλαδή καταναλώνεται άνθρακας από αυτότροφους (ανόργανος) και ετερότροφους (οργανικός)

μικροοργανισμούς για την παραγωγή κυτταρικής μάζας οι οποίοι όμως πεθαίνουν παράγοντας οργανικό άνθρακα. Επιπλέον, από τις παρατηρούμενες διακυμάνσεις προκύπτει ότι η δοσολογία του όξινου ανθρακικού νατρίου που προσθέτονταν ήταν ικανοποιητική.

### 7.3 Επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων νιτροποίησης σε εργαστηριακή κλίμακα

Από τις πειραματικές μετρήσεις στον βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης καθώς και από τα δεδομένα φόρτισης του αντιδραστήρα, είναι δυνατό να υπολογιστεί η απόδοση της διεργασίας νιτροποίησης, δηλαδή το ποσοστό του διαθέσιμου αμμωνιακού αζώτου που μετατράπηκε σε νιτρικό άζωτο:

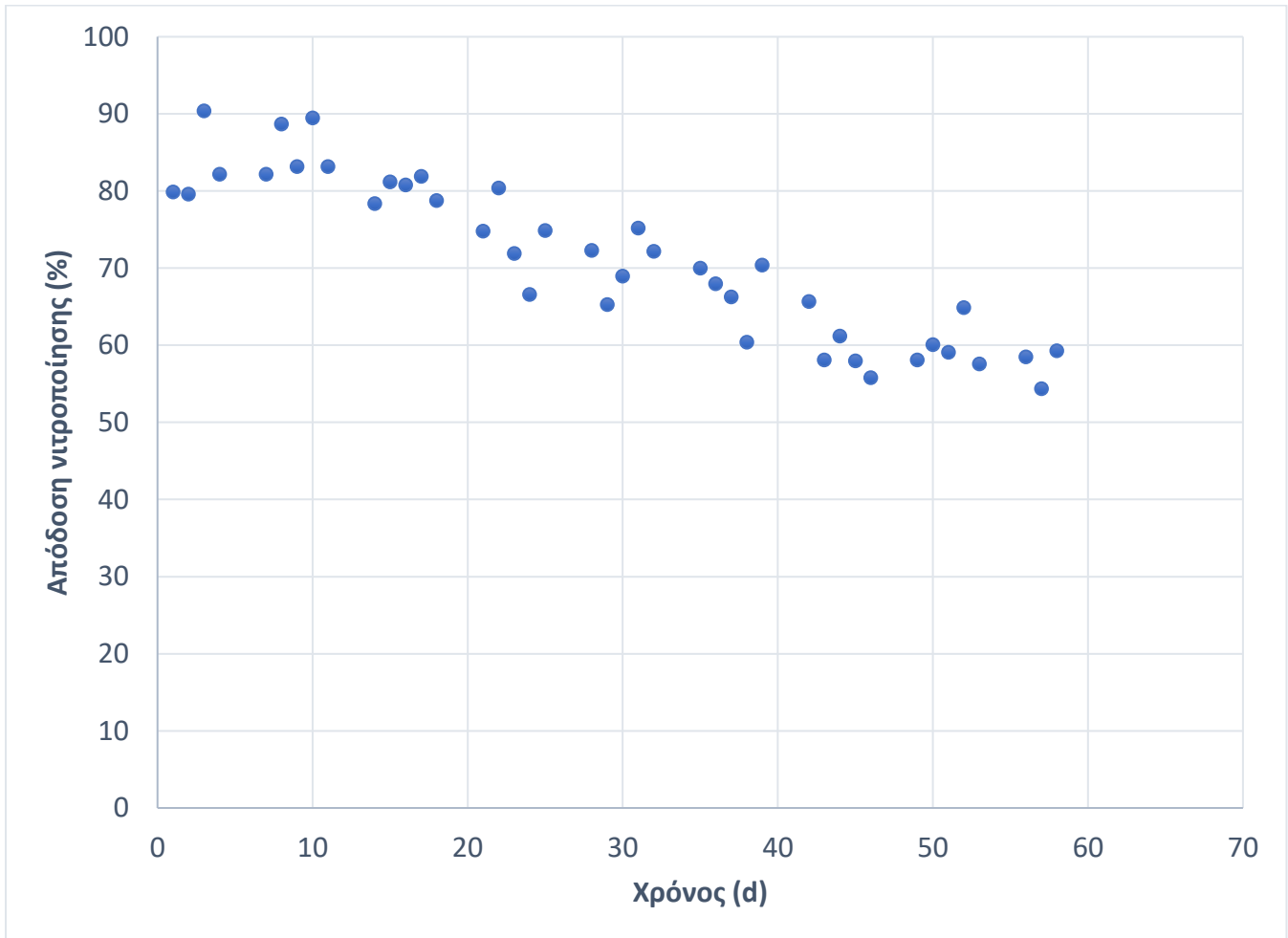
$$\% \text{ Απόδοση νιτροποίησης} = \frac{\text{Νιτρικό άζωτο που παράχθηκε}}{\text{Διαθέσιμο αμμωνιακό άζωτο}} \cdot 100$$

Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 6 και στην Εικόνα 39:

Πίνακας 6: Απόδοση της διεργασίας νιτροποίησης στην εργαστηριακή κλίμακα

<b>Χρόνος (d)</b>	<b>Απόδοση νιτροποίησης (%)</b>
1	79.9
2	79.6
3	90.4
4	82.2
7	82.2
8	88.7
9	83.2
10	89.5
11	83.2
14	78.4
15	81.2
16	80.8
17	81.9

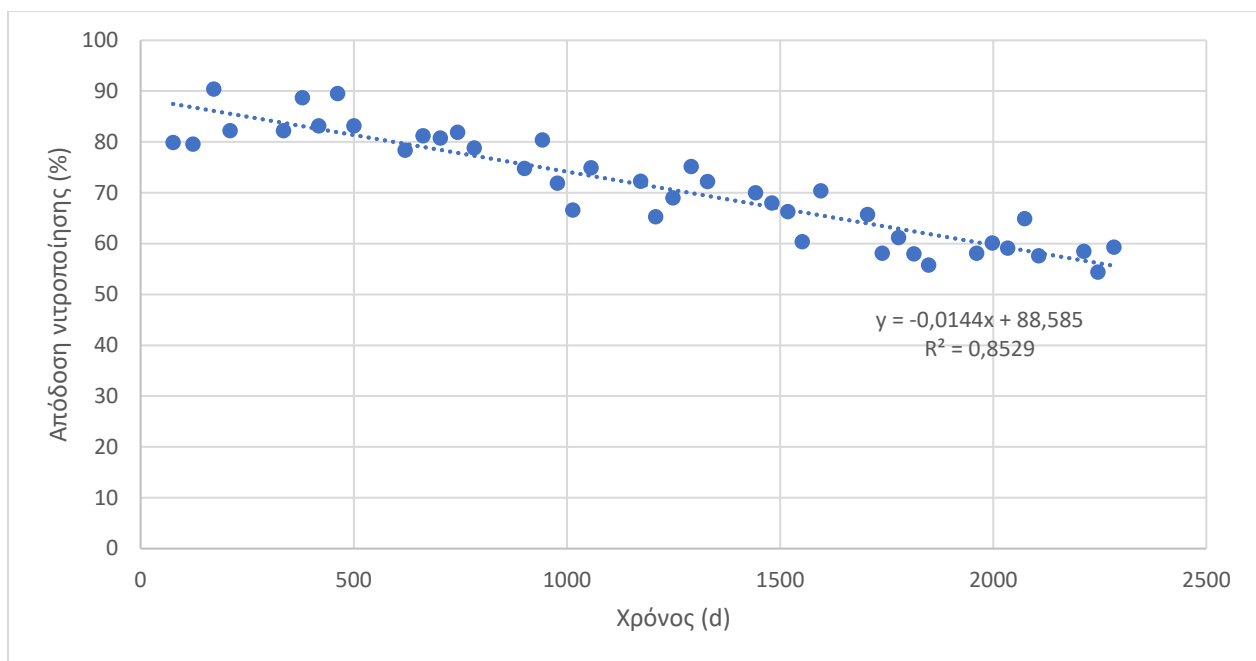
18	78.8
21	74.8
22	80.4
23	71.9
24	66.6
25	74.9
28	72.3
29	65.3
30	69.0
31	75.2
32	72.2
35	70.0
36	68.0
37	66.3
38	60.4
39	70.4
42	65.7
43	58.1
44	61.2
45	58.0
46	55.8
49	58.1
50	60.1
51	59.1
52	64.9
53	57.6
56	58.5
57	54.4
58	59.3



Εικόνα 39: Απόδοση της διεργασίας νιτροποίησης στον εργαστηριακό βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης

Από την εικόνα 39 παρατηρούμε ότι η απόδοση της νιτροποίησης εμφανίζει μια ελαφριά πτωτική πορεία με την πάροδο του χρόνου, δηλαδή όσο συσσωρεύονται νιτρικά ιόντα. Παρόλα αυτά στη διάρκεια των δύο μηνών η μέση τιμή της απόδοσης ήταν  $71,0 \pm 10,6\%$  που κρίνεται πολύ ικανοποιητική για αερόβια βιολογικά συστήματα.

Προκειμένου να ελεγχθεί εάν υπάρχει κάποια συσχέτιση κατασκευάστηκε το ακόλουθο διάγραμμα (Εικόνα 40) από όπου διακρίνεται μια ήπια γραμμική συσχέτιση ( $R^2 = 0,8529$ ), δηλαδή όσο αυξάνεται η συγκέντρωση του νιτρικού αζώτου, μειώνεται η απόδοση νιτροποίησης.



