



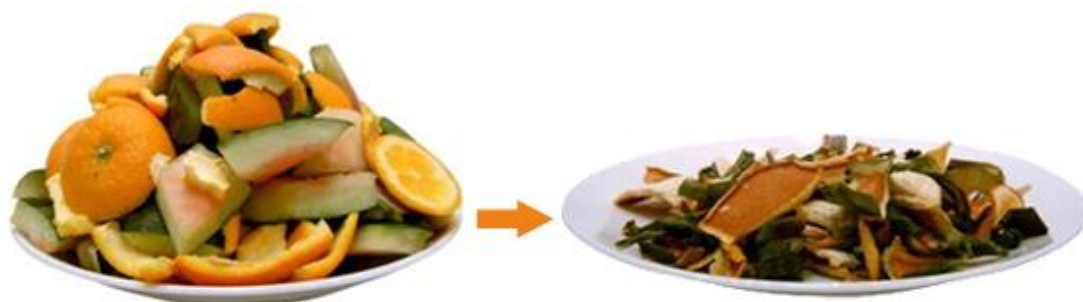
**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

*Μεταπτυχιακή Εργασία με θέμα*

**Τεχνικές και Διεργασίες Ξήρανσης του  
Βιοαποδομήσιμου Κλάσματος των Απορριμμάτων**



**Ιωάννης Πεζούλας**

Χημικός Μηχανικός

**Επιβλέπων: Δρ. Ευάγγελος Καπετάνιος**

ΑΘΗΝΑ 2014



## Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έχει ως κύριο να μελετήσει την ξήρανση, σε ρεύμα αέρα, των βιολογικών απορριμμάτων (και ειδικότερα των διατροφικών απορριμμάτων) ως εναλλακτικού τρόπου διαχείρισής τους. Η οικιακή ξήρανση αποτελεί μια καινοτόμο τεχνική η οποία περιλαμβάνει το διαχωρισμό και αφυδάτωση των οικιακών διατροφικών αποβλήτων στην πηγή με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της μάζας και του όγκου αυτών μέσω της αφαίρεσης της περιεχόμενης σε αυτά υγρασίας. Τα διατροφικά απορρίμματα, εμπεριέχουν υψηλά ποσοστά υγρασίας η οποία κυμαίνεται μεταξύ 75-95 % κ.β. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών οικιακών διατροφικών απορριμμάτων προεπεξεργασμένα με τη μέθοδο της οικιακής ξήρανσης παρουσιάζονται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Για τους σκοπούς της εργασίας έγινε χρήση ενός εμπορικού συστήματος οικιακής ξήρανσης της εταιρίας LOOFEN, το οποίο λειτούργησε για χρονική περίοδο 3 μηνών στο εργαστήριο της Μονάδας Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π.. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η πειραματική μελέτη, διαμορφώθηκε κατάλληλο μίγμα διατροφικών απορριμμάτων σταθερής σύστασης το οποίο προέκυψε από παρατηρήσεις των διατροφικών συνηθειών 25 οικιών του Δήμου Παπάγου-Χολαργού σε συνδυασμό με στοιχεία από τη WRAP στη διάρκεια πιλοτικής εφαρμογής η οποία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος DRYWASTE.

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 4 κύκλοι πλήρους λειτουργίας της συσκευής ξήρανσης, ο καθένας με διαφορετικές ποσότητες του μίγματος των διατροφικών απορριμμάτων που αντιστοιχούν στις ποσότητες που παράγει μια μονομελής, μια διμελής και μια τριμελής οικογένεια. Το μίγμα αυτό με σκοπό να αξιολογηθούν τα χαρακτηριστικά του τελικού ξηρού προϊόντος που προέκυψε, αλλά και να συγκριθεί η απόδοση του συγκεκριμένου εμπορικού συστήματος οικιακής ξήρανσης με αυτή του συστήματος οικιακής ξήρανσης DRYWASTE το οποίο αναπτύχθηκε και κατασκευάστηκε στη Μονάδα Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας του ΕΜΠ.

Επιπλέον εξετάστηκαν 5 διαφορετικά κινητικά μοντέλα ξήρανσης για να διαπιστωθεί ποιο από τα αυτά εκφράζει καλύτερα τα πειραματικά αποτελέσματα της ξήρανσης του υλικού με θερμό ρεύμα αέρα και να μελετηθούν οι παράμετροι που επηρεάζουν τη διεργασία της ξήρανσης

Με τη χρήση του συστήματος παρατηρήθηκε ότι, η μείωση της μάζας των οικιακών διατροφικών απορριμμάτων, μέσω της αφαίρεσης της περιεχόμενης σε αυτά υγρασίας, είναι ίση με 75,83% κ.β. Το ποσοστό κυμάνθηκε στο εύρος τιμών μεταξύ 75,05-76,8% κ.β., γεγονός που οφείλεται στη διαφορετική ποσότητα του υλικού που τοποθετούνταν σε κάθε κύκλο ξήρανσης στο εσωτερικό του θαλάμου ξήρανσης. Η μείωση του όγκου των οικιακών βιοαποβλήτων προσδιορίστηκε ίση με 49,87 %, ενώ

το ποσοστό κυμάνθηκε στο εύρος τιμών μεταξύ 41,66-54,9 %. Η μείωση της υγρασίας των οικιακών βιοαποβλήτων προσδιορίστηκε ίση με 73,46 % κ.β. ενώ κυμάνθηκε στο εύρος τιμών 73,2-76% % κ.β. Τέλος, η ενεργειακή κατανάλωση της συσκευής στο σύνολο των εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν, προσδιορίστηκε ίση με 2,05 kWh/kg ενώ το εύρος τιμών κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών 1,68-2,6 kWh/kg.

Τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη χρήση του εμπορικού συστήματος ξήρανσης LOOFEN δείχνουν ότι το συγκεκριμένο εμπορικό σύστημα οικιακής ξήρανσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την διαχείριση διατροφικών απορριμμάτων που παράγει μια μονομελής ή μια διμελής οικογένεια, ωστόσο δε μπορεί να διαχειριστεί αποτελεσματικά την ποσότητα που παράγει την ποσότητα που παράγει μια τριμελής ή τετραμελής οικογένεια. Συγκρίνοντας επίσης με τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη χρήση του συστήματος οικιακής ξήρανσης DRYWASTE, διαπιστώθηκε ότι το σύστημα DRYWASTE παρουσίασε συνολικά καλύτερη απόδοση από το σύστημα LOOFEN, αφού με χρήση του ίδιου υποστρώματος πέτυχε μεγαλύτερη μείωση της μάζας, του όγκου και της υγρασίας του αρχικού νωπού υλικού.

Από την εξέταση των πέντε κινητικών μοντέλων ξήρανσης με ρεύμα αέρα επιβεβαιώνεται ότι η θερμοκρασία και η ταχύτητα του ρεύματος αέρα ξήρανσης επιδρούν θετικά στην κινητική της ξήρανσης, έτσι με την αύξηση τους, αυξάνεται ο ρυθμός ξήρανσης, ενώ η υγρασία του ρεύματος αέρα και το πάχος του υλικού επιδρούν αρνητικά στην κινητική της ξήρανσης οπότε με την αύξηση τους ο ρυθμός ξήρανσης μειώνεται.

Όσον αφορά για το πιο κινητικό μοντέλο ανταποκρίνεται καλύτερα στις πειραματικές τιμές της υγρασίας, συμπεραίνεται ότι το εμπειρικό μοντέλο Modified Henderson and Pabis ανταποκρίνεται καλύτερα από τα υπόλοιπα μοντέλα στις πειραματικές τιμές του 2<sup>ο</sup>, 3<sup>ο</sup> και 4<sup>ο</sup> κύκλου, ενώ το εμπειρικό μοντέλο Two Term ανταποκρίνεται καλύτερα από τα υπόλοιπα μοντέλα στις πειραματικές τιμές του 1<sup>ο</sup> κύκλου.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα συμπεράσματα καταλήγουμε ότι η διεργασία της ξήρανσης με ρεύμα αέρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά ως εναλλακτικός τρόπος διαχείρισης του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων προσφέροντας σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη.

## **Abstract**

This thesis has as main objective to study the drying air stream as an alternative way of management of organic waste and particularly food residues. Domestic waste drying is an innovative approach which involves the source separation and dehydration of household food waste in order to reduce their mass and volume at source through the efficient removal of their moisture content. Food waste contains a large amount of water which varies between 75-95 % w/w. The results of the evaluation of the physicochemical characteristics of household food waste pretreated with the domestic food drying method are presented within the framework of this thesis.

For the purposes of this thesis, we used a commercial system of food waste drying that was manufactured by the company LOOFEN. This system was tested for a period of 3 months at the NTUA laboratories. In order to carry out this experimental study, we used a fixed mix of food waste which emerged from observations of dietary habits of 25 houses in the municipality of Papagou - Holargos in conjunction with data from WRAP (Wellness Recovery Action Plan) during the European DRYWASTE program.

A total of four full functional cycles of the drying device were conducted, each with different amounts of the mixture of food waste that correspond to the quantities produced by a one-, two- and three-member family, in order to assess the characteristics of the final dry product that was produced by the system and to compare the performance this particular commercial food waste drying system with the one of the DRYWASTE domestic waste dryer which was developed and built at the Unit of Environmental Science and Technology of NTUA.

Additionally 5 different empirical drying kinetic models were tested, in order to determine which of these better fits the experimental results of the drying process with hot air stream and to study the parameters that affect the process of drying.

The use of the system revealed that the mass reduction of food waste reached 75.83 % w/w while it varied between 75.05-76.8% w/w which was caused by the fact that different food waste mass was used as input material throughout the process. The volume decrease of household bio waste was determined equal to 49.87% while the rate fluctuated in the range between 41.66 to 54.9% w/w. The moisture reduction of household bio waste determined equal to 73.46% w/w fluctuated in the range of 73.2 to 76 % w/w. Finally, the energy consumption of the appliance in the laboratory trials was determined equal to 2.05 kWh/kg while it varied between 1.68-2.6 kWh/kg.

The experimental results that occurred during the usage of the LOOFEN food waste dryer proved that the system can be efficiently used for the management of food waste produced by a one-and two-member family, but it cannot handle effectively the amount of food waste produced by a three-or four-member family. Additionally,

comparing the experimental data of this system with the DRYWASTE food waste drying system led to the conclusion that the DRYWASTE system performed better altogether, since it achieved greater mass, volume and moisture reduction of the food waste, using the exact same materials.

The testing of the 5 different drying kinetic models proved that the temperature and velocity of the drying air stream positively affect the kinetics of drying, therefore the drying rate increases as they increase, while the humidity of the air stream and the thickness of the material, adversely affect the kinetics of drying, therefore the drying rate decreases as they increase.

With regard to which kinetic model best meets the experimental values of moisture, it is concluded that the empirical model Modified Henderson and Pabis fits better than the other models in the experimental values of the 2<sup>nd</sup>, 3<sup>rd</sup> and 4<sup>th</sup> cycle of drying, while the empirical model Two Term fits better than the rest in the experimental values of the 1<sup>st</sup> cycle of drying.

Considering all findings, we conclude that the drying with hot air stream can be used effectively as an alternative way of management of the organic fraction of waste, offering significant environmental benefits.

## Πρόλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του διατμηματικού προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών «Συστήματα Αυτοματισμού» και του μαθήματος Διεργασίες και Τεχνικές Αντιρρύπανσης.

Έχοντας ολοκληρώσει τη συγγραφή, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υπεύθυνο του μαθήματος Δρ. Χημικό Μηχανικό Καπετάνιο Ευάγγελο για την ανάθεση και επίβλεψη αυτής της ερευνητικής εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Καθηγήτρια. Λοϊζίδου Μαρία, που μου επέτρεψε να εργαστώ στα εργαστήρια της Μονάδας Περιβαλλοντική Επιστήμης και Τεχνολογίας για την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας.

Ευχαριστώ, επίσης, ιδιαίτερα τον Διδάκτορα, Μηχανικό Περιβάλλοντος, Δημήτρη Κωνσταντίνο Μαλαμή, όπως επίσης ευχαριστώ τον Υποψήφιο Διδάκτορα, Φυσικό, Άγγελο Σωτηρόπουλο για την πολύ σημαντική βοήθεια και καθοδήγησή τους που ήταν καθοριστική τόσο για την διεξαγωγή των πειραμάτων όσο και για τη συγγραφή και παρουσίαση της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον ευχαριστώ τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τον Καθηγητή Αντωνιάδη Ιωάννη, την Καθηγήτρια Φούντη Μαρία και τον Δρ. Ευάγγελο Καπετάνιο για τη τιμή που μου κάνουν να συμμετάσχουν στην αξιολόγηση της παρούσας εργασίας

Τέλος, θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε όλο το προσωπικό των εργαστηρίων όπου εργάστηκα τόσο για το φιλικό κλίμα εντός του, όσο και για τη συνεργασία και τη συμπαράστασή τους.





## Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή στα βιοαπόβλητα .....	1
1.1.	Εισαγωγή.....	1
1.2.	Αρχές και Στρατηγική Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση .....	2
1.3.	Ορισμός και κατηγοριοποίηση βιολογικών αποβλήτων .....	5
1.4.	Υφιστάμενη νομοθεσία για τη διαχείρισης των βιολογικών απορριμμάτων στην Ε.Ε. ....	7
2.	Μέθοδοι Διαχείρισης Βιοαποβλήτων .....	11
2.1.	Εισαγωγή.....	11
2.2.	Διαλογή στην πηγή.....	11
2.2.1	Συλλογή με τη μέθοδο ‘Πόρτα- Πόρτα’ .....	12
2.2.2	Συλλογή με Κάδους ανά Ομάδες Κατοικιών.....	13
2.2.3	Συγκέντρωση Διαχωρισμένων ΒΑ σε Κέντρα Συλλογής.....	14
2.3.	Κομποστοποίηση.....	15
2.3.1	Γενικά.....	15
2.3.2	Φάσεις της ζύμωσης .....	17
2.3.3	Παράγοντες που επιδρούν στη κομποστοποίηση .....	18
2.3.4	Συστήματα Κομποστοποίησης.....	21
2.3.5	Οικιακή Κομποστοποίηση .....	24
2.3.6	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κομποστοποίησης.....	25
2.4.	Αναερόβια Χώνευση .....	26
2.4.1	Γενικά.....	26
2.4.2	Στάδια της Αναερόβιας Χώνευσης .....	27
2.4.3	Παράγοντες που επιδρούν στην αναερόβια χώνευση .....	29
2.4.4	Συστήματα Αναερόβιας Χώνευσης .....	31
2.4.5	Οικιακή αναερόβια χώνευση .....	33
2.4.6	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αναερόβιας χώνευσης .....	34
2.5.	Θερμικές Μέθοδοι Επεξεργασίας .....	36
2.5.1	Γενικά.....	36
2.5.2	Πυρόλυση .....	39
2.5.3	Αεριοποίηση .....	40

2.5.4	Αεριοποίηση/Υαλοποίηση με την τεχνική πλάσματος.....	41
2.6.	Υγειονομική Ταφή .....	42
3.	Διαχείριση Βιοαποβλήτων με τη Μέθοδο της Ξήρανσης .....	45
3.1.	Εισαγωγή.....	45
3.2.	Θεωρία της Ξήρανσης.....	46
3.2.1	Ορισμός .....	46
3.2.2	Μεταφορά Ενεργείας και Μάζας.....	47
3.2.3	Φαινόμενα κατά τη ξήρανση .....	48
3.2.4	Συμπεριφορά υλικών κατά την ξήρανση .....	51
3.2.5	Μέθοδοι Ξήρανσης.....	53
3.3.	Κινητικές Εξισώσεις Ξήρανση Οργανικών Απόβλητων από Ξηραντήρα με Ρεύμα Θερμού Αέρα .....	54
3.3.1	Παράγοντες που επηρεάζουν την απομάκρυνση της υγρασίας από τα υγρά στερεά.....	58
3.4.	Συστήματα Οικιακής Ξήρανσης.....	61
4.	Πειραματική Διαδικασία .....	71
4.1.	Περιγραφή του εμπορικού συστήματος οικιακής ξήρανσης .....	72
4.2.	Πειραματική Μέθοδος .....	76
4.2.1	Αρχική σύσταση υποστρώματος.....	76
4.2.2	Κύκλοι ξήρανσης.....	80
4.2.3	Προσδιορισμός μείωσης μάζας.....	80
4.2.4	Προσδιορισμός προφίλ θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας εντός της συσκευής.....	81
4.2.5	Προσδιορισμός όγκου δείγματος.....	82
4.2.6	Καταγραφή ενεργειακής κατανάλωσης.....	83
4.2.7	Ομογενοποίηση ξηρού υπολείμματος.....	83
4.2.8	Προσδιορισμός φυσικοχημικών παραμέτρων .....	85
4.3.	Μέθοδος ανάλυσης κινητικών ξήρανσης του οργανικού αποβλήτου.....	95
5.	Πειραματικά Αποτελέσματα-Συζήτηση και Σύγκριση Αποτελεσμάτων .....	97
5.1.	1 <sup>ος</sup> κύκλος ξήρανσης (μονομελής οικογένεια) .....	97
5.1.1	Προσδιορισμός μεταβολής μάζας δείγματος.....	97
5.1.2	Προσδιορισμός μεταβολής όγκου δείγματος.....	100

5.1.3	Προσδιορισμός ενεργειακής κατανάλωσης συσκευής οικιακής ξήρανσης.....	102
5.1.4	Προσδιορισμός μεταβολής υγρασίας.....	103
5.1.5	Προσδιορισμός φυσικοχημικών χαρακτηριστικών τελικού ξηρού υλικού	103
5.1.6	Προσδιορισμός συνθηκών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας .....	104
5.2.	2 <sup>ος</sup> κύκλος ξήρανσης (διμελής οικογένεια).....	105
5.2.1	Προσδιορισμός μεταβολής μάζας δείγματος.....	105
5.2.2	Προσδιορισμός μεταβολής όγκου δείγματος.....	108
5.2.3	Προσδιορισμός ενεργειακής κατανάλωσης συσκευής οικιακής ξήρανσης.....	111
5.2.4	Προσδιορισμός μεταβολής υγρασίας.....	112
5.2.5	Προσδιορισμός φυσικοχημικών χαρακτηριστικών τελικού ξηρού υλικού	112
5.2.6	Προσδιορισμός συνθηκών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας .....	113
5.3.	3 <sup>ος</sup> και 4 <sup>ος</sup> κύκλος ξήρανσης (τριμελής οικογένεια).....	114
5.3.1	Προσδιορισμός μεταβολής μάζας δείγματος.....	114
5.3.2	Προσδιορισμός μεταβολής όγκου δείγματος.....	119
5.3.3	Προσδιορισμός ενεργειακής κατανάλωσης συσκευής οικιακής ξήρανσης.....	122
5.3.4	Προσδιορισμός μεταβολής υγρασίας.....	123
5.3.5	Προσδιορισμός φυσικοχημικών χαρακτηριστικών τελικού ξηρού υλικού	124
5.3.6	Προσδιορισμός συνθηκών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας .....	124
5.4.	Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων.....	126
5.4.1	Μάζα Διαχειρισθέντος Νωπού Υλικού.....	126
5.4.2	Χρόνος περάτωσης διεργασίας ξήρανσης .....	127
5.4.3	Ποσοστό μείωσης μάζας νωπού υλικού .....	128
5.4.4	Ποσοστό μείωσης όγκου νωπού υλικού .....	128
5.4.5	Ποσοστό μείωσης υγρασίας νωπού υλικού .....	129
5.4.6	Ενεργειακή Κατανάλωση ανά kg νωπού υλικού .....	130
5.4.7	Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τελικού ξηρού υλικού .....	131
5.5.	Προσαρμογή Κινητικών Μοντέλων.....	132

5.6. Συμπεράσματα .....	138
6. Βιβλιογραφία .....	143
7. Παράρτημα .....	146

## Διαγράμματα

Διάγραμμα 1: Συσχέτιση υγρασιών στερεής και υγρής βάσης [30] .....	47
Διάγραμμα 2: Διάγραμμα υγρασίας ως συνάρτηση του χρόνου για σταθερές συνθήκες ξήρανσης. [27] .....	50
Διάγραμμα 3: Διάγραμμα του ρυθμού ξήρανσης ως προς την υγρασία για σταθερές συνθήκες ξήρανσης. [27] .....	51
Διάγραμμα 4: Συνολική πορεία μεταβολής μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας (1ος κύκλος).....	98
Διάγραμμα 5: Μεταβολή μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (1ος κύκλος).....	99
Διάγραμμα 6: Συνολική μεταβολή μάζας (1ος κύκλος) .....	99
Διάγραμμα 7: Συνολική πορεία μεταβολής όγκου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας (1 <sup>ος</sup> κύκλος).....	100
Διάγραμμα 8: Μεταβολή όγκου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (1ος κύκλος).....	101
Διάγραμμα 9: Συνολική μεταβολή όγκου (1ος κύκλος) .....	102
Διάγραμμα 10: Μεταβολή ενεργειακής κατανάλωσης 1ου κύκλου .....	102
Διάγραμμα 11: Συνολική μεταβολή υγρασίας 1ου κύκλου .....	103
Διάγραμμα 12: Μεταβολή θερμοκρασίας εντός της συσκευής κατά τη λειτουργία της (1ος κύκλος).....	104
Διάγραμμα 13: Μεταβολή σχετικής υγρασίας εντός της συσκευής κατά τη λειτουργία της (1ος κύκλος) .....	105
Διάγραμμα 14: Συνολική πορεία μεταβολής μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας (2ος κύκλος).....	106
Διάγραμμα 15: Μεταβολή μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (2ος κύκλος).....	107
Διάγραμμα 16: Συνολική μεταβολή μάζας (2ος κύκλος) .....	108
Διάγραμμα 17: Συνολική πορεία μεταβολής όγκου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας (2 <sup>ος</sup> κύκλος).....	109
Διάγραμμα 18: Μεταβολή όγκου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (2ος κύκλος).....	110
Διάγραμμα 19: Συνολική μεταβολή όγκου (2ος κύκλος) .....	110
Διάγραμμα 20: : Μεταβολή ενεργειακής κατανάλωσης 2ου κύκλου .....	111
Διάγραμμα 21: : Συνολική μεταβολή υγρασίας 2ου κύκλου .....	112

Διάγραμμα 22: Μεταβολή θερμοκρασίας εντός της συσκευής κατά τη λειτουργία της (2ος κύκλος).....	113
Διάγραμμα 23: Μεταβολή σχετικής υγρασίας εντός της συσκευής κατά τη λειτουργία της (2ος κύκλος) .....	113
Διάγραμμα 24: Συνολική πορεία μεταβολής μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας (3ος κύκλος).....	115
Διάγραμμα 25: Συνολική πορεία μεταβολής μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας (4ος κύκλος).....	115
Διάγραμμα 26: Μεταβολή μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (3ος κύκλος).....	117
Διάγραμμα 27: Μεταβολή μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (4ος κύκλος).....	117
Διάγραμμα 28: Συνολική μεταβολή μάζας (3ος και 4ος κύκλος) .....	118
Διάγραμμα 29: Συνολική πορεία μεταβολής όγκου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας (3ος κύκλος).....	119
Διάγραμμα 30: Συνολική πορεία μεταβολής μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας (4ος κύκλος).....	119
Διάγραμμα 31: Μεταβολή όγκου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (3ος κύκλος).....	120
Διάγραμμα 32: Μεταβολή όγκου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (4ος κύκλος).....	121
Διάγραμμα 33: Συνολική μεταβολή όγκου (3ος και 4ος κύκλος) .....	121
Διάγραμμα 34: Μεταβολή ενεργειακής κατανάλωσης 3ου κύκλου .....	122
Διάγραμμα 35: Μεταβολή ενεργειακής κατανάλωσης 4ου κύκλου .....	122
Διάγραμμα 36: Συνολική μεταβολή υγρασίας 3ου και 4ου κύκλου.....	123
Διάγραμμα 37: Μεταβολή θερμοκρασίας εντός της συσκευής κατά τη λειτουργία της (3ος κύκλος).....	124
Διάγραμμα 38: Μεταβολή σχετικής υγρασίας εντός της συσκευής κατά τη λειτουργία της (3ος κύκλος) .....	125
Διάγραμμα 39: Συνολική μάζα που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε σύστημα ξήρανσης.	126
Διάγραμμα 40: Συνολικός χρόνος που χρειάστηκε για ένα πλήρη κύκλο κάθε σύστημα ξήρανσης.....	127
Διάγραμμα 41: Συνολική απώλεια μάζας νωπού υλικού σε κάθε σύστημα ξήρανσης .....	128
Διάγραμμα 42: Συνολική απώλεια όγκου νωπού υλικού σε κάθε σύστημα ξήρανσης .....	129

Διάγραμμα 43: Συνολική απώλεια υγρασίας νοπού υλικού σε κάθε σύστημα ξήρανσης.....	130
Διάγραμμα 44: Συνολική ενεργειακή κατανάλωση σε κάθε σύστημα ξήρανσης ....	130
Διάγραμμα 45:RMSE του βέλτιστου μοντέλου προς το RMSE του κάθε κινητικού μοντέλου για πειραματικό κύκλο 1μελούς οικογένειας.....	136
Διάγραμμα 46: RMSE του βέλτιστου μοντέλου προς το RMSE του κάθε κινητικού μοντέλου για πειραματικό κύκλο 2μελούς οικογένειας.....	136
Διάγραμμα 47: RMSE του βέλτιστου μοντέλου προς το RMSE του κάθε κινητικού μοντέλου για πειραματικό κύκλο 1μελούς οικογένειας.....	137

### Σχήματα

Σχήμα 1:Ιεράρχηση πολιτικών διαχείρισης των ΑΣΑ στην Ευρωπαϊκή Ένωση.[20]...4	
Σχήμα 2: Κατηγορίες προέλευσης και διακριτά ρεύματα παραγωγής βιοαποβλήτων ..5	
Σχήμα 3:Διεργασία της κομποστοποίησης .....	16
Σχήμα 4: Διάγραμμα θερμοκρασίας και pH κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης	18
Σχήμα 5: Διεργασία αναερόβιας χώνευσης .....	27
Σχήμα 6: Επεξεργασία αστικών αποβλήτων στην Ε.Ε. ....	43

## Πίνακες

Πίνακας 1: Νομοθετικό πλαίσιο σχετικά με τη διαχείριση βιοαποβλήτων σε Ελλάδα και Ε.Ε. ....	9
Πίνακας 2: Σύνοψη συστημάτων κομποστοποίησης.....	21
Πίνακας 3: Σύνοψη συστημάτων αναερόβιας χώνευσης.....	32
Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά μεθόδων θερμικής επεξεργασίας.....	37
Πίνακας 5: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα Χ.Υ.Τ.Α.....	43
Πίνακας 6: Ημερήσιο πρότυπο μείγμα αποβλήτων τροφών συναρτήσει του αριθμού των μελών οικογένειας .....	76
Πίνακας 7: Σύσταση του προτύπου μείγματος διατροφικών απορριμμάτων .....	79
Πίνακας 8: Καταγραφή μεταβολής μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής(1ος κύκλος) .....	98
Πίνακας 9: Καταγραφή μεταβολής όγκου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής(1ος κύκλος) .....	101
Πίνακας 10: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τελικού ξηρού υλικού 1ου κύκλου.....	104
Πίνακας 11: Καταγραφή μεταβολής μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής(2ος κύκλος) .....	106
Πίνακας 12: : Καταγραφή μεταβολής όγκου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής(2ος κύκλος) .....	109
Πίνακας 13: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τελικού ξηρού υλικού 2ου κύκλου.....	112
Πίνακας 14: Καταγραφή μεταβολής μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (3ος κύκλος) .....	116
Πίνακας 15: Καταγραφή μεταβολής μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (4ος κύκλος) .....	116
Πίνακας 16: : Καταγραφή μεταβολής όγκου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (3ος κύκλος) .....	120
Πίνακας 17: : Καταγραφή μεταβολής όγκου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (4ος κύκλος) .....	120
Πίνακας 18: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τελικού ξηρού υλικού 3ου και 4ου κύκλου.....	124
Πίνακας 19: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του τελικού ξηρού υλικού που προέκυψε από το κάθε σύστημα ξήρανσης .....	131
Πίνακας 20: Κινητικά Μοντέλα Ξήρανσης .....	132
Πίνακας 21: Παράμετροι των Μοντέλων Ξήρανσης για κύκλο 1μελούς οικογένειας (1ος) .....	132



Πίνακας 22: Παράμετροι Μοντέλων Ξήρανσης για κύκλο διμελούς οικογένειας (2ος ) .....	133
Πίνακας 23: Παράμετροι των Μοντέλων Ξήρανσης για κύκλο τριμελούς οικογένειας (3ος και 4ος) .....	133
Πίνακας 24: RMSE των Εμπειρικών Μοντέλων Ξήρανσης.....	135

### Εικόνες

Εικόνα 1: X.Y.T.A. Αττικής.....	7
Εικόνα 2: Καδοι συλλογής οικιακών βιοαποβλήτων.....	13
Εικόνα 3: Κάδοι Συλλογής .....	13
Εικόνα 4: Υπόγειοι Κάδοι.....	13
Εικόνα 5: Οχήματα Συλλογής και Μεταφοράς ΒΑ .....	14
Εικόνα 6: Σύστημα αναστρεφόμενων σειραδίων .....	22
Εικόνα 7: Αεριζόμενος στατικός σωρός.....	22
Εικόνα 8: : Σχηματική αναπαράσταση των βασικών τύπων κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης( a & c κάθετοι αντιδραστήρες, b & d οριζόντιοι αντιδραστήρες) [12].....	23
Εικόνα 9: Οικιακοί κομποστοποιητές.....	25
Εικόνα 10: : Συστήματα «ξηρής» αναερόβια χώνευσης ενός σταδίου Dranco, Valorga και Komrogas .....	33
Εικόνα 11: Αρχές λειτουργίας των οικιακών τύπων αντιδραστήρων AX: α) Κινέζικος τύπος, .....	34
Εικόνα 12: Τα 3 είδη αποτεφρωτήρων .....	38
Εικόνα 13: Διεργασία της πυρόλυσης[17].....	39
Εικόνα 14:Διάγραμμα ροής σε τυπική μονάδα αεριοποίησης[17] .....	40
Εικόνα 15:Σύστημα οικιακής ξήρανσης Loofen[36].....	62
Εικόνα 16:Προδιαγραφές των διαφορετικών μοντέλων της εταιρίας Loofen[36] .....	62
Εικόνα 17: Φίλτρο ενεργού άνθρακα των συσκευών Loofen[36].....	63
Εικόνα 18: Μοντέλο Loofen LF-07[36] .....	63
Εικόνα 19: Συσκευή ξήρανσης Smart Cara .....	64
Εικόνα 20: Συστήματα ξήρανσης Coway[35] .....	65
Εικόνα 21: Τα βασικά μέρη ενός οικιακού ξηραντήρα [35] .....	66
Εικόνα 22:Τεχνικές προδιαγραφές του ξηραντήρα WM05-A [35] .....	66
Εικόνα 23: Συσκευές ξήρανσης SomohNK [37] .....	67

Εικόνα 24:Σύστημα οικιακής ξήρανσης DUO Enterprise Ltd.[33].....	68
Εικόνα 25: Σύστημα οικιακής ξήρανσης DRYWASTE.....	69
Εικόνα 26: Σύστημα ξήρανσης Loofen LF-07[36].....	72
Εικόνα 27: Εσωτερικό και εξωτερικό μέρος της συσκευής LF-07[36].....	73
Εικόνα 28: Φίλτρο ενεργού άνθρακα .....	73
Εικόνα 29: Φωτογραφία του εσωτερικού της συσκευής .....	74
Εικόνα 30: Φωτογραφία κάδου απόρριψης της συσκευής .....	74
Εικόνα 31: Φωτογραφία κάδου απόρριψης με και χωρίς σχάρα.....	75
Εικόνα 32: Αναπαράσταση της κυκλοφορίας αέρα εντός της συσκευής[36] .....	75
Εικόνα 33: Ζυγός ακριβείας.....	81
Εικόνα 34: Εξωτερικό και εσωτερικό συστήματος Loofen κατά τη λειτουργία .....	81
Εικόνα 35: Αισθητήρας μέτρησης θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας .....	82
Εικόνα 36: Αισθητήρας εντός του καλαθιού απόρριψης.....	82
Εικόνα 37: Άδειος κάδος απόρριψης.....	83
Εικόνα 38: Μετρητής καταναλισκόμενης ενέργειας .....	83
Εικόνα 39: Τελικό ξηρό υλικό πριν την άλεση.....	84
Εικόνα 40: Μύλος άλεσης .....	84
Εικόνα 41: Τελικό ξηρό υλικό μετά την άλεση .....	84
Εικόνα 42: Φούρνος ξήρανσης .....	86
Εικόνα 43: Συσκευή ανάδευσης .....	87
Εικόνα 44: Πεχάμετρο METTLER TOLEDO MPC227 .....	87
Εικόνα 45: Συσκευή Gerhardt KJELDATHERM .....	88
Εικόνα 46: Συσκευή απόσταξης Vapodest .....	89
Εικόνα 47:Πριν και μετά τη τιτλοδότηση κατά τη μέθοδο προσδιορισμού του αζώτου των δειγμάτων.....	89
Εικόνα 48: Συσκευή Shimatzu (TOC).....	92
Εικόνα 49: Πορσελάνινη κάψα.....	92
Εικόνα 50: Φούρνος (Solid Sample Module SSM 5000A) .....	93
Εικόνα 51:Κεντρική μονάδα TOCVCSH .....	93
Εικόνα 52: Φούρνος υψηλών θερμοκρασιών .....	94
Εικόνα 53: Πορσελάνινες Κάψες.....	95

### ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ/ABBREVIATIONS

ΑΧ	Αναερόβια Χώνευση
ΑΣΑ	Αστικά Στερεά Απορρίμματα
ΒΑΑ	Βιοαποδομήσιμα Αστικά Απορρίμματα
ΒΑ	Βιοαπόβλητα
ΒΕ	Βελτιωτικό Εδάφους
ΔΑ	Διαχείριση Απορριμμάτων
ΔΒ	Διαχείριση Βιοαποβλήτων
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΕΜΠ	Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
ΕΠΕ	Εταιρία Περιορισμένης Ευθύνης
ΕΠΠΕΡΡΑ	Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Περιβάλλον και Αειφόρος Ανάπτυξη
ΜΠΕΤ	Μονάδα Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας
ΠΑ	Παραγωγή Απορριμμάτων
ΣΑ	Στερεά Απόβλητα
ΤΔ	Τελική Διάθεση
ΧΥΤΑ	Χώροι Υγειονομικής Ταφής
NTUA	National Technical University of Athens
RDF	Refuse-Derived Fuel
SRF	Solid Recovered Fuel
TKN	Total Kjeldahl Nitrogen
TN	Total Nitrogen
TOC	Total Organic Carbon
VS	Volatile Solids



# **1. Εισαγωγή στα βιοαπόβλητα**

## **1.1. Εισαγωγή**

Στις αρχές του προηγούμενου αιώνα, το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού κατοικούσε σε χωριά και μικρές πόλεις, και είχε στην κατοχή του κυρίως μικρές καλλιέργειες και λίγα κατοικίδια ζώα με αποτέλεσμα τα απόβλητα τα οποία παράγαγε να τα μετατρέπει σε λίπασμα ή να δίνονται ως τροφή στα ζώα. Τα χαρτιά, τα μπουκάλια, τα μέταλλα ή άλλες συσκευασίες ήταν πολύτιμα υλικά για διάφορες χρήσεις και εν συνεχεία για το τζάκι, το μαγκάλι ή την ανακύκλωση.

Κατά το δεύτερο ήμισυ του 20ου αιώνα διάφοροι λόγοι, κυρίως πολιτικοί, κοινωνικοί, οικονομικοί και χωροταξικοί, συντέλεσαν ώστε να οδηγηθούμε σε μια τελείως διαφορετική κατάσταση. Η ύπαιθρος ερημώθηκε σε μεγάλο βαθμό και οι πόλεις διογκώθηκαν υπερβολικά για να καταλήξουν στην σημερινή τους μορφή με τους πολίτες στοιβαγμένους σε πολυώροφα κτίρια με κεντρική θέρμανση και χωρίς δυνατότητα πρόσβασης σε ελεύθερο χώρο, με συνέπεια να μην είναι δυνατή η αξιοποίηση μεγάλου μέρους των σκουπιδιών, δηλαδή των χαρτιών ή των οργανικών.

Συνεπώς η αλματώδης αύξηση του πληθυσμού των πόλεων σε συνδυασμό με τη συγκεκριμένη χωροταξική τους κατάληξη και δομή, αλλά και με το σύγχρονο πρότυπο ζωής οδήγησαν τις σύγχρονες κοινωνίες να είναι πλέον αντιμέτωπες με τους συνεχώς αυξανόμενους όγκους απορριμμάτων όλο και πιο πολύπλοκης σύνθεσης προκαλώντας προβλήματα σταδιακά τόσο στον άνθρωπο όσο και στο κάθε μορφής περιβάλλον. Έτσι, τις προηγούμενες δεκαετίες αυξήθηκαν αισθητά οι καταναλωτικές συνήθειες των πολιτών, επεκτάθηκε η κατασκευή υλικών ως παράγωγα χημικών διεργασιών, αυξήθηκαν υπερβολικά τα συσκευασμένα προϊόντα, οι συσκευασίες έγιναν μεγαλύτερες και βαρύτερες, μιας χρήσης και λιγότερο φιλικές προς το περιβάλλον. Παράλληλα, η μόνη «τεχνική» που εφαρμοζόταν στη διαχείριση των απορριμμάτων στις πόλεις, μικρές ή μεγάλες, ήταν η συλλογή και το ξεφόρτωμά τους οπουδήποτε, και στην συνεχεία έπαιρνε σειρά η ανεξέλεγκτη ή «ελεγχόμενη» καύση τους.[13]

Σήμερα επομένως, ενώ παρατηρούνται δείγματα υπέρμετρης κατανάλωσης αγαθών σχεδόν σε όλα τα τμήματα της κοινωνίας των προηγμένων τεχνολογικά και οικονομικά χωρών, ταυτόχρονα υπάρχουν και ελπιδοφόρα ψήγματα ανάκλησης της γενικότερης επικρατούσας τάσης είτε λόγω της συνειδητοποίησης των συνεπειών τόσο στο φυσικό περιβάλλον όσο και στον άνθρωπο μαζί με όλους τους τομείς που ο ίδιος επηρεάζει ή λόγω των οικονομικών κινήτρων περί προστασίας του περιβάλλοντος. Όποιος και αν θεωρείται ως λόγος, το αποτέλεσμα μπορεί να κριθεί ως θετικό για το περιβάλλον. Ενδείξεις αποτελούν αλλαγές στη νομοθεσία, κίνητρα και αντικίνητρα οικονομικών εργαλείων, κάποιες νέες τεχνολογικές προτάσεις και συστήματα διαχείρισης απορριμμάτων καθώς και η μεταστροφή της γνώμης συνεχώς

αυξανόμενου αριθμού ατόμων της κοινωνίας αποδεχόμενων της προσωπικής ευθύνης για την παρούσα κατάσταση. [18]

## **1.2. Αρχές και Στρατηγική Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση**

Η οικονομική μεγέθυνση στην ΕΕ εξακολουθεί να συνοδεύεται από αυξανόμενους όγκους αποβλήτων, με αποτέλεσμα να προκαλούνται απώλειες υλικών και ενέργειας, περιβαλλοντικές ζημιές και αρνητικές συνέπειες στην υγεία και την ποιότητα ζωής. Στρατηγικός στόχος της ΕΕ είναι να περιορισθούν αυτές οι αρνητικές συνέπειες και να μετατραπεί σε ενεργειακά αποδοτική «κοινωνία της ανακύκλωσης». Η διαχείριση των αποβλήτων διέπεται ήδη από μεγάλο όγκο κανονιστικών ρυθμίσεων, υπάρχουν όμως ακόμη δυνατότητες περαιτέρω βελτίωσης της διαχείρισης ορισμένων κύριων ροών αποβλήτων.

Στις αρχές της δεκαετίας του '70, η Ευρωπαϊκή Οικονομική Κοινότητα αναλαμβάνει σταθερή δέσμευση όσο αφορά στο περιβάλλον με κύριους άξονες την προστασία της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα και των υδάτων, τη διατήρηση της βιοποικιλότητας και φυσικά τη διατήρηση των φυσικών πόρων και τη διαχείριση των αποβλήτων και των δραστηριοτήτων με δυσμενείς επιπτώσεις

Η Αρχική ευαισθητοποίηση στην Ευρωπαϊκή Ένωση για την προστασία του περιβάλλοντος ξεκίνησε ουσιαστικά με την Σύνοδο κορυφής των Παρισίων το 1974. Ακολούθησαν τα “προγράμματα δράσης” της Κοινότητας και ήδη από το 1975 προβλέπονται στον κοινοτικό προϋπολογισμό κονδύλια για την προστασία του περιβάλλοντος. Το 1981 οι ως τότε διάσπαρτες περιβαλλοντικές υπηρεσίες συγχωνεύονται στην Γενική Διεύθυνση XI (περιβάλλον, πυρηνική ασφάλεια προστασία πολιτών) και υπό το πρίσμα των εξελίξεων υιοθετείται η Ενιαία Ευρωπαϊκή Πράξη (1η Ιουλίου 1987) ως ανεξάρτητη πολιτική για το περιβάλλον. Την ίδια χρονιά υιοθετείται το 4ο Πρόγραμμα Δράσης για το περιβάλλον, με βασικό στόχο την αποτελεσματική εφαρμογή της κοινοτικής νομοθεσίας για το περιβάλλον από τα κράτη μέλη. Το 1991 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ξεκίνησε το πρόγραμμα για την διαχείριση των αποβλήτων προτεραιότητας στα οποία περιλαμβάνονταν:

- Απόβλητα από ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό.
- Απόβλητα από κατασκευές και κατεδαφίσεις.
- Οχήματα στο τέλος κύκλου ζωής τους.
- Συσσωρευτές.
- Ελαστικά.
- Συσκευασίες και απορρίμματα συσκευασιών.
- Χρησιμοποιημένα Ορυκτέλαια.
- Νοσοκομειακά απόβλητα.
- PCB's.

Ακολούθησε το 5ο Πρόγραμμα Δράσης για το Περιβάλλον "προς μια αειφόρο ανάπτυξη" το οποίο θέσπισε τις αρχές μιας πιο ενεργητικής Ευρωπαϊκής στρατηγικής για την περίοδο 1992-2000 και σηματοδότησε την αρχή μίας οριζόντιας κοινοτικής δράσεως, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους παράγοντες ρύπανσης (βιομηχανία, ενέργεια, τουρισμός, μεταφορές, γεωργία). Πλέον τρέχει το 6ο Πρόγραμμα Δράσης για το Περιβάλλον το οποίο προσδιορίζει γενικούς στόχους και καθορίζει κατάλογο περιβαλλοντικών προτεραιοτήτων μέχρι και το έτος 2010.

Η περιβαλλοντική πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης εστιάζει στα εξής σημεία:

- Η πρόληψη είναι προτιμότερη από την λήψη διορθωτικών μέτρων.
- Τα περιβαλλοντικά προβλήματα πρέπει να αντιμετωπίζονται στην πηγή τους.
- Ο ρυπαίνων πρέπει να πληρώνει το κόστος των μέτρων που θα ληφθούν για την προστασία του περιβάλλοντος
- Η περιβαλλοντική πολιτική πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και να αποτελεί τμήμα των άλλων πολιτικών της Ευρωπαϊκής Κοινότητας.

Ολόκληρη η περιβαλλοντική πολιτική της Ε.Ε. βασίζεται στην αρχή "ο ρυπαίνων πληρώνει". Σύμφωνα με αυτήν, ο ρυπαντής, είναι υπεύθυνος για τις επιπτώσεις και για την δαπάνη αποκατάστασης των ζημιών. Κατά συνέπεια, είναι ζητούμενο ο κάθε πολίτης να υποχρεούται να καλύπτει πλήρως την δαπάνη διαχείρισης των ΑΣΑ (Αστικά Στερεά Απόβλητα) που παράγει. Οι πληρωμές μπορεί να πραγματοποιηθούν με την μορφή επενδύσεων για να επιτευχθεί συμμόρφωση προς αυστηρότερα πρότυπα ή με τη μορφή φόρου επιβαλλόμενου στις επιχειρήσεις ή στους καταναλωτές που χρησιμοποιούν μη οικολογικά προϊόντα.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, σύμφωνα με τις ισχύουσες Συνθήκες και βάσει των Αρχών της Βιώσιμης (αειφορικής) Ανάπτυξης, έχει υιοθετήσει την παρακάτω ιεράρχηση (η οποία έχει ενσωματωθεί και στην εθνική μας νομοθεσία) στον τομέα της διαχείρισης των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (Εικόνα 1):

1. Πρόληψη ή Μείωση στην πηγή
2. Ελαχιστοποίηση
3. Επαναχρησιμοποίηση
4. Ανακύκλωση
5. Ανάκτηση ενέργειας
6. Τελική διάθεση.



**Σχήμα 1:Ιεράρχηση πολιτικών διαχείρισης των ΑΣΑ στην Ευρωπαϊκή Ένωση.[20]**

Η παραπάνω Κοινοτική Πολιτική καταρτίστηκε το 6ο Πρόγραμμα Δράσης της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το Περιβάλλον (6ο ΠΔΠ) Στα κείμενα του 6ου Προγράμματος Δράσης της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το Περιβάλλον προβλέπεται ότι τα απόβλητα θα συνεχίσουν να αυξάνονται εκτός κι αν αναληφθεί διορθωτική δράση. Ιδιαίτερη προσοχή στο 6ο ΠΔΠ δίνεται σε τέσσερις τομείς προτεραιότητας για δράση:

- Αντιμετώπιση της αλλαγής του κλίματος
- Φύση και βιοποικιλότητα
- Περιβάλλον και υγεία
- Βιώσιμη χρήση των φυσικών πόρων
- Διαχείριση των αποβλήτων

Η ιεράρχηση που φαίνεται να επικρατεί στην πράξη αφορά στα κριτήρια επιλογής εναλλακτικών συστημάτων διαχείρισης τα οποία είναι:

1. Κόστος,
2. Κοινωνική αποδοχή και
3. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

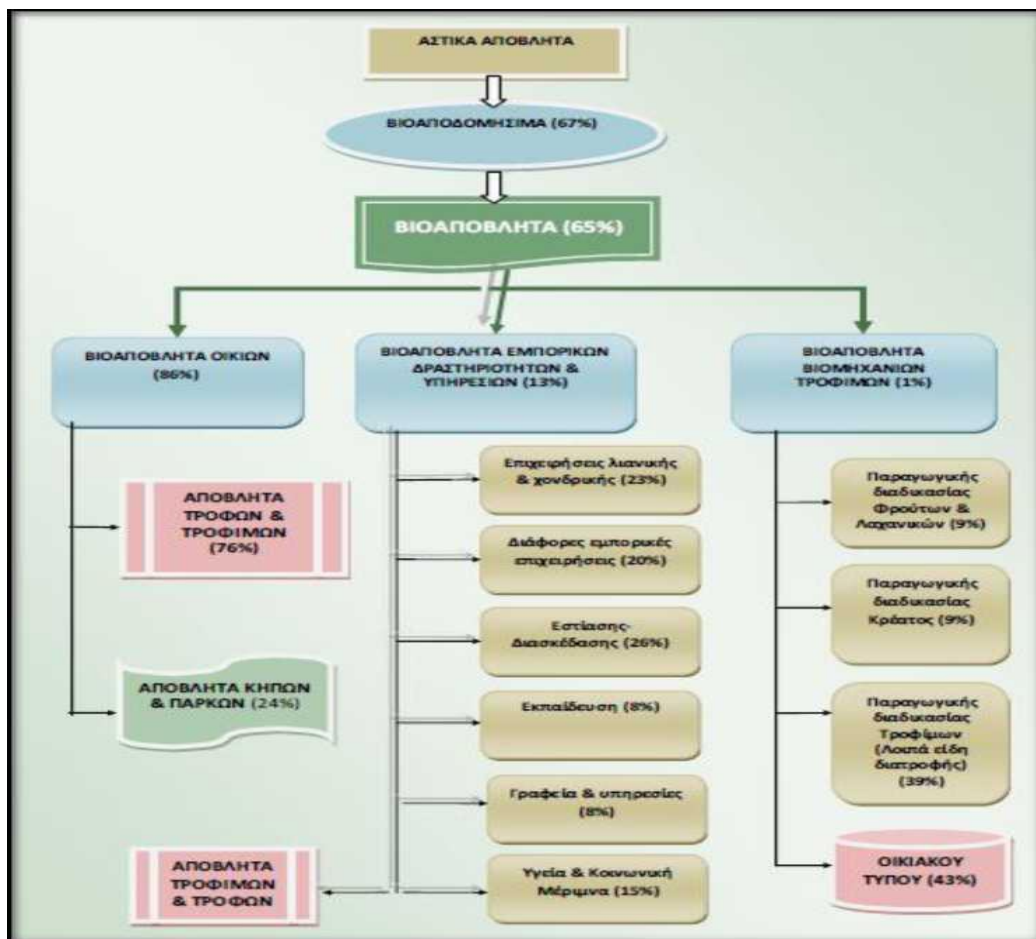


### 1.3. Ορισμός και κατηγοριοποίηση βιολογικών αποβλήτων

Μέρος των Αστικών Αποβλήτων αποτελούν τα βιοαποδομήσιμα απόβλητα (BAA), τα οποία σύμφωνα με την οδηγία περί υγειονομικής ταφής (99/31/EC), ορίζονται ως "κάθε απόβλητο που είναι σε θέση να υποστεί αναερόβια ή αερόβια αποσύνθεση", όπως είναι τα απόβλητα τροφών & κηπουρικής, το χαρτί-χαρτόνι & το ξύλο.

Επιπλέον σύμφωνα με την Οδηγία 98/2008 για τα απόβλητα και την Πράσινη Βίβλο, τα βιοαπόβλητα ή βιολογικά απόβλητα (BA) αποτελούν υποσύνολο των βιοαποδομήσιμων αποβλήτων (BAA) και ορίζονται ως εξής:

Βιολογικά απόβλητα ονομάζουμε τα βιοαποικοδομήσιμα απόβλητα κήπων και πάρκων, τα απορρίμματα τροφών και μαγειρείων νοικοκυριών, εστιατορίων, μονάδων εστίασης και καταστημάτων λιανικής πώλησης, και παρεμφερή απόβλητα εγκαταστάσεων επεξεργασίας τροφίμων. Στον ορισμό δεν περιλαμβάνονται τα δασικά ή γεωργικά κατάλοιπα, η κοπριά, η ιλύς επεξεργασίας λυμάτων ή άλλα βιοαποικοδομήσιμα απόβλητα όπως οι φυσικές ίνες, το χαρτί ή το κατεργασμένο ξύλο.[1]



Σχήμα 2: Κατηγορίες προέλευσης και διακριτά ρεύματα παραγωγής βιοαποβλήτων

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα τα βιοαπόβλητα διακρίνονται σε 3 βασικές κατηγορίες:

i. **Οικιακά βιοαπόβλητα**

Τα **οικιακά βιοαπόβλητα** αποτελούν το οργανικό κλάσμα των βιοαποδομησιμων αποβλήτων τα οποία δημιουργούνται στις οικίες (ή και σε δημόσιους χώρους στην περίπτωση των αποβλήτων κήπων) και διακρίνονται σε:

**Απόβλητα τροφών** Το ρεύμα αυτό περιλαμβάνει τρόφιμα που απορρίπτονται γιατί δεν χρησιμοποιήθηκαν καθόλου ή χρησιμοποιήθηκαν εν μέρει κατά την παρασκευή γευμάτων εντός των οικιών. Επίσης περιλαμβάνει τις ποσότητες φρέσκων φρούτων και λαχανικών που απορρίφθηκαν.

**Απόβλητα κήπων - πρασίνου** τα οποία είναι τα πράσινα απόβλητα από τους κήπους των οικιών και δημόσιων χώρων και εν γένει των υπολειμμάτων βλάστησης από τη συντήρηση χώρων πρασίνου του τοπίου. Περιλαμβάνουν μοσχεύματα δέντρων, κλαδιά, χόρτα, φύλλα, κλαδέματα, παλιά φυτά, λουλούδια κλπ.

ii. **Εμπορικά βιοαπόβλητα**

Τα απόβλητα που προέρχονται από **επιχειρήσεις** που χρησιμοποιούνται κυρίως για εμπορικούς ή επαγγελματικούς σκοπούς, δραστηριοποιούνται ως κέντρα διασκέδασης, αναψυχής και εστίασης. Η κατηγορία αυτή εμπεριέχει τα βιοαπόβλητα που προέρχονται από αθλητικές δραστηριότητες, υπηρεσίες αναψυχής, τις υπηρεσίες δημοσίου ή ιδιωτικού χαρακτήρα, οργανισμούς κοινής ωφέλειας και εκπαιδευτικά ιδρύματα.

iii. **Βιομηχανικά βιοαπόβλητα**

**Βιοαπόβλητα βιομηχανιών** ονομάζονται τα βιοαπόβλητα που προέρχονται από τις βιομηχανίες τροφίμων και ποτών. Στον εν λόγω ορισμό δεν συμπεριλαμβάνονται τα δασικά ή γεωργικά κατάλοιπα, η κοπριά, η ιλύς επεξεργασίας αστικών λυμάτων καθώς και άλλα βιοαποδομήσιμα όπως οι φυσικές ίνες, το χαρτί ή το κατεργασμένο ξύλο. Επιπλέον και με βάση τον ορισμό για τα βιοαπόβλητα, εξαιρούνται τα παραπροϊόντα της παραγωγής τροφίμων που δεν μετατρέπονται ποτέ σε απόβλητα.

Τα βιοαπόβλητα βιομηχανιών χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- Εγκαταστάσεις επεξεργασίας Φρούτων & Λαχανικών
- Εγκαταστάσεις επεξεργασίας Κρέατος & Αλιευμάτων
- Λοιπές εγκαταστάσεις επεξεργασίας Τροφίμων

Τα βιοαπόβλητα των παραπάνω εγκαταστάσεων χωρίζονται σε αυτά που προέρχονται από την παραγωγική διαδικασία και διατίθενται προς ταφή χωρίς επεξεργασία και σε αυτά που είναι αστικού τύπου.[1]

#### **1.4. Υφιστάμενη νομοθεσία για τη διαχείρισης των βιολογικών απορριμμάτων στην Ε.Ε.**

Υπολογίζεται ότι στην ΕΕ παράγονται ετησίως 76,5-102 εκατομμύρια τόνοι αποβλήτων από τρόφιμα και κήπους που περιέχονται σε ανάμεικτα αστικά απορρίμματα και έως 37 εκατομμύρια τόνοι από τη βιομηχανία ειδών διατροφής και ποτών.

Η κύρια περιβαλλοντική απειλή από τα βιολογικά απόβλητα είναι η παραγωγή αερίων του θερμοκηπίου από την αποσύνθεση αυτών σε ΧΥΤΑ, τα οποία αντιπροσωπεύουν περίπου το 3% των συνολικών εκπομπών στην ΕΕ-15 το 1995. Ένας τόνος βιολογικών αποβλήτων παράγει μεταξύ 200 και 400 m<sup>3</sup> αερίου υγειονομικής ταφής. Αν το αέριο που αναδύεται από τους χώρους της υγειονομικής ταφής, δεν συλληφθεί, συμβάλει σημαντικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθώς αποτελείται κυρίως από μεθάνιο, που είναι 23 φορές πιο ισχυρό από το διοξείδιο του άνθρακα όσον αφορά τις επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή.[21]



**Εικόνα 1: Χ.Υ.Τ.Α. Αττικής**

Η οδηγία **1999/31/ΕΚ** υποχρεώνει τα κράτη μέλη της ΕΕ να μειώσουν την ποσότητα των βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων που οδηγούνται στους ΧΥΤΑ στο 35% των επιπέδων του 1995 μέχρι το 2016 (για ορισμένες χώρες έως το 2020), γεγονός το οποίο αναμένεται να μειώσει την παραγωγή αερίων θερμοκηπίου σε επίπεδο ΕΕ.

Μεταξύ των λύσεων διαχείρισης των βιολογικών αποβλήτων, πέραν της πρόληψης στην πηγή τους, είναι η αποκομιδή (χωριστή ή μαζί με άλλα απόβλητα), η αναερόβια ζύμωση και η λιπασματοποίηση, η αποτέφρωση και η υγειονομική ταφή. Τα περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη των διαφόρων μεθόδων επεξεργασίας εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις κατά τόπους συνθήκες, όπως είναι η πυκνότητα πληθυσμού, οι υποδομές και το κλίμα, καθώς και από τις αγορές των αντίστοιχων προϊόντων (ενέργεια και προϊόντα λιπασματοποίησης).

Ορισμένες νομικές πράξεις της ΕΕ πραγματεύονται το θέμα της επεξεργασίας των βιολογικών αποβλήτων. Γενικές απαιτήσεις για τη διαχείριση των αποβλήτων, όσον αφορά π.χ. την προστασία του περιβάλλοντος και την ανθρώπινη υγεία κατά την επεξεργασία των αποβλήτων και για την κατά προτεραιότητα ανακύκλωση των αποβλήτων, καθορίζονται στην αναθεωρημένη οδηγία-πλαίσιο για τα απόβλητα, η οποία περιέχει επίσης διατάξεις ειδικά για τα βιολογικά απόβλητα (νέους στόχους ανακύκλωσης για τα οικιακά απορρίμματα που μπορούν να συμπεριλαμβάνουν βιολογικά απόβλητα) και τον μηχανισμό καθορισμού κριτηρίων ποιότητας για τα προϊόντα λιπασματοποίησης.

Η νομοθεσία της ΕΕ δεν περιορίζει τις επιλογές των κρατών μελών όσον αφορά τις λύσεις επεξεργασίας των βιολογικών αποβλήτων, εφόσον τηρούνται ορισμένες προϋποθέσεις πλαισίου που θέτει η οδηγία-πλαίσιο για τα απόβλητα.

Η επιλογή της λύσης επεξεργασίας πρέπει να εξηγείται και να δικαιολογείται σε εθνικά ή περιφερειακά σχέδια διαχείρισης των αποβλήτων και προγραμμάτων πρόληψης. Με τον ορισμό, ταυτόχρονα, της έννοιας «απόβλητα», ο οποίος πριν την αναθεώρηση της οδηγίας -πλαισίου δεν οριοθετούσε με σαφήνεια πότε έχουν υποβληθεί τα απόβλητα σε κατάλληλη επεξεργασία, ώστε να θεωρούνται προϊόν, χαράχθηκαν πολλές και ποικίλες πολιτικές και μέθοδοι επεξεργασίας στην ΕΕ, όπως επίσης δημιουργήθηκαν και διάφορες ερμηνείες από κράτη μέλη σχετικά με το πότε επεξεργασμένα βιολογικά απόβλητα είναι δυνατόν να παύσουν να είναι απόβλητα και να είναι προϊόντα που είναι δυνατόν να διακινούνται ελεύθερα στην εσωτερική αγορά ή να εξάγονται από την ΕΕ.

Σήμερα, εφαρμόζονται πολύ διαφορετικές εθνικές πολιτικές διαχείρισης των βιολογικών αποβλήτων, οι οποίες κυμαίνονται από ελάχιστα μέτρα σε ορισμένα κράτη μέλη έως φιλόδοξες πολιτικές σε άλλα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και σε παρεμπόδιση ή καθυστέρηση της πλήρους χρήσης προηγμένων τεχνικών διαχείρισης των βιολογικών αποβλήτων. Εκείνο που πρέπει να ερευνηθεί είναι κατά πόσον η ανάληψη δράσης σε εθνικό επίπεδο αρκεί για να εξασφαλισθεί ορθή διαχείριση των βιολογικών αποβλήτων στην ΕΕ, ή εάν χρειάζεται ανάληψη δράσης σε επίπεδο Κοινότητας.[11]

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται το νομοθετικό πλαίσιο σχετικά με τη διαχείριση των βιοαποβλήτων στην Ελλάδα και την ΕΕ. [1]

**Πίνακας 1: Νομοθετικό πλαίσιο σχετικά με τη διαχείριση βιοαποβλήτων σε Ελλάδα και Ε.Ε.**

<b>Ευρωπαϊκή Νομοθεσία</b>	<b>Εθνική Νομοθεσία</b>	<b>Επισημάνσεις</b>
Οδηγία 98/2008/ΕΚ για τα απόβλητα Οδηγία 2008/99/ΕΚ σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος μέσω του ποινικού δικαίου.	ΝΟΜΟΣ 4042 (ΦΕΚ Α' 24/13-02-2012) Ποινική προστασία του περιβάλλοντος - Πλαίσιο παραγωγής και διαχείρισης αποβλήτων.	(Εναρμόνιση με την Οδηγία 2008/99/ΕΚ και την Οδηγία 2008/98/ΕΚ.) Σύμφωνα με το άρθρο 41: Έως το 2015, το ποσοστό χωριστής συλλογής των βιολογικών αποβλήτων πρέπει να ανέλθει, κατ' ελάχιστον, στο 5% του συνολικού βάρους των βιολογικών αποβλήτων και έως το 2020, κατ' ελάχιστον, στο 10% του συνολικού βάρους των βιολογικών αποβλήτων.
Οδηγία 91/156/ΕΚ περί στερεών αποβλήτων.	ΚΥΑ 114218/1997 (ΦΕΚ 1016Β/17.11.97), Κατάρτιση πλαισίου Προδιαγραφών και γενικών προγραμμάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων.	Ενσωμάτωση των γενικών κατευθύνσεων και προδιαγραφών της 75/442/ΕΚ περί στερεών αποβλήτων, όπως τροποποιήθηκε από την 91/156/ΕΚ.
Οδηγία 1999/31/ΕΚ περί υγειονομικής ταφής αποβλήτων.	ΚΥΑ 29407/3508/2002 (ΦΕΚ 1572Β/16.12.02), Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων	Θέσπιση στόχων για επεξεργασία πριν την ταφή και μείωση της ποσότητας των ΒΑΑ που οδηγείται για ταφή.
Οδηγία 75/442/ΕΚ, όπως τροποποιήθηκε με την 91/156/ΕΚ.	ΚΥΑ 50910/2727/2003 (ΦΕΚ 1909Β/22.12.2003), Μέτρα και Όροι για τη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων. Εθνικός και Περιφερειακός Σχεδιασμός Διαχείρισης.	Εναρμόνιση εθνικού με ευρωπαϊκό δίκαιο Σε εθνικό επίπεδο με την εν λόγω ΚΥΑ ενσωματώθηκε η 75/442/ΕΚ, όπως τροποποιήθηκε με την 91/156/ΕΚ θέτοντας αυστηρότερες κατευθύνσεις, μέτρα, όρους και διαδικασίες για την διαχείριση στερεών αποβλήτων και εισήγαγε τους ευρωπαϊκούς στόχους και αρχές στην εθνική στρατηγική διαχείρισης.
Οδηγία 2008/ι/ΕΚ, σχετικά με την ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχο της ρύπανσης.	ΚΥΑ 22912/1117 (ΦΕΚ 759Β/06.06.05) Μέτρα και όροι για την πρόληψη και τον περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος από την αποτέφρωση των αποβλήτων.	Εναρμόνιση εθνικού με ευρωπαϊκό δίκαιο.
Οδηγία 28/2009/ΕΚ, σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές	Νόμος 3468/2006 (ΦΕΚ 129Α/27.06.06) Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές & Συμπαράγωγή Ηλεκτρισμού & Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης, (τροποποιήθηκε από τους Ν.3734/2009, Ν.3851/2010, Ν.3889/2010.	Ενσωμάτωση της ευρωπαϊκής στην εθνική νομοθεσία. Τίθενται στόχοι σε εθνικό επίπεδο συμπεριλαμβάνοντας και τα βιοαπόβλητα ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, στο ευρύτερο πλαίσιο της βιομάζας.

Κανονισμός 1774/2002/ΕΚ, για τον καθορισμό υγειονομικών κανόνων σχετικά με τα ζωικά υποπροϊόντα που δεν προορίζονται για κατανάλωση από τον άνθρωπο.	ΠΔ 211/2006 (ΦΕΚ 211Α/05.06.06), Συμπληρωματικά μέτρα εκτέλεσης του Κανονισμού 1774/2002/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 3ης Οκτωβρίου 2002 για τον καθορισμό υγειονομικών κανόνων σχετικά με τα ζωικά υποπροϊόντα που δεν προορίζονται για κατανάλωση από τον άνθρωπο.	Ενσωμάτωση εθνικού με ευρωπαϊκό δίκαιο Το ΠΔ συμπληρώνεται και με τις εγκυκλίους όπως παρουσιάστηκαν ανωτέρω. Δίνονται προδιαγραφές για εγκαταστάσεις λιπασματοποίησης και αναερόβιας χώνευσης (παρασκευής βιοαερίου), αδειοδότηση και ορθή λειτουργία. Επίσης, γίνεται και προσέγγιση για θέσπιση κριτηρίων οργανικών λιπασμάτων από υλικά αυτών των κατηγοριών.
Κανονισμός 1069/2009/ΕΚ, περί υγειονομικών κανόνων για ζωικά υποπροϊόντα και παράγωγα προϊόντα που δεν προορίζονται για κατανάλωση από τον άνθρωπο - κατάργηση του κανονισμού (ΕΚ) αριθ. 1774/2002 (κανονισμός για τα ζωικά υποπροϊόντα).	-	Νέο συνεκτικό και συνολικό πλαίσιο κοινοτικών υγειονομικών κανόνων για τη συλλογή, τη μεταφορά, τον χειρισμό, τον μετασχηματισμό, τη μεταποίηση, την αποθήκευση, τη διάθεση στην αγορά, τη διανομή, τη χρήση ή την απόρριψη των ζωικών υποπροϊόντων.
Κανονισμός 142/2011/ΕΚ, για την εφαρμογή του κανονισμού (ΕΚ) αριθ. 1069/2009 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου περί υγειονομικών κανόνων για ζωικά υποπροϊόντα και παράγωγα προϊόντα που δεν προορίζονται για κατανάλωση από τον άνθρωπο.	-	Θέσπιση κανόνων για τη διαχείριση ζωικών υποπροϊόντων, την επίτευξη των στόχων του Κανονισμού 1069/2009/ΕΚ και τη βιώσιμη χρήση ζωικών υλικών, αλλά και τη διατήρηση υψηλού επιπέδου προστασίας της δημόσιας υγείας και υγείας των ζώων στην ΕΕ.
Οδηγία 2000/76/ΕΚ, για την αποτέφρωση των αποβλήτων.	ΚΥΑ 22912/1117 (ΦΕΚ 759Β/06.06.05) Μέτρα και όροι για την πρόληψη και τον περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος από την αποτέφρωση των αποβλήτων.	Εναρμόνιση εθνικού με ευρωπαϊκό δίκαιο.
Οδηγία 2006/799/ΕΚ, περί καθορισμού αναθεωρημένων οικολογικών κριτηρίων και των σχετικών απαιτήσεων αξιολόγησης και εξακρίβωσης για την απονομή κοινοτικού οικολογικού σήματος σε βελτιωτικά εδάφους.	-	Με τις οδηγίες αυτές είναι σαφής η προώθηση της χρήσης ανανεώσιμων υλικών ή/ και η ανακύκλωση οργανικής ύλης προερχόμενης από συγκέντρωση ή/ και επεξεργασία αποβλήτων, ως συμβολή στην ελαχιστοποίηση των προς τελική διάθεση στερεών αποβλήτων σε εθνικό επίπεδο ακόμη δεν έχουν εναρμονιστεί.
Οδηγία 2007/64/ΕΚ, περί καθορισμού αναθεωρημένων οικολογικών κριτηρίων και των σχετικών απαιτήσεων αξιολόγησης και εξακρίβωσης για την απονομή κοινοτικού οικολογικού σήματος σε καλλιεργητικά μέσα.	-	-

## **2. Μέθοδοι Διαχείρισης Βιοαποβλήτων**

### **2.1. Εισαγωγή**

Ο όρος «Διαχείριση βιοαποβλήτων» (ΔΒ) αναφέρεται στο σύνολο των ενεργειών που σχετίζονται με την παραγωγή, προσωρινή αποθήκευση, συλλογή, μεταφορά/μεταφόρτωση, επεξεργασία και τελική διάθεση. Η ορθή αντιμετώπιση των προβλημάτων που συνεπάγονται τα απορρίμματα επιβάλλει την αξιοποίηση στοιχείων αστικού και περιφερειακού σχεδιασμού, όπως επίσης και διδαγμάτων από τις οικονομικές και κοινωνικές επιστήμες. Σήμερα, δεν είναι πλέον αποδεκτές παραδοσιακές προσεγγίσεις, οι οποίες στο παρελθόν συχνά αγνοούσαν κοινωνικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες. Ενώ η δημόσια υγεία και τα οικονομικά παραμένουν πρωταρχικοί προβληματισμοί, άρχισε τα τελευταία χρόνια να δίδεται ιδιαίτερη έμφαση σε περιβαλλοντικούς περιορισμούς. Επιπλέον, έχει καταστεί σαφής η σχέση μεταξύ της εξάντλησης των φυσικών πόρων και της τελικής διάθεσης των Στερεών Αποβλήτων (ΣΑ).

Στην Ευρώπη και παγκοσμίως χρησιμοποιούνται διαφορετικές τεχνικές διαχείρισης των οικιακών βιοαποβλήτων οι οποίες χαρακτηρίζονται από ελάχιστες δράσεις σε ορισμένα κράτη ως διευρυμένες δράσεις οι οποίες αποσκοπούν στην αειφόρο διαχείρισή τους. Στη δεύτερη περίπτωση, κύριος στόχος είναι η δραστική μείωση της ποσότητας των βιοαποβλήτων που οδηγείται στους ΧΥΤΑ και η παραγωγή προϊόντων προστιθέμενης αξίας, τα οποία δημιουργούν καινούργιες πλουτοπαραγωγικές πηγές με ανεξάντλητα αποθέματα προς εκμετάλλευση.

### **2.2. Διαλογή στην πηγή**

Διαλογή στην Πηγή (ΔσΠ) εννοείται η διαδικασία με την οποία γίνεται διαχωρισμός των απορριμμάτων σε επιμέρους υλικά ή ομοιογενείς κατηγορίες συστατικών με σκοπό την ανάκτηση χρήσιμων υλικών, πριν αυτά αναμειχθούν με την υπόλοιπη μάζα των απορριμμάτων και έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του ρεύματος των σύμμεικτων απορριμμάτων που οδηγούνται στις αντίστοιχες εγκαταστάσεις επεξεργασίας ή/και διάθεσης και την ανάκτηση ή/και επαναχρησιμοποίηση καθαρών δευτερογενών υλικών χωρίς χρήση υψηλής τεχνολογίας διαχωρισμούς. Η διαλογή στην πηγή των απόβλητων, σήμερα είναι ένας από τους υπέρτατους στόχους των κοινοτήτων της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Τα προς ανάκτηση υλικά αποκαλούνται υλικά-στόχοι. Βασικό κριτήριο για την επιτυχία ενός προγράμματος διαλογής στην πηγή είναι το ποσοστό συμμετοχής των πολιτών και τα μέτρα που περνούν οι κοινότητες με ,ενημερωτικές ημερίδες, και τα κίνητρα που δίνουν στους πολίτες. Τα ανακτηθέντα υλικά – στόχοι μπορούν είτε να αξιοποιηθούν απευθείας, είτε να αποτελέσουν ‘πρώτη ύλη’ ως συνθετικό υλικό στις αντίστοιχες βιομηχανικές ή/και βιοτεχνικές εφαρμογές. Τα βιοαπόβλητα στα οποία περιλαμβάνονται τα πράσινα απορρίμματα και τα τροφικά απορρίμματα μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο χωριστής διαλογής ως υλικά – στόχοι.

Τα βασικά οφέλη από τη ΔσΠ των βιοαποβλήτων μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- Επίτευξη υψηλών στόχων ανακύκλωσης, καθώς αποτελούν σημαντικό ποσοστό των αποβλήτων.
- Επίτευξη σημαντικού ποσοστού εκτροπής των Βιοαποδομήσιμων Αστικών Αποβλήτων (ΒΑΑ) από τον ΧΥΤ, καθώς τα βιοαπόβλητα αποτελούν το μεγαλύτερο και «δυσκολότερο» ρεύμα των ΒΑΑ.
- Αναδιοργάνωση του συνολικού συστήματος συλλογής αποβλήτων έτσι ώστε να ανακυκλώνονται / αξιοποιούνται πολλαπλά ρεύματα χωρίς σημαντική επιβάρυνση του κόστους.
- Διευκόλυνση της αξιοποίησης των υπόλοιπων αποβλήτων αφού η ΔσΠ των βιοαποβλήτων «απομακρύνει» τα οργανικά υλικά που χαρακτηρίζονται από υψηλή υγρασία και χαμηλή θερμοϊδική αξία, από τα υπόλοιπα Α.Σ.Α.
- Παραγωγή κόμποστ υψηλής ποιότητας, με χαμηλή συγκέντρωση βαρέων μετάλλων και αδρανών προσμείξεων (πλαστικά, γυαλί), το οποίο πληρεί αυστηρές προδιαγραφές και κερδίζει την εμπιστοσύνη των καταναλωτών, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η αξιοποίησή του.
- Αποτελεσματική επιστροφή της οργανικής ουσίας και των θρεπτικών συστατικών στο έδαφος, με πολλαπλά οφέλη (βελτίωση της δομής του εδάφους, της υδατοικανοτητάς του, της παραγωγικότητας, καταπολέμηση της ερημοποίησης, μερική υποκατάσταση λιπασμάτων, μείωση των φυτοφαρμάκων)
- Ενημέρωση - ευαισθητοποίηση των πολιτών για θέματα διαχείρισης αποβλήτων που συνεισφέρει στην αλλαγή της καταναλωτικής συμπεριφοράς και στη μακροπρόθεσμη μείωση των αποβλήτων. [11]

Τα υπάρχοντα οργανωτικά σχήματα συλλογής των υλικών – στόχων από τις πηγές παραγωγής είναι τα εξής:

### 2.2.1 Συλλογή με τη μέθοδο ‘Πόρτα- Πόρτα’

Κατά τη συλλογή με τη μέθοδο πόρτα σε πόρτα κάθε υλικό – στόχος τοποθετείται από τον κάτοικο – παραγωγό σε μέσα προσωρινής αποθήκευσης που βρίσκεται εντός της οικίας. Το μέσο προσωρινής αποθήκευσης μπορεί να είναι κάδοι, σάκοι, δεξαμενές ή σκουπιδοφάγοι οι οποίοι βρίσκονται τοποθετημένοι εντός ή εκτός της οικίας. Το μέγεθος και το είδος των αποθηκευτικών μέσων, ποικίλει κάθε φορά και εξαρτάται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής, του πληθυσμού της, καθώς και των κοινωνικοοικονομικών δεδομένων ενός Δήμου. Επιπλέον, ο τύπος των κάδων που χρησιμοποιούνται κάθε φορά, είναι άμεσα εξαρτώμενος από τον τύπο των οχημάτων που χρησιμοποιούνται για την αποκομιδή. Στην πλειοψηφία των χωρών παγκοσμίως η κύρια μέθοδος προσωρινής αποθήκευσης και συλλογής οικιακών ΒΑ που χρησιμοποιείται σήμερα, είναι οι σακούλες και οι κάδοι. Στη συνέχεια, το περιεχόμενο κάθε οικιακού κάδου, ή κάθε σάκου, είτε οδηγείται σε ειδικά διαμορφωμένο δημόσιο χώρο εξωτερικά της οικίας, είτε εκκενώνεται σε κάδο μεγαλύτερης χωρητικότητας που επίσης βρίσκεται σε ειδικά διαμορφωμένο δημόσιο χώρο εξωτερικά της οικίας.





**Εικόνα 2: Καδοί συλλογής οικιακών βιοαποβλήτων**

### 2.2.2 Συλλογή με Κάδους ανά Ομάδες Κατοικιών

Αποτελεί το συνηθέστερα εφαρμοζόμενο σύστημα διαλογής στην πηγή. Τα οικιακά ΒΑ συλλέγονται σε κεντρικά σημεία ανά ομάδες οικιών ή σε κεντρικά σημεία συλλογής. Οι κάτοικοι τοποθετούν τα διατροφικά απορρίμματα ή απόβλητα κήπου σε κάδους ή ομάδες κάδων οι οποίοι προορίζονται για την συλλογή και προσωρινή αποθήκευση τους. Η υπηρεσία αποκομιδής είναι υπεύθυνη για την συλλογή και μεταφορά τους σε ειδικά κέντρα επεξεργασίας προκειμένου να λάβει χώρα η επιθυμητή ανάκτηση

Η συλλογή με κάδους ανά ομάδες κατοικιών διαφοροποιείται από τη συλλογή με τη μέθοδο ‘πόρτα – πόρτα’ ως προς το ότι, στην μέθοδο ‘πόρτα – πόρτα’ κάθε μέσο προσωρινής αποθήκευσης το οποίο εκκενώνεται από τα οχήματα συλλογής και μεταφοράς αφορά σε μια κατοικία του οικιστικού ιστού, είτε είναι μονοκατοικία (αραιοκατοικημένη περιοχή), είτε είναι πολυκατοικία (πυκνοκατοικημένη περιοχή).



**Εικόνα 4: Υπόγειοι Κάδοι**

**Εικόνα 3: Κάδοι Συλλογής**

Στον αντίποδα, κατά τη συλλογή με κάδους ανά ομάδες κατοικιών, κάθε μέσο προσωρινής αποθήκευσης το οποίο εκκενώνεται από τα οχήματα μεταφοράς αφορά σε περισσότερες από μια κατοικίες, ανεξάρτητα από την πυκνότητα δόμησης του οικιστικού ιστού.

### 2.2.3 Συγκέντρωση Διαχωρισμένων ΒΑ σε Κέντρα Συλλογής

Τα κέντρα συλλογής συνιστούν εγκαταστάσεις ελαφρού τύπου στις οποίες το κοινό με δική του πρωτοβουλία εναποθέτει σε ειδικά μέσα προσωρινής αποθήκευσης μία ή περισσότερες ομάδες υλικών – στόχων. Ωστόσο, προκειμένου για κέντρα συλλογής στα οποία συγκεντρώνονται ειδικά ρεύματα των ΑΣΑ (π.χ. μεταχειρισμένα ελαστικά, απόβλητα ηλεκτρονικού και ηλεκτρικού εξοπλισμού κ.ά.) υπάρχουν ειδικά διαμορφωμένα οχήματα συλλογής και μεταφοράς τα οποία κατόπιν συνεννόησης παραλαμβάνουν από μια ή περισσότερες κατοικίες ποσότητες των εν λόγω ρευμάτων και τις οδηγούν στο αντίστοιχο κέντρο συλλογής. [22]



Εικόνα 5: Οχήματα Συλλογής και Μεταφοράς ΒΑ

Τα οχήματα συλλογής και μεταφοράς των ΒΑ, αφορούν στα οχήματα εκείνα με τα οποία τα οικιακά βιοαπόβλητα συλλέγονται μηχανικά ή χειρονακτικά. Υπάρχουν πολλοί τύποι οχημάτων τα οποία χρησιμοποιούνται, σε συνδυασμό με κατάλληλους κάδους στα πλαίσια ενός ολοκληρωμένου σχεδίου διαχείρισης βιοαποβλήτων. Τα οχήματα, επιλέγονται με βάση τα χαρακτηριστικά των βιοαποβλήτων και ιδιαίτερα την πυκνότητά τους.

Στα διατροφικά απορρίμματα τα οποία έχουν υψηλή πυκνότητα (0,6 έως 0,8 kg/L), δεν χρειάζονται οχήματα με σύστημα συμπίεσης καθώς η μεταφορά τους μπορεί να πραγματοποιηθεί με απλό όχημα συλλογής. Τα διατροφικά απορρίμματα είναι δυνατόν να συλλεχθούν μαζί με απόβλητα κήπου των οποίων η πυκνότητα κυμαίνεται από (0,15 έως 0,3Kg/L) [23]

## 2.3. Κομποστοποίηση

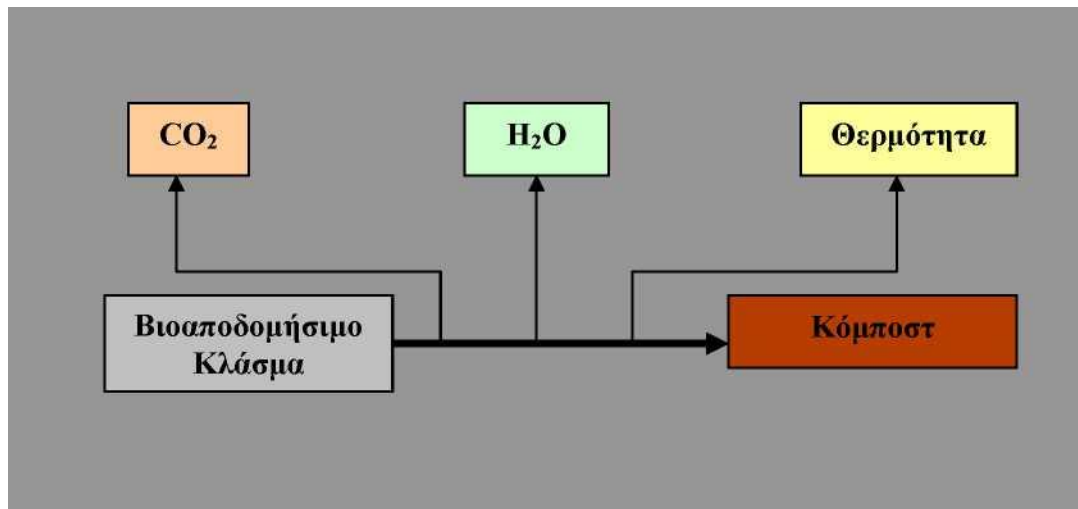
### 2.3.1 Γενικά

Ο όρος κομποστοποίηση (composting) αναφέρεται στη αερόβια βιολογική διαδικασία αποδόμησης και σταθεροποίησης οργανικών υλικών υπό ελεγχόμενες συνθήκες (θερμοκρασίας, υγρασίας, αερισμού). Το τελικό προϊόν είναι σταθεροποιημένο και μπορεί να διατεθεί, χωρίς να έχει ανεπιθύμητες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Η φράση « αποδομείται βιολογικά » διαφοροποιεί την εν λόγω μέθοδο από άλλες τεχνικές διαχείρισης του οργανικού κλάσματος όπως είναι η αναερόβια χώνευση, η θερμική επεξεργασία και η υγειονομική ταφή. Με τον όρο «οργανικά απόβλητα» ορίζονται τα υλικά τα οποία δύναται να αποδομηθούν βιολογικά ενώ με τη φράση «ελεγχόμενες συνθήκες» η κομποστοποίηση διαφοροποιείται από τη βιολογική αποδόμηση που λαμβάνει χώρα στη φύση, καθώς ελέγχονται οι συνθήκες της θερμοκρασίας, της υγρασίας και του αερισμού κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Το τελικό προϊόν ορίζεται ως βιολογικά σταθεροποιημένο όταν δεν υπόκειται πλέον έντονη μικροβιακή δραστηριότητα, ενώ η τελική του χρήση εξαρτάται από ποικίλες φυσικοχημικές και βιολογικές παραμέτρους που προσδιορίζουν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του. Ενδεχόμενες χρήσεις του κόμποστ περιλαμβάνουν τη ρύθμιση εδαφών, την αποκατάσταση εδαφών την αξιοποίησή του ως φυσικό εδαφοβελτιωτικό κ.α..

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται σχηματικά η διεργασία της κομποστοποίησης. Η κομποστοποίηση αποτελεί μια βιολογική διεργασία βασιζόμενη στις δραστηριότητες συγκεκριμένων βακτηρίων και μυκήτων. Κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης οι αερόβιοι μικροοργανισμοί καταναλώνουν οξυγόνο για την οξείδωση της οργανικής ουσίας διασπώντας σύνθετες οργανικές ενώσεις του υποστρώματος σε ενδιάμεσα προϊόντα και έπειτα σε απλούστερες ενώσεις παράγοντας CO<sub>2</sub>, ανόργανες μορφές αζώτου, νερό και θερμότητα ενώ επιτυγχάνεται μείωση του όγκου και της μάζας του υποστρώματος Παράλληλα με τη βιοαποδόμηση της οργανικής ουσίας συντελούνται και διεργασίες χουμοποίησης οι οποίες περιλαμβάνουν τον πολυμερισμό ενώσεων από τους μικροοργανισμούς ή/και το σχηματισμό απλούστερων ενώσεων προερχόμενα από την αποσύνθεση της οργανικής ουσίας.

Επομένως, το βιοαποδομήσιμο οργανικό υλικό μετατρέπεται μέσω διαδοχικών μικροβιακών δραστηριοτήτων και βιοχημικών αντιδράσεων σε σταθερότερη οργανική ουσία η οποία έχει κοινά χημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά με τις χουμικές ενώσεις . [7]



Σχήμα 3: Διεργασία της κομποστοποίησης

Η υπό αερόβιες συνθήκες δράση των μικροβίων εξασφαλίζει την ζύμωση των απορριμμάτων, με την παράλληλη ανάπτυξη σοβαρής ποσότητας θερμικής ενέργειας. Οι μικροοργανισμοί σπάνε τους χημικούς δεσμούς με τους οποίους συνδέονται τα άτομα του άνθρακα μεταξύ τους. Στη συνέχεια σχηματίζουν πρωτεΐνες, συνδυάζοντας την χημική ενέργεια που εκλύεται, με τα άτομα άνθρακα και αζώτου, που βρίσκονται προσωρινά σε διάσπαση.

Οι κυριότερες ομάδες οργανικών ουσιών που βρίσκονται στα βιοαποδομήσιμα απόβλητα (BAA) είναι οι πρωτεΐνες (3-4 %), τα λίπη (2-4%), τα σάκχαρα (8-10%), οι κυτταρίνες και ημικυτταρίνες (44-50 %) και οι λιγνίνες (12-15 %). Ανάλογα με την ευκολία βιοαποδομησιμότητας των παραπάνω υλικών, μπορεί να γίνει ταξινόμηση στις εξής κατηγορίες:[12]

- Εύκολα αποδομήσιμα: σάκχαρο, άμυλο, ημικυτταρίνες, κάποιες πρωτεΐνες
- Υλικά που χρειάζονται αρκετό διάστημα και συγκεκριμένες κατάλληλες συνθήκες για να αποδομηθούν: κυτταρίνες, λίπη και ορισμένες πρωτεΐνες
- Υλικά αρκετά ανθεκτικά στην αποδόμηση: λιγνίνες, κερατίνες

Βοηθούμενη η μεταβολική τους δραστηριότητα από ενδοκυτταρικά και εξωκυτταρικά ένζυμα, αποικοδομείται η οργανική ύλη και έχει ως αποτέλεσμα:

- τον σχηματισμό πλήθους μεταβολικών προϊόντων, όπως χουμικές ουσίες ή και λιγνο-πρωτεΐνες
- Την αποδέσμευση των θρεπτικών στοιχείων από οργανικές ενώσεις και μεταφορά σε διαλυτά και αδιάλυτα ανόργανα άλατα,
- την έκλυση αερίων, όπως αμμωνίας, διοξειδίου του άνθρακα, οξειδίων του αζώτου, υδρατμών.

### 2.3.2 Φάσεις της ζύμωσης

Η ζύμωση των απορριμμάτων αποβλέπει κυρίως στην απόκτηση μιας υψηλής θερμοκρασίας για την απαλλαγή του παραγόμενου κόμποστ από βλαβερούς μικροοργανισμούς και γίνεται στις παρακάτω τέσσερις φάσεις:

#### **I.** Λανθάνουσα φάση

Αντιστοιχεί στο χρόνο που χρειάζεται για να γίνουν οι αποικίες των μικροοργανισμών στο καινούριο μέσο που δημιουργήθηκε γι' αυτούς.