Εικόνα 40: Συσχέτιση συγκέντρωσης νιτρικού αζώτου με απόδοση νιτροποίησης

#### 7.4 Πειραματικά αποτελέσματα νιτροποίησης σε πιλοτική κλίμακα

Στην πρώτη φάση λειτουργίας του πιλοτικού αντιδραστήρα νιτροποίησης, σκοπός των πειραμάτων ήταν να εγκλιματιστεί η αερόβια ιλύς στο συνθετικό διάλυμα αμμωνιακών ιόντων αλλά και να ελεγχθούν οι λειτουργικές συνθήκες που εφαρμόστηκαν σε εργαστηριακή κλίμακα (45g/L<sub>r</sub>/d). Τελικός στόχος ήταν να εξασφαλιστεί η τροφοδοσία υψηλής συγκέντρωσης νιτρικών που απαιτείται για τη βιολογική αποθείωση.

Τα αποτελέσματα της καθημερινής παρακολούθησης του πιλοτικού βιολογικού αντιδραστήρα νιτροποίησης παρουσιάζονται στους ακόλουθους Πίνακες (Πίνακας 7 και 8).

Πίνακας 7: Πειραματικά αποτελέσματα πιλοτικού βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης ως προς τη συγκέντρωση των μακροθρεπτικών αζώτου και φωσφόρου

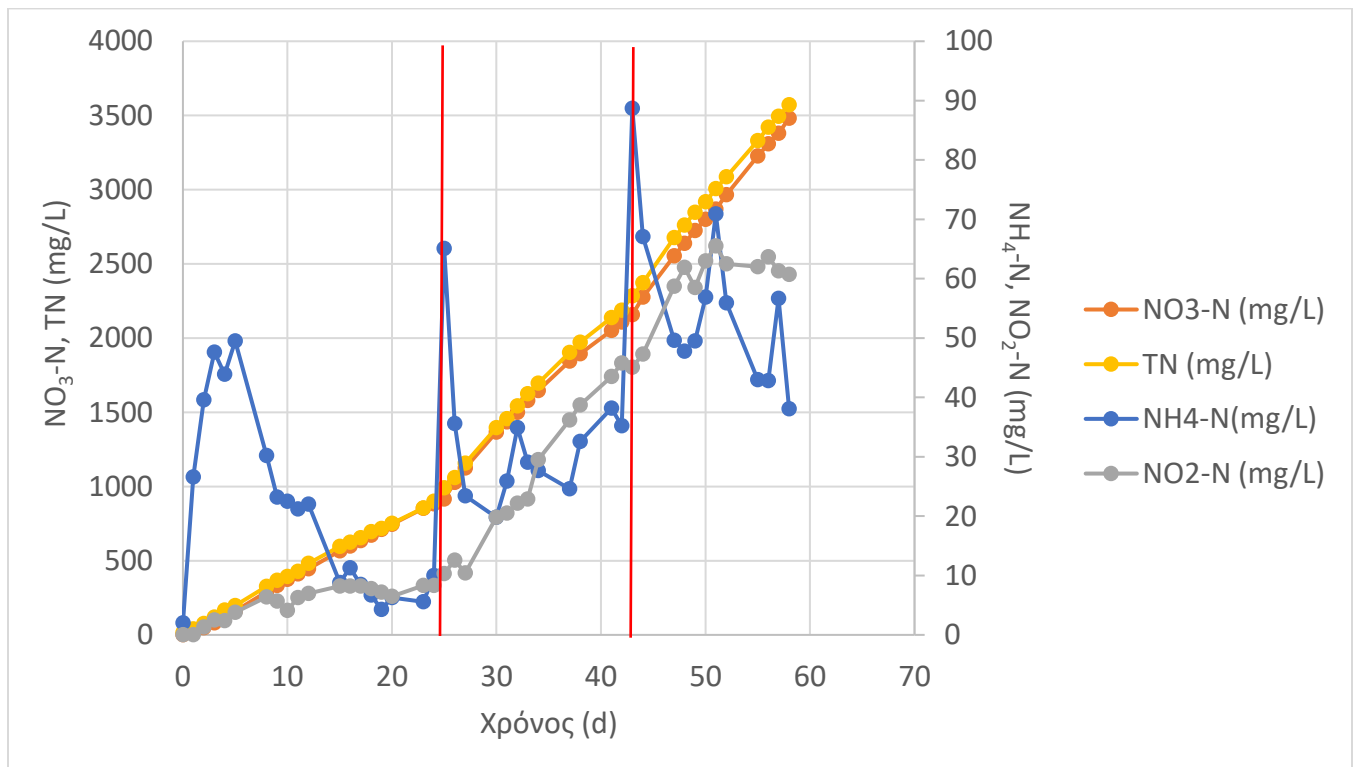
Χρόνος (d)	Φόρτιση (g/L <sub>r</sub> /d)	NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	NO <sub>2</sub> -N (mg/L)	TN (mg/L)	P (mg/L)
0	45	2.0	0.2	0.01	15.4	1.00
1	45	26.6	19.6	n.d.	38.8	1.46
2	45	39.6	48.9	1.3	76.0	1.68

3	45	47.6	81.6	2.5	119.4	1.80
4	45	43.9	125.6	2.4	166.8	1.68
5	45	49.5	159.4	3.8	197.9	1.76
8	45	30.2	289.7	6.4	327.0	1.25
9	45	23.2	333.5	5.7	367.7	1.07
10	45	22.5	372.9	4.1	392.5	1.02
11	45	21.2	410.8	6.3	428.2	0.95
12	45	22.0	446.0	7.0	480.7	0.93
15	45	8.8	565.5	8.2	595.2	0.55
16	45	11.3	597.9	8.2	623.3	0.57
17	45	8.5	635.4	8.2	653.2	0.47
18	45	6.7	672.2	7.8	694.5	0.40
19	45	4.3	710.2	7.2	716.1	0.32
20	45	6.3	744.7	6.5	751.1	0.32
23	45	5.6	852.4	8.3	853.8	0.20
24	45	10.0	883.0	8.3	899.6	0.25
25	100	65.1	916.2	10.3	991.5	1.33
26	100	35.6	1027.0	12.6	1060.5	0.72
27	100	23.4	1123.4	10.4	1155.7	0.46
30	100	19.8	1365.3	19.8	1396.3	0.33
31	100	25.9	1434.9	20.5	1475.3	0.43
32	100	34.9	1500.1	22.2	1543.6	0.59
33	100	29.1	1578.7	22.9	1624.6	0.46
34	100	27.7	1646.9	29.5	1695.4	0.41
37	100	24.6	1843.7	36.2	1903.3	0.29
38	100	32.6	1894.4	38.7	1971.7	0.43
41	100	38.2	2052.2	43.5	2136.7	0.49
42	100	35.2	2106.6	45.8	2187.4	0.41
43	150	88.7	2156.4	45.1	2283.7	1.44
44	150	67.1	2274.8	47.3	2373.1	0.96

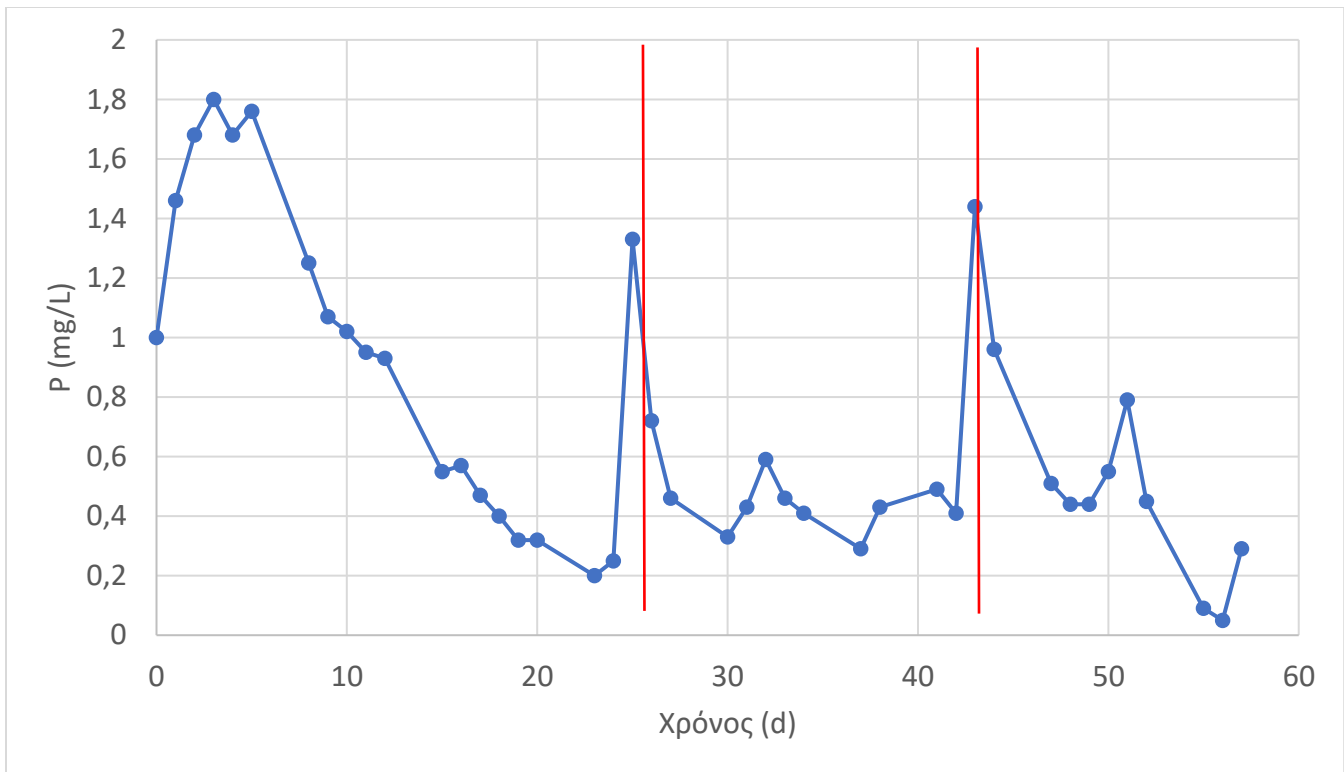


47	150	49.6	2553.3	58.7	2676.5	0.51
48	150	47.8	2638.9	61.9	2761.0	0.44
49	150	49.5	2724.4	58.5	2848.8	0.44
50	150	56.9	2800.3	63.0	2918.5	0.55
51	150	70.9	2867.9	65.5	3007.7	0.79
52	150	55.9	2965.5	62.5	3085.6	0.45
55	150	43.0	3225.6	62.0	3329.9	0.09
56	150	42.8	3307.9	63.7	3421.6	0.05
57	150	56.7	3379.2	61.3	3493.7	0.29
58	150	38.1	3481.6	60.7	3572.7	n.d.