#### **II.** Φάση της αυξήσεως

Κατά την οποία ανεβαίνει η θερμοκρασία, η οποία εξελίσσεται πιο γρήγορα, όταν ο αέρας και η υγρασία πλησιάζουν την επιθυμητή περιεκτικότητα. Αναπτύσσονται τα μεσόφιλα μικρόβια που προκαλούν την έναρξη της ζύμωσης. Στους 40°C – 45°C τα μεσόφιλα μικρόβια πεθαίνουν.

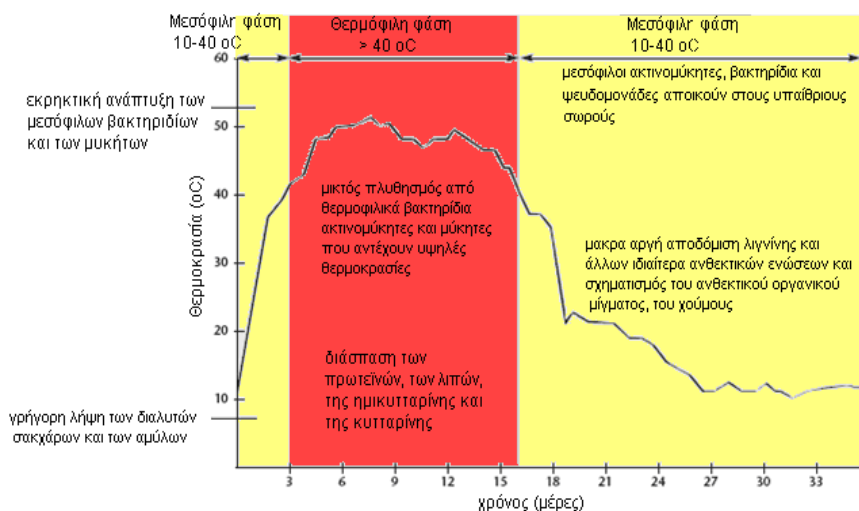
#### **III.** Θερμόφιλη Φάση

Αντιστοιχεί στην περίοδο ενέργειας ενός άλλου μικροβιακού κύματος, που αντικαθιστά το προηγούμενο και συνεχίζει το έργο της αποδόμησης και ανύψωσης της θερμοκρασίας. Στους 60°C – 70°C τα θερμόφιλα βακτήρια πεθαίνουν καθώς και οι παθογόνοι μικροοργανισμοί και τα διάφορα παράσιτα. Η φάση αυτή πρέπει να σταματήσει εγκαίρως για να μην ελαχιστοποιηθεί το περιεχόμενο σε οργανικές ουσίες του κόμποστ.

#### **IV.** Φάση ωριμάνσεως

Με τη φάση αυτή τελειώνει η διαδικασία. Τα δυο μικροβιακά κύματα (μεσόφιλα, θερμόφιλα) κατανάλωσαν το οξυγόνο και έκαναν προοδευτικά το μέσο αναερόβιο. Η φάση αυτή γεννά πτητικές ουσίες με δυσάρεστη οσμή ( $NH_3$ ,  $H_2S$ , διάφορα οργανικά προϊόντα). Για την αποφυγή του δυσάρεστου αυτού φαινομένου πρέπει να αποκαθίσταται η αερόβιος λειτουργία μέσω της ανάδευσης του σωρού. [8]

Οι φάσεις αυτές παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 4: Διάγραμμα θερμοκρασίας και pH κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης**

Θα πρέπει να διευκρινίσουμε ότι το μικροβιακό κύμα αποτελείται από βακτήρια, ακτινομύκητες και μύκητες. Στην αρχή σε συνήθη θερμοκρασία, το προϊόν είναι ελαφρά όξινο και προσφέρεται για δραστηριοποίηση των μεσόφιλων οργανισμών, που ευνοούνται σε θερμοκρασίες 25°C – 45°C και όξινο περιβάλλον. Με την άνοδο της θερμοκρασίας οι θερμοφιλοί μικροοργανισμοί αρχίζουν να αντικαθιστούν τους μεσόφιλους και σιγά σιγά το προϊόν γίνεται αλκαλικό με παραγωγή μικρών ποσοτήτων αμμωνίας. Στη φάση αυτή συνήθως χρειάζεται προσθήκη C και N και άλλων θρεπτικών στοιχείων για την εξέλιξη της ζύμωσης. Σε αυτή τη φάση της ζύμωσης διασπώνται ουσιαστικά οι πρωτεΐνες και τα κυτταρινούχα προϊόντα. Σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από 60°C η θερμοφιλή καλλιέργεια καταστρέφεται και αντικαθίσταται από σποροβακτήρια και ακτινομύκητες. Με προσφορά οξυγόνου η θερμοκρασία μπορεί να ανέλθει στους 75°C, ακολούθως όμως σταδιακά μειώνεται στους 60°C, οπότε αρχίζει πάλι η δραστηριότητα των θερμοφίλων καλλιέργειών με συνεχή μείωση του pH, που πάντοτε όμως διατηρείται ελαφρά αλκαλικό. Η περίοδος μείωσης της θερμοκρασίας οδηγεί σε ωρίμανση του προϊόντος, που απαιτεί αρκετό χρόνο.

### 2.3.3 Παράγοντες που επιδρούν στη κομποστοποίηση

Οι παράγοντες που ενδέχεται να επηρεάσουν τη διαδικασία της κομποστοποίησης είναι τόσο βιολογικοί όσο και χημικοί. Οι σπουδαιότεροι από αυτούς είναι οι εξής:[11]

#### ➤ Διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών

Προκειμένου να γίνει σωστά η διεργασία της κομποστοποίησης, οι μικροοργανισμοί πρέπει να τροφοδοτηθούν με τα απαραίτητα θρεπτικά σε κατάλληλη αναλογία. Τα βασικότερα θρεπτικά συστατικά που χρειάζονται οι μικροοργανισμοί σε μεγάλες ποσότητες είναι κατά σειρά προτεραιότητας: 1. Οάνθρακας (C), 2. το άζωτο (N), 3. ο φώσφορος (P) και το κάλιο (K). Έλλειψη ή περίσσεια τους επιβραδύνει την ανάπτυξη

των μικροοργανισμών και κατά συνέπεια μειώνεται ο ρυθμός με τον οποίο γίνεται η βιοαποδόμηση της οργανικής ύλης. Ο άνθρακας χρησιμοποιείται ως βασική πηγή ενέργειας από τους μικροοργανισμούς αλλά και για να συνθέσουν τις πρωτεΐνες σε συνδυασμό με το άζωτο, να σχηματίσουν τα κύτταρα και να εξασφαλίσουν την αναπαραγωγή τους. Το κάλιο και ο φώσφορος είναι βασικά συστατικά για την κυτταρική διαίρεση και το μεταβολισμό. Σε ένα σύστημα κομποστοποίησης ο άνθρακας ή το άζωτο είναι συνήθως οι περιοριστικοί παράγοντες για μια αποτελεσματική αποσύνθεση. Αν το άζωτο γίνει περιοριστικός παράγοντας κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης, η διαδικασία της αποσύνθεσης θα επιβραδυνθεί. Αντίθετα αν υπάρχει περίσσια αζώτου, συχνά χάνεται από το σύστημα ως αμμωνία (σε μορφή αερίου) ή άλλες αζωτούχες ενώσεις.

Οι μικροοργανισμοί επίσης χρειάζονται ιχνοστοιχεία, όπως βόριο, κοβάλτιο, σίδηρο, μαγνήσιο, μολυβδαίνιο, σελήνιο, νάτριο, ψευδάργυρο. Ενώ αυτά τα θρεπτικά συστατικά είναι βασικά για τη διατήρηση της ζωής τους, συγκεντρώσεις έστω λίγο μεγαλύτερες από τις ενδεικνυόμενες μπορεί να είναι τοξικές για τους μικροοργανισμούς. Ακόμα και αν υπάρχουν τα απαραίτητα θρεπτικά σε επαρκείς ποσότητες, η χημική τους σύσταση μπορεί να μην τα καθιστά διαθέσιμα σε ορισμένους ή όλους τους μικροοργανισμούς. Η ικανότητα της κομποστοποίησης των οργανικών ενώσεων εξαρτάται από τα ένζυμα του κάθε μικροοργανισμού.

#### ➤ Σχέση C/N

Για την αποτελεσματική εφαρμογή της διεργασίας της κομποστοποίησης ο λόγος C/N πρέπει να είναι περίπου 30:1 (έχουν, όμως, αναφερθεί και ιδανικές αναλογίες κοντά στο 15:1). Μεγάλες διαφοροποιήσεις ως προς το λόγο αυτό επιδρούν αρνητικά στην εξέλιξη της μεθόδου. Για παράδειγμα αν η αναλογία C/είναι μεγαλύτερη από 35:1 τότε προκαλείται μια αργή αποσύνθεση που ευνοεί μεγαλύτερες απώλειες αζώτου. Σ' αυτήν την περίπτωση οι μικροοργανισμοί αναπτύσσονται σε διαδοχικούς βιολογικούς κύκλους, οξειδώνοντας αργά το πλεόνασμα του άνθρακα μέχρι να φέρουν το λόγο σε ευνοϊκές συνθήκες για το μεταβολισμό τους. Αν σε αντίθετη περίπτωση το αρχικό οργανικό υλικό παρουσιάζει πάρα πολύ χαμηλές τιμές C/N ευνοούνται απώλειες αζώτου λόγω πτητικότητας της αμμωνίας.

#### ➤ Υγρασία

Η παρουσία του νερού παίζει σημαντικό ρόλο στην κομποστοποίηση. Όταν το ποσοστό υγρασίας είναι χαμηλό οδηγούμαστε σε επιβράδυνση ή αναστολή των βιολογικών διεργασιών, φαινόμενο που είναι εντονότερο στις περιπτώσεις που συνοδεύονται από πτώση της θερμοκρασίας. Η υπερβολική υγρασία μειώνει την διάχυση του οξυγόνου στη μάζα του υλικού. Η υγρασία προσροφάτε αφενός στα σωματίδια λόγω των υδροφιλικών χαρακτηριστικών τους αλλά γεμίζει λόγω τριχοειδών φαινομένων τους μικρότερους πόρους δημιουργώντας έτσι ζώνες αναερόβιες. Μια επακόλουθη επίπτωση της μεγάλης υγρασίας είναι η δημιουργία οσμών λόγω της επικράτησης αναερόβιων συνθηκών σε μεγάλο τμήμα της μάζας των

απορριμμάτων. Παρόλο που οι περισσότεροι ενοχλητικές οσμές παράγονται από την αναερόβια δράση, και η ζύμωση παράγει διάφορες «γλυκές» οσμές π.χ. αλκοόλες. Για τους λόγους αυτούς, τα προς κομποστοποίηση υλικά θα πρέπει να περιέχουν το κατάλληλο ποσοστό υγρασίας. Το βέλτιστο ποσοστό υγρασίας, για τη διεργασία της κομποστοποίησης, κυμαίνεται μεταξύ 45-55%.

#### ➤ pH

Οι τιμές του pH επηρεάζουν σημαντικά τις διεργασίες της κομποστοποίησης, αφού από τις τιμές αυτές εξαρτάται το είδος των μικροοργανισμών που θα αναπτυχθούν. Για παράδειγμα τα βακτήρια δραστηριοποιούνται σε ουδέτερο ή αλκαλικό περιβάλλον υπό αερόβιες συνθήκες (π.χ γένη Bacillus) και υπό αναερόβιες (π.χ γένη Clostridium). Αντίθετα σε pH<5,5 η διάσπαση των κυτταρινών, ημικυτταρινών κλπ γίνεται κυρίως από μύκητες και ακτινομύκητες (π.χ γένη Aspergillus). Τα συνήθη υλικά που οδηγούνται στην κομποστοποίηση παρουσιάζουν γενικά χαμηλό pH ενώ για την βελτιστοποίηση της διεργασίας το pH πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 6,0 και 8,5. Στα αρχικά στάδια της κομποστοποίησης σχηματίζονται οργανικά οξέα και το υπόστρωμα γίνεται όξινο, με pH γύρω στην τιμή 5. Σ' αυτό το σημείο οι μύκητες που αντέχουν το όξινο περιβάλλον κατέχουν ένα σημαντικό ρόλο στην αποσύνθεση. Οι μικροοργανισμοί στη συνέχεια διασπούν τα οξέα και η τιμή του pH αυξάνεται σταδιακά προς ουδέτερο εύρος, γύρω στο 7, ή ακόμα υψηλότερα σε αλκαλικό περιβάλλον λαμβάνοντας τιμές έως 8,5. Όσο η τιμή του pH αυξάνεται, τόσο αυξάνεται και ο ρόλος των βακτηρίων στην κομποστοποίηση. Ανά τιμή του pH παραμένει σε όξινα επίπεδα, αυτό σημαίνει ότι το κόμποστ δεν είναι ακόμα ώριμο.

#### ➤ Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία θεωρείται ίσως η σημαντικότερη παράμετρος για τη διεργασία της κομποστοποίησης. Η μικροβιακή δραστηριότητα προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας η οποία πολλές φορές ξεπερνά τους 60 °C, οπότε γίνεται ανεπιθύμητη και λαμβάνονται μέτρα για την ελάττωση της (ύγρανση των υλικών, βελτίωση του αερισμού, ανάδευση του κ.λ.π). Σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες αναστέλλεται η δραστηριότητα των περισσότερων μικροοργανισμών. Μία θερμοκρασία γύρω στους 50-60 °C είναι επιθυμητή για ένα χρονικό διάστημα επειδή οδηγεί σε μερική αποστείρωση του υλικού. Σε αυτή την θερμοκρασιακή περιοχή καταστρέφονται οι παθογόνοι μικροοργανισμοί που ενδεχομένως υπάρχουν στα υλικά. Κατά την εξέλιξη της διεργασίας η βέλτιστη θερμοκρασία κομποστοποίησης στη μεσόφιλη περιοχή κυμαίνεται ανάμεσα στους 35-45 °C ενώ αν πέσει κάτω απ' τους 20 °C η αποδόμηση επιβραδύνεται.

#### ➤ Αερισμός

Η σημασία της παρουσίας του οξυγόνου κατά τη διάρκεια της διεργασίας της κομποστοποίησης είναι εύκολο να αναγνωριστεί καθώς πρόκειται για μια αερόβια διεργασία και οι μικροοργανισμοί που δρουν χρειάζονται οξυγόνο για την διάσπαση των οργανικών ουσιών. Γι' αυτό το λόγο πρέπει στο υπόστρωμα να παρέχεται



οξυγόνο είτε μέσω του ανάδευσης του υλικού είτε χρησιμοποιώντας δυναμικά συστήματα αερισμού.

Ο αερισμός έχει πολλές λειτουργίες κατά την διεργασία της κομποστοποίησης

- παρέχει οξυγόνο και βοηθά τον αερόβιο μεταβολισμό
- ελέγχει την θερμοκρασία
- απομακρύνει την υγρασία και αέρια προϊόντα του μικροβιακού μεταβολισμού όπως το CO<sub>2</sub> και άλλα.

#### 2.3.4 Συστήματα Κομποστοποίησης

Τα συστήματα κομποστοποίησης αποτελούνται από δυο κατηγορίες τα ανοιχτά συστήματα και τα κλειστά συστήματα. Στα ανοιχτά συστήματα η κομποστοποίηση λαμβάνει χώρα στην ύπαιθρο ή σε ημίκλειστα κτίρια. Στα κλειστασυστήματα η κομποστοποίηση λαμβάνει χώρα σε ειδικά σχεδιασμένους βιοαντιδραστήρες ή σε κλειστά κτίρια, απ' όπου είναι εφικτή η απαγωγή και επεξεργασία του αέρα και των οσμών, οι οποίες αποτελούν σημαντικό πρόβλημα για πολλές μονάδες κομποστοποίησης, ειδικά όταν γειτνιάζουν με κατοικημένες περιοχές. Τα κλειστά συστήματα διακρίνονται σε κάθετους αντιδραστήρες συνεχούς ή ασυνεχούς ροής και σε οριζόντιους αντιδραστήρες είτε στατικούς είτε με κίνηση του σωρού. [12]

Πίνακας 2: Σύνοψη συστημάτων κομποστοποίησης

ΚΛΕΙΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ (βιοαντιδραστήρες και κλειστά κτίρια)	ΑΝΟΙΧΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ (σειράδια)
<b>Κάθετοι αντιδραστήρες</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Συνεχούς ροής</li> <li>• Ασυνεχούς ροής</li> </ul>	<b>Αναστρεφόμενα σειράδια (windrows)</b> <b>Αεριζόμενοι στατικοί σωροί (aerated static piles - ASP)</b>
<b>Οριζόντιοι Αντιδραστήρες</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Στατικοί</li> <li>• Με κίνηση του υλικού</li> </ul>	<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>

## Ανοικτά συστήματα

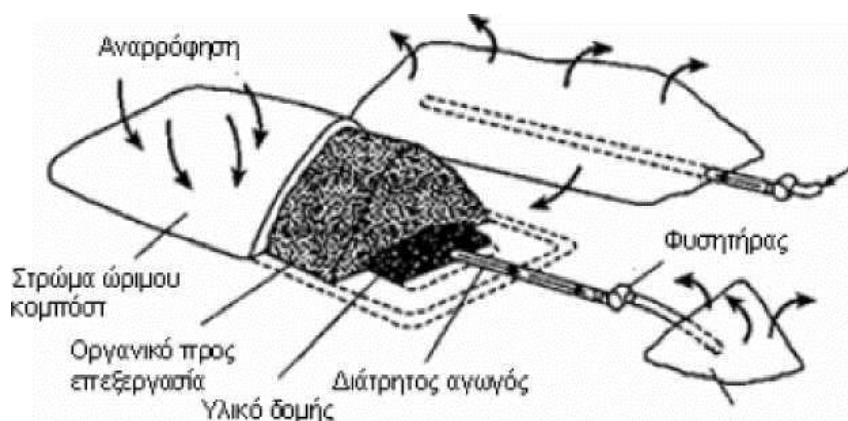
Τα νοπιά οικιακά απορρίμματα τοποθετούνται στην επιφάνεια που έχει οριστεί σαν μέρος εναπόθεσης τους. Η ζύμωση εδώ γίνεται στον ελεύθερο αέρα και υφίσταται τις κλιματικές επιδράσεις. Γι' αυτό στα ψυχρά και υγρά κλίματα, θα ήταν επιθυμητή η κομποστοποίηση και η αποθήκευση να γίνεται κάτω από υπόστεγα.

Τα ανοικτά συστήματα ή σειράδια διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες, ανάλογα με τη μέθοδο του αερισμού:

- τα αναστρεφόμενα σειράδια (windrows)
- τους αεριζόμενους στατικούς σωρούς (aerated static pile - ASP)



Εικόνα 6: Σύστημα αναστρεφόμενων σειραδιών

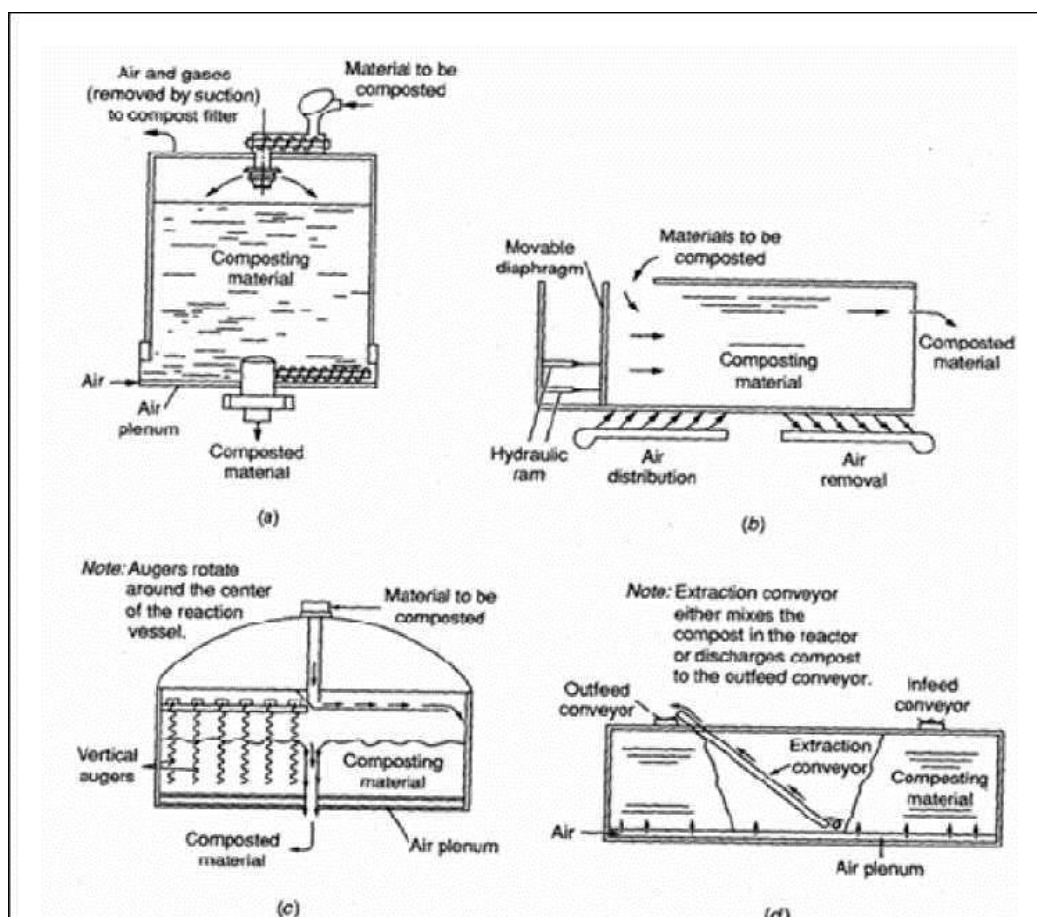


Εικόνα 7: Αεριζόμενος στατικός σωρός

### Κλειστά συστήματα ( in vessel composting)

Η κομποστοποίηση στα κλειστά συστήματα λαμβάνει χώρα σε βιοαντιδραστήρες ή κλειστά κτίρια. Χαρακτηρίζονται συνήθως από δυναμικό αερισμό, με ή χωρίς ανάδευση, μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η ταχύτερη βιοχημική σταθεροποίηση του οργανικού υλικού, η καλύτερη ποιότητα των χαρακτηριστικών του και η δυνατότητα ελέγχου και επεξεργασίας των οσμών οι οποίες αποτελούν σημαντικό πρόβλημα, ειδικά όταν η κομποστοποίηση γίνεται κοντά σε κατοικημένες περιοχές.

Οι δύο κυρίες κατηγορίες των βιοαντιδραστήρων που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία των κλειστών συστημάτων είναι οι κάθετοι και οριζόντιοι.



Εικόνα 8: : Σχηματική αναπαράσταση των βασικών τύπων κλειστών συστημάτων κομποστοποίησης (a & c κάθετοι αντιδραστήρες, b & d οριζόντιοι αντιδραστήρες) [12]

### 2.3.5 Οικιακή Κομποστοποίηση

Η οικιακή κομποστοποίηση αποτελεί μια από τις σημαντικότερες και πλέον πιο αξιόπιστες μεθόδους ανακύκλωσης των οργανικών απορριμμάτων που αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος των σκουπιδιών για κάθε νοικοκυριό. Με την οικιακή κομποστοποίηση ένα μεγάλο ποσοστό διαχωρίζεται από τον κύριο όγκο των ΑΣΑ με τελικό προορισμό τους Χώρους Υγειονομικής Ταφής. Πολλοί ιδιώτες παγκοσμίως παρακινούνται από ένα συναίσθημα ευαισθησίας ή ενδιαφέροντος για την προστασία του περιβάλλοντος ή την επιθυμία να έχουν μια φθηνή και αξιόπιστη πηγή λιπάσματος για τον κήπο τους και τις καλλιέργειές τους, εφαρμόζουν τη μέθοδο της κομποστοποίησης επιστρέφοντας έτσι στο έδαφος όλα εκείνα τα απαραίτητα συστατικά (οργανικά και ανόργανα) που χρειάζονται για την ανάπτυξη των φυτών. Έτσι εκτός από την ανακύκλωση των μετάλλων, του χαρτιού, των γυαλιών και των ελαστικών, που σε κάποιο ικανοποιητικό βαθμό μπορεί να επιτευχθεί, με τη σύνθετη διαδικασία της ανακύκλωσης, με την κομποστοποίηση ανακυκλώνεται ουσιαστικά και το οργανικό κλάσμα, επαναφέροντάς το σωστά στο φυσικό αποδέκτη του το χώμα για να μπορέσει το τελευταίο διατηρώντας την κανονική δομή και γονιμότητά του να συνεχίσει να παράγει.

Με την οικιακή κομποστοποίηση μειώνονται οι συνολικές ποσότητες αποβλήτων που στέλνει ο κάθε δήμος στο ΧΥΤΑ. Το γεγονός θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των δημοτικών τελών που πληρώνει κάθε πολίτης, αν συνδυαστεί με αλλαγή της πολιτικής χρέωσης των δήμων για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων τους. Προς το παρόν η χρέωση των δήμων γίνεται ανάλογα με τον πληθυσμό τους, ενώ θα έπρεπε να γίνεται ανάλογα με τις ποσότητες αποβλήτων που στέλνουν για υγειονομική ταφή. Επιμηκύνεται σημαντικά ο χρόνος ζωής των ΧΥΤΑ, αφού έτσι θα δέχονται πολύ λιγότερα απόβλητα. Προστατεύεται ο πλανήτης από το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Τα οργανικά απόβλητα στους ΧΥΤΑ θάβονται και αποδομούνται κάτω από συνθήκες έλλειψης οξυγόνου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων μεθανίου (CH<sub>4</sub>), μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και σε λιγότερες ποσότητες υδρόθειο (H<sub>2</sub>S) κ.α. Τα αέρια αυτά είναι σε μεγάλο βαθμό υπεύθυνα για το φαινόμενο του θερμοκηπίου και συνεπώς για την αλλαγή του κλίματος στη Γη, με τις γνωστές για όλους καταστρεπτικές συνέπειες.

Βασικό εξάρτημα του εξοπλισμού είναι ο κάδος κομποστοποίησης που θα παρέχει κάποιο περιορισμένο χώρο στο προς κομποστοποίηση μίγμα. Πολύ σημαντικό στοιχείο επίσης είναι η γνώση των κατάλληλων αλλά και ακατάλληλων υλικών για την κομποστοποίηση.

Πιθανά προβλήματα που μπορούν να παρουσιαστούν εφαρμόζοντας την οικιακή κομποστοποίηση, αποτελούν οι δυσάρεστες οσμές, οι οποίες συγκεντρώνουν και τα περισσότερα παράπονα των γειτόνων. Το πρόβλημα με τις οσμές είναι δυνατόν να αποφεύγονται με την ικανοποιητική ανακύκλωση του αέρα (οξυγόνου) μέσα στον κάδο κομποστοποίησης, αυτό είναι θέμα του κατασκευαστή του κάδου.



Εικόνα 9: Οικιακοί κομποστοποιητές

### 2.3.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κομποστοποίησης

#### Πλεονεκτήματα Κομποστοποίησης

- Μείωση των οχλήσεων κατά τη συλλογή και μεταφορά των οικιακών στερεών αποβλήτων
- Μικρότερη επιβάρυνση των χώρων ταφής αποβλήτων (τόσο ποσοτικά όσο και ως προς το ρυπαντικό φορτίο) λόγω της μειωμένης ποσότητας στερεών αποβλήτων που καταλήγουν στους χώρους αυτούς, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση του χρόνου λειτουργίας τους.
- Μειωμένη παραγωγή στραγγισμάτων στους χώρους ταφής αποβλήτων τα οποία επιπλέον, περιέχουν μικρότερο ρυπαντικό φορτίο.
- Μειωμένες αέριες εκπομπές από τους χώρους διάθεσης τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά (διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, πτητικές οργανικές ενώσεις κ.λπ.)
- Παραγωγή προϊόντος προστιθέμενης αξίας το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές – αποφυγή της χρήσης συνθετικών λιπασμάτων
- Παραγωγή προϊόντος υψηλής ποιότητας λόγω του γεγονότος ότι προέρχεται από τη χρήση υλικών διαχωρισμένων στην πηγή (σε αντίθεση με το προϊόν που προέρχεται από οργανικό υλικό το οποίο διαχωρίζεται σε κεντρικές μονάδες μηχανικής διαλογής)

- Η χωριστή συλλογή και αξιοποίηση των βιοαποδομήσιμων οργανικών αποβλήτων εντός της οικίας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της απαιτούμενης συχνότητας για συλλογή των μικτών οικιακών αποβλήτων που τοποθετούνται στους κάδους. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για χώρες όπως η Ελλάδα όπου οι κλιματικές συνθήκες απαιτούν συχνό άδειασμα των κάδων για αποφυγή της ανάπτυξης συνθηκών αποδόμησης των αποβλήτων που συλλέγονται σε αυτούς. [7]

### **Μειονεκτήματα Κομποστοποίησης**

- Η ανάγκη ταφής τουλάχιστο ενός μέρους από το μη ζυμώσιμο κλάσμα των σκουπιδιών.
- Πιθανά προβλήματα λόγω δυσσομίας.
- Χρονοβόρα διαδικασία.
- Απαραίτητη η διάθεση/πώληση του προϊόντος.

## **2.4. Αναερόβια Χώνευση**

### **2.4.1 Γενικά**

Ο όρος «αναερόβια χώνευση» (ΑΧ) αναφέρεται στην ελεγχόμενη βιολογική αποδόμηση των οργανικών αποβλήτων κάτω από συνθήκες έλλειψης οξυγόνου (αναερόβιες συνθήκες) και οδηγεί στην παραγωγή βιοαερίου (ένα μείγμα  $\text{CH}_4$  και  $\text{CO}_2$  το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για την συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας) και ενός υδαρούς υπολείμματος (digestate = χωνεμένη ιλύς).

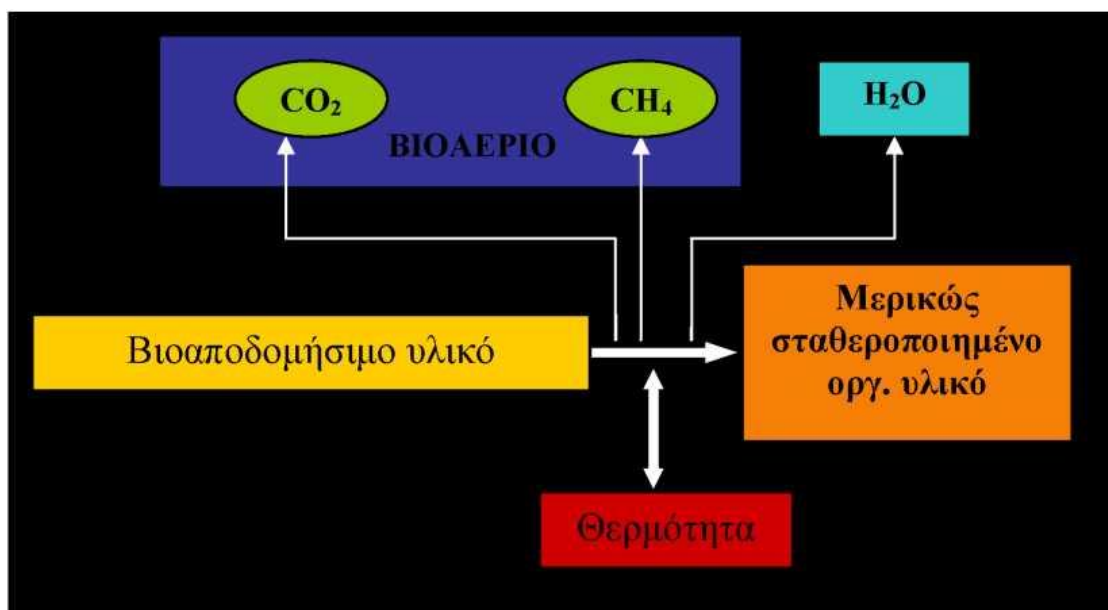
Η χωνεμένη ιλύς πρέπει να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία είτε για τη σταθεροποίησή της και τη μετατροπή της σε κόμποστ και χρήση του ως εδαφοβελτιωτικό (μέσω λιπασματοποίησης, κάτι το οποίο προτιμάται όταν η αρχική τροφοδοσία είναι διαλεγμένα στη πηγή ή υλικό τύπου κόμποστ, είτε για την ξήρανσή της και τη χρήση της ως καύσιμης ύλης.

Η αναερόβια χώνευση στερεών αποβλήτων συχνά αναφέρεται και ως βιοαεριοποίηση (biogasification). Ο τελευταίος όρος υπονοεί τη μερική μετατροπή των στερεών αποβλήτων σε αέριο (βιοαέριο), κύριο συστατικό του οποίου είναι το καύσιμο μεθάνιο. Η παραγωγή του μεθανίου κάνει την αναερόβια χώνευση μία βιολογική διεργασία μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια (waste to energy). Η αναερόβια χώνευση, η οποία αποτελεί μία διεργασία που λαμβάνει χώρα αυθόρμητα σε αναερόβια περιβάλλοντα, όπως οι ορυζώνες, τα έλη, οι Χ.Υ.Τ.Α. και οι ΧΑΔΑ, μπορεί να λειτουργήσει κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες σε ειδικές εγκαταστάσεις, με στόχο τη μεγιστοποίηση του παραγόμενου μεθανίου καθώς και τον έλεγχο των περιβαλλοντικών προβλημάτων και οχλήσεων (π.χ. διαφυγή μεθανίου, οσμές).

Ο βασικός στόχος της μεθόδου είναι η ανάκτηση ενέργειας (υπό μορφή μεθανίου). Δευτερεύων στόχος είναι η μείωση του όγκου και του βάρους των αποβλήτων, η βιολογική σταθεροποίησή τους, και η πιθανή ανάκτηση θρεπτικών μέσω της χρήσης του παραγόμενου υπολείμματος ως εδαφοβελτιωτικού [12]

Κατά τη διάρκεια της αναερόβιας χώνευσης, παράγεται πολύ λίγη θερμότητα σε αντίθεση με την αερόβια (παρουσία οξυγόνου) αποσύνθεση, όπως η κομποστοποίηση. Η ενέργεια, που είναι χημικά δεσμευμένη μέσα στο υπόστρωμα, παραμένει κυρίως στο παραγόμενο βιοαέριο με τη μορφή μεθανίου.

Διεθνώς, η αναερόβια χώνευση έχει χρησιμοποιηθεί εδώ και δεκαετίες, κυρίως σε αγροτικές περιοχές, για την παραγωγή βιοαερίου το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως καύσιμο μαγειρέματος και φωτισμού. Σήμερα, αναερόβια χώνευση χρησιμοποιείται για την παραγωγή θερμικής ενέργειας που θερμαίνει το νερό (που κυκλοφορεί σε σωλήνες νερού) σε κατάλληλες θερμοκρασίες για την ξήρανση των οργανικών υλικών, όπως η ιλύς και τα απορρίμματα της κουζίνας. Στις πρόσφατες δεκαετίες, η Ευρώπη έχει αναπτύξει μεγάλης κλίμακας κεντρικά συστήματα αστικών στερεών αποβλήτων με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ως υποπροϊόν. [24]



Σχήμα 5: Διεργασία αναερόβιας χώνευσης

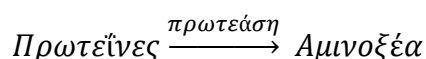
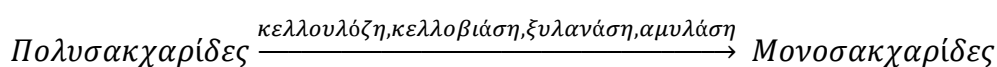
#### 2.4.2 Στάδια της Αναερόβιας Χώνευσης

Η αναερόβια βιοαποδόμηση του οργανικού υλικού μπορεί να περιγραφεί ως μία διαδικασία τεσσάρων σταδίων, στα οποία λαμβάνουν χώρα ένα πλήθος από αντιδράσεις.

Τα στάδια της Αναερόβιας Χώνευσης είναι:

## 1. Υδρόλυση

Η υδρόλυση είναι το πρώτο βήμα της ΑΧ, κατά τη διάρκεια της οποίας η οργανική ουσία (πολυμερή) αποσυντίθεται σε μικρότερα στοιχεία (μονο- και ολιγομερή). Τα πολυμερή όπως οι υδατάνθρακες, τα λιπίδια, τα νουκλεϊκά οξέα και οι πρωτεΐνες μετατρέπονται σε γλυκόζη, σε γλυκόλη, πουρίνες, πυριδίνες, κλπ. Τα υδρολυτικά βακτηρίδια εκκρίνουν υδρολυτικά ένζυμα, μετατρέποντας τα βιοπολυμερή σε απλούστερες και διαλυτές ενώσεις όπως παρουσιάζεται παρακάτω:



Μεγάλη ποικιλία μικροοργανισμών εμπλέκονται στην υδρόλυση, η οποία πραγματοποιείται από τα εξωένζυμα, που παράγονται από τους μικροοργανισμούς εκείνους που αποσυνθέτουν το αδιάλυτο μοριακό υλικό. Τα προϊόντα που προκύπτουν από την υδρόλυση αποσυντίθενται περαιτέρω από τους εμπλεκόμενους μικροοργανισμούς και χρησιμοποιούνται για τις δικές τους διεργασίες μεταβολισμού.

## 2. Ακετογένεση

Στο στάδιο αυτό, τα προϊόντα της υδρόλυσης μετατρέπονται από οξεογενή βακτηρίδια σε μεθανογενή υποστρώματα. Τα απλά σάκχαρα, τα αμινοξέα και τα λιπαρά οξέα υποβιβάζονται σε οξικό άλας, διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο (70%), καθώς επίσης και σε πτητικά λιπαρά οξέα (VFA) και αλκοόλες (30%).

## 3. Οξικογένεση

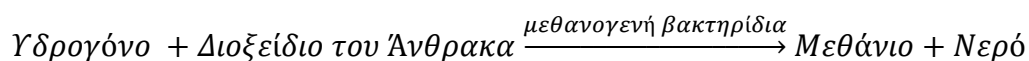
Κατά τη διάρκεια της οξικογένεσης, τα προϊόντα από την ακετογένεση που δεν μπορούν να μετατραπούν άμεσα σε μεθάνιο από τα μεθανογενή βακτηρίδια μετατρέπονται σε μεθανογενή υποστρώματα. Τα πτητικά λιπαρά οξέα και οι αλκοόλες οξειδώνονται σε μεθανογενή υποστρώματα, όπως οξικό οξύ, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Τα πτητικά λιπαρά οξέα με αλυσίδες άνθρακα με περισσότερους από δύο δεσμούς και οι αλκοόλες με αλυσίδες άνθρακα με περισσότερους από ένα δεσμό οξειδώνονται σε οξικό οξύ και υδρογόνο. Η παραγωγή του υδρογόνου αυξάνει την μερική πίεση του. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως «υπόλειμμα» της οξικογένεσης και εμποδίζει το μεταβολισμό των οξικογενών βακτηριδίων. Κατά τη διάρκεια της μεθανογένεσης, το υδρογόνο μετατρέπεται σε



μεθάνιο. Η οξικογένεση και η μεθανογένεση συνήθως λαμβάνουν χώρα παράλληλα, ως συμβίωση δύο ομάδων οργανισμών.

#### 4. Μεθανογένεση

Κατά το στάδιο της μεθανογένεσης η παραγωγή του μεθανίου και του διοξειδίου του άνθρακα από ενδιάμεσα προϊόντα πραγματοποιείται από τα μεθανογενή βακτηρίδια. Το 70% του διαμορφωμένου μεθανίου προέρχεται από οξικό άλας, ενώ το υπόλοιπο 30% παράγεται από τη μετατροπή του υδρογόνου και του CO<sub>2</sub> σύμφωνα με την ακόλουθη αντίδραση:



Το στάδιο της μεθανογένεσης είναι ένα κρίσιμο βήμα σε ολόκληρη τη διεργασία της χώνευσης, δεδομένου ότι είναι η πιο αργή βιοχημική αντίδραση της διεργασίας. Η μεθανογένεση επηρεάζεται σοβαρά από τις συνθήκες λειτουργίας. Η σύνθεση της πρώτης ύλης, ο ρυθμός τροφοδοσίας, η θερμοκρασία και το pH είναι παραδείγματα παραγόντων που επηρεάζουν τη μεθανογένεση. Η υπερφόρτωση του χωνευτήρα, οι αλλαγές θερμοκρασίας ή η μεγάλη είσοδος οξυγόνου οδηγούν συνήθως στον τερματισμό της παραγωγής μεθανίου. [25]

##### 2.4.3 Παράγοντες που επιδρούν στην αναερόβια χώνευση

Η εξέλιξη της αναερόβιας χώνευσης στηρίζεται κυρίως στη διαδοχή και στη δραστηριότητα των μικροβιακών κοινοτήτων. Οπότε καθορίζεται από τις παραμέτρους που ευνοούν, δυσχεραίνουν ή αναστέλλουν την ανάπτυξη των εμπλεκόμενων μικροοργανισμών. Πιο συγκεκριμένα καθορίζεται από παράγοντες όπως:[11]

##### Θερμοκρασία

Δεδομένου ότι τα βακτήρια που συμμετέχουν στην αναερόβια χώνευση δεν περιορίζονται από τις υπάρχουσες θερμοκρασίες (αναστέλλονται μόνο από χαμηλές θερμοκρασίες), τα συστήματα μπορεί να λειτουργήσουν σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών χωρίς να προκύψουν σημαντικά ζητήματα αποδόσεων. Ωστόσο, σχεδιάζονται να λειτουργήσουν στις δύο περιοχές θερμοκρασίας, όπου έχει αποδειχθεί ότι η απόδοση βελτιστοποιείται. Η πρώτη περιοχή ευνοεί την ανάπτυξη των μεσόφιλων μικροοργανισμών και εκτείνεται γύρω από τους 35 °C (γενικότερα

από 20 έως 45°C), ενώ η δεύτερη ευνοεί τους θερμοφίλους και τοποθετείται γύρω στους 55°C.

Καθώς οι αντιδράσεις του μικροβιακού μεταβολισμού που πραγματοποιούνται υπό αναερόβιες διεργασίες δεν παράγουν μεγάλα ποσά θερμότητας, η βιολογικά παραγόμενη θερμότητα δεν επαρκεί για τη διατήρηση της θερμοκρασίας στο βέλτιστο επίπεδο λειτουργίας του συστήματος της αναερόβιας χώνευσης, ούτε ακόμη και για τη δραστηριότητα των μεσόφιλων μικροοργανισμών. Γι αυτό κρίνεται απαραίτητη η παροχή πρόσθετης, εξωτερικής θερμότητας. Η απαιτούμενη ενέργεια μπορεί να προέλθει από την καύση του βιοαερίου, οπότε το σύστημα δεν επιβαρύνεται οικονομικά. Υπό συνθήκες καλής λειτουργίας του συστήματος της αναερόβιας χώνευσης, η ποσότητα του παραγόμενου βιοαερίου είναι ικανή να ανατροφοδοτήσει το σύστημα (να καλύψει δηλαδή της ενεργειακές του ανάγκες) αλλά και να παράγει περίσσεια αξιοποιήσιμης ενέργειας (ηλεκτρισμού ή θερμότητας).

### **Υγρασία**

Η αναερόβια χώνευση είναι μια διεργασία που λαμβάνει χώρα στην υγρή φάση και χρησιμοποιείται σε υπόστρωμα με σχετικά χαμηλή συγκέντρωση στερεών και υγρασία που κυμαίνεται από 60 έως 95%. Για υγρά υποστρώματα (>80% υγρασία), το τελικό στάδιο της μεθανογένεσης είναι συνήθως περιοριστικό της όλης διεργασίας. Για στερεά υποστρώματα όμως (60-80% υγρασία), όπως το οργανικό τον ΑΣΑ, η περιοριστική φάση στη συνολική διεργασία είναι η υδρόλυση των στερεών, δηλαδή το πρώτο στάδιο.

### **Δομή Υποστρώματος**

Το βέλτιστο μέγεθος των σωματιδίων εξαρτάται από το βαθμό βιοδιασπασιμότητας του υποστρώματος. Αυτό σημαίνει ότι υποστρώματα με μικρή έως μέτρια βιοδιασπασιμότητας (π.χ. το χαρτί) θα πρέπει να είναι τεμαχισμένα σε ένα μικρό σχετικά μέγεθος σωματιδίων έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η διαδικασία. Αντίθετα για τα ταχέως βιοαποδομήσιμα απόβλητα (π.χ. υπολείμματα φαγητών), το μικρό μέγεθος αποτελεί μειονέκτημα, αφού οδηγεί σε μεγάλη παραγωγή οξέων. Η αύξηση των οξέων μεταφράζεται σε μείωση του pH, η οποία αναστέλλει την ανάπτυξη των περισσότερων «ευαίσθητων» μεθανογόνων βακτηρίων.

Ωστόσο σε κάθε τύπο υποστρώματος, η μείωση του μεγέθους των υλικών (μέσω τεμαχισμού ή κοσκινίσματος), αποτελεί συνήθη επιλογή για τα συστήματα αναερόβιας χώνευσης, αφού με την πρακτική αυτή η παραγωγή βιοαερίου αυξάνεται ενώ ο χρόνος μειώνεται.

### **Περιεχόμενο Οξυγόνο**

Τα βακτήρια που συμμετέχουν στις φάσεις της υδρόλυσης των πολυμερών οργανικών ενώσεων καθώς και στη φάση της οξεογένεσης είναι κατά κύριο λόγο είτε προαιρετικά αερόβια είτε αυστηρά αναερόβια. Για την ακετογένεση ευθύνονται

αυστηρά αναερόβια βακτήρια. Κατά συνέπεια, μια χαμηλή, εντούτοις σταθερή περιεκτικότητα σε οξυγόνο δεν δρα ανασταλτικά για την αναερόβια χώνευση.

### **Θρεπτικά στοιχεία**

Για να εξελιχτεί η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης προς το αναμενόμενο αποτέλεσμα, τα υποστρώματα πρέπει να χαρακτηρίζονται από τιμές του λόγου άνθρακα προς άζωτο (C/N) οι οποίες ευνοούν τη μεταβολική δραστηριότητα των μικροοργανισμών. Ενδεικτικά για υποστρώματα με μέτρια έως υψηλή βιοαποδομησιμότητα, όπως τα υπολείμματα τροφών, ο βέλτιστος λόγος C/N κυμαίνεται από 25 έως 30. Για βραδέως βιοαποδομήσιμα υποστρώματα, όπως είναι η ξυλεία, ο λόγος αυτός μπορεί να ανέρχεται στο 40, καθότι σε αυτήν την περίπτωση μόνο ένα μικρό μέρος του άνθρακα είναι άμεσα διαθέσιμο στους μικροοργανισμούς.

Σε γενικές γραμμές χαμηλές τιμές C/N έχουν σαν αποτέλεσμα τη μεγέθυνση των εκπομπών του αζώτου με τη μορφή της αέριας αμμωνίας. Η τελευταία όμως μπορεί να αποβεί τοξική για τον μικροβιακό πληθυσμό. Από την άλλη πλευρά, οι μεγάλες αναλογίες C/N, δηλαδή τιμές μεγαλύτερες από 45, μπορεί να οδηγήσουν σε ημιτελή κατανάλωση άνθρακα, μείωση του ρυθμού της μεθανογένεσης και αύξηση των οργανικών οξέων σε τοξικές συγκεντρώσεις (π.χ. 15g/l). Οι βέλτιστες τιμές του λόγου C/N επιτυγχάνονται με την κατάλληλη μίξη συστατικών των αποβλήτων. Η επίτευξη τους απαιτεί καλό σχεδιασμό για τον τύπο και τις ποσότητες των αποβλήτων που δέχεται κάθε εγκατάσταση, για το χρόνο που δέχεται, την αποθήκευση τους και την τροφοδοσία του βιοαντιδραστήρα.

### **Οξύτητα**

Οι τέσσερις φάσεις της αναερόβιας χώνευσης χαρακτηρίζονται από βέλτιστες τιμές οξύτητας. Η φάση της ακετογένεσης πραγματοποιείται σε pH μεταξύ 5,3-6,7 με κάτω όριο το 5, ενώ η φάση της μεθανογένεσης πραγματοποιείται σε pH μεταξύ 6,8-7,2 με κάτω όριο το 6. Επομένως ένα ικανοποιητικό εύρος για το σύνολο της διεργασίας θεωρείται το είναι το 6,6 -8.

#### **2.4.4 Συστήματα Αναερόβιας Χώνευσης**

Τα συστήματα αναερόβιας χώνευσης που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των στερεών αποβλήτων μπορούν να ταξινομηθούν στη βάση τεσσάρων κύριων χαρακτηριστικών, που προσδιορίζουν και τον τύπο της εφαρμοζόμενης τεχνολογίας:

1. τη θερμοκρασία,
2. τη συγκέντρωση των στερεών,
3. το σύστημα ανάδευσης και
4. τον αριθμό των φάσεων /αντιδραστήρων.

Ο συνδυασμός αυτών των χαρακτηριστικών μπορεί να περιγράψει τα περισσότερα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα, αν και κάποια συστήματα παραμένουν ενδιάμεσα αυτών των κατηγοριοποιήσεων. [12]

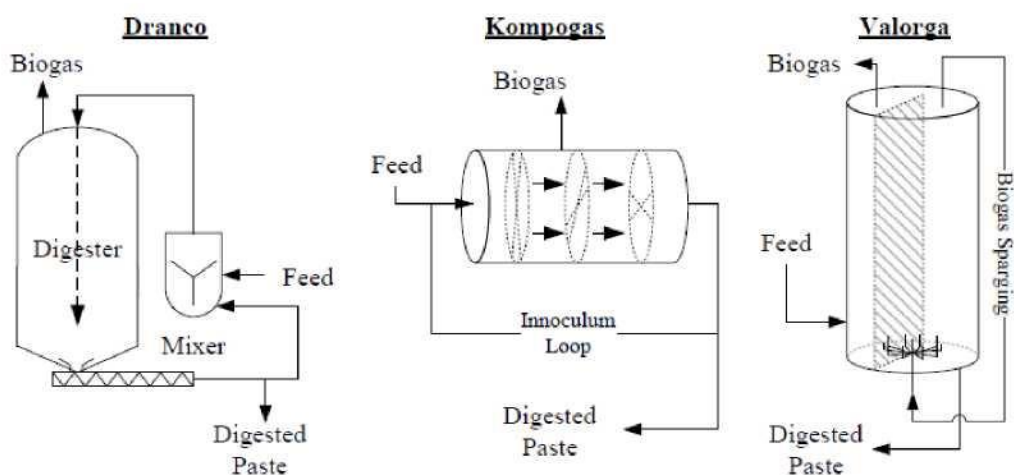
**Πίνακας 3: Σύνοψη συστημάτων αναερόβιας χώνευσης**

Θερμοκρασία	Συγκέντρωση στερεών	Σύστημα μίξης	Αριθμός Σταδίων
Μεσόφιλο (~ 35°C)	Χαμηλά στερεά (<10% ξ.ο)	Μηχανική ανάδευση	Ενός σταδίου ( ένας αντιδραστήρας)
Θερμόφιλο (~55°C)	Μεσαία στερεά ( 10-25% ξ.ο)	Ανάδευση μέσω των αερίων	Πολλαπλών σταδίων
	Υψηλά στερεά (>25% ξ.ο)	Στρωτής ροής	
		Διακοπτόμενης Τροφοδοσίας	

Τα γνωστότερα ωστόσο εφαρμοσμένα συστήματα αναερόβιας χώνευσης κατηγοριοποιούνται κυρίως σύμφωνα με τον αριθμό σταδίων ως εξής:

#### Κλασικό σύστημα αναερόβιας χώνευσης, ενός αντιδραστήρα

Αποτελείται από έναν αντιδραστήρα, με χρόνο παραμονής κάποιων εβδομάδων, στον οποίο συνήθως πραγματοποιείται ανάδευση του περιεχομένου. Στόχος της ανάδευσης είναι η αποφυγή συσσώρευσης μεταβολικών προϊόντων που μπορούν να οδηγήσουν στη θανάτωση των ενεργών μικροβίων. Στην περίπτωση μη ανάδευσης, δημιουργούνται τέσσερα στρώματα εντός του αντιδραστήρα, ενώ στην κορυφή αυτού γίνεται συλλογή του παραγόμενου αερίου. Στην επόμενη εικόνα, φαίνονται μερικοί αντιδραστήρες ενός σταδίου.



**Εικόνα 10: : Συστήματα «ξηρής» αναερόβια χώνευσης ενός σταδίου Dranco, Valorga και Kompogas**

#### Σύστημα δύο ή περισσότερων σταδίων

Τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν τουλάχιστον δύο αντιδραστήρες που λειτουργούν σε σειρά. Τα στάδια της υδρόλυσης και παραγωγής οξέων πραγματοποιούνται στον πρώτο αντιδραστήρα. Τα περιεχόμενα του πρώτου αντιδραστήρα αναμιγνύονται πλήρως (με προσθήκη νερού) και ο χρόνος παραμονής είναι μερικές ημέρες. Στη συνέχεια, το περιεχόμενο του πρώτου αντιδραστήρα περνάει στο στάδιο 2, δηλαδή στον δεύτερο αντιδραστήρα. Στο στάδιο αυτό λαμβάνει χώρα η μεθανογένεση (κατά κύριο λόγο) χωρίς να παρεμποδίζεται από τα σχετικά χαμηλά pH των πρώτων σταδίων. Στην πραγματικότητα βέβαια, τα στάδια της αναερόβιας χώνευσης δεν διαχωρίζονται πλήρως κι έτσι το συλλεγόμενο αέριο του δευτέρου σταδίου συνδυάζεται με το συλλεγόμενο αέριο του πρώτου σταδίου, αφού και σε αυτό παράγεται βιοαέριο. [13]

#### 2.4.5 Οικιακή αναερόβια χώνευση

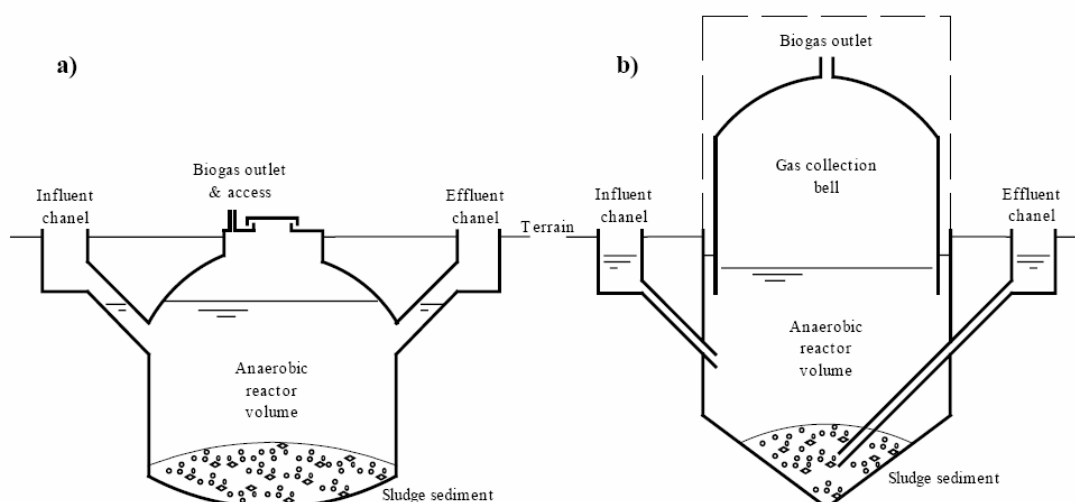
Η αναερόβια χώνευση οικιακών ΒΑ, μπορεί να πραγματοποιηθεί σε οικιακό επίπεδο ωστόσο η πολυπλοκότητα της διεργασίας είναι αυτή η οποία την καθιστά ακόμα μη διαδεδομένη ανά τον κόσμο. Οι περισσότερες εγκαταστάσεις βιοαερίου σε οικιακή κλίμακα λειτουργούν σε χώρες όπως το Νεπάλ, η Κίνα ή η Ινδία και χρησιμοποιούν πολύ απλές τεχνολογίες. Η πρώτη ύλη της Αναερόβιας Χώνευσης που χρησιμοποιείται σε αυτές τις εγκαταστάσεις βιοαερίου προέρχεται από τα νοικοκυριά και/ή τη μικρή αγροτική τους δραστηριότητα και το παραγόμενο βιοαέριο χρησιμοποιείται για το μαγείρεμα, το φωτισμό, την θέρμανση μιας οικίας, μέχρι και την καθολική ηλεκτροδότησή της.

Παρότι οι χωνευτήρες είναι απλοί, φθηνοί, γεροί, εύκολοι στη λειτουργία και την συντήρησή τους, και μπορούν να κατασκευαστούν με τοπικά παραγόμενα υλικά, η

μέθοδος παρουσιάζει ακόμα σημαντικά προβλήματα ως προς την ορθή υλοποίησή της. Συνήθως, δεν υπάρχουν όργανα ελέγχου και καμία διεργασία θέρμανσης (ψυχρόφιλη ή μεσόφιλη λειτουργία), καθώς πολλά από αυτά λειτουργούν σε θερμότερα κλίματα και έχουν μεγάλους χρόνους παραμονής.[9]

Μέχρι στιγμής έχουν αναπτυχθεί αρκετά οικιακά συστήματα τα οποία όμως παρουσιάζουν αρκετά προβλήματα όσον αφορά την λειτουργικότητά τους.

Υπάρχουν διάφορα είδη οικιακών χωνευτήρων, αλλά οι πιο διαδεδομένοι τύποι είναι ένας κινέζικος τύπος ημι-συνεχή υπόγειου αντιδραστήρα και ένας ινδικός που τροφοδοτείται με οικιακά λύματα, ζωικά περιττώματα και οργανικά οικιακά απόβλητα. Οι αντιδραστήρες λειτουργούν κατά έναν τρόπο, όπου νέο υπόστρωμα προστίθεται μια φορά την ημέρα και αντίστοιχα μια παρόμοια ποσότητα μεταγισμένου αναμεμιγμένου υγρού αφαιρείται μια φορά την ημέρα.



**Εικόνα 11: Αρχές λειτουργίας των οικιακών τύπων αντιδραστήρων AX: α) Κινέζικος τύπος, β) Ινδικός τύπος**

#### 2.4.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αναερόβιας χώνευσης

Η αναερόβια χώνευση έχει τα εξής πλεονεκτήματα: [11]

- Παράγεται βιοαέριο το οποίο μπορεί να καθαριστεί από της ανεπιθύμητες προσμίξεις ή να καεί ως έχει σε ειδικούς καυστήρες δίνοντας θερμική και ηλεκτρική ενέργεια μειώνοντας έτσι το αρχικό κόστος επένδυσης για την εγκατάσταση

- Απαιτεί μικρή δαπάνη ενέργειας για την επεξεργασία των αποβλήτων.
- Παράγει πολύ μικρότερες ποσότητες βιομάζας (3-20 φορές λιγότερη σε σχέση με την αερόβια διεργασία).
- Λόγω του μικρού συντελεστή απόδοσης βιομάζας των οξικογόνων και μεθανογόνων μικροοργανισμών, οι απαιτήσεις της διεργασίας σε θρεπτικά (Άζωτο, Φώσφορο) είναι μειωμένες συγκριτικά με τις αερόβιες διεργασίες.
- Επιτυγχάνεται υψηλή απομάκρυνση οργανικού φορτίου.
- Η διεργασία είναι κατάλληλη για ισχυρά αγροτοβιομηχανικά απόβλητα.
- Καλά προσαρμοσμένη αναερόβια λάσπη μπορεί να παραμείνει ενεργή, χωρίς τροφοδοσία, για μεγάλο χρονικό διάστημα (άνω του έτους).

Τα σημαντικότερα μειονεκτήματα είναι:

- Μεγάλο χρονικό διάστημα εγκλιματισμού μικροβιακής καλλιέργειας και πιο αργή διεργασία από την αερόβια επεξεργασία.
- Ευαισθησία συστημάτων σε αυξομειώσεις της οργανικής φόρτισης.
- Μικρός ειδικός ρυθμός ανάπτυξης μεθανογόνων βακτηρίων.
- Εξάρτηση της διεργασίας από τη θερμοκρασία και κατανάλωση ενέργειας.
- Ευαισθησία μεθανογόνων μικροοργανισμών σε ευρύ φάσμα τοξικών ενώσεων.
- Μικρότερη ικανότητα καταστροφής των παθογόνων μικροοργανισμών σε σχέση με την αερόβια επεξεργασία.
- Δυσοσμία του συστήματος εφόσον περιέχονται θειικά στην εισροή.
- Περαιτέρω επεξεργασία των εκροών.

## 2.5. Θερμικές Μέθοδοι Επεξεργασίας

### 2.5.1 Γενικά

Το βιοαποδομήσιμο κλάσμα των οικιακών απορριμμάτων μπορεί να θεωρηθεί ως μέρος του μεικτού κλάσματος των αποβλήτων σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας. Έτσι, εκτός από τις μεθόδους οικιακής επεξεργασίας που έχουν ήδη καταγραφεί, (κομποστοποίηση και Α.Χ.) υπάρχουν και άλλες επιπρόσθετες μέθοδοι που ονομάζονται θερμικές.

Η θερμική επεξεργασία είναι ο όρος που περιγράφει όλες τις τεχνολογίες επεξεργασίας αποβλήτων, που χρησιμοποιούνται για την καύση ή τη θέρμανση διαφόρων ειδών αποβλήτων. Υπάρχουν πολλές και διαφορετικές τεχνολογίες οι οποίες διαφέρουν ανάλογα:

- Την ειδική επεξεργασία για κάθε απόβλητο
- Την ποσότητα οξυγόνου
- Τις θερμοκρασίες επεξεργασίας

Κύριος στόχος της θερμικής επεξεργασίας είναι:

- Η ελαχιστοποίηση του τελικού προς διάθεση όγκου απορριμμάτων
- Η πλήρης αξιοποίηση όλων των καύσιμων συστατικών τους
- Η παραγωγή αξιοποιήσιμης ενέργειας και η βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης
- Η τήρηση όλων των νομικών περιορισμών, όσον αφορά τις κάθε είδους περιβαλλοντικές οχλήσεις (ειδικότερα η αποφυγή δημιουργίας και εκπομπής οργανικών ενώσεων όπως διοξίνες και φουράνια) [9]

Τα οικιακά ΒΑ μπορούν να επεξεργαστούν με μια εκ των υφιστάμενων μεθόδων θερμικής επεξεργασίας ως μέρος της συνολικής ποσότητας των ΑΣΑ. Τα οικιακά ΒΑ συλλέγονται μαζί με τα υπόλοιπα οικιακά απορρίμματα και μεταφέρονται σε κεντρικές εγκαταστάσεις για την παραγωγή ενέργειας.

Οι κυριότερες μέθοδοι Θερμικής Επεξεργασίας είναι :

- Η Αποτέφρωση-Καύση
- Η Πυρόλυση
- Η Αεριοποίηση
- Η Τεχνική Πλάσματος



Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των μεθόδων θερμικής επεξεργασίας, όσον αφορά στις συνθήκες λειτουργίας των αντίστοιχων εγκαταστάσεων και τα προκύπτοντα προϊόντα.

**Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά μεθόδων θερμικής επεξεργασίας**

	<b>Πυρόλυση</b>	<b>Αεριοποίηση</b>	<b>Αποτέφρωση</b>
<b>Συνθήκες λειτουργίας</b>			
Θερμοκρασία αντίδρασης (°C)	250 – 700	500 – 1600	800 – 1450
Πίεση (bar)	1	1 – 45	1
Ατμόσφαιρα	Αδρανής / Άζωτο	Παράγοντας αεριοποίησης O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	Αέρας
Στοιχειομετρική αναλογία	0	<1	>1
<b>Προϊόντα</b>			
Αέρια φάση	H <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> , υδρογονάνθρακες	H <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>
Στερεά φάση	Τέφρα, κωκ	Τέφρα, σκωρία	Τέφρα, σκωρία
Υγρή φάση	Έλαια πυρόλυσης και νερό	Μικρή ποσότητα συμπυκνωμένου υγρού	

### **Αποτέφρωση-Καύση**

Η ανεξέλεγκτη καύση των απορριμμάτων εφαρμοζόταν από αρχαιοτάτων χρόνων και ακόμα εφαρμόζεται σε μη ανεπτυγμένες τεχνολογικά και οικονομικά χώρες. \η ελεγχόμενη καύση ξεκίνησε με την ανάπτυξη της βιομηχανίας και οι τεχνολογίες Θερμικής Επεξεργασίας (ΘΕ) με ανάκτηση ενέργειας αναπτύχθηκαν κατά τις δεκαετίες του '80 και κυρίως του '90 στην αρχή σε πιλοτικό επίπεδο, μετά πειραματικό και τα τελευταία χρόνια και σε βιομηχανικό επίπεδο, ως εναλλακτικές λύσεις της χρήσης συμβατικών καυσίμων, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στόχος της εν λόγω διεργασίας είναι η εξάτμιση, η αποσύνθεση και η καταστροφή των οργανικών στοιχείων των απορριμμάτων, παρουσία οξυγόνου (είτε σε στοιχειομετρική αναλογία, είτε σε περίσσεια), καθώς και η ταυτόχρονη μείωση του προς τελική διάθεση όγκου τους.

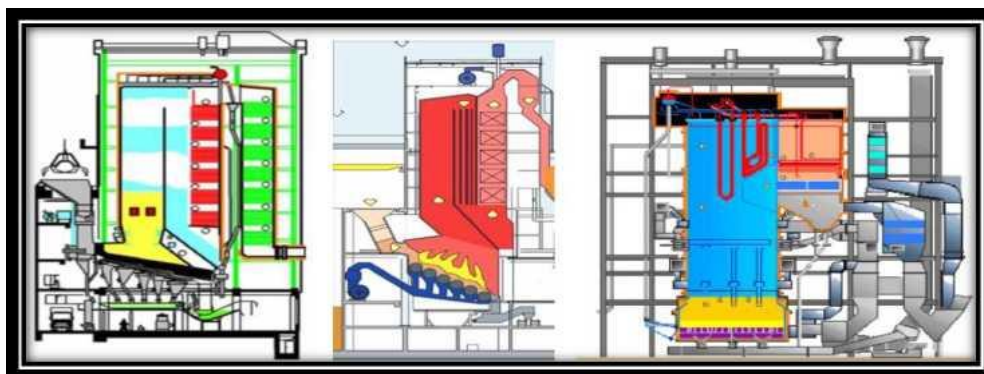
Κατά την καύση εκτός των τυπικών προϊόντων καύσης (διοξείδιο του άνθρακα, ατμός, μονοξείδιο του άνθρακα) παράγεται ανάλογα με την ποιότητα των αποβλήτων και μια σειρά άλλων ουσιών όπως διοξείδιο του θείου, οξείδια του αζώτου, υδροχλώριο, υδροφθόριο, πολυκυκλικοί υδρογονάνθρακες κλπ. Επίσης, κατά την καύση των στερεών αποβλήτων παραμένουν στερεά υπολείμματα, τα οποία αντιστοιχούν στο 25-40% του βάρους των εισερχομένων αποβλήτων. Η ποσότητα των υπολειμμάτων εξαρτάται από τη σύνθεση των αποβλήτων και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης. Διακρίνονται σε τέφρα που παράγεται στο χώρο της καύσης (απομακρύνονται μετά την εσχάρα), τέφρα από τους λέβητες (υπολείμματα τα οποία δημιουργούνται στις θερμαντικές επιφάνειες των λεβήτων και συγκεντρώνονται στις χοάνες κάτω από το λέβητα), ιπτάμενη τέφρα και σκόνη που κατακρατείται στα φίλτρα (συγκεντρώνεται στις χοάνες κάτω από τα ηλεκτρόφιλτρα ή σακκόφιλτρα) και υπολείμματα τα οποία παράγονται από τα συστήματα καθαρισμού των αερίων.

Τα διαδοχικά στάδια της καύσης είναι:

- 1) Ξήρανση του υλικού σε θερμοκρασία λίγο πάνω από τους 100° C
- 2) Εξαερίωση κατά την οποία απομακρύνεται το πτητικό κλάσμα σε θερμοκρασία αερίου 250° C
- 3) Έναυση όπου ο άνθρακας μετατρέπεται σε αέρια προϊόντα σε θερμοκρασία 500-600° C
- 4) Αποτέφρωση όπου σε θερμοκρασία 800-1100° C τα αέρια που προήλθαν από τις προηγούμενες φάσεις οξειδώνονται πλήρως.

Υπάρχουν 3 είδη αποτεφρωτήρων.

- Κινούμενων σχαρών
- Περιστρεφόμενου κλιβάνου
- Ρευστοποιημένης Κλίνης



Εικόνα 12: Τα 3 είδη αποτεφρωτήρων

## 2.5.2 Πυρόλυση

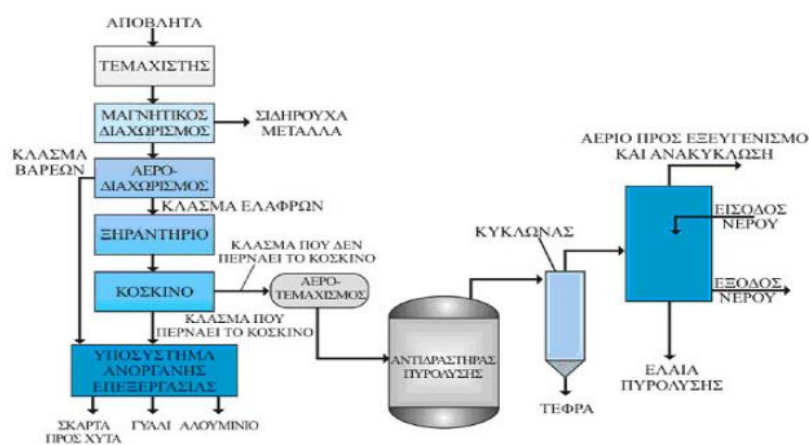
Η πυρόλυση αποτελεί μια σχετικά νέα θερμική διεργασία, η οποία αν και αναπτύχθηκε τα τέλη του 19ου αιώνα, μόλις τα τελευταία 20 – 30 χρόνια άρχισε να εφαρμόζεται στην επεξεργασία ΑΣΑ. Γενικά, δεν αποτελεί μια ιδιαίτερα διαδεδομένη μέθοδο θερμικής επεξεργασίας ΑΣΑ, τουλάχιστον στην Ευρώπη, λόγω της μειωμένης ενεργειακής απόδοσης και οικονομικής βιωσιμότητάς της. Παρόλα αυτά, μη Ευρωπαϊκές χώρες, όπως η Ιαπωνία, διαθέτουν εγκαταστάσεις πυρόλυσης στερεών απορριμμάτων, οι οποίες λειτουργούν αποδοτικά εδώ και πολλά χρόνια, γεγονός το οποίο πιθανότατα οφείλεται στις διαφορές των χαρακτηριστικών των απορριμμάτων σε σχέση με εκείνα των Ευρωπαϊκών χωρών. Πιο συγκεκριμένα, πυρόλυση είναι η θερμική διαδικασία αποσύνθεσης ενός υλικού η οποία λαμβάνει χώρα είτε σε συνθήκες παντελούς έλλειψης οξειδωτικού μέσου, είτε σε συνθήκες μερικής οξείδωσης. Οι διεργασίες της πυρόλυσης συμβαίνουν σε θερμοκρασίες 400-800° C και διασπώνται τα πολύπλοκα μόρια σε απλούστερα μόρια C. Κατά την πυρόλυση των στερεών αποβλήτων, τα προϊόντα που παράγονται είναι:

**Αέρια:** Αποτελούνται κυρίως από υδρογόνο, μεθάνιο, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα και διάφορα άλλα αέρια, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των στερεών αποβλήτων

**Υγρά:** Το υγρό κλάσμα, είναι ελαιώδες με υψηλή πυκνότητα και ιξώδες και περιέχει απλά καρβοξυλικά οξέα (π.χ. οξικό οξύ), κετόνες (π.χ. ακετόνη), αλκοόλες (π.χ. μεθανόλη) καθώς και σύνθετους οξυγονωμένους υδρογονάνθρακες. Με περαιτέρω επεξεργασία το κλάσμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συνθετικό καύσιμο.

**Πίσσα:** Το στερεό υπόλειμμα περιέχει σχεδόν καθαρό άνθρακα και τυχόν αδρανή υλικά που υπάρχουν στα στερεά απόβλητα.

Η αναλογία των παραπάνω προϊόντων εξαρτάται από τη μέθοδο της πυρόλυσης, δηλαδή από τη θερμοκρασία στην οποία υποβάλλεται το υλικό, το χρόνο έκθεσης στη συγκεκριμένη θερμοκρασία και από τη φύση του ίδιου του υλικού.



Εικόνα 13: Διεργασία της πυρόλυσης[17]

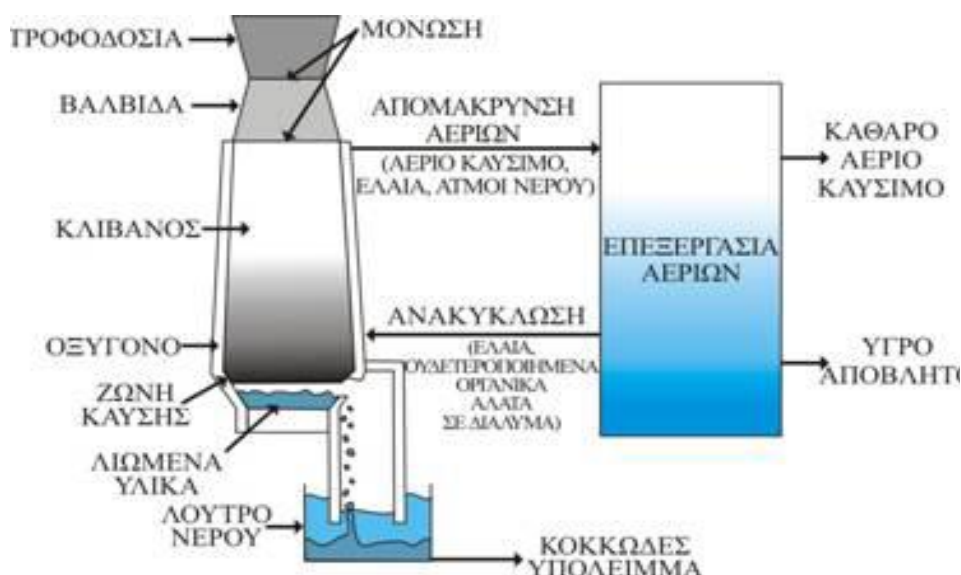
### 2.5.3 Αεριοποίηση

Η αεριοποίηση αποτελεί επίσης μια σχετικά νέα και μη ευρέως διαδεδομένη, στην Ευρώπη, μέθοδο θερμικής επεξεργασίας ΑΣΑ. Ουσιαστικά περιλαμβάνει την μετατροπή του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων σε ένα μίγμα καυσίμων αερίων, μέσω μερικής οξείδωσης αυτού σε υψηλές θερμοκρασίες (400 έως 1500 °C).

Τα τελικά προϊόντα της αεριοποίησης είναι:

- Αέριο (αέριο σύνθεσης - syngas) πλούσιο σε μονοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο και κορεσμένους υδρογονάνθρακες (κυρίως μεθάνιο) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο. Το αέριο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μηχανές εσωτερικής καύσης, σε λέβητες θέρμανσης κλπ.
- Στερεό υπόλειμμα κυρίως αδρανές υλικό.
- Η διαδικασία καθαρισμού των παραγόμενων αερίων οδηγεί στη δημιουργία μικρών ποσοτήτων υγρών αποβλήτων που χρήζουν κατάλληλης επεξεργασίας.

Υπάρχει μία ποικιλία αντιδραστήρων αεριοποίησης όμως οι πιο διαδεδομένοι είναι οι αντιδραστήρες ρευστοποιημένης και οι αντιδραστήρες σταθερής κλίνης. Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα για κάθε διαμόρφωση. Η ελλιπής οξείδωση, λόγω του σχεδιασμού του αντιδραστήρα, μπορεί να μολύνει το αέριο προϊόν και αυτό θα οδηγήσει σε υψηλότερα ποσοστά εκπομπών νιτρικών και θεικών (NOx και SOx). Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το διάγραμμα ροής σε μια τυπική μονάδα αεριοποίησης.



Εικόνα 14: Διάγραμμα ροής σε τυπική μονάδα αεριοποίησης [17]

#### 2.5.4 Αεριοποίηση/Υαλοποίηση με την τεχνική πλάσματος

Ο όρος πλάσμα (plasma) περιγράφει κάθε αέριο του οποίου τουλάχιστον ένα ποσοστό των ατόμων ή μορίων του είναι μερικά ή ολικά ιονισμένο. Ο ιονισμός αυτός μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Στην περίπτωση της επεξεργασίας αποβλήτων με την τεχνική του πλάσματος, το αέριο μεταπίπτει στην κατάσταση του πλάσματος συνήθως με τη βοήθεια της θερμότητας που δημιουργείται από ηλεκτρική αντίσταση τόξου στήλης πλάσματος. Το τόξο αυτό βρίσκεται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων (άνοδος και κάθοδος) και αποτελείται από ένα ηλεκτρικά αγώγιμο αέριο, μετατρέποντας έτσι τον ηλεκτρισμό σε θερμότητα. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνονται πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνικές θερμικής επεξεργασίας. Πιο συγκεκριμένα, η μέση θερμοκρασία του αερίου μπορεί να υπερβεί τους 6.000 °C. Το αέριο σε κατάσταση πλάσματος, παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη χημική δραστηριότητα συγκριτικά με τα περισσότερα αέρια σε μεγάλες θερμοκρασίες και πιέσεις και μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο σε μια ποικιλία χημικών διαδικασιών. Τα πλεονεκτήματα από τη χρησιμοποίηση της τεχνολογίας αυτής προκύπτουν κατά κύριο λόγο από την υψηλή κινητική ενέργεια που χαρακτηρίζει τα ιόντα και τα ηλεκτρόνια του πλάσματος, αλλά και τα άτομα του ουδέτερου αερίου. Η μερική μεταφορά αυτής της ενέργειας στις χημικές ενώσεις κάνει δυνατές χημικές αντιδράσεις, οι οποίες δεν θα μπορούσαν να ενεργοποιηθούν από τις εξώθερμες αντιδράσεις των συμβατικών διαδικασιών καύσης. Εφαρμόζοντας την τεχνική του πλάσματος, λαμβάνει χώρα η αεριοποίηση / υαλοποίηση του περιεχομένου των εισερχομένων στερεών αποβλήτων. Πιο συγκεκριμένα, υπό την επίδραση των πολύ υψηλών θερμοκρασιών, το οργανικό κλάσμα των αποβλήτων αεριοποιείται και σχηματίζει το αέριο σύνθεσης (μίγμα μονοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου) και απαέρια. Παράλληλα, το ανόργανο μέρος των αποβλήτων μετατρέπεται σε τηγμένο υπόλειμμα, το οποίο μετά από ψύξη σχηματίζει ένα σταθερό, αδρανές, υψηλής πυκνότητας υαλώδες υλικό. Τα τελικά προϊόντα από την εφαρμογή της τεχνολογίας του πλάσματος είναι:

- Το παραγόμενο αέριο σύνθεσης, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο.
- Το υαλώδους μορφής, αδρανές υλικό, το οποίο είναι ομογενές και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κατασκευαστικό υλικό σε διάφορες εφαρμογές.
- Τα απαέρια, τα οποία ύστερα από κατάλληλα επεξεργασία διοχετεύονται στην ατμόσφαιρα.
- Τα υγρά απόβλητα, τα οποία προκύπτουν από τη διαδικασία καθαρισμού των απαερίων. Ανάλογα με την ποιοτική και ποσοτική σύσταση των αποβλήτων αυτών, είναι δυνατόν να απαιτείται εγκατάσταση επεξεργασίας τους έτσι ώστε να είναι ασφαλής η τελική τους διάθεση. [26]

## 2.6. Υγειονομική Ταφή

Η υγειονομική ταφή, αν και είναι η χειρότερη λύση με βάση την ιεράρχηση των αποβλήτων, αποτελεί ακόμη τον κυρίαρχο τρόπο διαχείρισης των βιολογικών αποβλήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Οι Χώροι Υγειονομικής Ταφής (ΧΥΤΑ) πρέπει να κατασκευάζονται και να λειτουργούν σύμφωνα με την κοινοτική οδηγία για την υγειονομική ταφή αποβλήτων, ώστε να αποφεύγονται οι ζημίες στο περιβάλλον από την παραγωγή μεθανίου και λυμάτων.

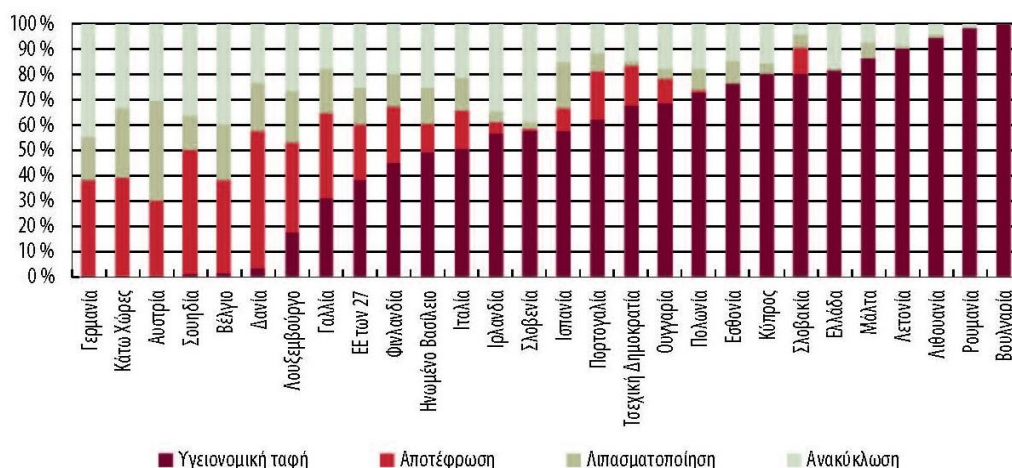
Τα κριτήρια καταλληλότητας για την χωροθέτηση Χ.Υ.ΤΑ. βασίζονται σε περιβαλλοντικά, κοινωνικά, χωροταξικά και οικονομικά χαρακτηριστικά του τόπου. Παραδειγματικά μία περιοχή που θα χαρακτηριζόταν ως χείριστη για την χωροθέτηση ενός Χ.Υ.ΤΑ. θα συνδύαζε τα παρακάτω:[27]

- Υπόβαθρο με πολλά περατά στρώματα (π.χ. χαλίκι, ρηματοποιημένα στρώματα)
- Ο πυθμένας του Χ.Υ.ΤΑ. να είναι κοντά στον υδροφόρο ορίζοντα ή το βάθος από την επιφάνεια στο υπόγειο νερό να είναι μικρότερο των 10 m
- Το υπόγειο νερό της ευρύτερης περιοχής να χρησιμοποιείται για υδρευτικούς λόγους.
- Ο Χ.Υ.ΤΑ. να γειτνιάζει με επιφανειακά νερά ή με πλημμυρική λεκάνη (αποστάσεις μικρότερες των 100 m).

Η κατασκευή ενός ΧΥΤΑ ξεκινάει με το σκάψιμο ενός χώρου στο έδαφος και καλύπτεται από μία μη διαπερατή μεμβράνη. Έπειτα τα απορρίμματα διαστρώνονται σε διαδοχικές στρώσεις των 80 περίπου εκατοστών μέχρι συνολικού πάχους 3 μέτρων. Για περιορισμό της δυσοσμίας, των εντόμων και της πιθανότητας ανάφλεξης τίθεται μεταξύ των στρώσεων αδρανές υλικό πάχους 20 εκατοστών περίπου σαν επικάλυψη (χώμα, άμμος κ.λ.π.). Στο τέλος της εκμετάλλευσης ενός χώρου πρέπει να τοποθετείται μια αργιλική στρώση και από πάνω ένα στρώμα χώματος κατάλληλο για δένδροφύτευση, ώστε να αποκαθίσταται το τοπίο. Αφού θαφτούν στην γη στα σκουπίδια αρχίζει η ζύμωσή τους με συνέπεια να παράγεται βιοαέριο και παράγονται υγρά που ονομάζονται στραγγίσματα.

Τα στραγγίσματα συλλέγονται μεσω σωλήνων και επεξεργάζονται με ειδικούς τρόπους ενώ το βιοαέριο που είναι ένα μίγμα μεθανίου, διοξειδίου του άνθρακα και λοιπών αερίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο. Η διαφυγή του βιοαερίου στην ατμόσφαιρα μπορεί να προκαλέσει διάφορα προβλήματα καθότι το μεθάνιο είναι ισχυρό θερμοκηπικό αέριο. [10]

## ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΑΝΑ ΚΡΑΤΟΣ ΜΕΛΟΣ ΤΟ 2010



Πηγή: Eurostat.

Σχήμα 6: Επεξεργασία αστικών αποβλήτων στην Ε.Ε.

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της ταφής συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 5: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα Χ.Υ.Τ.Α.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μικρό κόστος κατασκευής	Παραγωγή Μεθανίου (εφόσον δεν καίγεται το βίο-αέριο)
Σχετικώς εύκολη τεχνολογία	Παραγωγή CO <sub>2</sub> (εφόσον καίγεται το βίο-αέριο)
Παραγωγή βιοαερίου	Δυσχερής η εύρεση χώρων για την ταφή των απορριμμάτων
Επαναχρησιμοποίηση χώρου μετά την πλήρωση	Σχετικώς υψηλό κόστος μεταφοράς και λειτουργίας των Χ.Υ.Τ.Α.
	Ανάγκη παρακολούθησης της συμπεριφοράς έναντι διαφυγής ρύπων
	Κατάληψη μεγάλης έκτασης
	Κοινωνική αντίδραση κατά τη χωροθέτηση των Χ.Υ.Τ.Α. και τη μεταφορά των απορριμμάτων
	Μεγάλος όγκος των απορριμμάτων





### **3. Διαχείριση Βιοαποβλήτων με τη Μέθοδο της Ξήρανσης**

#### **3.1. Εισαγωγή**

Τα βιοαπόβλητα αποτελούν το σημαντικότερο κλάσμα των παραγόμενων απορριμμάτων σε ένα νοικοκυριό σε παγκόσμιο επίπεδο. Αυτά αποτελούν το 30 με 46 % της συνολικής ποσότητας των παραγόμενων αστικών απορριμμάτων στην Ελλάδα σε ετήσια βάση.

Η συνολική παραγόμενη ποσότητα των βιολογικών αποβλήτων τα οποία παράγονται στην Ευρώπη από τα νοικοκυριά, υπολογίζεται ίση με 118-138 Mt διατροφικών απορριμμάτων και αποβλήτων κήπων ετησίως. Αυτά αποτελούνται κυρίως από απορρίμματα κουζίνας και μπορούν να αποτελέσουν έως και το 50% κ.β της συνολικής ποσότητας των παραγόμενων οικιακών απορριμμάτων. Αυτό το είδος των απορριμμάτων περιέχει υψηλό ποσοστό νερού στο εσωτερικό του το οποίο αφενός μεν ποικίλει σημαντικά και αφετέρου δε μπορεί να ανέλθει στο 80-90% του συνολικού του βάρους.

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο οι κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα για την διαχείριση των βιολογικών αποβλήτων σε οικιακό επίπεδο, είναι η οικιακή κομποστοποίηση και η οικιακή αναερόβια χώνευση με την οικιακή κομποστοποίηση να είναι η πιο διαδεδομένη από τις δύο τεχνικές.