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 7 παριστάνονται και διαγραμματικά στα ακόλουθα σχήματα (Εικόνα 41 και Εικόνα 42).



Εικόνα 41: Μεταβολή της συγκέντρωσης των μορφών του αζώτου στον πιλοτικό βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης



Εικόνα 42: Μεταβολή της συγκέντρωσης του ολικού φωσφόρου στον πιλοτικό βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης

Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρούμε μια σταδιακή συσσώρευση νιτρικού αζώτου μέχρι συγκέντρωσης 3,4 g/L. Η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου επίσης αυξάνεται μέχρι την 8<sup>η</sup> ημέρα, ενώ στη συνέχεια παρατηρούμε μείωση της ποσότητας μέχρι την 20<sup>η</sup> ημέρα. Το εύρος της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου κυμαίνεται από 2 mg/L έως 88,7 mg/L. Συσσώρευση παρατηρείται και στη συγκέντρωση του νιτρώδους αζώτου, με μέγιστη παρατηρούμενη συγκέντρωση 65,5 mg/L μετά από περίπου 2 μήνες λειτουργίας της μονάδας και διαδοχική αύξηση της φόρτισης των αμμωνιακών. Από τα αποτελέσματα αυτά μπορεί κανείς να διακρίνει πρωτογενώς ότι και πάλι επιτυγχάνεται η μετατροπή του αμμωνιακού αζώτου σε νιτρικό, επιτυγχάνεται δηλαδή νιτροποίηση.

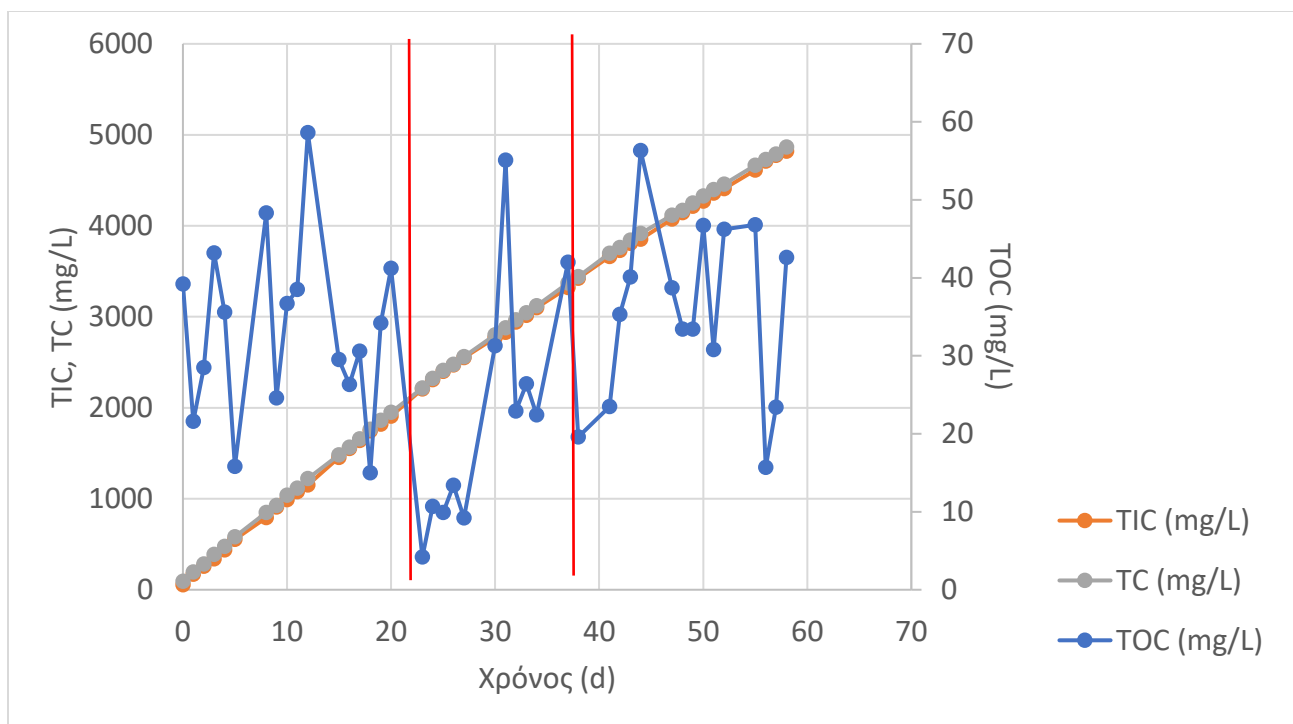
Όσον αφορά τη συγκέντρωση του ολικού φωσφόρου, παρατηρήθηκε μια ελάχιστη σταδιακή μείωση της συγκέντρωσης αυτής από 1,8 έως 0,05 mg/L. Ο φώσφορος καταναλώνεται κατά την παραγωγή βιομάζας και επομένως είναι απαραίτητος και για την πρόοδο της νιτροποίησης. Αυτός άλλωστε ήταν ο λόγος που είχαμε επιλέξει να προσθέτουμε και το εμπορικό λίπασμα NPK, για να καλύψουμε τις ανάγκες της βιομάζας σε φώσφορο. Προκύπτει λοιπόν ότι η δοσολογία που είχαμε επιλέξει ήταν κατάλληλη, παρότι στο πέρας της περιόδου φαίνεται να ελαχιστοποιείται τελείως η συγκέντρωσή του. Επομένως, ίσως θα ήταν σκοπιμότερη μια μεγαλύτερη δοσολογία φωσφόρου.

Στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 8) και Εικόνα 43 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πιλοτικού βιολογικού αντιδραστήρα νιτροποίησης ως προς τη συγκέντρωση του άνθρακα (οργανικού, ανόργανου και συνολικού).

Πίνακας 8: Πειραματικά αποτελέσματα πιλοτικού βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης ως προς τη συγκέντρωση του άνθρακα (οργανικού, ανόργανου και συνολικού)

Χρόνος (d)	Φόρτιση (g/Lr/d)	TIC (mg/L)	TOC (mg/L)	TC (mg/L)
0	45	55.0	39.2	92.7
1	45	170.9	21.6	193.7
2	45	259.5	28.5	281.3
3	45	339.2	43.2	388.2
4	45	438.5	35.6	476.1
5	45	552.1	15.8	580.7
8	45	793.0	48.3	848.3
9	45	907.7	24.6	927.0
10	45	988.1	36.7	1038.1
11	45	1078.6	38.5	1117.3
12	45	1151.2	58.6	1220.0
15	45	1455.2	29.5	1481.0
16	45	1551.6	26.3	1565.8
17	45	1639.3	30.6	1657.6
18	45	1747.1	15.0	1762.0
19	45	1820.0	34.2	1860.5
20	45	1906.1	41.2	1950.0
23	45	2220.8	4.2	2217.7
24	45	2307.9	10.7	2321.3
25	100	2401.2	9.9	2408.9
26	100	2471.0	13.4	2477.7
27	100	2552.5	9.2	2561.6
30	100	2769.8	31.3	2800.6

31	100	2827.5	55.1	2879.0
32	100	2941.8	22.9	2966.0
33	100	3017.1	26.4	3042.2
34	100	3100.8	22.4	3121.6
37	100	3320.6	42.0	3371.3
38	100	3424.9	19.6	3441.1
41	100	3662.4	23.5	3697.4
42	100	3730.1	35.3	3760.4
43	150	3805.9	40.1	3843.4
44	150	3853.3	56.3	3916.8
47	150	4072.7	38.7	4114.9
48	150	4146.2	33.4	4170.5
49	150	4215.2	33.4	4250.5
50	150	4272.1	46.7	4326.1
51	150	4359.8	30.8	4396.0
52	150	4409.5	46.2	4457.9
55	150	4611.7	46.8	4664.5
56	150	4711.4	15.7	4729.6
57	150	4775.5	23.4	4786.6
58	150	4820.7	42.6	4864.8



Εικόνα 43: Συγκέντρωση άνθρακα (οργανικού, ανόργανου και συνολικού) στον πιλοτικό βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης

Από τις τιμές του ανωτέρω πίνακα (Πίνακας 8) και της παραπάνω εικόνας (Εικόνα 43), παρατηρούμε ότι η συγκέντρωση του οργανικού άνθρακα δεν παρουσιάζει κάποια συγκεκριμένη τάση αλλά κινείται γύρω από μια μέση τιμή ( $30,2 \pm 13,4 \text{ mg/L}$ ). Από την άλλη πλευρά οι συγκεντρώσεις του ολικού και ανόργανου άνθρακα αυξάνονται συνεχώς μέχρι τις τιμές 4864,8 και 4820,7 mg/L αντίστοιχα. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι η δοσολογία του ανόργανου άνθρακα που είχε επιλεγεί ήταν μεγαλύτερη από αυτήν που χρειαζόταν. Βέβαια, δεν πρέπει κανείς να παραγνωρίζει και το γεγονός ότι τα αμμωνιακά ιόντα δεν μετατρέπονταν πλήρως σε νιτρικά, δεν ήταν δηλαδή πλήρης η νιτροποίηση η οποία θα απαιτούσε επιπλέον ανόργανο άνθρακα.