Συμπληρωματικά των βιολογικών μεθόδων για την επεξεργασία των οργανικών απορριμμάτων μπορεί να θεωρηθεί και η οικιακή ξήρανση. Η ιδέα της οικιακής ξήρανσης των βιοαποβλήτων βασίζεται στο γεγονός ότι η περιεκτικότητά τους σε νερό είναι υψηλή. Συνεπώς η απομάκρυνση της περιεχόμενης υγρασίας των βιοαποβλήτων θα προσέδιδε σημαντική μείωση στη μάζα και στον όγκο αυτών στο σημείο παραγωγής τους.

Η ξήρανση των βιολογικών αποβλήτων σε οικιακό επίπεδο είναι ένας εναλλακτικός τρόπος διαχείρισης του ρεύματος των οργανικών αποβλήτων, τα πλεονεκτήματα της ξήρανσης των οργανικών αποβλήτων είναι:

1. Μειώνει σημαντικά την ποσότητα , των οικιακών οργανικών απορριμμάτων εξαιτίας της απομάκρυνσης της υγρασίας προσδίδοντας σημαντικά περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά οφέλη ως προς τη διαχείριση της ροής αυτής των αστικών στερεών αποβλήτων.
2. Παράγεται ένα ξηρό υλικό, μετά το πέρας της διεργασίας της ξήρανσης, το οποίο απαλλαγμένο από την πλεονάζουσα υγρασία και έχοντας αδρανοποιήσει τους ανεπιθύμητους μικροοργανισμούς θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή εναλλακτικών προϊόντων και μορφών ενέργειας. Συνεπώς το ξηρό υλικό έχει μεγαλύτερες πιθανότητες να έλθει σε συμφωνία με τα περιβαλλοντικά κριτήρια όπως αυτά τίθενται από την Ευρωπαϊκή νομοθεσία, δίδοντας επιπλέον σημαντικά περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη στις κοινωνίες.

## 3.2. Θεωρία της Ξήρανσης

### 3.2.1 Ορισμός

Ο όρος ξήρανση (drying) αναφέρεται κυρίως στην αφαίρεση μικρών σχετικά ποσοτήτων νερού (πτητικών ουσιών ή υγρασίας) από ένα στερεό ή ημιστερεό υλικό, προκειμένου να μειωθεί το περιεχόμενο του εναπομείναντος υγρού σε μια αποδεκτή χαμηλή τιμή και τελικά να παραχθεί ένα στερεό προϊόν. Η αφαίρεση υγρασίας από αέρια αποδίδεται κυρίως με τους όρους αφύγρανση (dehumidification) και προσρόφηση (adsorption). Στις διεργασίες ξήρανσης δίνεται περισσότερο έμφαση συνήθως στο αποξηραμένο τελικό προϊόν και στις περισσότερες περιπτώσεις, η ξήρανση επιτυγχάνεται με αφαίρεση της υγρασίας σε θερμοκρασίες κάτω από το σημείο βρασμού. Η διεργασία της ξήρανσης μετατρέπει ένα στερεό, ή ημιστερεό ή υγρό υλικό σε ένα στερεό προϊόν με εξάτμιση του υγρού μέσω εφαρμογής θερμότητας. Η θερμότητα μπορεί να παρέχεται με συναγωγή (ξηραντήρες), με αγωγιμότητα, με ακτινοβολία ή με φούρνο. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να προκαλέσει επιθυμητές ή ανεπιθύμητες χημικές ή βιολογικές αντιδράσεις οδηγώντας σε αλλαγές στο χρώμα, την υφή, την οσμή και άλλες ιδιότητες του ρευστού προϊόντος [9]

Τα στερεά που πρόκειται να ξηραθούν μπορεί να βρίσκονται σε διάφορες μορφές, όπως νιφάδες, κόκκοι, κρύσταλλοι, σκόνη, πλάκες ή συνεχή φύλλα και να έχουν πολύ διαφορετικές ιδιότητες. Το υγρό που πρόκειται να εξατμιστεί μπορεί να βρίσκεται στην επιφάνεια του στερεού, ή εν μέρει έξω και εν μέρει στο εσωτερικό.[27]

Στα στερεά σώματα μπορεί κάποιος να εντοπίσει δύο είδη υγρασίας:

- Η υγρασία που βρίσκεται παγιδευμένη μέσα στη μικροκατασκευή του στερεού και η οποία ασκεί τάση ατμών μικρότερη από αυτή του καθαρού υγρού. Μπορεί να εντοπιστεί ως φυσικά προσροφημένο νερό, κρυσταλλικό νερό, ή ως διάλυμα. Η υγρασία αυτή ονομάζεται «δεσμευμένη υγρασία».
- Η υγρασία που συγκρατείται με χαλαρούς χημικούς δεσμούς και υπάρχει στο στερεό σαν υγρό διάλυμα. Η υγρασία αυτή, που είναι σε περίσσεια σε σχέση με τη δεσμευμένη, ονομάζεται «μη δεσμευμένη».[28]

Η κύρια διαφορά ανάμεσα στα δύο διαφορετικά αυτά είδη υγρασίας, είναι ότι η αποβολή της μη δεσμευμένης υγρασίας από το στερεό γίνεται πολύ πιο εύκολα (ακόμη και με ελεύθερη εξάτμιση), ενώ η δεσμευμένη υγρασία απαιτεί θέρμανση.

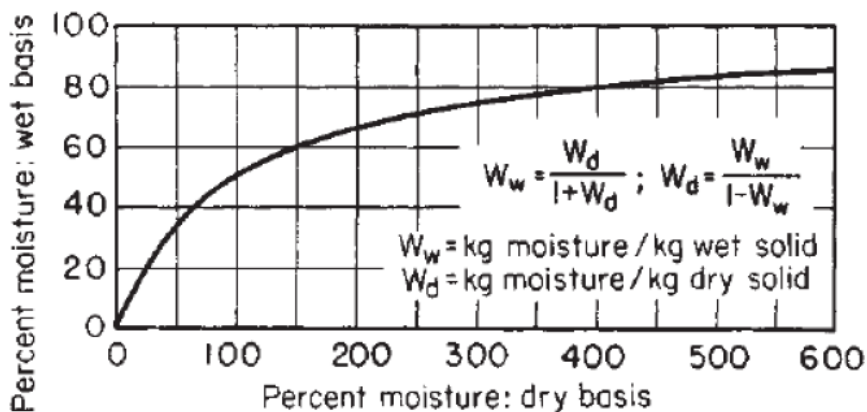
Την υγρασία ενός στερεού, την υπολογίζουμε ποσοτικά, συνήθως επί ξηράς βάσης (%Wd) σε kg ύδατος/kg ξηρού στερεού. Η υγρασία επί ξηρής βάσης σχετίζεται με την αντίστοιχη υγρής βάσης (% WW) με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$W_d = \frac{W_w}{1 - W_w} \quad (1)$$

$$W_w = \frac{W_d}{1 + W_d} \quad (2)$$

Η υγρασία των στερεών μπορεί να υπολογιστεί με αρκετούς τρόπους:

- Ξήρανση εντός κλιβάνου, για ορισμένο χρονικό διάστημα, σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης και θερμοκρασία 105°C.
- Ογκομετρικώς με το αντιδραστήριο του Fischer.
- Ξήρανση στο κενό σε περίπτωση που τα προϊόντα είναι ευαίσθητα στην θερμοκρασία.
- Αξεοτροπική απόσταξη του νερού με ανάμιξη του στερεού με τολουένιο.
- Με ηλεκτρικές μετρήσεις καθώς η περιεκτικότητα σε υγρασία, επηρεάζει την ηλεκτρική αντίσταση και τη διηλεκτρική σταθερά.



Διάγραμμα 1: Συσχέτιση υγρασιών στερεής και υγρής βάσης [30]

### 3.2.2 Μεταφορά Ενέργειας και Μάζας

Κατά τη διαδικασία στις θερμικής ξήρανσης ενός στερεού με υγρασία συμβαίνουν ταυτόχρονα **μεταφορά ενέργειας**, υπό μορφή θερμότητας, από το γύρο περιβάλλον με σκοπό την εξάτμιση της επιφανειακής υγρασίας καθώς και μεταφορά μάζας και συγκεκριμένα της εσωτερικής υγρασίας στην επιφάνεια του στερεού λόγο διάχυσης και ακολούθως εξάτμιση που οφείλεται στη μεταφορά ενέργειας.

Η μεταφορά θερμότητας προκαλείται από τη βαθμίδα της θερμοκρασίας, ανάμεσα στην επιφάνεια του υλικού και στον περιβάλλοντα αέρα, ενώ επίσης εξαρτάται από τις εξωτερικές συνθήκες, υγρασία αέρα, ρυθμός ροής του αέρα στην επιφάνεια έκθεσης και πίεση. Όσον αφορά στη μεταφορά της μάζας η διάχυση της υγρασίας οδηγείται από την βαθμίδα συγκέντρωσης του νερού στο εσωτερικό του υλικού και την επιφάνεια του υλικού, ενώ εξαρτάται και από τη φύση του στερεού και τη θερμοκρασία.

Η μεταφορά της ενέργειας σε μορφή θερμότητας από το περιβάλλον στο υγρό στερεό μπορεί να επιτευχθεί με συναγωγή, αγωγή και ακτινοβολία, ενώ η μεταφορά μάζας με μοριακή διάχυση, τριχοειδή ροή, ροή κατά Knudsen κλπ.

Ο ρυθμός της ξήρανσης εξαρτάται από το ρυθμό που ακολουθούν οι δύο προαναφερθείσες διαδικασίες. Παρόλα αυτά, κατά τη διάρκεια της ξήρανσης καθεμία από αυτές μπορεί να είναι ο περιοριστικός παράγοντας που καθορίζει το ρυθμό ξήρανσης, αν και οι δυο προχωρούν ταυτόχρονα.

Όπως αναφέρθηκε, η περιεχόμενη υγρασία σε ένα στερεό μπορεί να είναι δεσμευμένη ή μη. Υπάρχουν δύο μέθοδοι απομάκρυνσης της μη δεσμευμένης υγρασίας: εξάτμιση και ατμοποίηση.

Η εξάτμιση λαμβάνει χώρα όταν η τάση ατμών της επιφανειακής υγρασίας είναι ίση με την ατμοσφαιρική πίεση. Αυτό επιτυγχάνεται αυξάνοντας τη θερμοκρασία της υγρασίας έως το σημείο βρασμού (ξηραντήρες κυλίνδρων). Αν το προς ξήρανση υλικό είναι θερμοευαίσθητο, τότε η θερμοκρασία εξάτμισης, δηλαδή το σημείο βρασμού μπορεί να μειωθεί αν μειωθεί η πίεση (εξάτμιση υπό κενό). Αν η πίεση είναι μικρότερη από την πίεση που αντιστοιχεί στο τριπλό σημείο, τότε δεν μπορεί να υπάρξει υγρή φάση και το περιεχόμενο στο στερεό νερό παγώνει. Η προσφορά θερμότητας προκαλεί άμεση εξάχνωση του πάγου σε υδρατμό (ξηρανση δια καταψύξεως).

Παράλληλα κατά την ατμοποίηση, η ξήρανση πραγματοποιείται με συναγωγή, δηλαδή με ροή θερμού αέρα πάνω ή διαμέσου από το προϊόν. Ο αέρας ψύχεται από το προϊόν και η υγρασία απομακρύνεται μεταφερόμενη από το προϊόν στον αέρα. Σε αυτή την περίπτωση, η τάση κορεσμένου ατμού πάνω από το στερεό είναι μικρότερη από την ατμοσφαιρική πίεση.

### **3.2.3 Φαινόμενα κατά τη ξήρανση**

Η επαφή οποιουδήποτε υγρού στερεού με αέριο σε δεδομένη θερμοκρασία και υγρασία, έχει ως αποτέλεσμα η διεργασία ξήρανσης να εμφανίζει μια συγκεκριμένη συμπεριφορά. Μετά την πρώτη επαφή του υλικού και του μέσου ξήρανσης, υπάρχει μεταβολή στη θερμοκρασία του στερεού μέχρι αυτή να αποκτήσει σταθερή τιμή. Μέχρι να επιτευχθούν σταθερές συνθήκες, η θερμοκρασία του στερεού μπορεί είτε να αυξηθεί είτε να μειωθεί ανάλογα. Στη φάση που έχουν επιτευχθεί αυτές οι σταθερές συνθήκες, η θερμοκρασία της επιφάνειας του υλικού, είναι η θερμοκρασία του υγρού βολβού του μέσου ξήρανσης. Η καθυστέρηση στη μεταφορά της μάζας και της θερμότητας δεν θα επιτρέπουν στις θερμοκρασίες μέσα στο υλικό να εξισωθούν με τη θερμοκρασία του υγρού βολβού του αερίου. Όταν οι θερμοκρασίες του υλικού εξισωθούν με τη θερμοκρασία του υγρού βολβού του αερίου, τότε παραμένει σταθερός ο ρυθμός της ξήρανσης και στην περίπτωση αυτή, το στάδιο αυτό είναι γνωστό ως *περίοδος σταθερού ρυθμού ξήρανσης* (constant-rate drying period).

Η περίοδος σταθερού ρυθμού ξήρανσης τελειώνει όταν το υλικό αποκτήσει ένα καθορισμένο για κάθε υλικό ποσοστό υγρασίας, το οποίο ονομάζεται *κρίσιμη υγρασία*.

(critical moisture content). Μετά από αυτό το σημείο ακολουθεί αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ παράλληλα ο ρυθμός ξήρανσης μειώνεται γρήγορα. Η *περίοδος ελαττούμενου ρυθμού ξήρανσης* (falling-rate drying period) διαρκεί περισσότερο από την περίοδο του σταθερού ρυθμού, παρόλο που η αφαίρεση υγρασίας είναι πολύ μικρότερη. Κατά την περίοδο αυτή, αρχίζει να αυξάνει η θερμοκρασία της επιφάνειας και η αύξηση αυτή συνεχίζεται κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, μέχρι τελικά να πλησιάσει τη θερμοκρασία του ξηρού βολβού του αέρα.

Σε κάποιο ποσοστό υγρασίας που ονομάζεται υγρασία ισορροπίας και είναι το μικρότερο ποσό υγρασίας το οποίο μπορεί να παραμείνει στο στερεό,  $X_E$ , (equilibrium moisture content), ο ρυθμός της ξήρανσης τείνει στο μηδέν. Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται τυπικές *καμπύλες ξήρανσης* (drying curves). Η πιο συνηθισμένη μορφή είναι η μορφή του διαγράμματος 2, αλλά το διάγραμμα 3 περιγράφει καλύτερα τη διεργασία ξήρανσης [6].

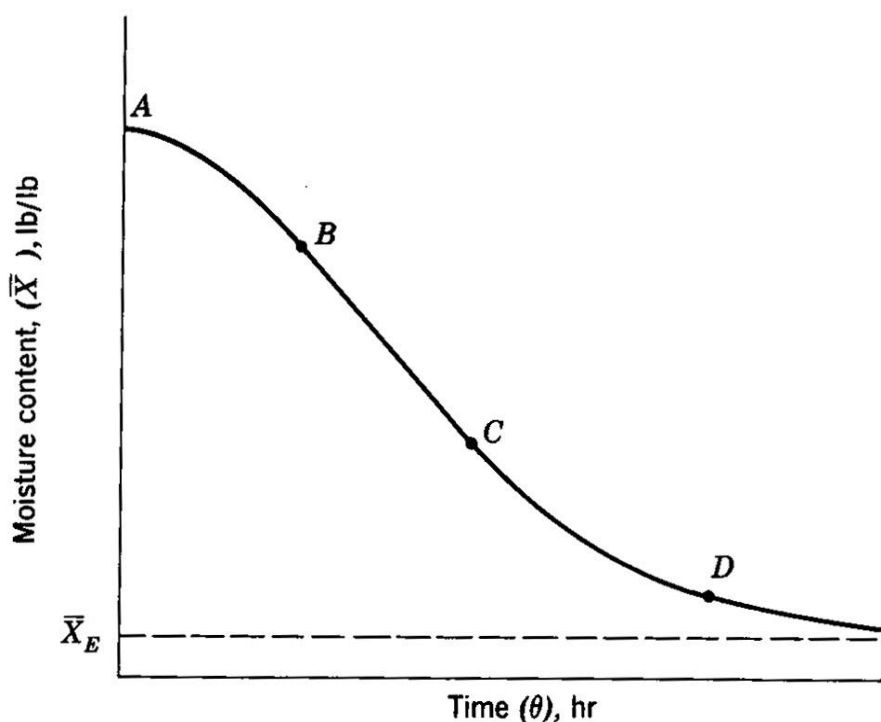
Κατά την περίοδο ξήρανσης του τμήματος AB, η θερμοκρασία του στερεού τείνει προς τις σταθερές συνθήκες. Παρόλο που στο διάγραμμα παριστάνεται μια τυπική μορφή καμπύλης, η περίοδος AB μπορεί να έχει οποιαδήποτε μορφή, δηλαδή μπορεί να είναι είτε ελαττούμενου είτε αυξανόμενου ρυθμού. Το τμήμα BC παριστάνει την περίοδο σταθερού ρυθμού, και στην φάση αυτή ολόκληρη η εξωτερική επιφάνεια του στερεού είναι κορεσμένη με νερό. Η ξήρανση πραγματοποιείται καθώς ο υδρατμός μεταβαίνει στην κύρια μάζα του ρεύματος θερμού αέρα, από την επιφάνεια του υγρού μέσω ενός υμενίου αέρα.

Ο ρυθμός της ξήρανσης εξαρτάται από το ρυθμό με τον οποίο μεταδίδεται θερμότητα στην επιφάνεια ξήρανσης. Παράλληλα, ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας εξισορροπείται από το ρυθμό μεταφοράς της μάζας και με αυτό τον τρόπο η θερμοκρασία της επιφάνειας ξήρανσης παραμένει σταθερή. Η δύναμη η οποία προκαλεί την κίνηση του υδρατμού μέσω του υμενίου του αέρα, είναι η διαφορά της τάσης των υδρατμών μεταξύ της κύριας μάζας του αέρα και της επιφάνειας. Η ξήρανση λαμβάνει χώρα χωρίς να υπάρχει επιρροή του στερεού υλικού στο ρυθμό ξήρανσης. Στη συνέχεια η μάζα που απομακρύνεται από την επιφάνεια συνεχώς αποκαθίσταται από την κίνηση υγρού και στερεού στο εσωτερικό του υλικού. Ανάλογα με την δομή του υλικού, ο μηχανισμός της κίνησης του υγρού και συνεπώς ο ρυθμός της αλλάζει, ενώ στα στερεά υλικά που έχουν σχετικά μεγάλα διάκενα στη δομή τους, ο έλεγχος της κίνησης γίνεται από την επιφανειακή τάση και τις βαρυτικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μέσα στο στερεό υλικό. Στα στερεά που έχουν άμορφη ή ινώδη μορφή, το υγρό κινείται με διάχυση διαμέσου του στερεού ενώ από τι στιγμή που οι ρυθμοί διάχυσης είναι μικρότεροι από τη ροή με τη δύναμη βαρύτητας, στα στερεά που πραγματοποιείται διάχυση του υγρού έχουμε και μικρότερες περιόδους σταθερού ρυθμού ή ακόμη και μηδενικές. Τέλος στο σημείο C (κρίσιμη υγρασία), μόλις που είναι δυνατό να εφοδιαστεί με υγρό η ελεύθερη επιφάνεια, καθώς το ποσοστό της υγρασίας του στερεού είναι ελάχιστο.

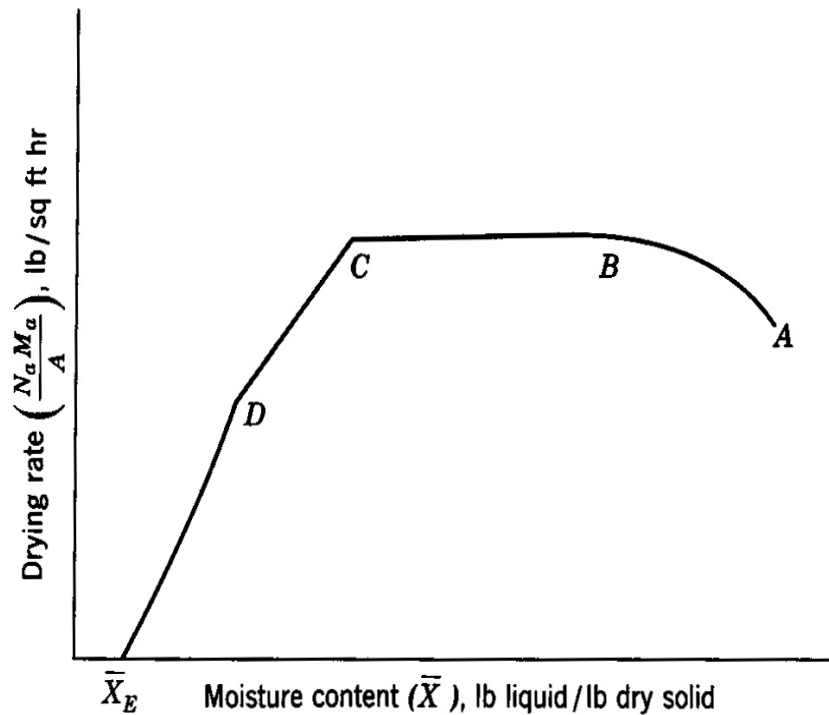
Παράλληλα μεταξύ των σημείων C και D του διαγράμματος 3, που ονομάζεται *πρώτη περίοδος ελαττούμενου ρυθμού* (first falling-rate period), ο ρυθμός της κίνησης του

υγρού προς την επιφάνεια, είναι μικρότερος από το ρυθμό απομάκρυνσης του από την επιφάνεια προς το αέριο ρεύμα, με αποτέλεσμα το υγρό στην επιφάνεια να λιγοστεύει συνέχεια. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, στο σημείο D να μην υπάρχει σημαντικό ποσό κορεσμένου υγρού στην επιφάνεια, ενώ το τμήμα της επιφάνειας που παρέμεινε κορεσμένο, υπόκειται σε περαιτέρω ξήρανση με μετάδοση θερμότητας, με συναγωγή από το θερμό ρεύμα αέρα και ταυτόχρονη μεταφορά μάζας προς το θερμό ρεύμα αέρα. Παράλληλα, μέσω των εσωτερικών στρωμάτων του δείγματος, διαχέεται ο υδρατμός προς τα μη κορεσμένα τμήματα της επιφάνειας και στη συνέχεια μεταφέρεται στο ρεύμα του αέρα. Εάν το ποσοστό της υγρασίας, είναι χαμηλότερο απ' αυτό του σημείου D του διαγράμματος 2, η ξήρανση πραγματοποιείται αποκλειστικά στο εσωτερικό εντός του στερεού. Η απόσταση για τη διάχυση της θερμότητας και της μάζας μεγαλώνει, αφού το ποσοστό υγρασίας μειώνεται συνεχώς και τελικώς η διαφορά συγκεντρώσεων μειώνεται συνεχώς μέχρι που στο  $X_E$  (υγρασία ισορροπίας), να μην υπάρχει περαιτέρω ξήρανση.

Τέλος, όσον αφορά την υγρασία ισορροπίας, μπορούμε να πούμε ότι εμφανίζεται όταν η τάση ατμών πάνω από το στερεό, γίνει ίση με τη μερική πίεση των υδρατμών στο ρεύμα αέρα και την περίοδο αυτήν την ονομάζουμε *δεύτερη περίοδο ελαττούμενου ρυθμού* (second falling rate period) [6].



Διάγραμμα 2: Διάγραμμα υγρασίας ως συνάρτηση του χρόνου για σταθερές συνθήκες ξήρανσης. [27]



Διάγραμμα 3: Διάγραμμα του ρυθμού ξήρανσης ως προς την υγρασία για σταθερές συνθήκες ξήρανσης. [27]

### 3.2.4 Συμπεριφορά υλικών κατά την ξήρανση

Τα υλικά κατηγοριοποιούνται σε δυο ομάδες με βάση την συμπεριφορά τους στην ξήρανση. Κοκκώδη ή κρυσταλλικά υλικά, που συγκρατούν υγρασία στα διάκενα μεταξύ των σωματιδίων ή σε επιφανειακούς πόρους, αποτελούν την πρώτη ομάδα. Σε αυτά τα υλικά η κίνηση της υγρασίας δεν εμποδίζεται ιδιαίτερα και λαμβάνει χώρα ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των βαρυτικών και των τριχοειδών δυνάμεων. Η περίοδος σταθερού ρυθμού συνεχίζεται για αρκετό χρονικό διάστημα έως ότου επιτευχθούν σχετικά χαμηλά ποσοστά υγρασίας. Αν και η περίοδος ελαττούμενου ρυθμού διακρίνεται στις δυο επιμέρους περιοχές που αναφέρθηκαν προηγουμένως, προσεγγιστικά μοιάζει με μια ευθεία γραμμή στο γράφημα του ρυθμού ξήρανσης με την υγρασία. Το στερεό υλικό, που είναι συνήθως ανόργανο, δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την παρουσία του υγρού και γι' αυτό μένει ανεπηρέαστο από την διεργασία της ξήρανσης. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, οι συνθήκες ξήρανσης μπορούν να επιλεγούν με βάση την τεχνική ευκολία, αλλά και βάσει οικονομικών κριτηρίων, απαιτώντας λίγο μόνο προβληματισμό όσον αφορά στις ιδιότητες των αποξηραμένων προϊόντων. Στην περίπτωση των ένυδρων ουσιών, οι συνθήκες ξήρανσης επηρεάζουν το προϊόν που λαμβάνεται, αλλά γενικά τα υλικά δεν επηρεάζονται από τις συνθήκες ξήρανσης για μεγάλα εύρη θερμοκρασιών και υγρασιών. Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι η συνθλιμμένη πέτρα, το διοξείδιο του τιτανίου, οι καταλύτες, ο ένυδρος θειικός ψευδάργυρος, το φωσφορικό νάτριο κλπ. Για τα υλικά αυτά η υγρασία ισορροπίας είναι συνήθως πολύ κοντά στο μηδέν.

Τα περισσότερα οργανικά στερεά είναι είτε άμορφα είτε ινώδη ή έχουν δομή παρόμοια με γέλη (gel) και αποτελούν την δεύτερη ομάδα υλικών. Στα εν λόγω υλικά η υγρασία αποτελεί ένα απαραίτητο μέρος της δομής τους ή είναι παγιδευμένη μέσα σε ίνες ή πόρους. Η κίνηση της υγρασίας είναι αργή και πιθανότατα συμβαίνει με την διάχυση του υγρού μέσα στην δομή του στερεού, με αποτέλεσμα οι καμπύλες ξήρανσης των υλικών αυτών να δείχνουν πολύ μικρές περιόδους σταθερού ρυθμού που καταλήγουν σε υψηλές τιμές κρίσιμης υγρασίας. Για τους ίδιους λόγους, η πρώτη περίοδος ελαττούμενου ρυθμού είναι αρκετά μειωμένη και στο μεγαλύτερο μέρος της διεργασίας ξήρανσης ο ρυθμός ξήρανσης ελέγχεται από τον ρυθμό διάχυσης του υγρού μέσα από το στερεό. Η κυρίως ξήρανση εκτυλίσσεται στην δεύτερη περίοδο ελαττούμενου ρυθμού. Η υγρασία ισορροπίας είναι γενικά υψηλή, υποδηλώνοντας έτσι ότι μια σημαντική ποσότητα του νερού κατακρατείται τόσο σταθερά από την δομή του στερεού ή σε μικροσκοπικούς πόρους του, που η τάση ατμών του εμφανίζεται αισθητά μειωμένη. Αφού το νερό που υπάρχει είναι ισχυρά συνδεδεμένο με την δομή του υλικού, τέτοια υλικά επηρεάζονται έντονα από την αφαίρεση της υγρασίας. Τα επιφανειακά στρώματα τείνουν να ξηραίνονται πιο γρήγορα από τα εσωτερικά. Αν ο ρυθμός ξήρανσης είναι υψηλός, μπορεί να δημιουργήσει μεγάλες διαφορές στο ποσοστό υγρασίας μεταξύ της επιφάνειας και των εσωτερικών στρωμάτων του υλικού και να εμφανιστούν ρωγμές και αναδιπλώσεις στο υλικό. Σε άλλες περιπτώσεις μπορεί να σχηματιστεί εξωτερικά ένα σχετικά αδιαπέραστο αποξηραμένο κέλυφος (πέτσα/ κρούστα), που εμποδίζει την περαιτέρω ξήρανση και επιτείνει την ανομοιομορφία στο ποσοστό υγρασίας μέσα στο υλικό, δημιουργώντας συνεπώς ευνοϊκές συνθήκες για την αλλοίωση του στερεού.

Ένα σημαντικό φαινόμενο κατά την ξήρανση κάποιων υλικών είναι η συρρίκνωσή τους, καθώς το ποσοστό υγρασίας μειώνεται. Υπάρχουν ωστόσο υλικά που διαφέρουν ως προς αυτήν την ιδιότητα. Σκληρά, πορώδη ή μη πορώδη στερεά δεν συστέλλονται σημαντικά κατά την ξήρανση, αλλά κολλοειδή και ινώδη υλικά συρρικνώνονται σημαντικά, καθώς αφαιρείται υγρασία από αυτά. Το φαινόμενο της συρρίκνωσης έχει τρεις συνέπειες: Στην πρώτη, μεταβάλλεται η επιφάνεια του υλικού ανά μονάδα μάζας και έτσι σε πολλές περιπτώσεις η επιφάνεια δεν είναι πλέον γνωστή. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για υλικά όπως τα λαχανικά και τα τρόφιμα, στα οποία το φαινόμενο αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή του ποσοστού της επιφάνειας που είναι εκτεθειμένο στον αέρα. Η δεύτερη και πιο σημαντική συνέπεια είναι η ανάπτυξη μιας σκληρής στοιβάδας στην επιφάνεια, αδιαπέραστης από την ροή της υγρασίας είτε ως υγρό είτε ως ατμός. Αυτό σημαίνει ότι η υγρασία δεν δύναται να κινηθεί εύκολα από το εσωτερικό του στερεού προς την επιφάνεια ή το σύνορο όπου λαμβάνει χώρα η ξήρανση. Αυτό ελαττώνει σημαντικά την ξήρανση. Η τρίτη συνέπεια συνίσταται στην αλλαγή της ολικής δομής, κάτι που συμβαίνει επί παραδείγματι στην ξήρανση του ξύλου. Σε υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται από μεταβολή της ολικής τους δομής ή από δημιουργία σκληρής επιφανειακής στιβάδας είναι συνήθως επιθυμητή η διεξαγωγή της ξήρανσης με υγρό αέρα. Σε αυτήν την περίπτωση επιδιώκεται η ελάττωση της διαφοράς υγρασίας μεταξύ του αέρα και της επιφάνειας του στερεού, έτσι ώστε να ελαττωθεί ο ρυθμός ξήρανσης. Αυτό συχνά



επιφέρει μια λιγότερο απότομη διαφορά υγρασίας από μέσα προς τα έξω, συμβάλλοντας στον περιορισμό της συρρίκνωσης του υλικού. Για παράδειγμα, οι ξηραντήρες ξύλου έχουν την ικανότητα να υγραίνουν τον αέρα κατά την διάρκεια των αρχικών σταδίων της ξήρανσης, ώστε να μην υπάρχει ούτε μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά ούτε μεγάλη διαφορά υγρασίας μεταξύ του υλικού και του αέρα. Έτσι ο ρυθμός ξήρανσης ελαττώνεται σε σημείο που το υλικό διατηρεί μια σημαντική σταθερότητα διαστάσεων. [31]

### **3.2.5 Μέθοδοι Ξήρανσης**

Η διεργασία της ξήρανσης έχει πολλές εφαρμογές στη βιομηχανία στις οποίες το απομακρυνόμενο πτητικό συστατικό είναι συνήθως το νερό. Κάποιες από τις μεθόδους χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε βιομηχανικό αλλά και σε εργαστηριακό επίπεδο.

1. Συμβατική μέθοδος: Αυτή πραγματοποιείται έχοντας ως πηγή θερμότητας το θερμαινόμενο αέρα που διαχέεται μέσα στο φούρνο με τη βοήθεια ενός προσαρμοσμένου ανεμιστήρα. Τα προϊόντα που τοποθετούνται μέσα σε αυτόν αλλάζουν σταδιακά θερμοκρασία ξεκινώντας από την αρχική τους και καταλήγοντας στη θερμοκρασία ξήρανσης του ξηραντήρα. Η θερμοκρασιακή αυτή διαφορά αποτελεί την ωθούσα δύναμη που οδηγεί στην εξάτμιση.
2. Ξήρανση με Κατάψυξη: Αυτή πραγματοποιείται συνήθως με την εφαρμογή κενού και διεξάγεται σε δύο βήματα: Αρχικά την κατάψυξη του φρέσκου υλικού και ακολούθως την ξήρανση υπό κενό, ώστε να εξαχνωθεί ο πάγος. Η απόλυτη πίεση λειτουργίας είναι συνήθως χαμηλότερη από την πίεση του τριπλού σημείου του νερού έτσι, ώστε να επιτευχθεί η εξάχνωση του πάγου.
3. Οσμωτική Αφυδάτωση: Πρόκειται για την αφαίρεση νερού από κυτταρώδη υλικά όπως τα φρούτα και λαχανικά, τα οποία εμβαπτίζονται σε κορεσμένο οσμωτικό διάλυμα που αποτελείται από έναν ή περισσότερους διαλύτες χάνουν νερό από τα κύτταρα τους διάμεσου της κυτταρικής μεμβράνης
4. Μικροκύματα: κατά τη μέθοδο αυτή η εξάτμιση αρχίζει να πραγματοποιείται πολύ γρήγορα, δημιουργώντας μια μεγάλη ωθούσα δύναμη. Συνεπώς, υπάρχει μια επίδραση αναλυτικής δύναμης, η οποία ωθεί την υγρασία στην επιφάνεια του υλικού. Αυτό συνεπάγεται μια πολύ γρήγορη ξήρανση, χωρίς να χρειάζεται να υπερθερμανθεί η ατμόσφαιρα ή να υποστεί η επιφάνεια τις επιπτώσεις της υπερθέρμανσης.[10]

### **3.3. Κινητικές Εξισώσεις Ξήρανση Οργανικών Απόβλητων από Ξηραντήρα με Ρεύμα Θερμού Αέρα**

Ως κινητική της ξήρανσης χαρακτηρίζεται η συμπεριφορά του προς ξήρανση υλικού κατά την διάρκεια της διεργασίας, δηλαδή η μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας του σε σχέση με τον χρόνο. Η κινητική της ξήρανσης του προϊόντος, περιγράφεται από διάφορα μοντέλα ξήρανσης των οποίων οι συντελεστές τους εξαρτώνται από τις συνθήκες ξήρανσης και προσδιορίζονται πειραματικά.

Για τη περίπτωση της ξήρανσης τροφίμων, άρα και των αποβλήτων τροφών, η κυρίαρχη φάση της ξήρανσης είναι η περίοδος ελαττούμενου ρυθμού (δεύτερη φάση της διεργασίας όπως περιγράφηκε στο κεφ.3.2.3). Για τις περιπτώσεις αυτές τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα για την περιγραφή της κινητικής της ξήρανσης ανήκουν κυρίως η κατηγορία των ημιεμπειρικών μοντέλων.

Επομένως στη παρούσα εργασία τα κινητικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της ξήρανσης τροφίμων με ρεύμα αέρα είναι εμπειρικά, και σχηματίστηκαν από τις πληροφορίες που δίνονται από τις καμπύλες ξήρανσης από διάφορα πειράματα για διάφορα επίπεδα των μεταβλητών της διαδικασίας. Ο χρόνος που απαιτείται για να αφυδατώσουν αποτελεσματικά τα τρόφιμα άρα και τα οικιακά οργανικά απορρίμματα εξαρτάται από τις εξής παραμέτρους (α) το πάχος των δειγμάτων, (β) τη θερμοκρασία (γ) την ταχύτητα του αέρα ξήρανσης και (δ) το μέγεθος των σωματιδίων των οργανικών αποβλήτων. Πρέπει να σημειωθεί ότι το μέγεθος των σωματιδίων των αποβλήτων αποτελεί μια παράμετρο που είναι πρακτικά αδύνατο να διατηρείτε σταθερή για την επαναληψιμότητα των πειραμάτων της ξήρανσης των αποβλήτων κουζίνας.

Για την περιγραφή των κινητικών μοντέλων ξήρανσης των τροφίμων και, συνεπώς, και των οργανικών απορριμμάτων της κουζίνας χρησιμοποιείται η σταθερά ξήρανση **K** αφού ενσωματώνει όλες τις μεταβλητές ιδιότητες που αναφέραμε πιο πάνω, και μπορεί να εκτιμηθεί από το μοντέλο ξήρανσης του λεπτού στρώματος.

Το μαθηματικό μοντέλο του Lewis / Newton είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη εξίσωση για την περιγραφή της διαδικασίας ξήρανσης με λεπτό στρώμα. Με βάση νόμο του Νεύτωνα, ο Lewis (1921) πρότεινε ότι το ποσοστό ξήρανσης ανάλογο με τη διαφορά δυναμικού της υγρασίας, ανάμεσα στο υλικό που ξηραίνεται και την υγρασία ισορροπίας  $X_e$  του μέσου ξήρανσης (αέρα). Ως εκ τούτου, το ποσοστό ξήρανσης και η μεταφορά υγρασίας του δείγματος μπορεί να περιγραφεί από το μαθηματικό μοντέλο σε διαφορική μορφή:

$$-\frac{dX}{dt} = K(X - X_e) \quad (3)$$

X: Η περιεχόμενη στο υλικό υγρασία κατά την τυχαία χρονική στιγμή η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$X = \frac{M - M_{ds}}{M_{ds}} \quad (4)$$

Στην οποία το  $M$  είναι η μάζα του υλικού τη τυχαία χρονική στιγμή  $t$  και  $M_{ds}$  η μάζα του ξηρού στερεού.

Με ολοκλήρωση της συνάρτησης (3) :

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = e^{-Kt} \quad (5)$$

ή

$$\ln\left(\frac{X - X_e}{X_0 - X_e}\right) = -Kt = MR \quad (6)$$

$X_0$ : Η αρχική υγρασία του υλικού.

$X_e$ : Η υγρασία ισορροπίας.

$$X_t = X_0 e^{(-Kt)} \quad (7)$$

$K$ : Η σταθερά ξήρανσης, η οποία εξαρτάται από την επίδραση των δευτερογενών παραγόντων του φαινομένου της απομάκρυνσης της υγρασίας και υπολογίζεται από την εμπειρική σχέση:

$$K = k_0 d^{k_1} T^{k_2} u^{k_3} a_w^{k_4} \quad (8)$$

Όπου,  $d$  το πάχος του υλικού (**cm**),  $T$  η θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης (**°C**),  $u$  η ταχύτητα του αέρα ξήρανσης (**m/s**) και  $a_w$  η σχετική υγρασία (**%**) του αέρα ξήρανσης. Και  $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4$  εμπειρικές σταθερές.

Σύμφωνα με την κινητική συνάρτηση του Lewis/Newton η ξήρανση ακολουθεί κινητική πρώτης τάξης και εφαρμόζεται για πορώδη υγροσκοπικά υλικά. Επιπλέον, ενσωματώνει μια σταθερά ξήρανσης  $K$ , αποτέλεσμα του συνδυασμού των διαφόρων φαινομένων μεταφοράς (μεταφορά ενεργείας, θερμότητας, μεταφορά μάζας, διάχυση υγρασίας). Επίσης κάνει τη παραδοχή ότι το υπό ξήρανση υλικό είναι αρκετά λεπτό

ώστε οι παράμετροι θερμοκρασίας και υγρασίας (συνθήκες αέρα ξήρανσης) διατηρούνται σταθερές σε όλο το υλικό.

Το δεύτερο κινητικό μοντέλο για την περιγραφή της διεργασίας είναι το μοντέλο two term όπου παρουσίασε ο Sharaf-Eldeen et al. (1980),

$$X_t = X_o(a \cdot e^{-kt} + b \cdot e^{-k't}) \quad (9)$$

Όπου  $X_t$  : Περιεκτικότητα σε υγρασία το συγκεκριμένο  $t$  χρόνο

$a, b$  : σταθερές συνάρτησης

$k, k'$  : σταθερές ξήρανσης

$X_o$  : αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία

Ο Sharaf-Eldeen προσπάθησε να εκφράσει ένα μοντέλο κινητικής διάχυσης του ρευστού από ένα σφαιρικό μέσο. Το μοντέλο βασίζεται στη λύση της εξίσωσης διάχυσης υγρού υποθέτοντας σφαιρική γεωμετρία του μέσου ξήρανσης και μια σταθερή αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία.

Το τρίτο κινητικό μοντέλο για την περιγραφή της διεργασίας είναι το τροποποιημένο μοντέλο Henderson and Pabis όπου παρουσίασε ο , Καραθάνος (1999):

$$X_t = X_o(a \cdot e^{-kt} + b \cdot e^{-k't} + c \cdot e^{-k''t}) \quad (10)$$

Όπου  $X_t$  : Περιεκτικότητα σε υγρασία το συγκεκριμένο  $t$  χρόνο

$a, b, c$  : σταθερές συνάρτησης

$k, k', k''$  : σταθερές ξήρανσης

$X_o$  : αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία

Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ξήρανσης των ξηρών ή σχεδόν υγρών γεωργικών προϊόντων (π.χ. σταφίδες) ένα σημαντικό μέρος των στερεών αποσυντίθεται μαζί με την απώλεια ύδατος λόγω εξάτμισης. Ενσωματώνει 3 μηχανισμούς αντίδρασης πρώτης τάξης και συγκεκριμένα τη μείωση του βάρους που οφείλεται στην αποσύνθεση των στερεών (π.χ. ζάχαρη), την απώλεια βάρους που οφείλεται στην απομάκρυνση του νερού που αναφέρεται ως μιας στρώσης (που το νερό σε άμεση επαφή με την επιφάνεια των στερεών από τις ισχυρές ελκυστικές μοριακές δυνάμεις) και την απώλεια βάρους αντιστοιχεί στο λιγότερο δεσμευμένο νερό, το οποίο μπορεί να είναι πολυστρωματικό και ελεύθερο νερό.

Το τέταρτο κινητικό μοντέλο για την περιγραφή της διεργασίας είναι το μοντέλο του Page (1949) που είναι παρόμοιο με το μοντέλο ξήρανσης του Lewis/Newton:

$$X_t = X_o(e^{-kt^n}) \quad (11)$$

Όπου  $X_t$  : Περιεκτικότητα σε υγρασία το συγκεκριμένο  $t$  χρόνο

$k, n$  : σταθερά ξήρανσης

$X_o$  : αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία

Το μοντέλο παρουσιάζει την εξίσωση ξήρανσης λεπτής στιβάδας για τα υλικά με βάση το άμυλο. Ωστόσο, η ίδια εξίσωση έχει εφαρμοστεί για άλλα δημητριακά από πολλούς ερευνητές για να περιγράψει τη διαδικασία της ξήρανσης.

Το πέμπτο και τελευταίο κινητικό μοντέλο για την περιγραφή της διεργασίας είναι το μοντέλο του Midilli et al. (2002) που αποτελεί ένα ημι-εμπειρικό μοντέλο διάχυσης από λεπτό στρώμα :

$$X_t = X_o[(a \cdot e^{-kt^n}) + bt] \quad (12)$$

Όπου  $X_t$  : Περιεκτικότητα σε υγρασία το συγκεκριμένο  $t$  χρόνο

$a, b$  : σταθερές συνάρτησης

$k, n$  : σταθερές ξήρανσης

$X_o$  : αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία

Πρόκειται για ένα ημι-εμπειρικό μοντέλο για τη διαδικασία ξήρανσης σε ένα μόνο στρώμα, το οποίο διασταυρώθηκε με επιλεγμένα πειραματικά δεδομένα από ξήρανση μανιταριών, γύρης και φιστικιών. Η εργαστηριακή ξήρανση έγινε κάτω από άμεση ηλιακή ακτινοβολία, καθώς και σε ηλιακό στεγνωτήρα εξαναγκασμένου αέρα.

Συμφώνα τώρα με τη θεωρία της μοριακής διάχυσης, η υγρασία μεταφέρεται προς την εξωτερική επιφάνεια του στερεού λόγω διαφοράς συγκέντρωσης. Από το δεύτερο νόμο του Fick, που ορίζει τον συντελεστή διάχυσης  $D_L$  της υγρασίας στο εσωτερικό του στερεού, όταν ο ελέγχων μηχανισμός είναι η μοριακή διάχυση.

$$\frac{dX}{d\theta} = D_L \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (13)$$

Όπου  $D_L$  ο συντελεστής μοριακής διάχυσης ( $m^2/s$ )

Η απλοποιημένη λύση για επίπεδη πλάκα, όταν ο συντελεστής διάχυσης  $D_L$  και οι συνθήκες του αέρα (θερμοκρασία, απόλυτη υγρασία, ταχύτητα) είναι σταθερά:

$$t = \frac{4x_0^2}{\pi^2 D} \ln \left[ \frac{8}{\pi^2} \left( \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \right) \right] \quad (14)$$

Η οποία συμπίπτει με την εμπειρική εξίσωση (6) αν θεωρήσουμε ότι  $\frac{8}{\pi^2} \cong 1$  και

$$K = \frac{\pi^2}{4x_0^2} D \quad (15)$$

Όπου  $2x_0$  το πάχος της πλάκας.

### 3.3.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την απομάκρυνση της υγρασίας από τα υγρά στερεά

Οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται το φαινόμενο της απομάκρυνσης της υγρασίας είναι [13]:

- i. η θερμοκρασία του ρευστού ξήρανσης
- ii. η σχετική υγρασία του ρευστού ξήρανσης
- iii. η ταχύτητα του ρεύματος ξήρανσης που σχετίζεται με την ποσότητα του ρευστού και τον τρόπο κυκλοφορίας του εντός του ξηραντήρα
- iv. το πάχος του υπό ξήρανση υλικού που σχετίζεται με το μέγεθος, τη δομή και τη σύστασή του.

Αυτές οι μεταβλητές έχουν ένα σημαντικό ρόλο στο φαινόμενο της απομάκρυνσης της υγρασίας λόγω του ότι είναι σημαντικοί παράγοντες των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και μάζας. Συνεπώς για την πιο αποδοτική λειτουργία ενός ξηραντήρα, απαιτείται καλή γνώση των παραπάνω συνθηκών, με σκοπό την βελτιστοποίηση της διαδικασίας ξήρανσης. Αυτό θα συντελέσει στην εξοικονόμηση ενέργειας καθώς και στην κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων.

Αναλυτικότερα:

**Η θερμοκρασία (T)** του ρεύματος συνιστά σημαντικό παράγοντα για τη μεταφορά θερμότητας πάνω στην επιφάνεια του στερεού. Η διάφορα θερμοκρασίας ανάμεσα στο σώμα και το ρευστό αποτελεί το δυναμικό τη εξίσωση μεταφοράς θερμότητας. Η ροή θερμότητας πάνω στην επιφάνεια του στερεού από το ρευστό σε κάθε θέση  $x$  του αγωγού από τη σχέση της μορφής:

$$\dot{q} = h(T_m - T_s) \quad (17)$$

Όπου  $T_m$ : Η θερμοκρασία του ρευστού

$T_s$  : Η θερμοκρασία του στερεού

$h$  : Ο τοπικός συντελεστής συναγωγής

Από την εξίσωση (17) το δυναμικό της διαφοράς θερμοκρασίας είναι ανάλογο με την μεταφορά θερμότητας άρα όσο μεγαλύτερη η θερμοκρασία του ρευστού τόσο πιο μεγάλη θα είναι η μεταφορά θερμότητας στο στερεό.

**Η ταχύτητα του ρεύματος ( $u$ )** του ρευστού (αέρα) συνιστά και αυτή σημαντικό παράγοντα για τη μεταφορά θερμότητας πάνω στην επιφάνεια του στερεού. Για το φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας από το ρευστό στην επιφάνεια του στερεού, σύμφωνα με την συνάρτηση μεταφοράς της θερμικής ενέργειας σε συγκεκριμένο τμήμα της διατομής εμβαδού  $dA_c$  ισχύει ότι:

$$\dot{E} = \int c_p \rho u_x T dA_c \quad (18)$$

Όπου  $C_p$ : Η ειδική θερμότητα του ρευστού (αέρα) υπό σταθερή πίεση (j/kg·K)

$\rho$  : Η πυκνότητα του ρευστού (kg/m<sup>3</sup>)

$u_x$ : Η ταχύτητα του ρευστού (m/s)

$T$ : Η θερμοκρασία του ρευστού (K)

Από την εξίσωση (18), η μεταβλητή της ταχύτητας  $u_x$  είναι ανάλογη με την θερμική ενέργεια που μεταφέρεται στο στερεό σώμα από το ρευστό. Έτσι συμπεραίνουμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ρευστού τόσο πιο πολύ θερμική ενέργεια δέχεται το στερεό στην επιφάνεια του.

Η μεταβλητή της ταχύτητας του ρεύματος του ρευστού περιλαμβάνεται σε ακόμα μια σημαντική συνάρτηση του φαινομένου μεταφοράς θερμότητας, την συνάρτηση του συντελεστή συναγωγής της θερμότητας  $h$  που έχει σημαντικό ρολό στην ροή της θερμότητας με συναγωγή, συνάρτηση (17):

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad (19)$$

Όπου  $k$  : Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.

$L$  : Μήκος στρώματος στερεού.

$Nu$ : Αριθμός Nusselt

Ο αριθμός Nusselt αντιπροσωπεύει το λόγο του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή προς το ρυθμό μεταφοράς με αγωγή σε ακίνητο στερεό πάχους L. Ο αριθμός  $Nu_x$  για επίπεδη επιφάνεια ισούται με:

$$Nu_x = 0.332 \cdot Re_x^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (20)$$

Όπου Pr : Ο αδιάστατος αριθμός Prandtl ( $0.01 < Pr < 10^5$ )

$Re_x$ : Ο αριθμός Reynolds

$$Re = \frac{u \cdot D}{\nu} \quad (21)$$

Όπου u : Η ταχύτητα του ρευστού

D: Η διάμετρος του αγωγού

$\nu$  : Κινηματικό Ιξώδες του ρευστού.

Συνεπάγεται από τις συναρτήσεις (17),(19)-(21) ότι η μεταβλητή της ταχύτητας  $u_x$  είναι ανάλογη με τον συντελεστή συναγωγής της θερμότητας h άρα ανάλογη και με ροή θερμότητας πάνω στην επιφάνεια του στερεού. Έτσι συμπεραίνουμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ρευστού τόσο μεγαλύτερη είναι ροή θερμότητας πάνω στην επιφάνεια του στερεού.

**Η σχετική υγρασία  $a_w$**  η σχετική υγρασία του ρευστού αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα της μεταφοράς μάζας μεταξύ του ρευστού και του στερεού σύμφωνα με την συνάρτηση (22) ο ρυθμός μεταφοράς μάζας είναι ανάλογος της διαφοράς συγκέντρωσης υγρασίας του ρευστού από το στερεό:

$$N_A = k_c (C_{As} - C_{Am}) \quad (22)$$

Όπου  $N_A$ : Ο ρυθμός μεταφοράς μάζας

$k_c$  : Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας με συναγωγή

$C_{As}$ : Συγκέντρωση υγρασίας στο στερεό

$C_{Am}$ : Συγκέντρωση υγρασίας στο ρευστό

Από την εξίσωση (22) παρατηρούμε ότι όσο πιο μεγάλο το δυναμικό της συγκέντρωσης της υγρασίας τόσο πιο μεγάλο ρυθμό μεταφοράς μάζας έχουμε στη διεπιφάνεια του στερεού με το ρευστό.



**Το πάχος του υλικού (στερεού) (d)** σύμφωνα με την συνάρτηση διάχυσης (23) του Fick είναι αντιστρόφως ανάλογος με τον ρυθμό μεταφοράς μάζας. Άρα όσο πιο μεγάλο είναι το πάχος του στερεού τόσο μικρότερος είναι ο ρυθμός μεταφοράς μάζας.

$$N_A = \frac{D''_{A,e}}{d} (C_{As} - C_{Am}) \quad (23)$$

Όπου  $N_A$ : Ο ρυθμός μεταφοράς μάζας

$D''_{A,e}$  : Ο συντελεστής διάχυσης

$C_{As}$ : Συγκέντρωση υγρασίας στο στερεό

$C_{Am}$ : Συγκέντρωση υγρασίας στο ρευστό

d : Πάχος στερεού.

### **3.4. Συστήματα Οικιακής Ξήρανσης**

Η ξήρανση των οικιακών αποβλήτων είναι μια πρωτοποριακή τεχνολογία που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη διαχείριση και επεξεργασία των οικιακών οργανικών απορριμμάτων. Παρόλα αυτά δεν υπάρχουν ιδιαίτερες αναφορές σε συστήματα μικρής κλίμακας τα οποία να έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για τη διαχείριση των οργανικών απορριμμάτων ούτε στην Ευρωπαϊκή Ένωση ούτε σε διεθνές επίπεδο. Στην αγορά υπάρχουν συστήματα επεξεργασίας οργανικών απορριμμάτων τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεμονωμένα ως μια συνηθισμένη οικιακή συσκευή χωρίς να ανήκουν σε ένα ευρύτερο πλαίσιο διαχείρισης των οικιακών αποβλήτων.

Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη περιγραφή στα υπάρχοντα εμπορικά συστήματα οικιακής ξήρανσης των οικιακών οργανικών απορριμμάτων στην πηγή.

#### **Συστήματα Εταιρίας Loofen**

Η Loofen **Lee Co., Ltd** ιδρύθηκε το 2003 στην Κορέα. Η εταιρία έχει αναπτύξει μερικά καινοτόμα εμπορικά συστήματα ξήρανσης για τα οικιακά οργανικά στερεά απόβλητα. Αν και τα συστήματα που έχει δημιουργήσει δεν έχουν χρησιμοποιηθεί σε ευρεία κλίμακα, έχουν αποκτήσει πολλές πιστοποιήσεις σε Εθνικό κυρίως επίπεδο.

Η εταιρεία έχει κατασκευάσει συστήματα οικιακής ξήρανσης το κάθε ένα από τα οποία έχει διαφορετικές δυνατότητες. Όλα τα συστήματα ωστόσο χρησιμοποιούν θερμό αέρα για τη διεργασία της ξήρανσης.

Ορισμένα εμπορικά μοντέλα της εταιρίας Loofen φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 15:Σύστημα οικιακής ξήρανσης Loofen[36]

Utility	Household Appliances				
Model No.	LF-07	LF-01	LF-02	LF-03	10Liter New
Standard Feature					
Dimension (WxDxH / mm) (exclude Filter Holder) (Main Body only)	270 x 292 x 350	270 x 275 x 350	270 x 309 x 355	360 x 250 x 438	280 x 420 x 440
Waste Basket Capacity	5L	4L	4L	7L	5L x 2 basket
Product Weight (exclude Filter & Filter Holder)	6kg	6kg	6kg	8kg	undecided
Advantageous Characteristics	Moisture Detecting Sensor			*Standard drying mode * Rapid drying mode	Same as LF-07,01,02
	Touch Sensor Button (Power On/Off & Operation)				
	Coated with antifungal substance / easy-washable Basket				
Process Type	Dehydrating : Heated Air circulation in chamber			Dehydrating : Air circulation in chamber	Dehydrating : Air circulation in chamber
	Deodorizing : Coated activated carbon filtration			Deodorizing : Air through the bag	Deodorizing : Activated carbon filter
Power Source	Varies to suit each country Voltage / Hz / (Phase) standard				
Power Consumption	Ventilation mode 10W/Hr – Operation mode 90W/Hr(average 60W/Hr)			Ventilation 20W / Standard 90W / Rapidity 150W	2 Basket operation 700g input 145~150W
Option	*pearl coated red body with yellow circle *pearl coated black body with green circle	N/A	N/A	N/A	N/A

Εικόνα 16:Προδιαγραφές των διαφορετικών μοντέλων της εταιρίας Loofen[36]

Ένα κοινό χαρακτηριστικό όλων των συστημάτων οικιακής ξήρανσης είναι ότι έχουν ενσωματωμένο ένα φίλτρο ενεργού άνθρακα το οποίο δεσμεύει τις δυσάρεστες οσμές που μπορεί να προκύψουν κατά τη διάρκεια της ξήρανσης. Το φίλτρο αυτό είναι τοποθετημένο στο πίσω μέρος της συσκευής. Ο αέρας με την υγρασία που απομακρύνεται από τα απορρίμματα, περνά μέσα από το παχύ στρώμα του ενεργού άνθρακα με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία καθώς κατακρατούνται πλήθος βλαπτικών ουσιών προερχόμενες από τα απορρίμματα. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το φίλτρο ενεργού άνθρακα που χρησιμοποιείται στις συσκευές Loofen:



Εικόνα 17: Φίλτρο ενεργού άνθρακα των συσκευών Loofen[36]



Εικόνα 18: Μοντέλο Loofen LF-07[36]

### Συστήματα οικιακής ξήρανσης της εταιρίας Magic Cara Co., Ltd

Η εταιρία Magic Cara είναι μία κορεάτικη εταιρία που ειδικεύεται σε προϊόντα που έχουν σκοπό την προστασία του περιβάλλοντος και μείωσης της παραγωγής του όγκου των οικιακών απορριμμάτων που στην Κορέα αποτελούν κριτήριο για τη φορολογία κάθε νοικοκυριού. Για τον λόγο αυτό κατασκεύασαν τον οικιακό

ξηραντήρα Smart Cara. Ο εν λόγω ξηραντήρας δέχεται τα βιοαπόβλητα από τα τρόφιμα του νοικοκυριού και με θέρμανση απομακρύνει την υγρασία και μειώνει τον όγκο τους μέχρι και 90% του αρχικού. Περιέχει φίλτρα ενεργού άνθρακα για να συγκρατεί τις οσμές και σύστημα κονιορτοποίησης των αποβλήτων μετά την ξήρανση τους. Τέλος περιλαμβάνει αποσπώμενο καλάθι για την εύκολη απομάκρυνση του υλικού μετά τη ξήρανση, το οποίο βρίσκεται σε μορφή σκόνης. Παρότι η διανομή του συστήματος αυτού ξεκίνησε αποκλειστικά για την Κορέα τα τελευταία 2 χρόνια έχει επεκταθεί στην Αμερική, Ευρώπη και την υπόλοιπη ανατολική Ασία και έχει γνωρίσει μεγάλη εμπορική επιτυχία.



**Εικόνα 19: Συσκευή ξήρανσης Smart Cara**

Οι προδιαγραφές του συστήματος οικιακής ξήρανσης Smart Cara είναι οι εξής:

- Κατανάλωση ισχύος: Περίπου 250W
- Βάρος: 9 kg
- Χωρητικότητα: 1 kg
- Μέθοδος Ξήρανσης: Κυκλοφορία Αέρα
- Μέγεθος: 270(W)\*300(D)\*350(H)

## Συστήματα οικιακής ξήρανσης της εταιρίας COWAY

Η Coway ιδρύθηκε το 1989 στην Κορέα. Από τότε μέχρι σήμερα η εταιρία έχει δημιουργήσει διάφορα προϊόντα όπως συσκευές καθαρισμού του αέρα, συσκευές φιλτραρίσματος του νερού, διάφορα είδη οικιακών συσκευών κ.α. Επειδή τα προϊόντα της Coway είχαν υψηλό αρχικό κόστος οι καταναλωτές δεν ήταν εύκολο να τα αγοράσουν, για τον λόγο αυτό η εταιρία ενέκρινε ένα επιχειρηματικό σχέδιο προκειμένου να είναι τα προϊόντα της πιο προσβάσιμα στο ευρύ κοινό μειώνοντας το αρχικό τους κόστος. Με δεδομένο ότι το αρχικό κόστος μειώθηκε, οι καταναλωτές ολοένα και περισσότερο προτιμούσαν τα προϊόντα της Coway. Η εταιρία άρχισε να επεκτείνεται το 2003 στην Ιαπωνία και στην συνέχεια στην Ταϊλάνδη, τη Κίνα και την Μαλαισία. Το 2010 η Coway ίδρυσε μία θυγατρική εταιρία στις Η.Π.Α., στο Λος Άντζελες, σηματοδοτώντας έτσι την είσοδό της στην Αμερικανική αγορά.

Όσον αφορά την Ευρωπαϊκή αγορά η Coway έχει δημιουργήσει μια σειρά από βάσεις και σχεδιάζει σύντομα την δημιουργία θυγατρικών μονάδων. Έχει δημιουργήσει και μια σειρά από ξηραντήρες στερεών οικιακών οργανικών αποβλήτων. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται δύο από τα εμπορικά συστήματα της Coway.



Εικόνα 20: Συστήματα ξήρανσης Coway[35]

Στην εικόνα βλέπουμε τον πολυλειτουργικό σωλήνα τροφοδοσίας, από όπου και εισέρχονται τα στερεά οργανικά απόβλητα. Οι οσμές που πιθανότατα δημιουργούνται από τη διαδικασία της ξήρανσης δεν μπορούν να διαφύγουν στο περιβάλλον. Ο σωλήνας τροφοδοσίας μπορεί εύκολα να αφαιρεθεί προκειμένου να πλυθεί και στην συνέχεια να επανατοποθετηθεί. Το σφαιρικό τύμπανο που υπάρχει στο εσωτερικό του συστήματος επιτρέπει την ελεύθερη κυκλοφορία του αέρα καθώς επίσης και την ανάπτυξη μέγιστης θερμικής αγωγιμότητας με αποτέλεσμα να μειώνεται γρήγορα η μάζα των απορριμμάτων. Εσωτερικά υπάρχει μια επίστρωση από κεραμικό η οποία ελαχιστοποιεί την μετά-επεξεργασία των καταλοίπων.



**Εικόνα 21: Τα βασικά μέρη ενός οικιακού ξηραντήρα [35]**

Η παραπάνω εικόνα παρουσιάζει τα βασικά μέρη του ξηραντήρα. Σύμφωνα με αυτή:

1. Τα οικιακά οργανικά στερεά απόβλητα μπαίνουν στη κατάλληλη θήκη.
2. Ο ανεμιστήρας προκαλεί την ξήρανση των αποβλήτων.
3. Λαμβάνει χώρα η κονιορτοποίηση και το απόβλητο θερμαίνεται.
4. Οι άσχημες οσμές συγκρατούνται από το φίλτρο του ενεργού άνθρακα.
5. Το κονιοποιημένο τρόφιμο αφαιρείται από τον ξηραντήρα.

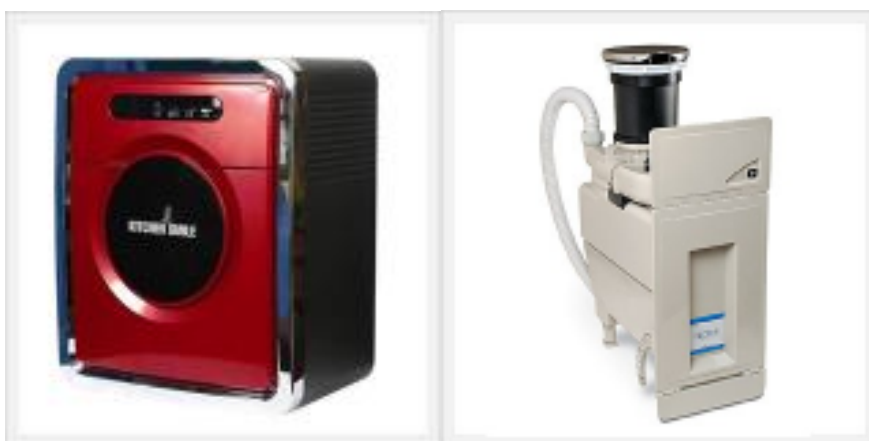
Model	WM05-A
Disposal Method	Heat and Grind
Volume Reduction	90 % (Varies depending on the moisture contents of food wastes)
Capacity	1.5 kg per session (Max. 3kg)
Processing Time	Approx 3 hrs/cycle * Varies depending on the types of food wastes
Deodorization	Composite Filter (AC + Zeolite + Oriental herb)
Power Consumption	800 W
Dimensions (WXHXD)	12.5 X 15.3 X 26.2 inch 320 X 397 X 668 mm
Net Weight	47.3 lb (21.5 kg)

**Εικόνα 22: Τεχνικές προδιαγραφές του ξηραντήρα WM05-A [35]**

### Συστήματα οικιακής ξήρανσης της εταιρίας SAMOH NK

Ακόμα μια εταιρία που ασχολείται με την κατασκευή συστημάτων ξήρανσης οικιακών οργανικών απορριμμάτων, είναι η Samoh NK. Η Samoh NK ιδρύθηκε στην Κορέα και έχει αναπτύξει πλήθος καινοτόμων συστημάτων διαχείρισης των οικιακών οργανικών απορριμμάτων. Τα προϊόντα της εταιρίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί σε ευρεία κλίμακα. Η εταιρία έχει δημιουργήσει 2 μοντέλα ξηραντήρων με την ονομασία «*smile household*» όπου το καθένα έχει τις δικές του ικανότητες και δυνατότητες.

Τα 2 μοντέλα της εταιρίας παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 23: Συσκευές ξήρανσης SamohNK [37]

Οι προδιαγραφές των συστημάτων οικιακής ξήρανσης της εταιρίας SamohNK είναι οι εξής:

- Τάση: 220V
- Κατανάλωση ισχύος: Περίπου 90W
- Βάρος: 6.6kg
- Μέθοδος Ξήρανσης: Κυκλοφορία Αέρα
- Μέγεθος: 240 χιλιοστά x 667 (697) mm x 429/240mm x 717 (747) mm x 429

### **Συστήματα οικιακής ξήρανσης της εταιρίας DUO ENTERPRISE LTD**

Η Duo enterprise ltd. ιδρύθηκε το 1998 και από τότε έχει κατασκευάσει αλλά και εξαγάγει πλήθος αγαθών όπως: (βαμβάκι, εσώρουχα, κάλτσες, κλπ). Η εταιρία ασκεί διάφορους ελέγχους της ποιότητας των προϊόντων της. Εκτός από τα προϊόντα που έχουν ήδη αναφερθεί η συγκεκριμένη εταιρία κατασκευάζει και συστήματα διαχείρισης οργανικών στερεών αποβλήτων. Ένα τέτοιο σύστημα εμφανίζεται στην παρακάτω εικόνα.



**Εικόνα 24:Σύστημα οικιακής ξήρανσης DUO Enterprise Ltd.[33]**

Η διεργασία της ξήρανσης πραγματοποιείται με διπλή ξήρανση και αποστείρωση με τη χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας (IR). Η χρήση της υπέρυθρης ακτινοβολίας προσδίδει τεράστιο πλεονέκτημα στον συγκεκριμένο ξηραντήρα σύμφωνα πάντα με την εταιρία. Το πλεονέκτημα αναφέρετε στην εξοικονόμηση χρόνου που επιτυγχάνεται με τη χρήση της υπέρυθρης ακτινοβολίας και αυτό γιατί τα στερεά απόβλητα ξηραίνονται ταυτόχρονα τόσο εξωτερικά όσο και εσωτερικά. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην διεισδυτικότητα της υπέρυθρης ακτινοβολίας λόγω του μήκους κύματός της. Επειδή η ακτινοβολία διεισδύει στο εσωτερικό των απορριμμάτων θεωρείται ότι είναι ο ποιο αποτελεσματικός τρόπος ξήρανσης σε σχέση με την χρήση θερμού αέρα. Η εταιρία έχει χρησιμοποιήσει ένα πολλαπλό φίλτρο για την απομάκρυνση των οσμών το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί έως και έξι μήνες σύμφωνα με την εταιρία.

Τέλος το δοχείο ξήρανσης στο οποίο τοποθετούνται τα απορρίμματα έχει τρύπες στο κάτω μέρος του προκειμένου να καθίσταται η διαδικασία της ξήρανσης αποδοτικότερη.

Οι τεχνικές προδιαγραφές του συστήματος είναι οι ακόλουθες:

Βάρος: 11 κιλά

Όγκος εισροής: 6.5L

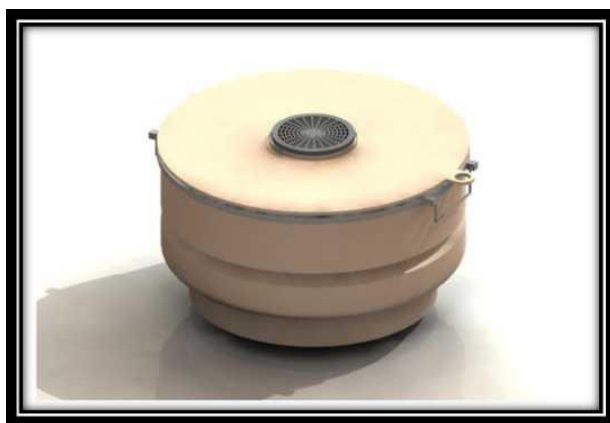
Τροφοδοσία: AC 220 ~ 240V 50/60Hz

Μέγεθος: 270 (Π) \* 450 (D) \* 380 (H)



## Σύστημα οικιακής ξήρανσης DRYWASTE

Το σύστημα οικιακής ξήρανσης DRYWASTE αναπτύχθηκε και κατασκευάστηκε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος LIFE+ 08 ENV/GR/000566 με το ακρωνύμιο DRYWASTE. Πρόκειται για μια καινοτόμο τεχνολογία στο τομέα της προεπεξεργασίας των οικιακών ΒΑ η οποία δεν έχει καταγραφεί ξανά στο παρελθόν και έχει ήδη λειτουργήσει πιλοτικά σε 25 οικίες του Δήμου Παπάγου-Χολαργού με μεγάλη επιτυχία.. Η συσκευή φέρει περιμετρικά στρώμα πετροβάμβακα πάχους 3 cm προκειμένου να μειωθούν οι θερμικές απώλειες από το εσωτερικό του θαλάμου ξήρανσης.



**Εικόνα 25: Σύστημα οικιακής ξήρανσης DRYWASTE**

Συγκεκριμένα, ο χρήστης έχοντας εισάγει τις ημερησίως παραγόμενες ποσότητες διατροφικών αποβλήτων της κατοικίας, στο εσωτερικό του υποδοχέα, τον τοποθετεί με τη βοήθεια των χειρολαβών στο θάλαμο του ξηραντήρα και κλείνει χειρονακτικά το πόμα. Κατόπιν, ενεργοποιεί ταυτόχρονα τις διατάξεις ανεμιστήρα και θερμικού καλωδίου προκειμένου να εκκινήσει τον κύκλο λειτουργίας του συστήματος. Ο νωπός ατμοσφαιρικός αέρας, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, εισέρχεται μέσω των διακένων της βάσης στο εσωτερικό του συστήματος. Στη συνέχεια, διερχόμενος από το διάκενο που σχηματίζεται μεταξύ του θερμικού δίσκου και της εσοχής της βάσης, εισέρχεται στο χώρο ξήρανσης. Ο χώρος αυτός βρίσκεται μεταξύ του θερμικού δίσκου (κάτω όριο), του υποδοχέα συμπυκνωμάτων (άνω όριο) και του ανώτερου τμήματος της βάσης (παράπλευρο-περιμετρικό όριο). Κατόπιν, μέσω της φυγοκεντρικής περωτής του ανεμιστήρα, ο θερμός αέρας θα εξαναγκαστεί να οδηγηθεί ακτινικά στο διάκενο μεταξύ της περιφέρειας του υποδοχέα συμπυκνωμάτων και της εσωτερικής περιφέρειας του θαλάμου. Στη συνέχεια, θα εισέλθει στο χώρο του υποδοχέα και μέσω του πλέγματος θα απαγάγει βαθμιαία την υγρασία των διατροφικών αποβλήτων. Η ποσότητα από ενδεχόμενη συμπύκνωση υδρατμών στα τοιχώματα του θαλάμου ή/και στον υποδοχέα, θα οδηγηθεί βαρυτικά στον αντίστοιχο υποδοχέα από όπου. Ο θερμός και νωπός αέρας ξήρανσης, εξερχόμενος του συστήματος θα διέρχεται από το εσωτερικό φίλτρου απόσμισης ενεργού άνθρακα, προκειμένου να δεσμευτούν οι χημικές ενώσεις που είναι υπεύθυνες για την έκλυση δυσάρεστων οσμών.[9]



## **4. Πειραματική Διαδικασία**

Σκοπός της εργασίας είναι να μελετηθεί η διεργασία της ξήρανσης στη πηγή με χρήση ενός εμπορικού συστήματος οικιακής ξήρανσης της εταιρίας Loofen. και να διαπιστωθεί εάν δύναται να συντελέσει ικανοποιητικά στη μείωση της περιεχόμενης στα διατροφικά απόβλητα υγρασίας, άρα και της συνολικής μάζας και όγκου τους, οπότε να μπορεί να αποτελέσει εναλλακτική μέθοδο στη διαχείριση τους. Ακόμα σκοπός είναι να διερευνηθούν οι παράμετροι που επηρεάζουν τη διεργασία της ξήρανσης, μελετώντας την κινητική της διεργασίας.

Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν ως υπόστρωμα προς ξήρανση διατροφικά απορρίμματα σταθερής σύστασης σε διαφορετικές ποσότητες που αντιστοιχούν στις ποσότητες που παράγει καθημερινά μία μονομελής, μια διμελής και μια τριμελής οικογένεια. Το υπόστρωμα αυτό προήλθε από φρέσκα τεμαχισμένα τρόφιμα τα οποία τοποθετήθηκαν εντός του καλάθιού απόρριψης του ξηραντήρα και αφέθηκαν προς ξήρανση. Κατά την ξήρανση λαμβάνονταν μετρήσει μάζας και όγκου των απορριμμάτων και ενεργειακής κατανάλωσης της συσκευής. Ακόμα με αισθητήρα λαμβάνονταν μετρήσεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας του εσωτερικού της συσκευής.

Το σύστημα λειτουργούσε καθημερινά για 8 ώρες και έπειτα η λειτουργία του τερματιζόταν. Στην αρχή κάθε οκταώρου λειτουργίας γινόταν προσθήκη φρέσκου νωπού υλικού πάνω στο υπάρχον υλικό της προηγούμενης μέρας. Η προσθήκη συνεχίστηκε μέχρι πλήρωσεως του κάδου απόρριψης. Από το σημείο αυτό και έπειτα το υλικό αφηνόταν να ξηραθεί χωρίς καμία ανάδευση μέχρι να μην παρατηρείται παρά μόνο ελάχιστη μείωση στη μάζα του. Μετά τη σχετική σταθεροποίηση του, το υλικό απομακρυνόταν από τον ξηραντήρα, αλεθόταν με χρήση μύλου άλεσης για να γίνει σκόνη και έπειτα γινόταν ανάλυση των φυσικοχημικών του χαρακτηριστικών.

Αυτή η διαδικασία επαναλήφθηκε 4 φορές σε 4 διαφορετικούς κύκλους πλήρους λειτουργίας της συσκευής. Στον πρώτο κύκλο χρησιμοποιήθηκε ποσότητα νωπού υλικού που αντιστοιχεί στην ποσότητα διατροφικών απορριμμάτων που παράγει μία μονομελής οικογένεια και στο δεύτερο κύκλο υλικό που αντιστοιχεί σε διμελή οικογένεια. Στον τρίτο και τέταρτο κύκλο χρησιμοποιήθηκε ποσότητα νωπού υλικού που αντιστοιχεί στην ποσότητα διατροφικών απορριμμάτων που παράγει μία τιμελής οικογένεια. Η διαφορά μεταξύ των 2 αυτών κύκλων είναι η ύπαρξη ανάδευσης κατά τη διάρκεια του τρίτου κύκλου και η απουσία ανάδευσης κατά τη διάρκεια του τέταρτου. Αυτό έγινε για να διαπιστωθεί η σημασία της ανάδευσης κατά τη διαδικασία της ξήρανσης.

Στη συνέχεια τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από το σύστημα Loofen συγκρίθηκαν άμεσα με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν από τη λειτουργία του συστήματος οικιακής ξήρανσης DRYWASTE που αναπτύχθηκε στη Μονάδα Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π. στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος LIFE+ και λειτούργησε με το ίδιο αρχικό υπόστρωμα.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού περιγράφονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου συστήματος καθώς και η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε προκειμένου να μελετήσουμε τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος και τις επιδόσεις του εμπορικού συστήματος οικιακής ξήρανσης. Ειδικότερα αναλύονται τα όργανα μέτρησης, οι αναλυτικές μέθοδοι για τη διεξαγωγή των πειραματικών αναλύσεων και οι μέθοδοι υπολογισμού των αποτελεσμάτων.

Επιπλέον περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε προκειμένου να μελετηθούν τα μοντέλα ξήρανσης των οργανικών αποβλήτων και να προσδιοριστούν οι μεταβλητές από τις οποίες εξαρτάται η διεργασία της ξήρανσης των συγκεκριμένων οργανικών οικιακών αποβλήτων. Έτσι έγινε η διερεύνηση της κινητικής ξήρανσης των βιοαποβλήτων με τη χρήση κατάλληλων μοντέλων προσομοίωσης. Να σημειωθεί επίσης ότι για να μελετηθεί η κινητική της ξήρανσης θεωρήθηκε ότι ξηραίνεται κάθε οκτάωρο μόνο το νεοεισαχθέν στο σύστημα υλικό.

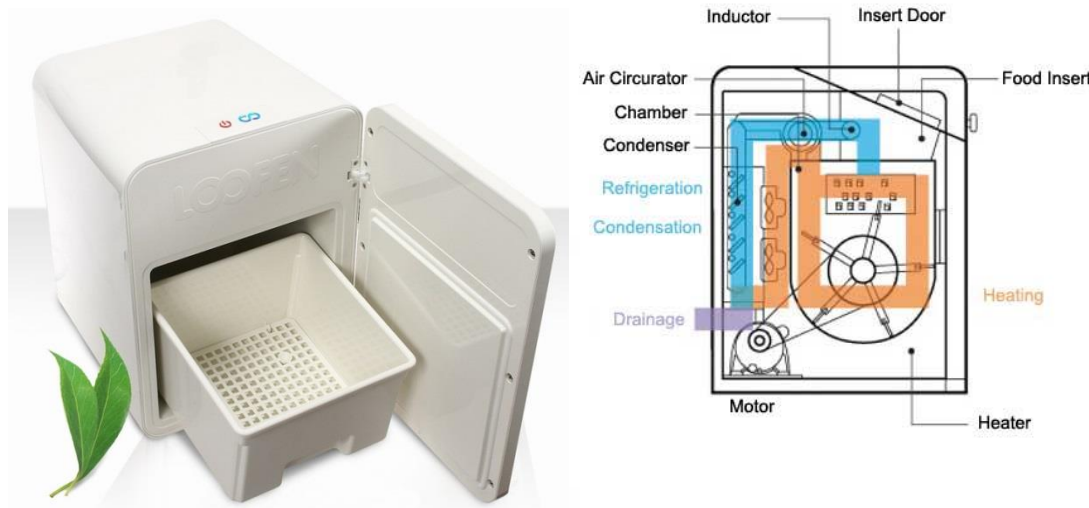
#### **4.1. Περιγραφή του εμπορικού συστήματος οικιακής ξήρανσης**

Για τους σκοπούς της συγκεκριμένης εργασίας χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό σύστημα οικιακής ξήρανσης LF-07 της κορεάτικης εταιρίας Loofen.



**Εικόνα 26: Σύστημα ξήρανσης Loofen LF-07[36]**

Πρόκειται για ένα σύστημα οικιακής ξήρανσης που χρησιμοποιεί ρεύμα θερμού αέρα για την ξήρανση των διατροφικών απορριμμάτων. Τα απορρίμματα τοποθετούνται μέσα στο ειδικό καλάθι του ξηραντήρα ώστε να μπορούν να απομακρυνθούν εύκολα μετά τη ξήρανση. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται το εξωτερικό και εσωτερικό μέρος της συσκευής.



**Εικόνα 27: Εσωτερικό και εξωτερικό μέρος της συσκευής LF-07[36]**

Από τη δεξιά εικόνα βλέπουμε ότι τα βασικά εσωτερικά τμήματα του συστήματος είναι ο απαγωγέας, ο χώρος όπου τοποθετούνται τα τρόφιμα, ο κυρίως θάλαμος, ο συμπυκνωτήρας, το μοτέρ και το θερμαντικό στοιχείο. Η μπλε γραμμή αναφέρεται στην ψύξη και στην συμπύκνωση. Η πορτοκαλί στην θέρμανση του συστήματος και η μωβ είναι η τελική έξοδος του συστήματος.

Η συγκεκριμένη συσκευή οικιακής ξήρανσης έχει τοποθετημένα στο πίσω μέρος της δύο φίλτρα ενεργού άνθρακα τα οποία δεσμεύουν τις δυσάρεστες οσμές που μπορεί να προκύψουν κατά τη διάρκεια της ξήρανσης. Ο αέρας με την υγρασία που απομακρύνεται από τα απορρίμματα, περνά μέσα από το παχύ στρώμα του ενεργού άνθρακα με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία καθώς κατακρατούνται πλήθος βλαπτικών ουσιών προερχόμενες από τα απορρίμματα. Τα φίλτρα αυτά απεικονίζονται παρακάτω.



**Εικόνα 28: Φίλτρο ενεργού άνθρακα**

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ο εσωτερικός θάλαμος της συσκευής όπου μπορεί κανείς να διακρίνει τον απαγωγέα και το θερμαντικό στοιχείο.



**Εικόνα 29: Φωτογραφία του εσωτερικού της συσκευής**

Όπως αναφέρθηκε ήδη τα τροφικά απορρίμματα τοποθετούνται στον ειδικό κάδο απόρριψης της συσκευής για να πραγματοποιηθεί η ξήρανση. Το καλάθι έχει τετράγωνη διατομή και χωρητικότητα 5 L. Μετά το πέρας της διαδικασίας το καλάθι αφαιρείται από τη συσκευή και εκκενώνεται το περιεχόμενό του. Στο κάτω μέρος του καλάθιού βρίσκεται μια πλαστική σχάρα με την οποία διευκολύνεται η αφαίρεση του ξηραμένου υλικού και αποφεύγεται η προσκόλληση του στη βάση του καλάθιού. Τέλος στο εξωτερικό του το καλάθι φέρει ειδική λαβή για την εύκολη αφαίρεση του από τη συσκευή. Το καλάθι και η εσωτερική σχάρα παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες:



**Εικόνα 30: Φωτογραφία κάδου απόρριψης της συσκευής**



**Εικόνα 31: Φωτογραφία κάδου απόρριψης με και χωρίς σχάρα**

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι η συσκευή περιλαμβάνει ανιχνευτή υγρασίας, ο οποίος απενεργοποιεί αυτόματα το σύστημα όταν δεν ανιχνεύει περαιτέρω αφαίρεση υγρασίας από το υλικό, ενώ η συσκευή έχει μέση ονομαστική ενεργειακή κατανάλωση 60W.

Τα χαρακτηριστικά της συσκευής συνοψίζονται παρακάτω:

- Μέση κατανάλωση ισχύος: 60W
- Βάρος: 6 kg
- Χωρητικότητα: 5 L
- Μέθοδος Ξήρανσης: Κυκλοφορία Θερμού Αέρα
- Μέγεθος: 270(W)\*292(D)\*350(H)







**Εικόνα 32: Αναπαράσταση της κυκλοφορίας αέρα εντός της συσκευής[36]**

## 4.2. Πειραματική Μέθοδος

### 4.2.1 Αρχική σύσταση υποστρώματος







Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η πειραματική μελέτη, διαμορφώθηκε κατάλληλο μίγμα διατροφικών απορριμμάτων σταθερής σύστασης το οποίο προέκυψε από παρατηρήσεις των διατροφικών συνηθειών 25 οικιών του Δήμου Παπάγου-Χολαργού στα πλαίσια της υλοποίησης του ευρωπαϊκού προγράμματος Life+ με το ακρωνύμιο DRYWASTE σε συνδυασμό με στοιχεία από τη βιβλιογραφία που αφορούν σε προδιαλεγμένα απόβλητα τροφών σε νοικοκυριά. Στους πίνακες που ακολουθούν, παρουσιάζεται το ημερήσιο πρότυπο μείγμα αποβλήτων τροφών συναρτήσει του αριθμού των μελών οικογένειας και η ποσοστιαία σύσταση του πρότυπου μίγματος που χρησιμοποιήθηκε. [9],[39]

Πίνακας 6: Ημερήσιο πρότυπο μείγμα αποβλήτων τροφών συναρτήσει του αριθμού των μελών οικογένειας


	1μελής	2μελής	3μελής	4μελής	Φωτογραφία
Πατάτα (g)	124	249	372	498	
Κρεμμύδι (g)	22	43	66	86	
Μαρούλι (g)	12	23	36	46	
Πιπεριά (g)	3	8	9	16	



<b>Πράσινα σαλάτας (g)</b>	7	12	21	24	
<b>Πράσο (g)</b>	3	8	9	16	
<b>Λάχανο (g)</b>	14	27	42	54	
<b>Ντομάτα (g)</b>	10	20	30	40	
<b>Πορτοκάλι (g)</b>	20	40	60	80	
<b>Μπανάνα (g)</b>	47	93	141	186	

<b>Μήλο (g)</b>	39	79	117	158	
<b>Λεμόνι (g)</b>	7	14	21	28	
<b>Μακαρόνια (g)</b>	55	110	160	220	
<b>Ψωμί (g)</b>	13	25	39	50	
<b>Κρέας (χοιρινό) (g)</b>	27	54	81	108	
<b>Τυρί (g)</b>	7	16	21	37	

Σύνολο (g)	410	821	1230	1642
------------	-----	-----	------	------



Πίνακας 7: Σύσταση του πρότυπου μείγματος διατροφικών απορριμμάτων

Υλικό	Ποσοστό (%)
Πατάτα	30.24%
Κρεμμύδι	5.37%
Μαρούλι	2.93%
Πιπεριά	0.73%
Πράσινα Σαλάτας	1.71%
Πράσσο	0.73%
Λάχανο	3.41%
Ντομάτα	2.44%
Πορτοκάλι	4.88%
Μπανάνα	11.46%
Μήλο	9.51%
Λεμόνι	1.71%
Μακαρόνια	6.59%
Ρύζι	6.83%
Ψωμί	3.17%
Κοτόπουλο	2.44%
Χοιρινό	3.17%
Ψαρί	0.98%
Τυρί	1.71%
Σύνολο	100.00%

Στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία διενέργειας των εργαστηριακών δοκιμών προκειμένου να μελετηθούν τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος καθώς και οι επιδόσεις του πρότυπου συστήματος οικιακής ξήρανσης. Ειδικότερα αναγράφονται τα όργανα μέτρησης, οι αναλυτικές μέθοδοι για τη διεξαγωγή των πειραματικών αναλύσεων και οι μέθοδοι υπολογισμού των αποτελεσμάτων.

#### 4.2.2 Κύκλοι ξήρανσης

Προκειμένου να διερευνηθούν τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά προϊόντος προεπεξεργασμένο με το εμπορικό σύστημα οικιακής ξήρανσης Loofen, πραγματοποιήθηκαν 4 κύκλοι ξήρανσης. Σε κάθε κύκλο πραγματοποιήθηκε πλήρης ξήρανση του αρχικού υποστρώματος που χρησιμοποιήθηκε. Οι περιπτώσεις που μελετήθηκαν ήταν: υπόστρωμα 1μελους οικογένειας (410 gr/day), 2μελους οικογένειας (821 gr/day) και 2 επαναλήψεις με υπόστρωμα 3μελους οικογένειας (1230 gr/day). Η ποσότητα των παραγόμενων απορριμμάτων σε ημερήσια βάση, προσδιορίστηκε με βάση τα επίσημα στοιχεία του Υπουργείου Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής για το έτος 2012. Λαμβάνοντας υπόψη τη σύσταση των αποβλήτων τροφών αλλά και την ημερήσια παραγόμενη ποσότητα αποβλήτων τροφών συναρτήσει του αριθμού των μελών οικογένειας, προκύπτει η ημερήσια ποσότητα και σύσταση του μίγματος αποβλήτων τροφών που εισέρχονται στον οικιακό ξηραντήρα (Πίνακας 6). Η περίπτωση της 4<sup>μελούς</sup> οικογένειας δεν μελετήθηκε διότι ο όγκος του καλάθιού της συσκευής δεν ήταν αρκετός για να χωρέσει η ποσότητα τροφικών απορριμμάτων που παράγει μια 4μελής οικογένεια, επομένως συμπεραίνουμε ότι το συγκεκριμένο σύστημα οικιακής ξήρανσης δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για νοικοκυριά με περισσότερα από 3 μέλη.