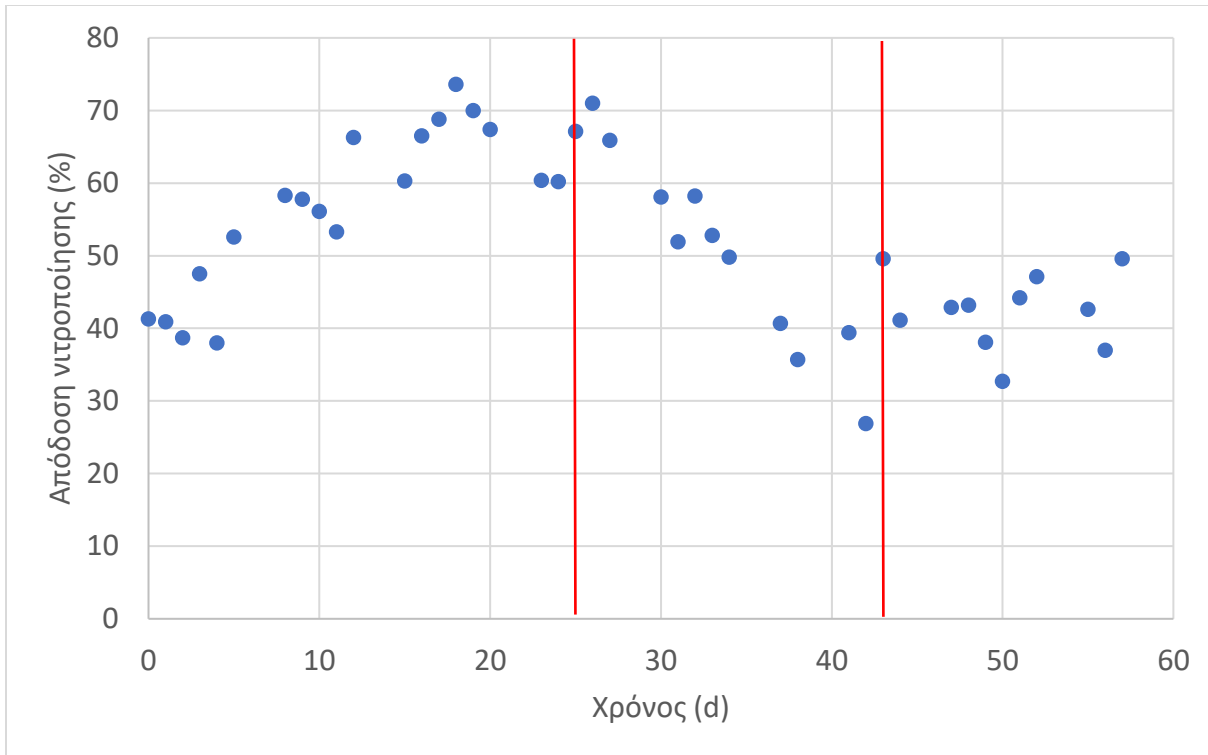
## 7.5 Επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων νιτροποίησης σε πιλοτική κλίμακα

Τα αποτελέσματα της απόδοσης νιτροποίησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 9 και στην Εικόνα 44:

Πίνακας 9: Απόδοση της διεργασίας νιτροποίησης στην πιλοτική κλίμακα

<b>Χρόνος (d)</b>	<b>Φόρτιση (g/Lr/d)</b>	<b>Απόδοση νιτροποίησης (%)</b>
0	45	
1	45	41.3
2	45	40.9
3	45	38.7
4	45	47.5
5	45	38.0
8	45	52.6
9	45	58.3
10	45	57.8
11	45	56.1
12	45	53.3
15	45	66.3
16	45	60.3
17	45	66.5
18	45	68.8
19	45	73.6
20	45	70.0
23	45	67.4
24	45	60.4
25	100	60.2
26	100	67.1
27	100	71.0

30	100	65.9
31	100	58.1
32	100	51.9
33	100	58.2
34	100	52.8
37	100	49.8
38	100	40.7
41	100	35.7
42	100	39.4
43	150	26.9
44	150	49.6
47	150	41.1
48	150	42.9
49	150	43.2
50	150	38.1
51	150	32.7
52	150	44.2
55	150	47.1
56	150	42.6
57	150	37.0
58	150	49.6

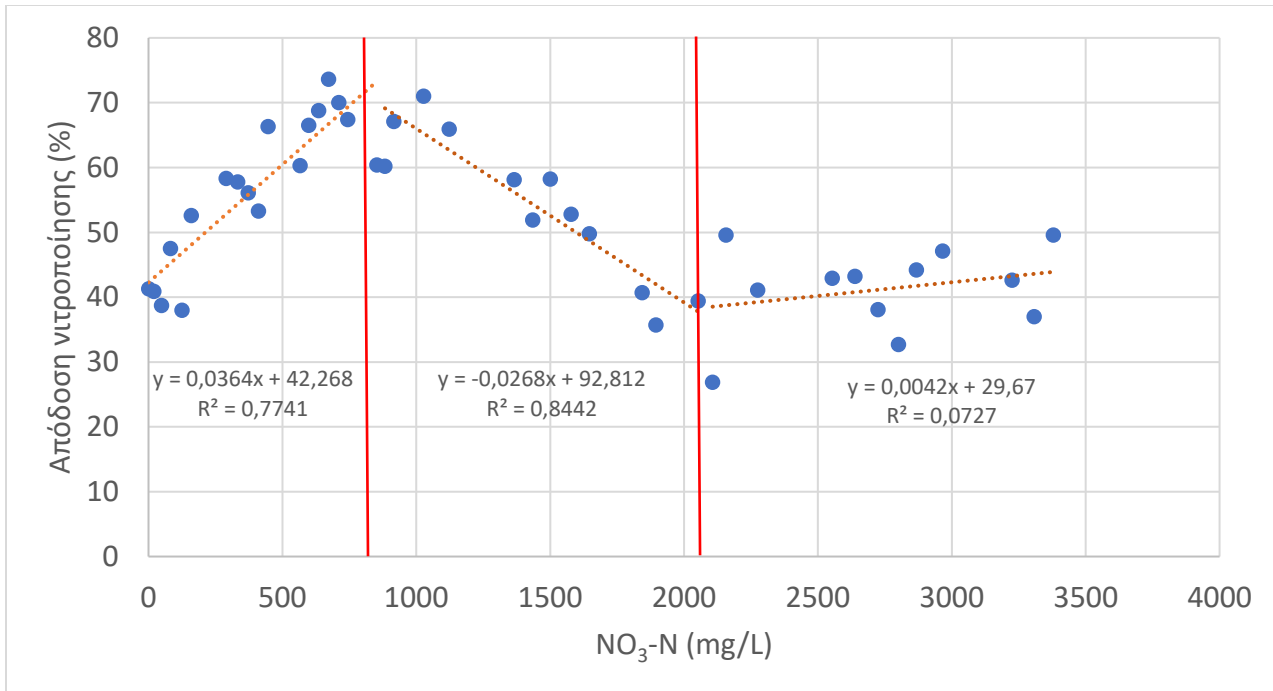


Εικόνα 44: Απόδοση της διεργασίας νιτροποίησης στον πιλοτικό βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης

Από την εικόνα 44 παρατηρούμε ότι κατά την έναρξη φόρτισης του αντιδραστήρα με 45 g/L<sub>r</sub>/d αμμωνιακό άζωτο απαιτήθηκαν σχεδόν 10 ημέρες για τον εγκλιματισμό της αερόβιας ιλύος στο υπόστρωμα αυτό. Στη συνέχεια και μέχρι την αύξηση της φόρτισης στα 100 g/L<sub>r</sub>/d, η απόδοση της νιτροποίησης διατηρήθηκε σε υψηλά επίπεδα περί το 67%. Η απόδοση αυτή ήταν βέβαια χαμηλότερη από αυτή που είχε επιτευχθεί στον εργαστηριακό αντιδραστήρα νιτροποίησης (71,0 ±10,6%), όπως αναμενόταν. Παρόλα αυτά δεν φαίνεται να επηρεάζεται από τη συσσώρευση νιτρικών ιόντων. Η αύξηση της φόρτισης στα 100 g/L<sub>r</sub>/d είχε ως αποτέλεσμα μια σταδιακή μείωση της απόδοσης μέχρι περίπου το 40%. Περαιτέρω αύξηση της φόρτισης δεν επέφερε αντίστοιχη μείωση στην απόδοση αλλά διατηρήθηκε περί το 40%.