#### 4.2.3 Προσδιορισμός μείωσης μάζας

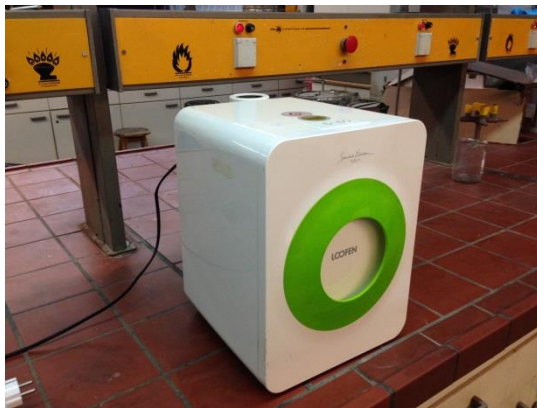
Η λειτουργία της συσκευής οικιακής ξήρανσης, οριζόταν καθημερινά σε 8 ώρες. Προκειμένου να λάβουν χώρα οι εργαστηριακές δοκιμές, η μάζα του αρχικού (νωπού) υποστρώματος εντός του καλάθιού απόρριψης, προσδιοριζόταν πριν την έναρξη της ξήρανσης.

Στη συνέχεια πραγματοποιούνταν καταγραφή της μάζας του υλικού με ζυγό ακριβείας ανά 1 ώρα μέχρι να τερματιστεί η λειτουργία της συσκευής σε χρονικό διάστημα 8 ωρών.

Την επόμενη ημέρα, τοποθετούνταν νέα ποσότητα νωπού υλικού (ίδιας σύστασης και μάζας) στο ήδη υπάρχον στο εσωτερικό του ξηραντήρα. Η διαδικασία αυτή συνεχιζόταν έως ότου το καλάθι στο εσωτερικό του ξηραντήρα υποστεί πλήρωση. Η διεργασία της ξήρανσης συνεχιζόταν με συνεχή μείωση της μάζας του δείγματος και λάμβανε τέλος κατά τη σχετική σταθεροποίηση της ξηρή μάζας.



**Εικόνα 33: Ζυγός ακριβείας**



**Εικόνα 34: Εξωτερικό και εσωτερικό συστήματος Loofen κατά τη λειτουργία**

#### **4.2.4 Προσδιορισμός προφίλ θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας εντός της συσκευής**

Κατά τη διαδικασία της ξήρανσης μετρήθηκε σε κάθε κύκλο η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία εντός του συστήματος οικιακής ξήρανσης με χρήση κατάλληλου αισθητήρα, ο οποίος ήταν τοποθετημένος εντός του καλαθιού σε όλη τη διάρκεια της διεργασίας. Ο αισθητήρας αυτός φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 35: Αισθητήρας μέτρησης θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας



Εικόνα 36: Αισθητήρας εντός του καλάθιού απόρριψης

#### 4.2.5 Προσδιορισμός όγκου δείγματος

Στη διάρκεια των εργαστηριακών δοκιμών, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μείωσης του όγκου του υλικού το οποίο τοποθετούνταν στο εσωτερικό της συσκευής οικιακής ξήρανσης. Το καλάθι απόρριψης του υλικού θεωρείται ορθογώνιο με πλευρές 21 cm και ύψος 12,5 cm, του οποίου ο συνολικός όγκος προσδιορίστηκε περίπου ίσος με 5,5 L.

Πριν την έναρξη της ξήρανσης καταγράφονταν το ύψος του ναπού υλικού ως προς τη βάση του καλάθιού και στο τέλος αυτής μετρούνταν το αντίστοιχο ύψος του ξηρού πλέον υλικού.

Έχοντας καταγράψει τα εκάστοτε ύψη για κάθε οκτάωρο και χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο για τον όγκο υπολογίζουμε τη μείωση του όγκου του δείγματος σε κάθε οκτάωρο.

$$V = A * h \quad (24)$$

όπου:  $A = 441 \text{ cm}^2$  και  $h =$  το μετρούμενο ύψος κάθε φορά



Εικόνα 37: Άδειος κάδος απόρριψης

#### 4.2.6 Καταγραφή ενεργειακής κατανάλωσης

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ενεργειακής κατανάλωσης με τη βοήθεια ειδικής συσκευής η οποία ήταν συνδεδεμένη με την πρίζα της συσκευής και την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Στο τέλος κάθε οκταώρου πραγματοποιούνταν καταγραφή της ενεργειακής κατανάλωσης για κάθε κύκλο ξήρανσης.



Εικόνα 38: Μετρητής καταναλισκόμενης ενέργειας

#### 4.2.7 Ομογενοποίηση ξηρού υπολείμματος

Στο τέλος κάθε κύκλου, πραγματοποιούνταν συλλογή του ξηρού υλικού και στη συνέχεια το δείγμα ομογενοποιούνταν σε ειδικό μύλο άλεσης, προκειμένου η κοκκομετρία του δείγματος να είναι ικανοποιητική για την πραγματοποίηση των φυσικοχημικών αναλύσεων.



Εικόνα 39: Τελικό ξηρό υλικό πριν την άλεση



Εικόνα 40: Μύλος άλεσης



Εικόνα 41: Τελικό ξηρό υλικό μετά την άλεση



#### 4.2.8 Προσδιορισμός φυσικοχημικών παραμέτρων

Οι φυσικοχημικές αναλύσεις χαρακτηρισμού του τελικού ξηρού υλικού, παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί:

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΙΑ
<b>TN</b>	Συσκευή χώνευσης Gerhard Kjeldatherm Συσκευή απόσταξης Gerhard Vapodest Ζυγός ακριβείας	Διάλυμα $C_7H_6O_3/ H_2SO_4$ Στερεό $Na_2S_2O_3 \cdot 5 H_2O$ Στερεό $K_2SO_4 - CuSO_4 \cdot 5H_2O$ Διάλυμα NaOH Διάλυμα $H_3BO_3$ Διάλυμα $H_2SO_4$ Δείκτης
<b>TKN</b>	Συσκευή χώνευσης Gerhard Kjeldatherm Συσκευή απόσταξης Gerhard Vapodest Ζυγός ακριβείας	Στερεό $K_2SO_4 - CuSO_4 \cdot 5H_2O$ Διάλυμα NaOH Διάλυμα $H_2SO_4$ Διάλυμα $H_3BO_3$ Δείκτης
<b>NH4-N</b>	Συσκευή απόσταξης Gerhard Vapodest Συσκευή ανάδευσης	Διάλυμα $H_2SO_4$ Διάλυμα $H_3BO_4$ Διάλυμα KCl Διάλυμα MgOH
<b>VS-Υγρασία</b>	Ξηραντήρας με silica gel Φούρνος ξήρανσης Ζυγός ακριβείας	
<b>TOC</b>	Συσκευή TOC Shimatzu	
<b>pH</b>	Πεχάμετρο	
<b>Αγωγιμότητα</b>	Αγωγιμόμετρο	

##### 4.2.8.1 Προσδιορισμός υγρασίας (%)

Τα δείγματα ζυγίστηκαν αρχικά με χρήση ζυγού ακριβείας (5 g από το κάθε ένα δείγμα). Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε δοχεία ζέσεως σε φούρνο ξήρανσης στους 105°C για χρονικό διάστημα ίσο με 16 ώρες.



Εικόνα 42: Φούρνος ξήρανσης

Μετά το πέρας των 16 ωρών τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρα με silica gel για περίπου 30 λεπτά προκειμένου να έρθουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος χωρίς να πάρουν υγρασία. Τα δείγματα ζυγίστηκαν εκ νέου για να προσδιοριστεί η τελική τους μάζα αλλά και το ποσοστό υγρασίας που είχαν. Οι ζυγίσεις επαναλαμβάνονταν ανά χρονικό διάστημα 30 λεπτών μέχρις ότου η πτώση της μάζας ήταν μικρότερη του 4%.

Η υγρασία (%) υπολογίστηκε από τη διαφορά μάζας πριν και μετά τη διεργασία ξήρανσης στους 105° C (ASTM 2004):

$$\text{Υγρασία (\%)} = [m_{\text{αρχ}} - m_{\text{τελ}}] / m_{\text{αρχ}} * 100 \quad (25)$$

όπου:

$m_{\text{αρχ}}$  = η αρχική μάζα του δείγματος + μάζα κάψας

$m_{\text{τελ}}$  = η τελική μάζα του δείγματος + μάζα κάψας

#### 4.2.8.2 Προσδιορισμός pH/Αγωγιμότητας

Για την μέτρηση του pH και της αγωγιμότητας ζυγίζονταν 2 g ξηραμένου υλικού που είχε γίνει σκόνη (διαμέτρου 1mm) και αναμιγνύονταν με 40 ml απιονισμένο H<sub>2</sub>O νερό. Στη συνέχεια πραγματοποιούνταν ανάδευση του διαλύματος με χρήση κατάλληλης συσκευής ανάδευσης για 30 λεπτά μέχρις ότου να ομογενοποιηθεί πλήρως. Το διάλυμα αφέθηκε για 1 ώρα περίπου να ηρεμήσει ώστε οι αδιάλυτες στερεές ουσίες να κατακάτσουν στον πάτο του δοχείου.



Εικόνα 43: Συσκευή ανάδευσης

Τέλος, ακολουθεί μέτρηση του pH και της αγωγιμότητας με χρήση πεχάμετρου METTLER TOLEDO MPC227 το οποίο απεικονίζεται στην εικόνα που ακολουθεί :



Εικόνα 44: Πεχάμετρο METTLER TOLEDO MPC227

#### **4.2.8.3 Προσδιορισμός ολικού αζώτου (TN) (%) / TKN (%) / αμμωνιακών (N-NH<sub>4</sub>) (%) και νιτρικών (N-NO<sub>3</sub>) (%) κατά Kjeldahl**

##### **Προσδιορισμός ολικού αζώτου (TN) (%)**

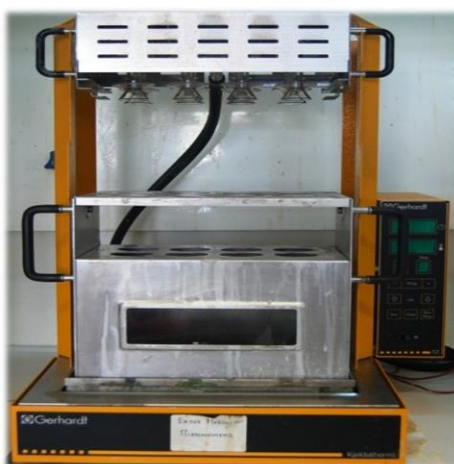
Η μέθοδος προσδιορισμού χωρίζεται σε τρία μέρη: τη χώνευση, την απόσταξη και την τιτλοδότηση. Η συγκεκριμένη μέθοδος που εφαρμόστηκε βασίζεται στην τροποποιημένη κατά Kjeldahl μέθοδο προσδιορισμού αζώτου η οποία περιγράφεται συνοπτικά ως εξής:

Αρχικά πραγματοποιείται μετατροπή του οργανικού αζώτου και ελεύθερου αμμωνίου σε άλας θειικού αμμωνίου (χώνευση) παρουσία θειικού οξέος και καταλυτών (διοξειδίου του τιτανίου). Τα νιτρικά και νιτρώδη ανάγονται σε αμμωνιακά με τη χρήση σαλικυλικού οξέος και θειοθειικού νατρίου. Έπειτα, η αμμωνία αποστάζεται και προσδιορίζεται ογκομετρικά με τιτλοδότηση. Ακολουθεί αναλυτικότερη

περιγραφή της μεθόδου με τα αντιδραστήρια που χρησιμοποιήθηκαν και αναφορές στις ποσότητες και τα είδη αυτών.

#### • Χώνευση

Στην αρχή παρασκευάστηκε ο καταλύτης με ανάμειξη 200g θειικού καλίου ( $K_2SO_4$ ), 6g θειικού χαλκού ( $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ ) και 6g οξειδίου του τιτανίου ( $Ti_2O$ ). Στη συνέχεια, παρασκευάστηκαν τα δείγματα έτσι ώστε να τοποθετηθούν στη συσκευή Gerhardt η οποία έχει χωρητικότητα 8 φιαλών.



Εικόνα 45: Συσκευή Gerhardt KJELDATHERM

Στις δύο (2) φιάλες προστέθηκαν τα τυφλά δείγματα (20 ml θειικό οξύ ( $H_2SO_4$ ) + 20 ml σαλικυλικό οξύ ( $C_7H_6O_3$ )) ενώ στις υπόλοιπες έξι (6) προστέθηκαν 0,5 g από το κάθε δείγμα (3 επαναλήψεις για το κάθε ένα) μαζί με την ίδια ποσότητα θειικού και σαλικυλικού οξέος. Οι φιάλες παρέμειναν στη συσκευή χώνευσης για 24 ώρες (επάωση). Την επόμενη ημέρα προστέθηκαν σε κάθε φιάλη 2,5 g  $Na_2S_2O_3$  κι έπειτα από 45 λεπτά προστέθηκαν 5,5 g καταλύτη. Στη συνέχεια, οι φιάλες παρέμειναν στη συσκευή για 2 ώρες στους  $400^\circ C$  προκειμένου να ολοκληρωθεί η διεργασία της χώνευσης.

Κατά τη χώνευση, οι νίτρο-ενώσεις που σχηματίζονται σε όξινο περιβάλλον από την αντίδραση του σαλικυλικού οξέος με το περιεχόμενο νιτρικό άζωτο του κάθε δείγματος, ανάγονται σε αμινο-ενώσεις, υπό τη θέρμανση του με το θειοθειικό νάτριο. Στην συνέχεια το μίγμα θερμαίνεται περίπου στους  $400^\circ C$  και πραγματοποιείται η χημική αποσύνθεση του δείγματος. Τελικά, αυτό που απομένει στη φιάλη κάθε δείγματος είναι ένα διάλυμα θειικού αμμωνίου.

### • Απόσταξη

Στη συνέχεια, αφού η οι φιάλες έλθουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, τοποθετούνται στη συσκευή απόσταξης Vapodest όπου και πραγματοποιείται απόσταξη σε κάθε ένα δείγμα.



Εικόνα 46: Συσκευή απόσταξης Vapodest

### • Τιτλοδότηση

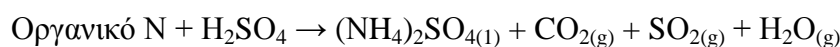
Τέλος, προστέθηκαν 25 ml βορικού οξέος ( $H_3BO_4$ ) καθώς και 3-4 σταγόνες δείκτη στο αποσταγμένο διάλυμα και πραγματοποιήθηκε τιτλοδότηση με χρήση θεικού οξέος ( $K_2SO_4$ ) 0,1N. Μέσω της τιτλοδότησης καθορίζεται η ποσότητα της περιεχόμενης αμμωνίας, και ως εκ τούτου η ποσότητα του περιεχόμενου αζώτου. Η ογκομέτρηση συνεχίζεται μέχρις ότου να μεταβληθεί το χρώμα του αποστάγματος από πράσινο σε βιολετί.



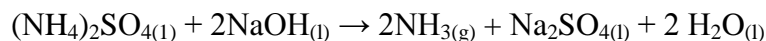
Εικόνα 47: Πριν και μετά τη τιτλοδότηση κατά τη μέθοδο προσδιορισμού του αζώτου των δειγμάτων

Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την χώνευση, την απόσταξη και την τιτλοδότηση παρατίθενται παρακάτω:

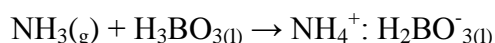
#### Κατά τη χώνευση



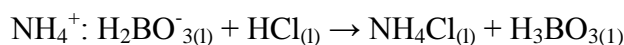
#### Κατά την απόσταξη



#### Κατά την συλλογή του αποστάγματος



#### Κατά την τιτλοδότηση



Η περιεκτικότητα του δείγματος σε ολικό άζωτο σε mg/g υπολογίζεται από παρακάτω τύπο:

$$\text{TN} (\%) = \frac{(V_{\Delta} - V_T) \times c(H^+) \times M_N}{m} \times \frac{100 + \%Y_{\text{E.B.}}}{100} \quad (26)$$

Όπου,

$V_{\Delta}$ : ο όγκος (mL) του θεικού οξέος που χρησιμοποιείται για την τιτλοδότηση του δείγματος,

$V_T$ : ο όγκος (mL) του θεικού οξέος που χρησιμοποιείται για την τιτλοδότηση του τυφλού,

$C(H^+)$ : η συγκέντρωση (mol/L) των  $H^+$  σε θεικό οξύ ίση με 0,05,

$M_N$ : το μοριακό βάρος (g/mol) του αζώτου ίσο με 14,0067,

$m$ : η μάζα (g) του ξηραμένου στερεού δείγματος,

$\% Y_{\text{E.B.}}$ : η υγρασία δείγματος (%) σε ξηρή βάση.

#### **Προσδιορισμός TKN (%)**

Για τον προσδιορισμό των TKN πραγματοποιήθηκε η ίδια διαδικασία με αυτήν του προσδιορισμού του ολικού αζώτου με τη διαφορά ότι σε αυτή τη μέτρηση δεν έγινε προσθήκη σαλικιλικού οξέος στη φάση της επώασης αλλά ούτε και προσθήκη  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  στο τέλος αυτής. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την τιτλοδότηση του αποσταγμένου διαλύματος και τον προσδιορισμό του χρησιμοποιούμενου θεικού οξέος.

Η περιεκτικότητα του δείγματος σε TKN (%) υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\text{TKN (\%)} = \frac{(V_{\Delta} - V_T) \times c(H^+) \times M_N}{m} \times \frac{100 + \%Y_{\text{E.B.}}}{100} \quad (27)$$

όπου,

$V_{\Delta}$ : ο όγκος (mL) του θεικού οξέος που χρησιμοποιείται για την τιτλοδότηση του δείγματος,

$V_T$ : ο όγκος (mL) του θεικού οξέος που χρησιμοποιείται για την τιτλοδότηση του τυφλού,

$C(H^+)$ : η συγκέντρωση (mol/L) των  $H^+$  σε θεικό οξύ ίση με 0,05,

$M_N$ : το μοριακό βάρος (g/mol) του αζώτου ίσο με 14,0067,

$m$ : η μάζα (g) του ξηραμένου στερεού δείγματος,

$\% Y_{\text{E.B.}}$ : η υγρασία δείγματος (%) σε ξηρή βάση.

#### **Προσδιορισμός αμμωνιακών (NH<sub>4</sub>-N) (%)**

Για τον προσδιορισμό των αμμωνιακών προστέθηκαν 5 g δείγματος με 50 ml KCl σε κωνικές φιάλες και τις τοποθετήθηκαν στη συσκευή ανάδευσης για 1 ώρα. Στη συνέχεια, προστέθηκαν σε ειδικές φιάλες, 5 ml από το διάλυμα μαζί με 6 ml οξείδιο του μαγνησίου (MgOH) και 2-3 σταγόνες από τον δείκτη octane. Έπειτα, ακολούθησε η διεργασία της απόσταξης σε κάθε φιάλη χωριστά και τέλος, αφού προστέθηκαν 25 ml βορικού οξέος (H<sub>3</sub>BO<sub>4</sub>) καθώς και 3-4 σταγόνες δείκτη στο αποσταγμένο διάλυμα, πραγματοποιήθηκε τιτλοδότηση με χρήση διαλύματος θεικού οξέος (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 0,1N.

Η περιεκτικότητα του δείγματος σε αμμωνιακά (NH<sub>4</sub>-N) υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$(\text{NH}_4 - \text{N})(\%) = \frac{V_{\Delta} \times c(H^+) \times M_N}{m} \times \frac{100 + \%Y_{\text{E.B.}}}{100} \quad (28)$$

όπου,

$V_{\Delta}$ : ο όγκος (mL) του θεικού οξέος που χρησιμοποιείται για την τιτλοδότηση του δείγματος,

$C(H^+)$ : η συγκέντρωση (mol/L) των  $H^+$  σε θεικό οξύ ίση με 0,05,

$M_N$ : το μοριακό βάρος (g/mol) του αζώτου ίσο με 14,0067,

$m$ : η μάζα (g) του ξηραμένου στερεού δείγματος,

$\% Y_{\text{E.B.}}$ : η υγρασία δείγματος (%) σε ξηρή βάση.

### Προσδιορισμός νιτρικών N-NO<sub>3</sub> (%)

Στον υπολογισμό του ολικού αζώτου κατά Kjeldahl (TN) μετράται το σύνολο του οργανικά δεσμευμένου αζώτου, του αζώτου σε μορφή αμμωνίας NH<sub>3</sub> και του αζώτου σε μορφή αμμωνιακών NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Για να προσδιοριστεί η ποσότητα των νιτρικών NO<sub>3</sub> στο δείγμα χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$N - NO_3 (\%) = TN (\%) - TKN (\%) \quad (29)$$

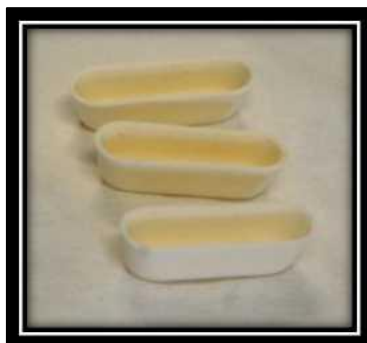
### **4.2.8.4 Προσδιορισμός ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) (%)**

Για τον προσδιορισμό της επί της εκατό περιεκτικότητας (%) ολικού οργανικού άνθρακα TOC χρησιμοποιήθηκε η συσκευή TOC της εταιρείας Shimatzu η οποία λειτουργεί στη Μονάδα Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας (ΜΠΕΤ) του Ε.Μ.Π.. Η ποσότητα ολικού οργανικού άνθρακα είναι ίση με την αρχική ποσότητα του δείγματος εφόσον αφαιρέσουμε τη τελική τέφρα του.



**Εικόνα 48: Συσκευή Shimatzu (TOC)**

Δείγμα στο οποίο είχε προηγηθεί ξήρανση στους 105°C υπέστη λειοτρίβηση με grinder και στη συνέχεια ζυγίστηκαν με ακρίβεια 40mg τα οποία χωρίστηκαν ισόποσα στις ειδικές κάψες από πορσελάνη.



**Εικόνα 49: Πορσελάνινη κάψα**



Στη συνέχεια οι κάψες τοποθετήθηκαν στον ειδικό φούρνο (Solid Sample Module SSM 5000A) όπου το δείγμα θερμαίνεται στους 900°C.



**Εικόνα 50: Φούρνος (Solid Sample Module SSM 5000A)**

Στη θερμοκρασία αυτή έγινε καύση του οργανικού άνθρακα και τα καυσαέρια αυτής οδηγήθηκαν στην κεντρική μονάδα TOCVCSH.



**Εικόνα 51:Κεντρική μονάδα TOCVCSH**

Στη μονάδα αυτή υπολογίστηκε η μάζα του οργανικού άνθρακα (mg) από το CO<sub>2</sub> που παράγεται κατά την καύση. Το (%) ποσοστό του οργανικού άνθρακα δίνεται από τον εξής τύπο:

$$TOC (\%) = \frac{\frac{m_1 + m_2}{M_1 + M_2}}{2} * 100 \quad (30)$$

Όπου:

m<sub>1</sub>: η μετρούμενη μάζα του οργανικού άνθρακα του πρώτου δείγματος (mg)

m<sub>2</sub>: η μετρούμενη μάζα του οργανικού άνθρακα του δεύτερου δείγματος (mg)

M<sub>1</sub>: η αρχική μάζα του πρώτου δείγματος (mg)

M<sub>2</sub>: η αρχική μάζα του δεύτερου δείγματος (mg)

#### 4.2.8.5 Προσδιορισμός πτητικών στερεών VS (%)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του περιεχόμενου οργανικού φορτίου ενός στερεού δείγματος μέσω της καύσης του σε υψηλή θερμοκρασία για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται κλίβανος σε θερμοκρασία λειτουργίας 550<sup>0</sup>C, με χρόνο παραμονής των στερεών τις 4 ώρες. Η εκτίμηση του περιεχόμενου οργανικού φορτίου γίνεται με τον υπολογισμό της απώλειας βάρους, πριν και μετά την εισαγωγή του δείγματος στον κλίβανο. Κατά την καύση πραγματοποιείται οξείδωση των οργανικών ουσιών γι' 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. Η διαφορά βάρους αντιπροσωπεύει κατά βάση το πόσο του οργανικού φορτίου που απομακρύνθηκε από το στερεό.

Δείγμα στο οποίο είχε προηγηθεί ξήρανση στους 105<sup>0</sup>C προκειμένου να είναι εντελώς ξηρό, αλέστηκε με τη βοήθεια μύλου άλεσης. Στη συνέχεια μικρή ποσότητα αυτού (1g) ζυγίστηκε σε πορσελάνινες κάψες με τη χρήση ζυγού ακριβείας.

Το δείγμα στην συνέχεια τοποθετήθηκε σε φούρνο σε θερμοκρασία 550<sup>0</sup>C για 4 ώρες. Αφού ολοκληρώθηκε η καύση της ύλης, οι κάψες τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρα (με silica gel) για χρόνο 1 ώρας τουλάχιστον προκειμένου το υλικό να έρθει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τέλος, η τελική μάζα του δείγματος ζυγίστηκε με τη χρήση ζυγού ακριβείας.



Εικόνα 52: Φούρνος υψηλών θερμοκρασιών



Εικόνα 53: Πορσελάνινες Κάψες

Ο υπολογισμός των πτητικών VS (%) γίνεται μέσω της σχέσης:

$$VS (\%) = \frac{(m_2 - m_3) \times 100}{m_2 - m_1} \quad (31)$$

Όπου,

$m_1$ : η μάζα (g) της κάψας,

$m_2$ : η μάζα (g) της κάψας και του περιεχόμενου δείγματος πριν την εισαγωγή της στον κλίβανο,

$m_3$ : η μάζα (g) της κάψας και του περιεχόμενου υπολείμματος μετά την έξοδο της από τον κλίβανο και τον ξηραντήρα.

#### **4.3. Μέθοδος ανάλυσης κινητικών ξήρανσης του οργανικού αποβλήτου**

Στη παρούσα εργασία εξετάστηκαν 5 διαφορετικές ημι-εμπειρικές εξισώσεις για να διαπιστωθεί ποιο από τα αυτά εκφράζει καλύτερα τα πειραματικά αποτελέσματα της ξήρανσης του υλικού με θερμό ρεύμα αέρα. Τα πέντε κινητικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο κεφάλαιο 3, είναι το Newton/Lewis, το Two term, το Modified Henderson and Pabis, το Page και το Midilli et al.

Από τις πειραματικές μετρήσεις της μάζας του υλικού στους συγκεκριμένους χρόνους αφαιρέθηκε η μάζα του απόβαρου και απέμεινε η καθαρή μάζα του μίγματος στην συνέχεια από την πειραματική ανάλυση προσδιορισμού της υγρασίας προσδιορίστηκε η μάζα του ξηρού υλικού. Ο υπολογισμός της υγρασίας  $X$  για χρόνο  $t$  υπολογίστηκε αφαιρώντας από την καθαρή μάζα του μίγματος τη μάζα του ξηρού υλικού και διαιρώντας με τη μάζα του ξηρού υλικού. Στην συνέχεια προσδιορίστηκαν οι σταθερές  $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4$  των μεταβλητών της ξήρανσης  $u$  (m/s),  $d$  (cm),  $a_w$  (%) και

T(°C) με την προσαρμογή των κινητικών μοντέλων (7), (9-12) , με βάση την συνάρτηση προσδιορισμού της σταθεράς ξήρανσης (8) σε όλα τα πειραματικά σημεία. Αυτό πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του συστήματος επίλυσης (Solver) του λογισμικού Microsoft Office Excel 2010 με τη χρήση του οποίου επετεύχθη η υπολογιστική ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών πειραματικής και της τιμής των μοντέλων (υπολογιζόμενης) δηλαδή το άθροισμα:

$$S = \sum_{i=1}^N (X_{db} - X_{calc})^2 \quad (32)$$

Όπου,  $X_{db}$ : Η πειραματική τιμή της υγρασίας

$X_{cal}$ : Η υπολογισμένη υγρασία από τα μοντέλα ξήρανσης

$N$  : Το πλήθος των πειραματικών μετρήσεων

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE - Root Mean Square Error) μεταξύ των πειραματικών τιμών υγρασίας και των τιμών των μοντέλων ξήρανσης για κάθε πείραμα. Το RMSE υπολογίστηκε έτσι ώστε να αποδειχτεί σε πιο μοντέλο ανταποκρίνονται καλύτερα οι πειραματικές τιμές της υγρασίας.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{db} - X_{calc})^2}{N}} \quad (33)$$

Όπου, RMSE: Ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος

$X_{db}$  : Η πειραματική τιμή της υγρασίας

$X_{cal}$  : Η υπολογισμένη υγρασία από τα μοντέλα ξήρανσης

$N$  : Το πλήθος των πειραματικών μετρήσεων

Οι πειραματικές τιμές υγρασίας  $X_{db}$  των δειγμάτων αλλά και η μάζα του καθαρού δείγματος χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των καμπύλων ξήρανσης που παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο. Οι καμπύλες αυτές υποδουλώνουν την επίδραση των πειραματικών συνθηκών (θερμοκρασία, ταχύτητα, υγρασία αέρα ξήρανσης και το πάχος του υποστρώματος) στην χρονική πορεία της ξήρανσής.

## **5. Πειραματικά Αποτελέσματα-Συζήτηση και Σύγκριση Αποτελεσμάτων**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών όπως αυτά προέκυψαν σε όλη τη διάρκεια των πειραματικών αναλύσεων. Στην συνέχεια παρουσιάζονται όλες οι παράμετροι που μελετήθηκαν μαζί με τα αντίστοιχα διαγράμματα και για τους τέσσερεις κύκλους πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν.

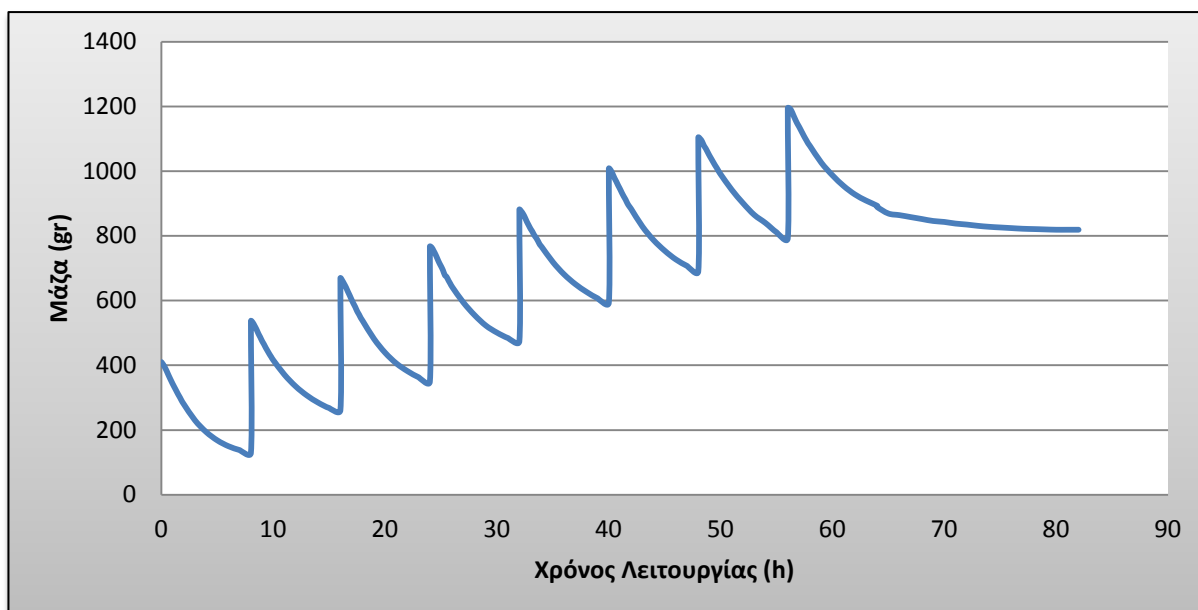
Επιπλέον πραγματοποιείται άμεση σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων του εμπορικού συστήματος ξήρανσης **Loofen LF-07** που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα εργασία με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του συστήματος οικιακής ξήρανσης **DRYWASTE** το οποίο αναπτύχθηκε και κατασκευάστηκε στη Μονάδα Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας του ΕΜΠ στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος LIFE+ 08 ENV/GR/000566. Για τα δύο συστήματα χρησιμοποιήθηκε η ίδια αρχική σύσταση υποστρώματος, ενώ τα πειράματα και οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν κάτω από τις ίδιες συνθήκες ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων των 2 συσκευών ξήρανσης.

### **5.1. 1<sup>ος</sup> κύκλος ξήρανσης (μονομελής οικογένεια)**

Στην υποενότητα αυτή παρατίθενται οι υπολογισμοί και αποτελέσματα του 1<sup>ου</sup> κύκλου ξήρανσης ο οποίος αφορά σε προεπεξεργασία ποσότητας διατροφικών απορριμμάτων 1μελους οικογένειας. Η ποσότητα που απορρίπτονταν σε ημερήσια βάση ήταν 410 gr νωπού υλικού το οποίο ξηραίνονταν για 8 ώρες ημερησίως. Η διαδικασία επαναλήφθηκε μέχρι την πλήρωση του κάδου απόρριψης της συσκευής οπότε και σταμάτησε η προσθήκη φρέσκου υλικού, ενώ το εναπομείναν υλικό αφέθηκε για επιπλέον ξήρανση μέχρι τη διακοπή της μείωσης της μάζας του.

#### **5.1.1 Προσδιορισμός μεταβολής μάζας δείγματος**

Με σκοπό να προσδιοριστεί η μεταβολή της μάζας του δείγματος πραγματοποιήθηκαν τακτικές ημερήσιες ζυγίσεις του περιεχομένου του κάδου απόρριψης ανά 10 λεπτά για τις πρώτες 2 ώρες λειτουργίας και ανά 1 ώρα για τις επόμενες 6 ώρες λειτουργίας. Μετά την πλήρωση του κάδου και τη διακοπή προσθήκης φρέσκου νωπού υλικού οι ζυγίσεις πραγματοποιούνταν μόνο ανά μια ώρα. Να επισημανθεί επίσης ότι ο όρος μάζα νωπού αναφέρεται στη μάζα του υλικού πριν τη ξήρανση κάθε οκταώρου και ο όρος μάζα ξηρού μετά τη ξήρανση κάθε οκταώρου. Με βάση τις μετρήσεις μάζας προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα που απεικονίζει την μεταβολή της μάζας του υλικού εντός του οικιακού συστήματος ξήρανσης Loofen καθ' όλη τη διάρκεια του 1<sup>ου</sup> κύκλου ξήρανσης.



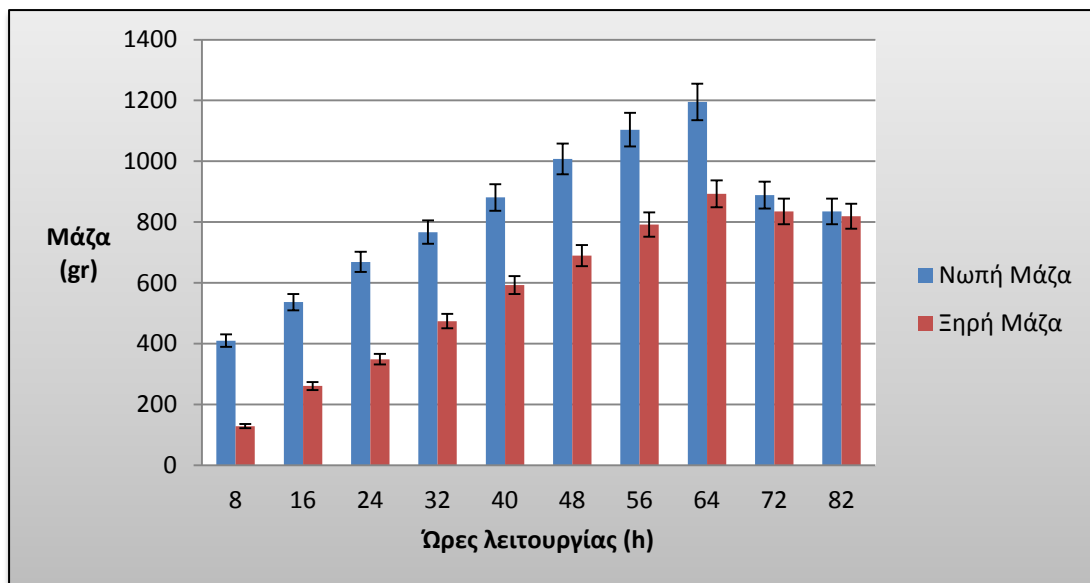
Διάγραμμα 4: Συνολική πορεία μεταβολής μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας (1ος κύκλος)

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται: η ποσότητα της νωπής μάζας που τοποθετούνταν ανά ημέρα στο εσωτερικό της συσκευής, η ποσότητα της ξηρής μάζας που παρέμενε στο εσωτερικό της συσκευής μετά το πέρας των 8 ωρών λειτουργίας και τα αποτελέσματα μείωσης της μάζας του οργανικού υλικού το οποίο επεξεργάστηκε όλη τη διάρκεια του πρώτου κύκλου με τη χρήση του συστήματος οικιακής ξήρανσης Loofen.

Πίνακας 8: Καταγραφή μεταβολής μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής(1ος κύκλος)

Ώρες Ξήρανσης	Μάζα Νωπού(gr)	Μάζα Ξηρού(gr)	Μείωση Μάζας
8	410	129	281
16	537	261	276
24	669	349	320
32	767	474	293
40	881	593	288
48	1008	690	318
56	1104	792	312
64	1195	893	302
72	889	835	54
82	835	819	16

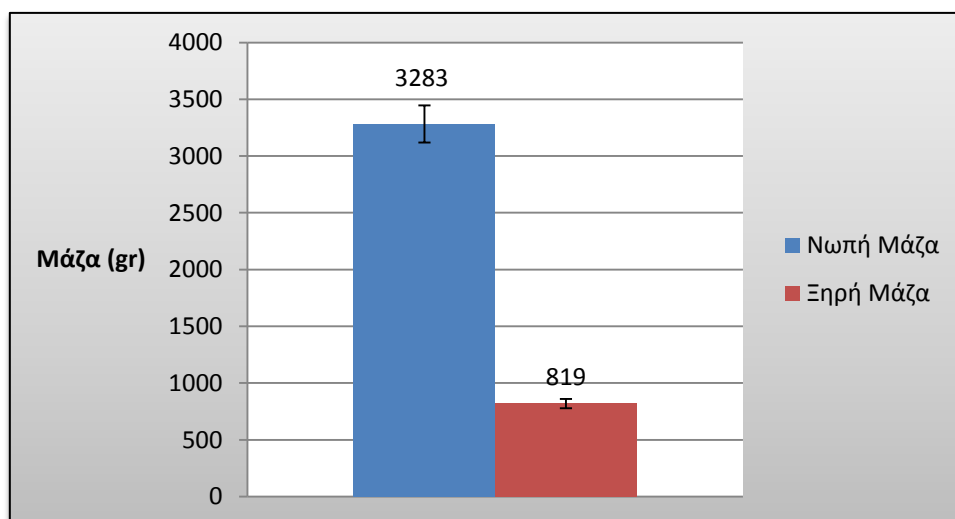
Στο παρακάτω ραβδόγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή της μάζας του δείγματος κατά τη διάρκεια του 1<sup>ου</sup> κύκλου ξήρανσης ανά 8 ώρες.



**Διάγραμμα 5: Μεταβολή μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (1ος κύκλος)**

Στο παραπάνω ραβδόγραμμα, παρατηρείται ότι η μάζα του νωπού υλικού αυξάνεται μέχρι και το 8<sup>ο</sup> οκτώωρο. Αυτό συμβαίνει διότι εκείνη τη χρονική στιγμή στο καλάθι στον εσωτερικό χώρο του ξηραντήρα τοποθετούνταν υλικό προκειμένου να επεξεργαστεί με τη χρήση της συσκευής οικιακή ξήρανση. Σε εκείνο το σημείο, η συσκευή έφτασε σε πλήρωση και δεν πραγματοποιήθηκε περαιτέρω προσθήκη νωπού υλικού. Η διεργασία της ξήρανσης έλαβε τέλος όταν επιτεύχθηκε σχετική σταθεροποίηση του ξηρού υλικού σε 18 ώρες μετά την πλήρωση της συσκευής.

Στο ραβδόγραμμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται η συνολική ποσότητα νωπού υλικού που τοποθετήθηκε στο εσωτερικό της συσκευής οικιακής ξήρανσης σε όλη τη διάρκεια του πρώτου κύκλου.



**Διάγραμμα 6: Συνολική μεταβολή μάζας (1ος κύκλος)**

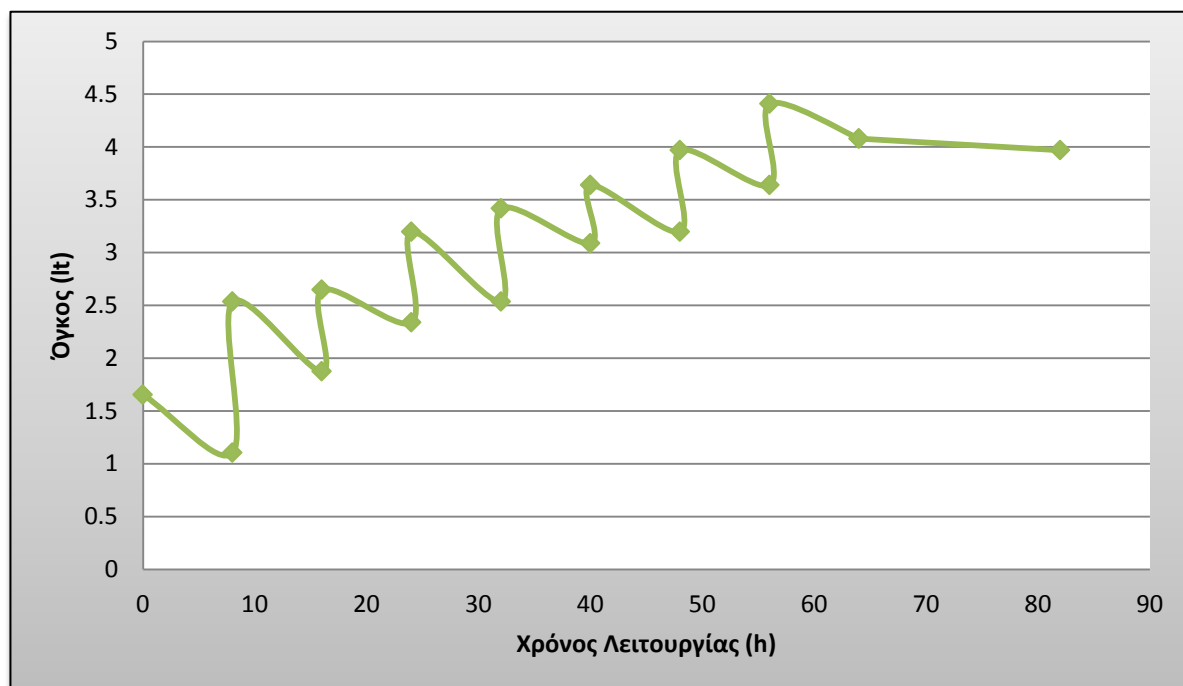
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι το **ποσοστό μείωσης μάζας του 1<sup>ου</sup> κύκλου ξήρανσης** είναι:

$$\frac{(\text{Συνολική νωπή μάζα} - \text{Συνολική ξηρή μάζα})}{\text{Συνολική νωπή μάζα}} \times 100 = 75,05\%$$

Παρατηρείται ότι το ποσοστό μείωσης μάζας είναι αρκετά υψηλό γεγονός που επιβεβαιώνει την αποτελεσματικότητα της διεργασίας της οικιακής ξήρανσης με χρήση του συστήματος Loofen.