Εξετάστηκε και για το πιλοτικό σύστημα η ύπαρξη συσχέτισης συγκέντρωσης νιτρικού αζώτου με την απόδοση νιτροποίησης (Εικόνα 45).





Εικόνα 45: Συσχέτιση συγκέντρωσης νιτρικού αζώτου με απόδοση νιτροποίησης

Από την Εικόνα 45 παρατηρείται μια ήπια γραμμική συσχέτιση τόσο για φόρτιση 45 g/L<sub>r</sub>/d (αύξουσα τάση) όσο και για φόρτιση 100 g/L<sub>r</sub>/d (φθίνουσα τάση). Για την φόρτιση 45 g/L<sub>r</sub>/d, πιθανώς η αυξητική τάση μπορεί να αποδοθεί στον εγκλιματισμό της βιολογικής ιλύος στο υπόστρωμα και μάλλον δεν σχετίζεται ουσιαστικά με την αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων. Αντίθετα η φθίνουσα τάση για φόρτιση 100 g/L<sub>r</sub>/d επιβεβαιώνει τα εργαστηριακά αποτελέσματα. Επιπλέον υποδεικνύεται ότι αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων πέραν των 2 g/L, δεν παρεμποδίζει περαιτέρω τη βιολογική διεργασία.

Από όλα τα παραπάνω αποφασίστηκε η βέλτιστη φόρτιση για τον πιλοτικό αντιδραστήρα νιτροποίησης από τις αέριες εκπομπές της κομποστοποίησης να τεθεί στο 45 g/L<sub>r</sub>/d.

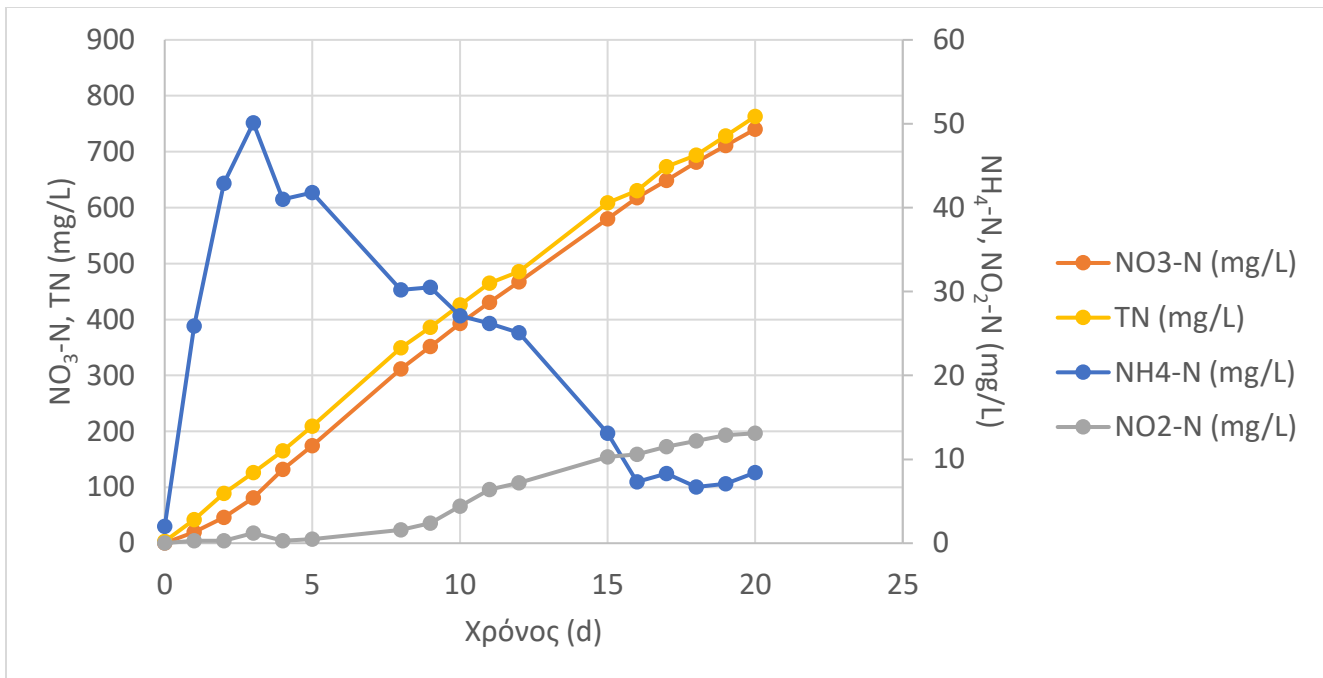
## 7.6 Πειραματικά αποτελέσματα νιτροποίησης με αξιοποίηση των αέριων εκπομπών της κομποστοποίησης

Τα αποτελέσματα της καθημερινής παρακολούθησης του πιλοτικού βιολογικού αντιδραστήρα νιτροποίησης με αξιοποίηση των αέριων εκπομπών της κομποστοποίησης παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα (Πίνακας 10).

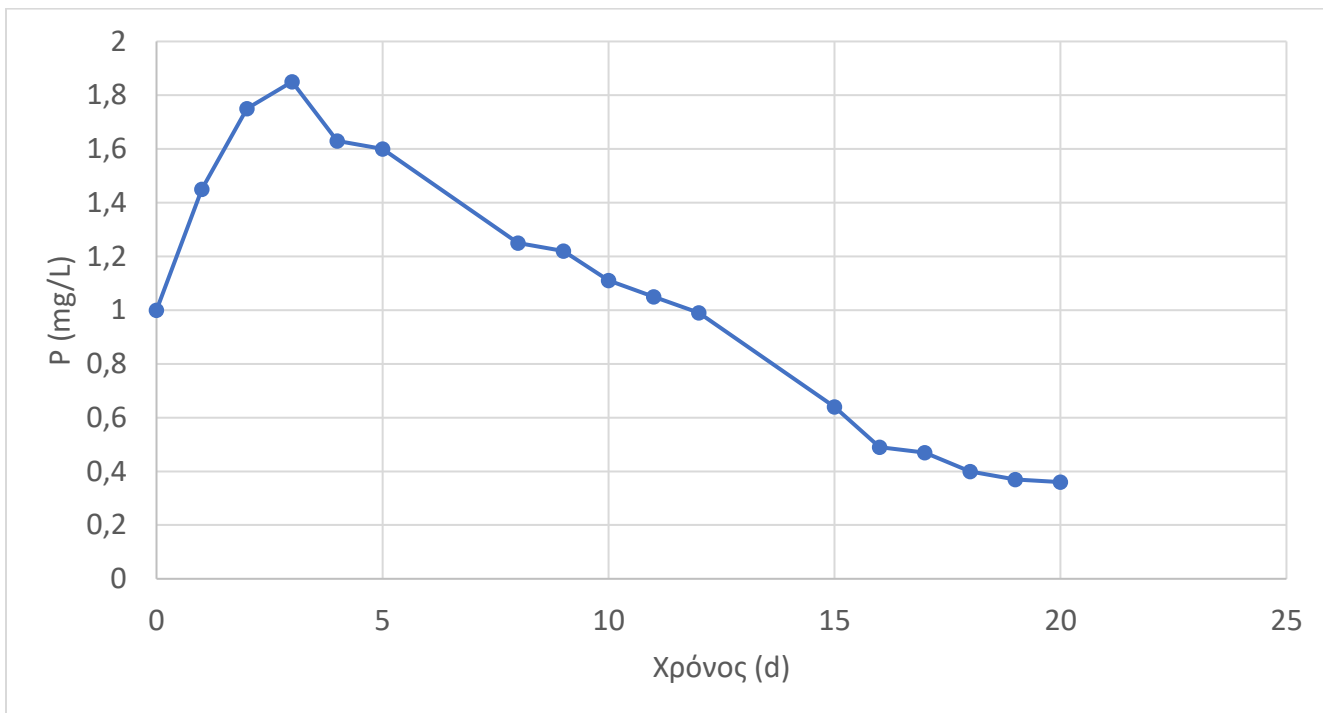
Πίνακας 10: Πειραματικά αποτελέσματα πιλοτικού βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης με αξιοποίηση των αέριων εκπομπών της κομποστοποίησης ως προς τη συγκέντρωση των μακροθρεπτικών αζώτου και φωσφόρου:

<b>Χρόνος (d)</b>	<b>NH<sub>4</sub>-N (mg/L)</b>	<b>NO<sub>3</sub>-N (mg/L)</b>	<b>NO<sub>2</sub>-N (mg/L)</b>	<b>TN (mg/L)</b>	<b>P (mg/L)</b>
0	2.0	0.2	0.01	3.3	1.00
1	25.9	19.8	0.3	42.3	1.45
2	42.9	46.2	0.3	89.3	1.75
3	50.1	81.1	1.2	126.5	1.85
4	41.0	132.1	0.3	165.1	1.63
5	41.8	174.5	-0.5	209.5	1.60
8	30.2	311.4	1.6	349.7	1.25
9	30.5	351.5	2.4	386.2	1.22
10	27.1	393.1	4.4	426.1	1.11
11	26.2	430.6	6.4	465.1	1.05
12	25.1	467.3	7.2	485.4	0.99
15	13.1	580.1	10.3	608.5	0.64
16	7.3	618.0	10.6	630.1	0.49
17	8.3	648.7	11.5	673.4	0.47
18	6.7	681.2	12.2	693.8	0.40
19	7.1	711.2	12.9	727.9	0.37
20	8.4	740.2	13.1	763.0	0.36

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 10 παριστάνονται και διαγραμματικά στα ακόλουθα σχήματα (Εικόνα 46 και Εικόνα 47).



Εικόνα 46: Μεταβολή της συγκέντρωσης των μορφών του αζώτου στον πιλοτικό βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης με αξιοποίηση των αέριων εκπομπών της κομποστοποίησης



Εικόνα 47: Μεταβολή της συγκέντρωσης του ολικού φωσφόρου στον πιλοτικό βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης με αξιοποίηση των αέριων εκπομπών της κομποστοποίησης

Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρούμε μια σταδιακή συσσώρευση νιτρικού αζώτου μέχρι συγκέντρωσης 0,7 g/L. Η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου επίσης αυξάνεται μέχρι την 3<sup>η</sup> ημέρα, ενώ στη συνέχεια παρατηρούμε σταδιακή μείωση της ποσότητας έως το τέλος του πειράματος. Το εύρος της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου κυμαίνεται από 2 mg/L έως 50,1 mg/L. Συσσώρευση παρατηρείται και στη συγκέντρωση του νιτρώδους αζώτου, με μέγιστη παρατηρούμενη συγκέντρωση 13,1 mg/L μετά από περίπου 2 μήνες λειτουργίας της μονάδας και διαδοχική αύξηση της φόρτισης των αμμωνιακών. Από τα αποτελέσματα αυτά μπορεί κανείς να διακρίνει πρωτογενώς ότι και πάλι επιτυγχάνεται η μετατροπή του αμμωνιακού αζώτου σε νιτρικό, επιτυγχάνεται δηλαδή νιτροποίηση. Βέβαια, οφείλουμε να αναφέρουμε ότι στις 20 ημέρες λειτουργίας της μονάδας δεν είχε σημειωθεί η συγκέντρωση νιτρικών ιόντων (2 g/L) που δρα παρεμποδιστικά όπως εντοπίστηκε στη φάση λειτουργίας του πιλοτικού αντιδραστήρα νιτροποίησης με χρήση συνθετικού υποστρώματος.

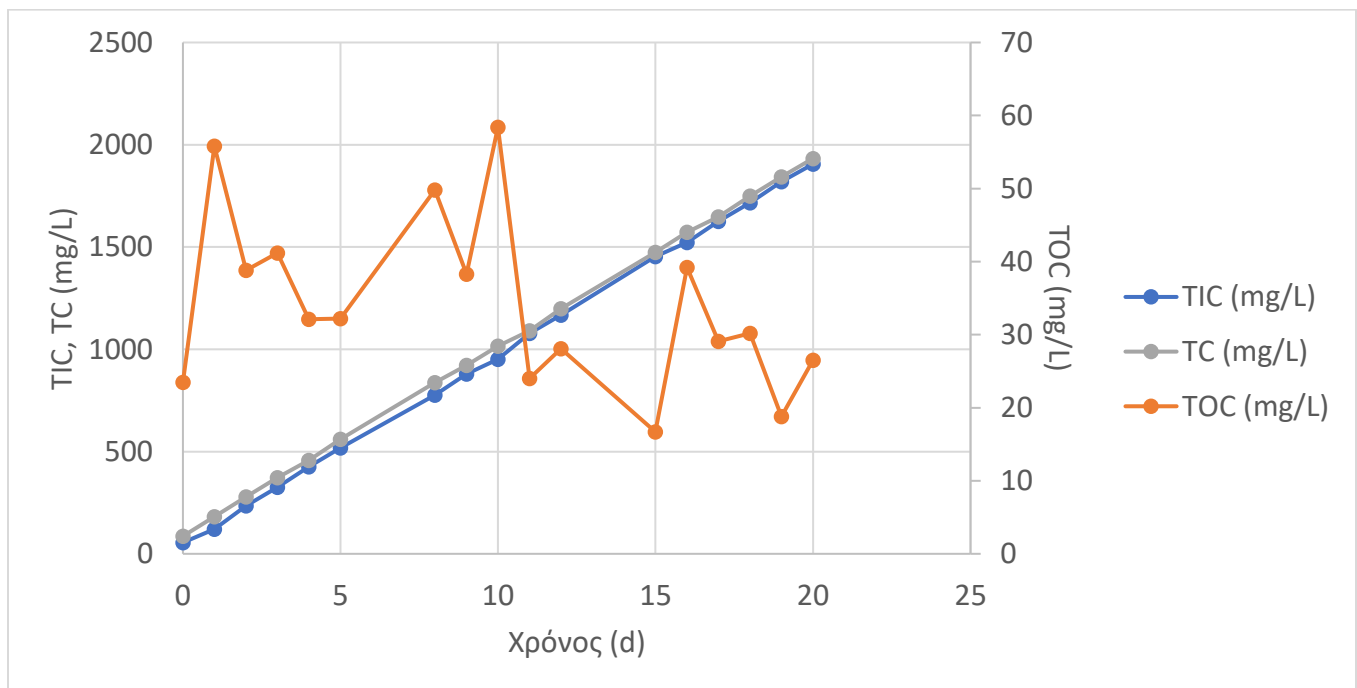
Όσον αφορά τη συγκέντρωση του ολικού φωσφόρου, παρατηρήθηκε μια ελάχιστη σταδιακή μείωση της συγκέντρωσης από 1,8 mg/L, η οποία παρατηρείται την 3<sup>η</sup> μέρα, έως 0,36 mg/L. Προκύπτει λοιπόν ότι η δοσολογία που είχαμε επιλέξει ήταν κατάλληλη, παρότι στο πέρας της περιόδου φαίνεται να είναι αρκετά μικρή η συγκέντρωσή του. Επομένως, ίσως θα ήταν σκοπιμότερη μια μεγαλύτερη δοσολογία φωσφόρου, όπως εντοπίστηκε και στην προηγούμενη φάση λειτουργίας.

Στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 11) και στην Εικόνα 48 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πιλοτικού βιολογικού αντιδραστήρα νιτροποίησης με αξιοποίηση των αέριων εκπομπών της κομποστοποίησης ως προς τη συγκέντρωση του άνθρακα (οργανικού, ανόργανου και συνολικού).

Πίνακας 11: Πειραματικά αποτελέσματα πιλοτικού βιολογικού αντιδραστήρα νιτροποίησης ως προς τη συγκέντρωση του άνθρακα (οργανικού, ανόργανου και συνολικού)

<b>Χρόνος (d)</b>	<b>TIC (mg/L)</b>	<b>TOC (mg/L)</b>	<b>TC (mg/L)</b>
0	55.0	23.5	86.2
1	120.8	55.8	182.4
2	234.2	38.8	278.3
3	326.0	41.2	371.9
4	425.6	32.1	457.2
5	518.3	32.2	560.1
8	775.8	49.8	837.0

9	880.0	38.3	921.9
10	951.7	58.4	1015.9
11	1078.5	24.0	1090.6
12	1166.8	28.1	1198.7
15	1453.2	16.7	1473.3
16	1522.1	39.2	1571.9
17	1625.0	29.1	1647.5
18	1716.1	30.2	1749.0
19	1820.3	18.8	1843.7
20	1905.5	26.5	1932.9



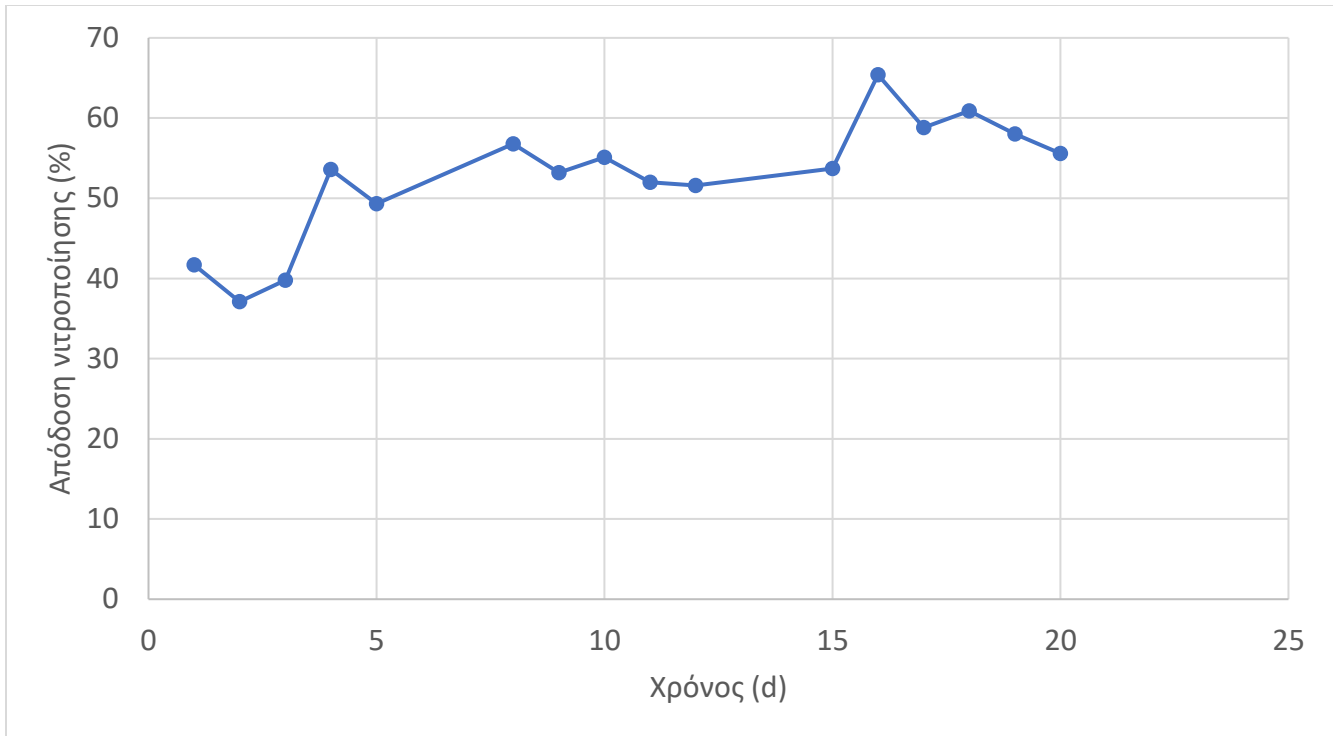
Εικόνα 48: Συγκέντρωση άνθρακα (οργανικού, ανόργανου και συνολικού) στον πιλοτικό βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης

Από τις τιμές του ανωτέρω πίνακα (Πίνακας 11) και της παραπάνω εικόνας (Εικόνα 48), παρατηρούμε ότι οι συγκεντρώσεις του οργανικού άνθρακα δεν παρουσιάζουν κάποια συγκεκριμένη τάση αλλά κινούνται γύρω από μια μέση τιμή ( $34,3 \pm 12 \text{ mg/L}$ ). Από την άλλη πλευρά οι συγκεντρώσεις του ολικού και ανόργανου άνθρακα αυξάνονται συνεχώς μέχρι τις τιμές 1932,9 και 1905,5 mg/L αντίστοιχα. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι η δοσολογία του ανόργανου άνθρακα που είχε επιλεγεί και πάλι ήταν μεγαλύτερη από αυτήν που χρειαζόταν, αν και πάλι δεν ήταν πλήρης η νιτροποίηση.

Τα αποτελέσματα της απόδοσης νιτροποίησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 12 και στην Εικόνα 49:

Πίνακας 12: Απόδοση της διεργασίας νιτροποίησης στην πιλοτική κλίμακα με αξιοποίηση των αέριων εκπομπών της κομποστοποίησης

<b>Χρόνος (d)</b>	<b>Απόδοση νιτροποίησης (%)</b>
0	
1	41.7
2	37.1
3	39.8
4	53.6
5	49.3
8	56.8
9	53.2
10	55.1
11	52.0
12	51.6
15	53.7
16	65.4
17	58.8
18	60.9
19	58.0
20	55.6



Εικόνα 49: Απόδοση της διεργασίας νιτροποίησης στον πιλοτικό βιοαντιδραστήρα νιτροποίησης με αξιοποίηση των αέριων εκπομπών της κομποστοποίησης

Από την Εικόνα 49 παρατηρούμε ότι η απόδοση της νιτροποίησης εμφανίζει μια ελαφριά ανοδική πορεία στις πρώτες τέσσερις ημέρες λειτουργίας μέχρι τον εγκλιματισμό του αερόβιου συστήματος. Στη συνέχεια διατηρείται περίπου σταθερή με μέση τιμή  $56,5 \pm 4,1\%$  η οποία είναι σαφώς χαμηλότερη από αυτήν που παρατηρήθηκε κατά την 1<sup>η</sup> φάση λειτουργίας όπου τροφοδοτούνταν συνθετικό απόβλητο.

Από τη λειτουργία του scrubber και του αντιδραστήρα νιτροποίησης παρήχθησαν διαλύματα πλούσια σε αμμωνιακά και νιτρικά ιόντα αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, μετά τις 20 ημέρες λειτουργίας του πιλοτικού συστήματος με αξιοποίηση των αέριων εκπομπών της κομποστοποίησης προέκυψαν διαλύματα συγκέντρωσης  $16,1 \text{ g/L NH}_4\text{-N}$  και  $740,2 \text{ mg/L NO}_3\text{-N}$ . Σύμφωνα με τους στόχους του προγράμματος Biogasnet, όπως περιγράφηκε ανωτέρω, τα διαλύματα αυτά έχουν ικανή σύσταση για να τροφοδοτήσουν την πιλοτική μονάδα της βιολογικής αποθείωσης. Πιο συγκεκριμένα, το διάλυμα νιτρικών θα εισέλθει στο ανοξικό βιοφίλτρο που τροφοδοτείται με το βιοαέριο του χώρου υγειονομικής ταφής, όπου το υδρόθειο του βιοαερίου θα βιομετατρέπεται σε θειικά ιόντα. Το ρεύμα των θεικών ιόντων θα αναμιγνύεται με το διάλυμα αμμωνιακών ιόντων που έχει προετοιμαστεί ώστε να παραχθεί ένα προϊόν προστιθέμενης αξίας, το θειικό αμμώνιο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα. Η λειτουργία της μονάδας βιολογικής αποθείωσης δεν αποτέλεσε αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής. Ωστόσο εργαστηριακά διαπιστώθηκε η παραγωγή θειικού αμμωνίου με την ισομοριακή

ανάμιξη του διαλύματος αμμωνιακών (από τον scrubber) και συνθετικού διαλύματος θεικών ιόντων (1,2M). Δεν διαπιστώθηκε καθίζηση άλλων παραπροϊόντων (άλλων αλάτων).



## 8. Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η πρόοδος της νιτροποίησης και η δυνατότητα συσσώρευσης νιτρικών ιόντων χωρίς παρεμπόδιση της βιολογικής διεργασίας ώστε να εξασφαλιστεί η τροφοδοσία υψηλής συγκέντρωσης νιτρικών που απαιτούνταν για τη βιολογική αποθείωση του βιοαερίου που προέρχεται από χώρο υγειονομικής ταφής.

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στην εργαστηριακή κλίμακα συμπεραίνουμε πως επιτυγχάνεται νιτροποίηση, αφού επιτυγχάνεται η μετατροπή του αμμωνιακού αζώτου σε νιτρικό. Η συγκέντρωση του ολικού άνθρακα παρουσιάζει τη μικρότερη διακύμανση συγκριτικά με τις συγκεντρώσεις του οργανικού και του ανόργανου άνθρακα, γεγονός που υποδεικνύει ότι κατά την πρόοδο της νιτροποίησης αλλά και της κατανάλωσης οργανικού άνθρακα από τους ετερότροφους οργανισμούς που είναι παρόντες στο οικοσύστημα του αντιδραστήρα ο άνθρακας αλλάζει μορφή, δηλαδή καταναλώνεται άνθρακας από αυτότροφους (ανόργανος) και ετερότροφους (οργανικός) μικροοργανισμούς για την παραγωγή κυτταρικής μάζας οι οποίοι όμως πεθαίνουν παράγοντας οργανικό άνθρακα. Επιπλέον, από τις παρατηρούμενες διακυμάνσεις προκύπτει ότι η δοσολογία του όξινου ανθρακικού νατρίου που προσθέτονταν ήταν ικανοποιητική. Αναφορικά με την απόδοση της νιτροποίησης υπολογίστηκε κατά μέσο όρο στο  $71,0 \pm 10,6\%$  που κρίνεται πολύ ικανοποιητική για αερόβια βιολογικά συστήματα. Διακρίνεται επιπλέον μια ήπια γραμμική συσχέτιση της απόδοσης νιτροποίησης με την συγκέντρωση του νιτρικού αζώτου ( $R^2 = 0,8529$ ), δηλαδή όσο αυξάνεται η συγκέντρωση, μειώνεται η απόδοση νιτροποίησης.

Αντίστοιχα στην πιλοτική κλίμακα με τροφοδοσία συνθετικού αποβλήτου, κατά την έναρξη φόρτισης του αντιδραστήρα νιτροποίησης με  $45 \text{ g/L}_r/\text{d}$  αμμωνιακό άζωτο η απόδοση της νιτροποίησης διατηρήθηκε σε υψηλά επίπεδα περί το 67%. Η απόδοση αυτή ήταν βέβαια χαμηλότερη από αυτή που είχε επιτευχθεί στον εργαστηριακό αντιδραστήρα νιτροποίησης όπως αναμενόταν. Η αύξηση της φόρτισης στα  $100 \text{ g/L}_r/\text{d}$  είχε ως αποτέλεσμα μια σταδιακή μείωση της απόδοσης μέχρι περίπου το 40%. Περαιτέρω αύξηση της φόρτισης ( $150 \text{ g/L}_r/\text{d}$ ) δεν επέφερε αντίστοιχη μείωση στην απόδοση αλλά διατηρήθηκε περί το 40%.

Τόσο για την αρχική φόρτιση  $45 \text{ g/L}_r/\text{d}$  (αύξουσα τάση) όσο και για την επόμενη φόρτιση  $100 \text{ g/L}_r/\text{d}$  (φθίνουσα τάση) παρατηρήθηκε ήπια γραμμική συσχέτιση της συγκέντρωσης του νιτρικού αζώτου σε σχέση με τις αντίστοιχες αποδόσεις νιτροποίησης ( $R^2 = 0,7741$  και  $R^2 = 0,8442$ ). Για τη φόρτιση  $45 \text{ g/L}_r/\text{d}$ , πιθανώς η αυξητική τάση μπορεί να αποδοθεί στον σταδιακό εγκλιματισμό της βιολογικής ιλύος στο υπόστρωμα και μάλλον δεν σχετίζεται ουσιαστικά με την αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών

ιόντων. Αντίθετα η φθίνουσα τάση για φόρτιση 100 g/L<sub>r</sub>/d επιβεβαιώνει τα εργαστηριακά αποτελέσματα. Επιπλέον υποδεικνύεται ότι αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων πέραν των 2 g/L, δεν παρεμποδίζει περαιτέρω τη βιολογική διεργασία. Από όλα τα παραπάνω αποφασίστηκε η βέλτιστη φόρτιση για τον πιλοτικό αντιδραστήρα νιτροποίησης από τις αέριες εκπομπές της κομποστοποίησης να τεθεί στο 45 g/L<sub>r</sub>/d.

Τέλος, εξετάστηκε η δυνατότητα αξιοποίησης των αέριων εκπομπών κομποστοποίησης ως πηγή αμμωνιακού αζώτου. Η φόρτιση που επιλέχθηκε με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα ήταν 45g/L<sub>r</sub>/d, οπότε παρατηρήθηκαν παρόμοια αποτελέσματα και στο συγκεκριμένο πείραμα, δηλαδή μπορεί κανείς να διακρίνει πρωτογενώς ότι επιτυγχάνεται η μετατροπή του αμμωνιακού αζώτου σε νιτρικό, επιτυγχάνεται δηλαδή νιτροποίηση. Η απόδοση όμως της νιτροποίησης ήταν σαφώς χαμηλότερη (56,5%).

Από τη λειτουργία της πιλοτικής μονάδας νιτροποίησης παρήχθησαν διαλύματα πλούσια σε αμμωνιακά και νιτρικά ιόντα αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, μετά τις 20 ημέρες λειτουργίας του πιλοτικού συστήματος με αξιοποίηση των αέριων εκπομπών της κομποστοποίησης προέκυψαν διαλύματα συγκέντρωσης 16,1 g/L NH<sub>4</sub>-N και 740,2 mg/L NO<sub>3</sub>-N. Τα διαλύματα αυτά αξιοποιήθηκαν και διαπιστώθηκε εργαστηριακά η παραγωγή θεικού αμμωνίου με την ισομοριακή ανάμιξη του διαλύματος αμμωνιακών (από τον scrubber) και συνθετικού διαλύματος θεικών ιόντων (1,2M). Δεν διαπιστώθηκε καθίζηση άλλων παραπροϊόντων (άλλων αλάτων).

## 9. Βιβλιογραφία

1. Saif, Y., Griffiths, S., & Almansoori, A. (2022). Municipal solid waste supply chain management under an integrated optimization of sustainability targets. *Computers & Chemical Engineering*, *160*, 107725. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107725>
2. Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid waste Management to 2050. In *Washington, DC: World Bank eBooks*. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
3. Rada, E. C., Cioca, L., & Ionescu, G. (2017). Energy recovery from Municipal Solid Waste in EU: proposals to assess the management performance under a circular economy perspective. *MATEC Web of Conferences*, *121*, 05006. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712105006>
4. Nanda, S., & Berruti, F. (2020). Municipal solid waste management and landfilling technologies: a review. *Environmental Chemistry Letters*, *19*(2), 1433–1456. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01100-y>
5. Bello, A., Al-Ghouti, M. A., & Abu-Dieyeh, M. H. (2022). Sustainable and long-term management of municipal solid waste: A review. *Bioresource Technology Reports*, *18*, 101067. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101067>
6. Xu, B., Bloemhof-Ruwaard, J., Ramos, T. R. P., Barbosa-Póvoa, A. P., Wong, C. Y., & Van Der Vorst, J. (2016). Research challenges in municipal solid waste logistics management. *Waste Management*, *48*, 584–592. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.025>
7. Barchiesi, M. A., Costa, R., & Di Pillo, F. (2022). The Link between the Compliance with Environmental Legislation on Separate Collection and the Municipal Solid Waste Costs. *Sustainability*, *14*(9), 5661. <https://doi.org/10.3390/su14095661>
8. Maria Salvetti. Municipal Waste Regulation in Europe: paving the road for upcoming challenges
9. European Environment Agency. Reaching 2030's residual municipal waste target — why recycling is not enough
10. Zero Waste Europe. Achieving the EU's waste targets: Zero waste cities showcasing how to go above and beyond what is required
11. Saif, Y., Griffiths, S., & Almansoori, A. (2022b). Municipal solid waste supply chain management under an integrated optimization of sustainability targets. *Computers & Chemical Engineering*, *160*, 107725. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107725>
12. Karageorgiou & Associates Law firm. Waste management in Greece under the current legislative framework

13. Ezeah, C., & Byrne, T. (2014). A Critical Review of Municipal Solid Waste Legislation and Compliance in Greece- In the Context of the EU Landfill Directive. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*. <https://doi.org/10.9790/2402-08548189>
14. European Environment Agency. Early warning assessment related to the 2025 targets for municipal waste and packaging waste
15. Eunomia. DRS essential for Greece to Reach Recycling Targets
16. Waste Management World. Waste management in Greece: A herculean task
17. Τερζής, Ε. (2009), Οδηγός για το περιβάλλον-Διαχείριση Απορριμμάτων, Αθήνα: WWF Ελλάς
18. Παναγιωτακόπουλος Δ.(2002) Βιώσιμη διαχείριση αστικών στερεών αποβλήτων, Εκδόσεις Ζυγός, Θεσσαλονίκη.
19. Ανδρεαδάκης Α. (2001) Θερμική Επεξεργασία Αστικών Στερεών Απορριμμάτων (ΑΣΑ) και Ιλύων, Σημειώσεις Μαθήματος 'Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων και Ιλύος', Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
20. Οικονόμου, Θ. (1997), Δυναμικά Συστήματα Διοίκησης - Διαχείριση στερεών αποβλήτων
21. Καραγιαννίδου Αναστασία. ΟΤΑ και Βιώσιμη Διαχείριση των Απορριμμάτων: Η περίπτωση του Δήμου Νέας Σμύρνης
22. Καρβούνης, Σ. & Γεωργακέλλος, Δ. (2003). Διαχείριση του Περιβάλλοντος, Επιχειρήσεις & Βιώσιμη Ανάπτυξη, Αθήνα: Εκδόσεις Σταμούλης
23. «Επίσημη Ιστοσελίδα της Ελληνικής Εταιρείας Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων» <http://www.eedsa.gr/Contents.aspx?CatId=96>
24. «Επίσημη ιστοσελίδα του Υπουργείου Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων» <http://www.minenv.gr/anakyklosi/general/general.html>
25. McDougall, F.R., White, P.R., Franke, M., Hindle, P. (2001), Integrated Solid Waste Management: A Life Cycle Inventory: 2nd edition, U.K. - Oxford: Blackwell Science
26. Λάλας και συν. , 2007 'Εκτίμηση των γενικευμένων επιπτώσεων και κόστους διαχείρισης στερεών αποβλήτων, τελική έκθεση', Αθήνα: Ινστιτούτο Τοπικής Αυτοδιοίκησης.
27. Καρακασίδης, Ν.Γ. (1999), Συσκευασία και περιβάλλον: β' έκδοση, Αθήνα: Εκδόσεις Ίων
28. <http://www.imerisia.gr/article.asp?catid=12333&subid=2&pubid=29049192>
29. Λαζαρίδης κ.α. ,2002 Προδιαγραφές ποιότητας και διάθεση κομπόστ: η ελληνική και διεθνής εμπειρία, Αθήνα:1ο Διεθνές Συνέδριο ΕΕΔΣΑ για την διαχείριση Στερεών Αποβλήτων, "Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων για μια Βιώσιμη Ανάπτυξη στον 21ο αιώνα", 28/02 -01/03/2002.
30. Haug, R.T. (1993) The Practical Handbook of Compost Engineering, Lewis Publishers, USA.
31. Lasaridi K.E. (1998) 'Compost stability: a comparative evaluation of respirometric techniques', Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Leeds, UK.

32. Hamoda, M. F., Qdais, H. A., & Newham, J. (1998). Evaluation of municipal solid waste composting kinetics. *Resources Conservation and Recycling*, 23(4), 209–223. [https://doi.org/10.1016/s0921-3449\(98\)00021-4](https://doi.org/10.1016/s0921-3449(98)00021-4)
33. Tchobanoglous, Thiessen and Vigil (1993). *Integrated Solid Waste Management*, Mc Graw Hill International.
34. Γιδάρáκος Ε. (2006) Διαχείριση και Επεξεργασία Στερεών Αποβλήτων, Σημειώσεις Μαθήματος ‘Ειδικά θέματα περιβάλλοντος και Υγείας’, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.
35. Imppola, U., Viilos, P., Veijanen, A., Hänninen, K., Nevanperä, P. (2001) ‘Reducing odour problems in a drum composting plant’, In: Lehtonen, T., Salminen J-P., Pihlaja, K. (Eds), *Proceedings of the Fifth Finnish Conference of Environmental Sciences*, Turku, Finland, 18–19 May 2001, pp. 100–103.
36. Lasaridi K., Loanna P., Kotsou M. , Georg P. and Thakis M. (2006), ‘Quality assessment of compost in the Greek market: the need for standards and quality assurance’. *Journal of Environmental Management*, 80: 58-65.
37. Dé portes, I. Benoit-Guyod, J.-L.; Zmirou D. (1995) ‘Hazard to man and the environment posed by the use of urban waste compost’, *Science of Total Environment*, 172, 197-222.
38. Powell, J. G. F., Townsend, T. G., & Zimmerman, J. (2015). Estimates of solid waste disposal rates and reduction targets for landfill gas emissions. *Nature Climate Change*, 6(2), 162–165. <https://doi.org/10.1038/nclimate2804>
39. European Parliament. *Waste management in the EU: infographic with facts and figures*
40. Bello, A., Al-Ghouti, M. A., & Abu-Dieyeh, M. H. (2022b). Sustainable and long-term management of municipal solid waste: A review. *Bioresource Technology Reports*, 18, 101067. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101067>