### 5.1.2 Προσδιορισμός μεταβολής όγκου δείγματος

Με σκοπό να προσδιοριστεί η μεταβολή του όγκου του δείγματος πραγματοποιήθηκαν ημερήσιες μετρήσεις του κενού χώρου του κάδου απόρριψης πριν την έναρξη της ξήρανσης και μετά το πέρας της. Με βάση τις μετρήσεις όγκου προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα που απεικονίζει την μεταβολή του όγκου του υλικού εντός του οικιακού συστήματος ξήρανσης Loofen καθ' όλη τη διάρκεια του 1<sup>ου</sup> κύκλου ξήρανσης.



**Διάγραμμα 7:** Συνολική πορεία μεταβολής όγκου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας (1<sup>ος</sup> κύκλος)

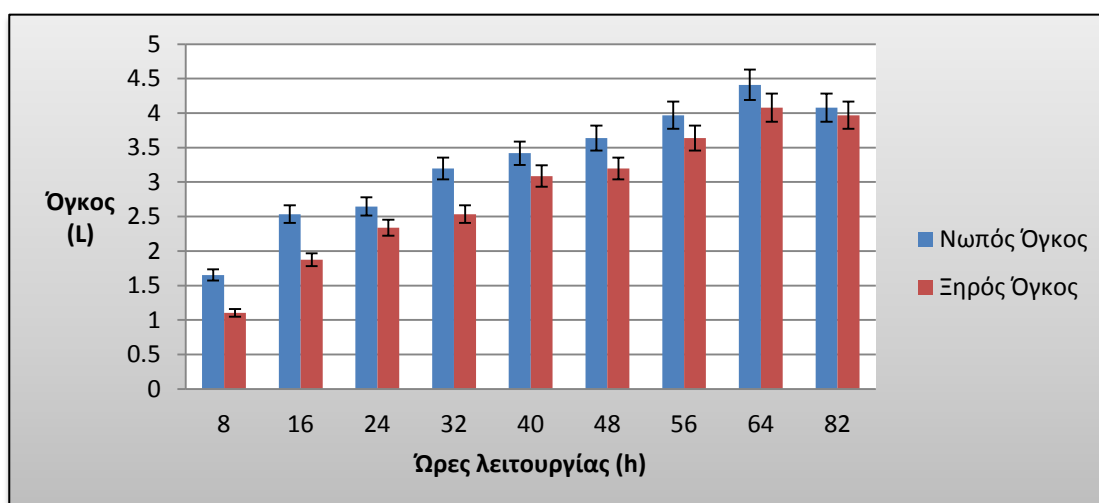
Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μείωσης του όγκου των διατροφικών απορριμμάτων όπως αυτά προέκυψαν σε όλη τη διάρκεια του πρώτου κύκλου.



**Πίνακας 9: Καταγραφή μεταβολής όγκου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής(1ος κύκλος)**

Ώρες Λειτουργίας	Όγκος Νωπού (L)	Όγκος Ξηρού (L)	Μείωση Όγκου
8	1.65375	1.1025	<b>0.55125</b>
16	2.53575	1.87425	<b>0.6615</b>
24	2.646	2.3373	<b>0.3087</b>
32	3.19725	2.53575	<b>0.6615</b>
40	3.41775	3.087	<b>0.33075</b>
48	3.63825	3.19725	<b>0.441</b>
56	3.969	3.63825	<b>0.33075</b>
64	4.41	4.07925	<b>0.33075</b>
82	4.07925	3.969	<b>0.11025</b>

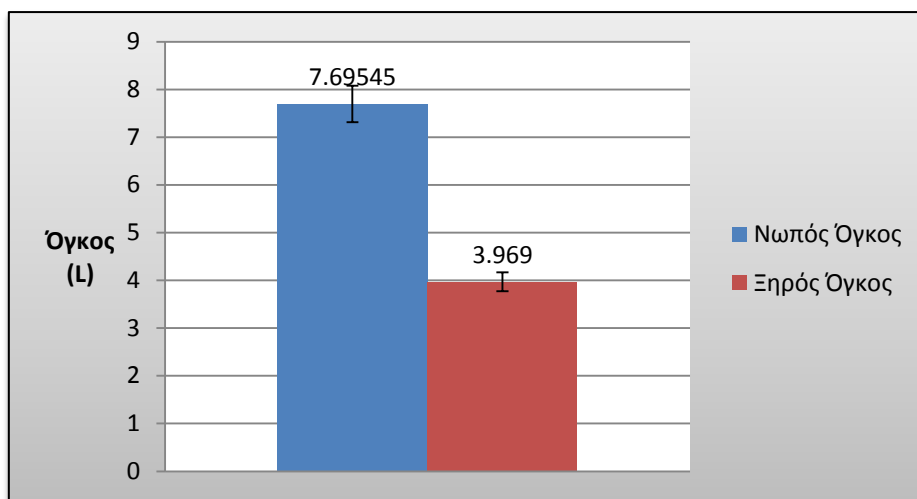
Στο παρακάτω ραβδόγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή του όγκου του δείγματος κατά τη διάρκεια του 1<sup>ου</sup> κύκλου ξήρανσης.



**Διάγραμμα 8: Μεταβολή όγκου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (1ος κύκλος)**

Οι μπλε στήλες απεικονίζουν τον όγκο του νωπού δείγματος και οι κόκκινες τον όγκο του ξηρού. Παρατηρείται ότι ο όγκος του δείγματος μειώνεται σταθερά κατά τη διάρκεια κάθε οκταώρου. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν και το αναμενόμενο εφόσον η διεργασία της ξήρανσης αφαιρεί από το δείγμα την περιεχόμενη σε αυτό υγρασία. Συνεπώς, ο όγκος του δείγματος, όπως και η μάζα του, συνεχώς μειώνεται.

Στο ραβδόγραμμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται ο συνολικός όγκος νωπού υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την ολοκλήρωση των πειραματικών μετρήσεων και ο συνολικός όγκος ξηρού υλικού που παρέμεινε στο εσωτερικό του ξηραντήρα.



Διάγραμμα 9: Συνολική μεταβολή όγκου (1ος κύκλος)

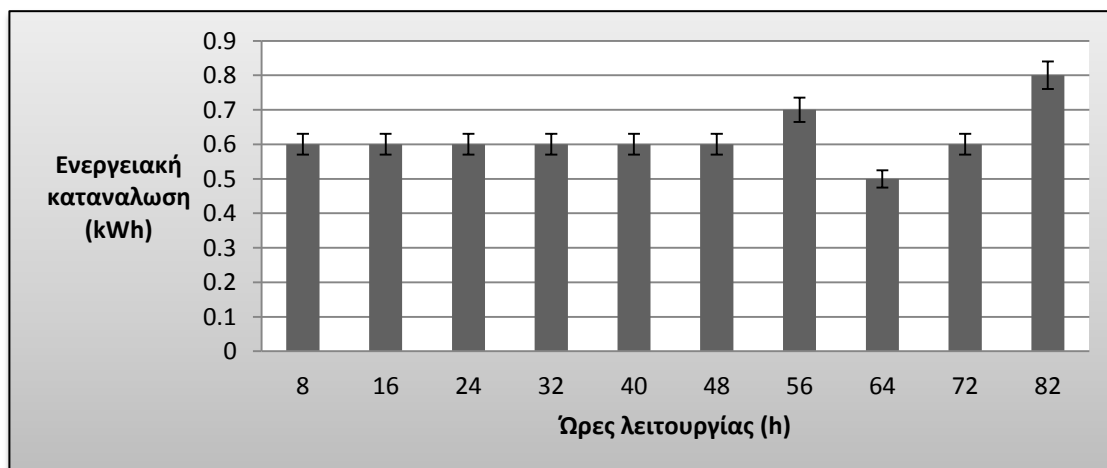
Προκύπτει ότι το **ποσοστό μείωσης όγκου** του 1<sup>ου</sup> κύκλου ξήρανσης είναι:

$$\frac{(\text{Συνολικός νωπός όγκος} - \text{Συνολικός ξηρός όγκος})}{\text{Συνολικός νωπός όγκος}} \times 100 = \mathbf{48,42\%}$$

Θεωρώντας ότι μια μέση Ελληνική οικογένεια χρησιμοποιεί σακούλα απορριμμάτων χωρητικότητας 23 L προκειμένου να συλλέξει τα απορρίμματά της και υποθέτοντας ότι το παραγόμενο ξηρό υλικό είναι όγκου 4 L ανά 8 μέρες για μονομελή οικογένεια όπως προέκυψε από τον πειραματικό κύκλο, η σακούλα χρειάζεται 46 ημέρες για να γεμίσει προκειμένου να συλλεχθεί καθώς το ξηρό υλικό είναι άοσμο και δεν αποσυντίθεται με το πέρασμα του χρόνου λαμβάνοντας υπόψη τη χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία όπως παρουσιάζεται στο κεφ. 5.1.4 . Η δυνατότητα παρατεταμένης προσωρινής αποθήκευσης των ξηραμένων αποβλήτων τροφών στα νοικοκυριά συνεπάγεται πολλαπλά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη στη διαχείριση των οικιακών απορριμμάτων λόγω της μείωσης της απαιτούμενης συχνότητας στη συλλογή και μεταφορά από την υπηρεσία του εκάστοτε Δήμου.

### 5.1.3 Προσδιορισμός ενεργειακής κατανάλωσης συσκευής οικιακής ξήρανσης

Στο γράφημα που ακολουθεί, παρουσιάζεται η καταγραφή της ενεργειακής κατανάλωσης της συσκευής σε όλη τη διάρκεια του 1ου κύκλου των πειραμάτων.



Διάγραμμα 10: Μεταβολή ενεργειακής κατανάλωσης 1ου κύκλου

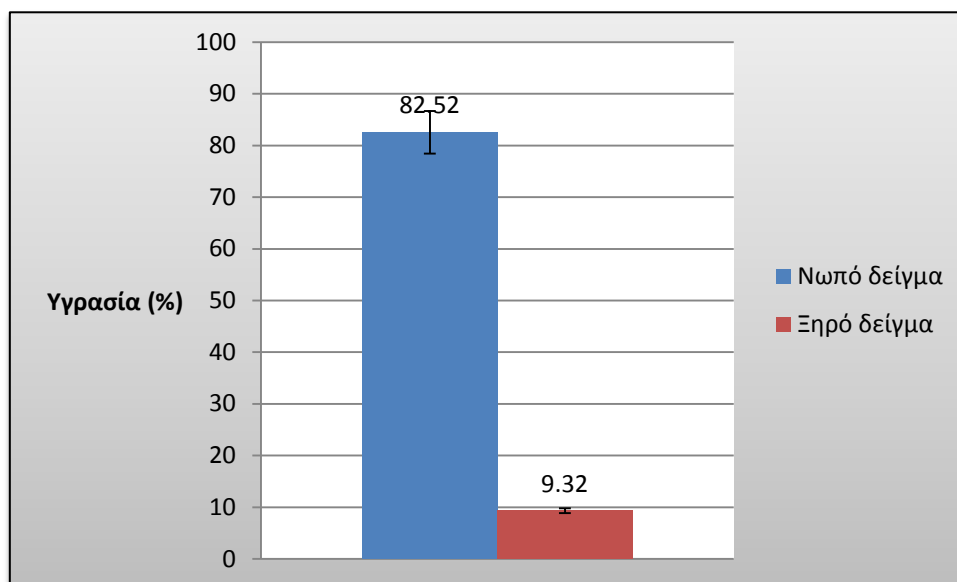
Η συνολική ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος Loofen σε όλη τη διάρκεια του 1<sup>ου</sup> κύκλου των εργαστηριακών δοκιμών, βρέθηκε ίση με **6.2 kWh**. Δεδομένου ότι η συνολική μάζα δείγματος που καταναλώθηκε είναι ίση με 3283 g, προκύπτει ότι:

$$\text{Συνολική Ενεργειακή Κατανάλωση} = 1,888 \text{ kWh/kg}$$

Ενδεικτικά, το ετήσιο κόστος διαχείρισης των αποβλήτων τροφών σε μονομελή οικογένεια με τη χρήση του εξεταζόμενου οικιακού ξηραντήρα ανέρχεται σε 20,1 ευρώ/έτος θέτοντας 0,071 ευρώ /KWh.

#### 5.1.4 Προσδιορισμός μεταβολής υγρασίας

Η μέση τιμή της υγρασίας του νωπού δείγματος που χρησιμοποιήθηκε υπολογίστηκε ίση με 82,52 % ενώ η υγρασία του ξηρού δείγματος στο τέλος της διεργασίας ίση με 9.32 %. Η διαφορά των δύο τιμών απεικονίζεται στο ραβδόγραμμα που ακολουθεί:



Διάγραμμα 11: Συνολική μεταβολή υγρασίας 1ου κύκλου

Επομένως από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι το **ποσοστό μείωσης υγρασίας** του 1<sup>ου</sup> κύκλου ξήρανσης υπολογίζεται:

$$\text{Συνολική υγρασία νωπού} - \text{Συνολική υγρασία ξηρού} = 73,2\%$$

Παρατηρείται ότι το ποσοστό μείωσης της υγρασίας είναι αρκετά ικανοποιητικό δεδομένου ότι μέσω της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήσαμε αφαιρέσαμε σχεδόν ολόκληρη την ποσότητα της περιεχόμενης υγρασίας γεγονός που επιβεβαιώνει την αποτελεσματικότητα της διεργασίας ξήρανσης.

#### 5.1.5 Προσδιορισμός φυσικοχημικών χαρακτηριστικών τελικού ξηρού υλικού

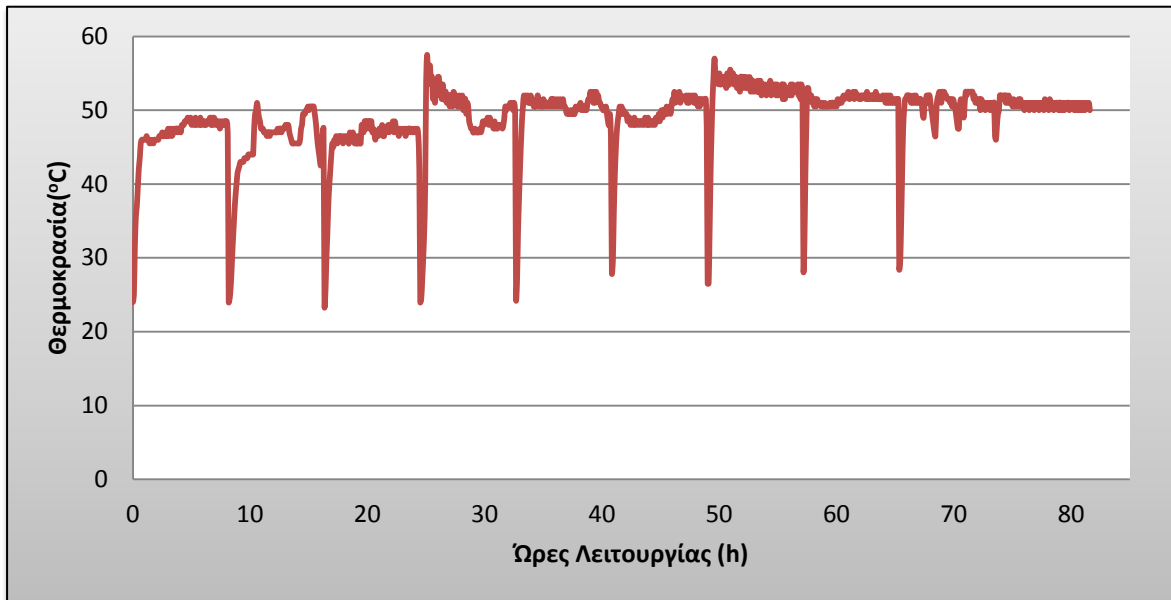
Στον παρακάτω Πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα των φυσικοχημικών μεγεθών όπως αυτά προσδιορίστηκαν μέσω της πειραματικής διαδικασίας κατά τον 1<sup>ο</sup> κύκλο πειραμάτων για μονομελή οικογένεια.

**Πίνακας 10: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τελικού ξηρού υλικού 1ου κύκλου**

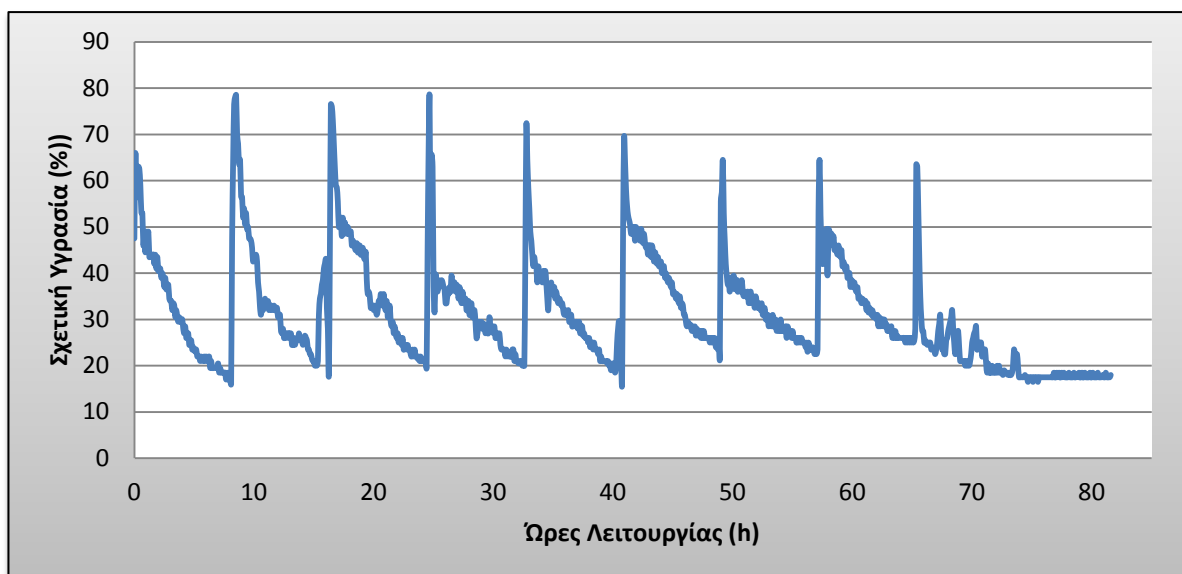
Αποτελέσματα	
TN (%)	2.65
TKN (%)	2.63
NH <sub>4</sub> -N (%)	2.88
N-NO <sub>3</sub> (%)	0.02
TOC (%)	48.23
VS (%)	90.96
pH	5.23
Αγωγιμότητα (mS)	4.75

#### 5.1.6 Προσδιορισμός συνθηκών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας

Κατά τη διάρκεια του πειραματικού κύκλου της ξήρανσης έγινε καταγραφή των συνθηκών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας εντός του συστήματος οικιακής ξήρανσης με χρήση ειδικού αισθητήρα, ο οποίος πραγματοποιούσε μετρήσεις κάθε 5 λεπτά. Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται τα δεδομένα των συνθηκών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας εντός του συστήματος οικιακής ξήρανσης καθ'όλη τη διάρκεια του 1<sup>ου</sup> πειραματικού κύκλου.



**Διάγραμμα 12: Μεταβολή θερμοκρασίας εντός της συσκευής κατά τη λειτουργία της (1ος κύκλος)**



**Διάγραμμα 13: Μεταβολή σχετικής υγρασίας εντός της συσκευής κατά τη λειτουργία της (1ος κύκλος)**

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι η θερμοκρασία εντός του συστήματος βρίσκεται σε χαμηλές τιμές κατά την έναρξη κάθε οκταώρου λειτουργίας του συστήματος και σταθεροποιείται κοντά στους 50 °C κατά την ομαλή του λειτουργία υπό την επίδραση του θερμού ρεύματος αέρα θερμοκρασίας περίπου 55 °C. Συνολικά η θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του κύκλου κυμάνθηκε μεταξύ 23,5 °C και 57,5 °C με μέση τιμή τους 49 °C. Αντίστοιχα, η σχετική υγρασία βρίσκεται σε υψηλά αρχικά επίπεδα κοντά στο 70% κατά την έναρξη κάθε οκταώρου λειτουργίας και την προσθήκη φρέσκου νωπού υλικού και σταδιακά μειώνεται κοντά στο 20% προς το τέλος της λειτουργίας της. Συνολικά η σχετική υγρασία κατά τη διάρκεια του κύκλου κυμάνθηκε μεταξύ 16% και 78,5% με μέση τιμή το 31%.

## **5.2. 2<sup>ος</sup> κύκλος ξήρανσης (διμελής οικογένεια)**

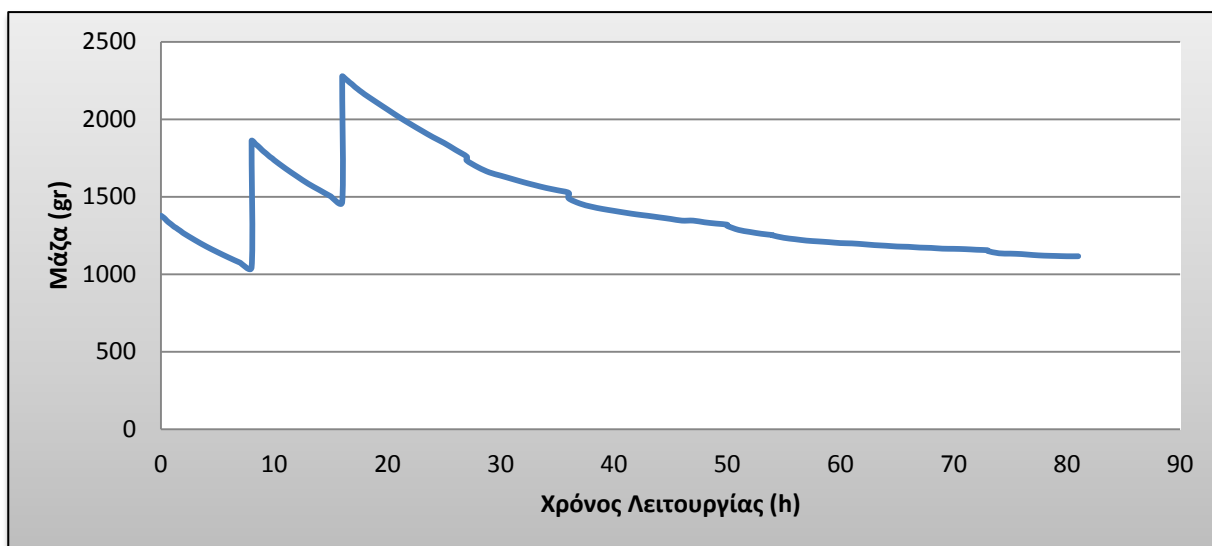
Στην υποενότητα αυτή παρατίθενται οι υπολογισμοί και αποτελέσματα του 2<sup>ου</sup> κύκλου ξήρανσης ο οποίος αφορά σε προεπεξεργασία ποσότητας διατροφικών απορριμμάτων 2μελους οικογένειας. Η ποσότητα που απορρίπτονταν σε ημερήσια βάση ήταν 820 gr νωπού υλικού το οποίο ξηραίνονταν για 8 ώρες ημερησίως. Η διαδικασία επαναλήφθηκε μέχρι την πλήρωση του κάδου απόρριψης της συσκευής οπότε και σταμάτησε η προσθήκη φρέσκου υλικού, ενώ το εναπομείναν υλικό αφέθηκε για επιπλέον ξήρανση μέχρι τη διακοπή της μείωσης της μάζας του.

### **5.2.1 Προσδιορισμός μεταβολής μάζας δείγματος**

Με σκοπό να προσδιοριστεί η μεταβολή της μάζας του δείγματος πραγματοποιήθηκαν τακτικές ημερήσιες ζυγίσεις του περιεχομένου του κάδου απόρριψης ανά 10 λεπτά για τις πρώτες 2 ώρες λειτουργίας και ανά 1 ώρα για τις επόμενες 6 ώρες λειτουργίας. Μετά την πλήρωση του κάδου και τη διακοπή

προσθήκης φρέσκου νωπού υλικού οι ζυγίσεις πραγματοποιούνταν μόνο ανά μια ώρα.

Με βάση τις μετρήσεις μάζας προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα που απεικονίζει την μεταβολή της μάζας του υλικού εντός του οικιακού συστήματος ξήρανσης Loofen καθ' όλη τη διάρκεια του 2<sup>ου</sup> κύκλου ξήρανσης.



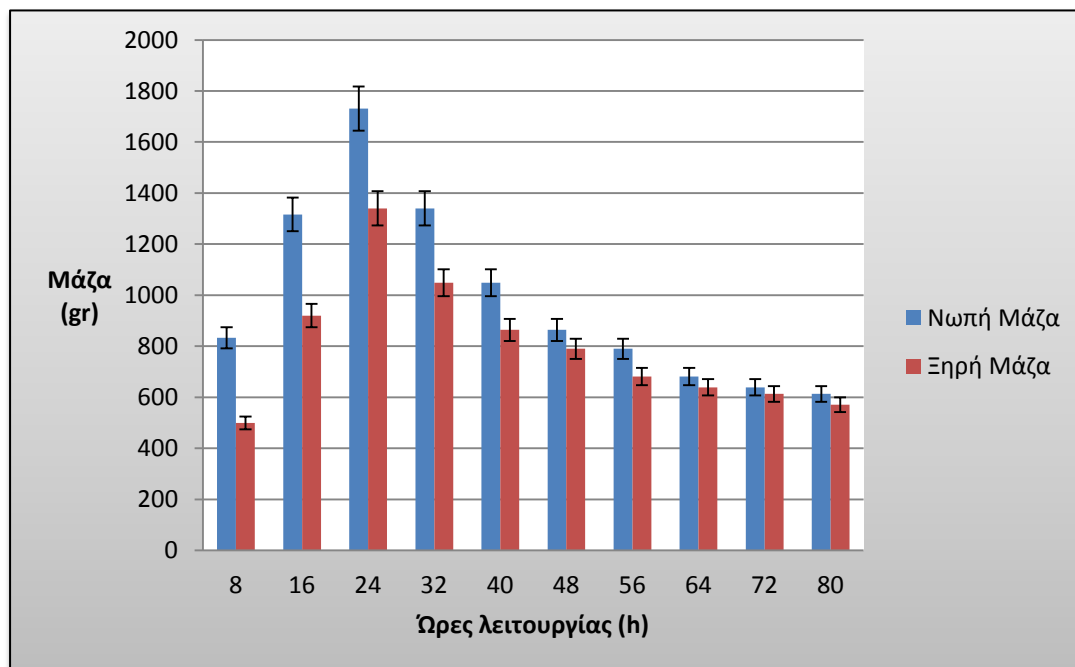
**Διάγραμμα 14:** Συνολική πορεία μεταβολής μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας (2ος κύκλος)

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται: η ποσότητα της νωπής μάζας που τοποθετούνταν ανά ημέρα στο εσωτερικό της συσκευής, η ποσότητα της ξηρής μάζας που παρέμενε στο εσωτερικό της συσκευής μετά το πέρας των 8 ωρών λειτουργίας και τα αποτελέσματα μείωσης της μάζας του οργανικού υλικού το οποίο επεξεργάστηκε όλη τη διάρκεια του 2<sup>ου</sup> κύκλου με τη χρήση του συστήματος οικιακής ξήρανσης Loofen.

**Πίνακας 11:** Καταγραφή μεταβολής μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (2ος κύκλος)

Ώρες Ξήρανσης	Μάζα Νωπού(gr)	Μάζα Ξηρού(gr)	Μείωση Μάζας
8	833	499	334
16	1316	920	396
24	1731	1340	391
32	1340	1049	291
40	1049	864	185
48	864	790	74
56	790	681	109
64	681	639	42
72	639	613	26
80	613	571	42

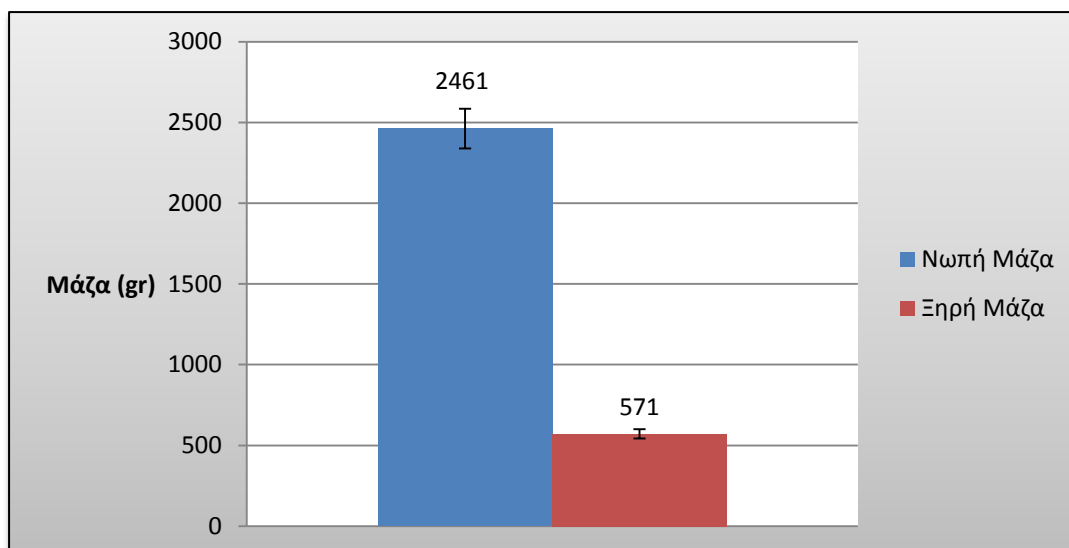
Στο παρακάτω ραβδόγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή της μάζας του δείγματος κατά τη διάρκεια του 2<sup>ου</sup> κύκλου ξήρανσης ανά 8 ώρες.



**Διάγραμμα 15: Μεταβολή μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (2ος κύκλος)**

Στο παραπάνω ραβδόγραμμα, παρατηρείται ότι η μάζα του νωπού υλικού αυξάνεται μέχρι και το 3<sup>ο</sup> οκτάωρο. Αυτό συμβαίνει διότι εκείνη τη χρονική στιγμή στο καλάθι στον εσωτερικό χώρο του ξηραντήρα τοποθετούνταν υλικό προκειμένου να επεξεργαστεί με τη χρήση της συσκευής οικιακή ξήρανσης. Σε εκείνο το σημείο, η συσκευή έφτασε σε πλήρωση και δεν πραγματοποιήθηκε περαιτέρω προσθήκη νωπού υλικού. Η διεργασία της ξήρανσης έλαβε τέλος όταν επιτεύχθηκε σχετική σταθεροποίηση του ξηρού υλικού σε 56 ώρες μετά την πλήρωση της συσκευής. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο ποσοστό υγρασίας που περιείχε το αρχικό νωπό υλικό, το οποίο δεν ξηράνθηκε επαρκώς κατά το πρώτο οκτάωρο και παρέμεινε εγκλωβισμένο κάτω από το φρέσκο νωπό υλικό που προστέθηκε.

Στο ραβδόγραμμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται η συνολική ποσότητα νωπού υλικού που τοποθετήθηκε στο εσωτερικό της συσκευής οικιακής ξήρανσης σε όλη τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου.



Διάγραμμα 16: Συνολική μεταβολή μάζας (2ος κύκλος)

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι το **ποσοστό μείωσης μάζας του 2<sup>ου</sup> κύκλου ξήρανσης** είναι:

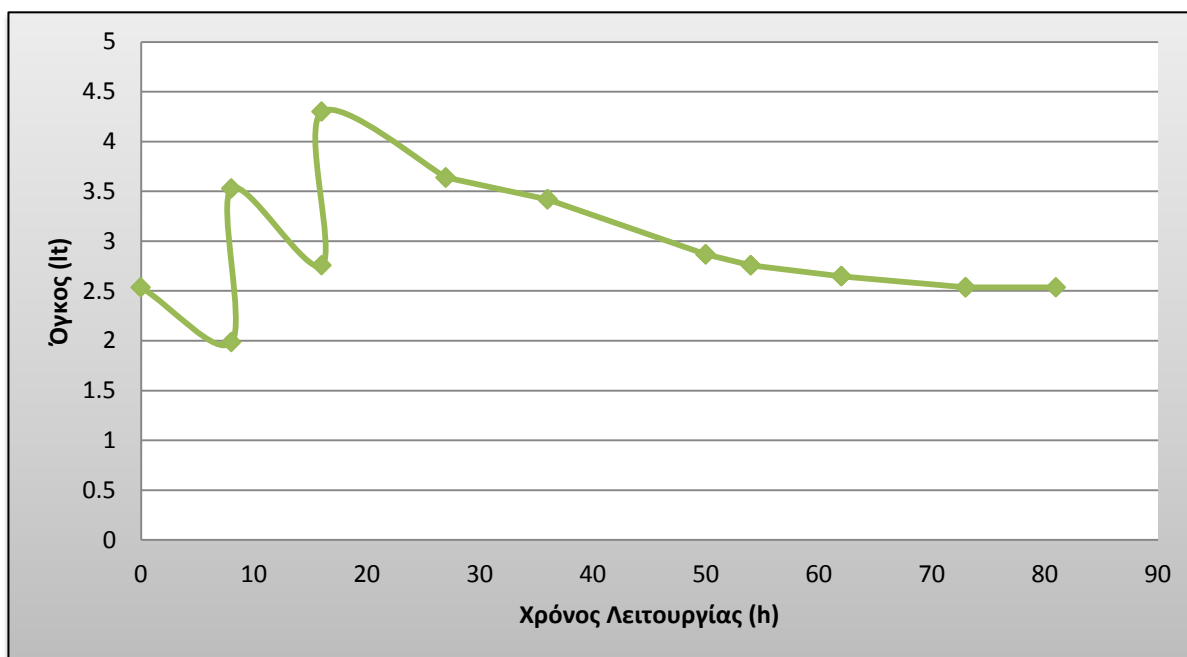
$$\frac{(\text{Συνολική νωπή μάζα} - \text{Συνολική ξηρή μάζα})}{\text{Συνολική νωπή μάζα}} \times 100 = 76,8\%$$

Παρατηρείται ότι το ποσοστό μείωσης μάζας είναι αρκετά υψηλό γεγονός που επιβεβαιώνει την αποτελεσματικότητα της διεργασίας της οικιακής ξήρανσης με χρήση του συστήματος Loofen.

### 5.2.2 Προσδιορισμός μεταβολής όγκου δείγματος

Με σκοπό να προσδιοριστεί η μεταβολή του όγκου του δείγματος πραγματοποιήθηκαν ημερήσιες μετρήσεις του κενού χώρου του κάδου απόρριψης πριν την έναρξη της ξήρανσης και μετά το πέρας της. Με βάση τις μετρήσεις όγκου προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα που απεικονίζει την μεταβολή του όγκου του υλικού εντός του οικιακού συστήματος ξήρανσης Loofen καθ'όλη τη διάρκεια του 2<sup>ου</sup> κύκλου ξήρανσης.





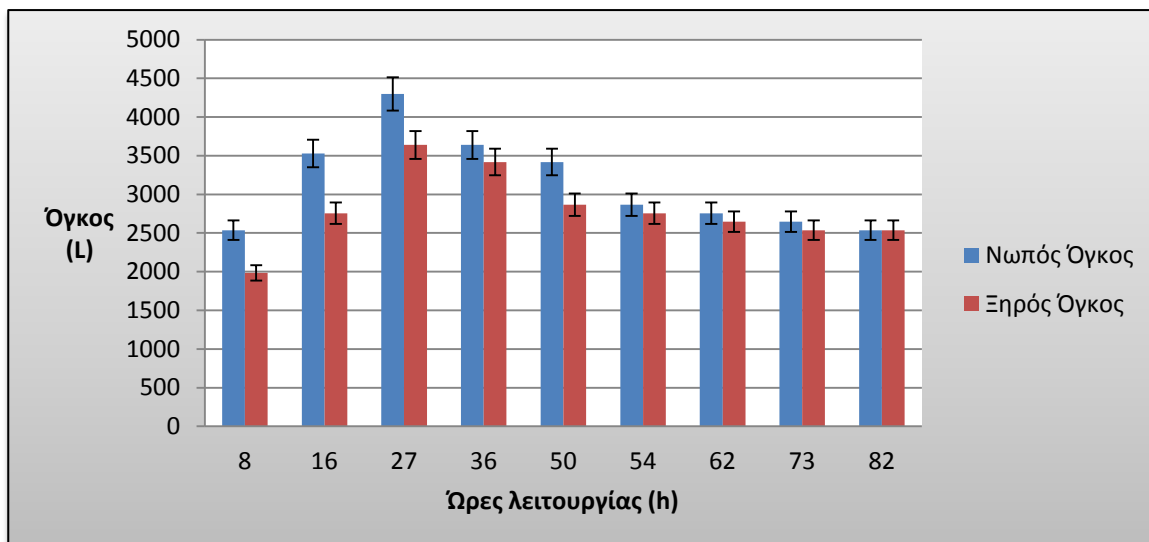
**Διάγραμμα 17:** Συνολική πορεία μεταβολής όγκου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας (2<sup>ος</sup> κύκλος)

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μείωσης του όγκου των διατροφικών απορριμμάτων όπως αυτά προέκυψαν σε όλη τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου.

**Πίνακας 12:** Καταγραφή μεταβολής όγκου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (2ος κύκλος)

Ώρες Λειτουργίας	Όγκος Νωπού (L)	Όγκος Ξηρού (L)	Μείωση Όγκου
8	2535.75	1984.5	551.25
16	3528	2756.25	771.75
27	4299.75	3638.25	661.5
36	3638.25	3417.75	220.5
50	3417.75	2866.5	551.25
54	2866.5	2756.25	110.25
62	2756.25	2646	110.25
73	2646	2535.75	110.25
82	2535.75	2535.75	0

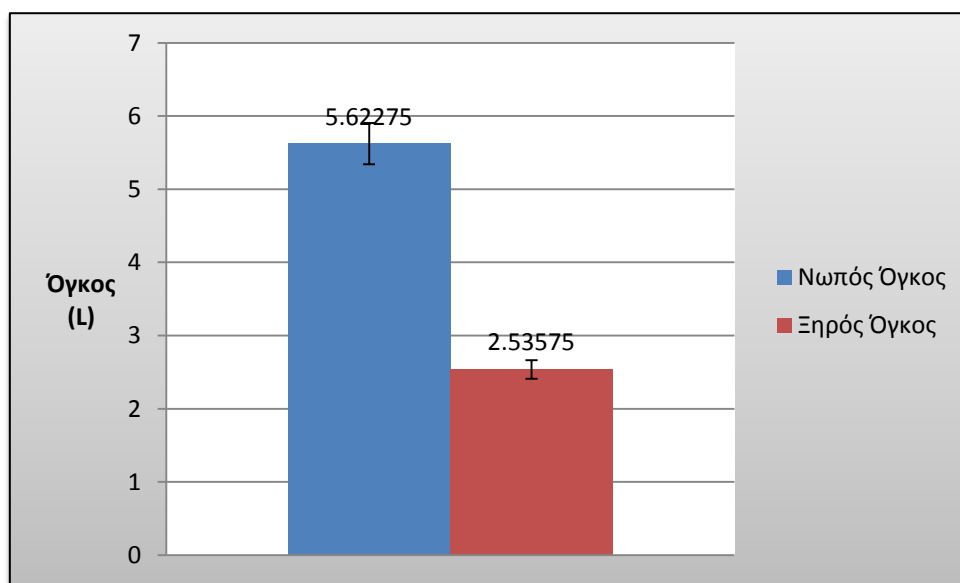
Στο παρακάτω ραβδόγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή του όγκου του δείγματος κατά τη διάρκεια του 2<sup>ου</sup> κύκλου ξήρανσης.



**Διάγραμμα 18: Μεταβολή όγκου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (2ος κύκλος)**

Οι μπλε στήλες απεικονίζουν τον όγκο του νωπού δείγματος και οι κόκκινες τον όγκο του ξηρού. Παρατηρείται ότι ο όγκος του δείγματος μειώνεται σταθερά κατά τη διάρκεια κάθε οκταώρου. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν και το αναμενόμενο εφόσον η διεργασία της ξήρανσης αφαιρεί από το δείγμα την περιεχόμενη σε αυτό υγρασία. Συνεπώς, ο όγκος του δείγματος, όπως και η μάζα του, συνεχώς μειώνεται.

Στο ραβδόγραμμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται ο συνολικός όγκος νωπού υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την ολοκλήρωση των πειραματικών μετρήσεων και ο συνολικός όγκος ξηρού υλικού που παρέμεινε στο εσωτερικό του ξηραντήρα.



**Διάγραμμα 19: Συνολική μεταβολή όγκου (2ος κύκλος)**

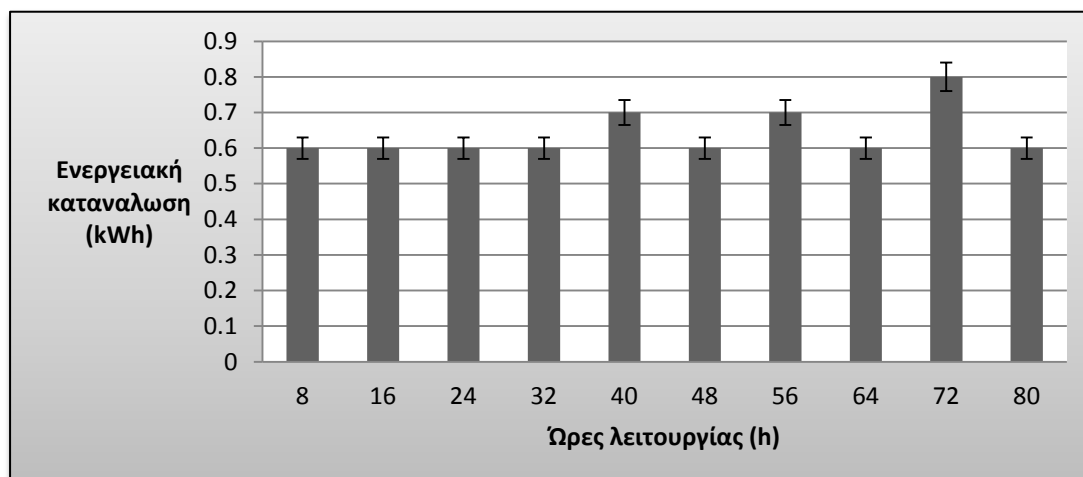
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι το **ποσοστό μείωσης όγκου** του 2<sup>ου</sup> κύκλου ξήρανσης υπολογίζεται:

$$\frac{(\text{Συνολικός νωπός όγκος} - \text{Συνολικός ξηρός όγκος})}{\text{Συνολικός νωπός όγκος}} \times 100 = \mathbf{54,9\%}$$

Θεωρώντας ότι μια μέση Ελληνική οικογένεια χρησιμοποιεί σακούλα απορριμμάτων χωρητικότητας 23 L προκειμένου να συλλέξει τα απορρίμματά της και υποθέτοντας ότι το παραγόμενο ξηρό υλικό είναι όγκου 5,6 L ανά 3 μέρες για διμελή οικογένεια όπως προέκυψε από τον πειραματικό κύκλο, η σακούλα χρειάζεται 12 ημέρες για να γεμίσει προκειμένου να συλλεχθεί καθώς το ξηρό υλικό είναι άοσμο και δεν αποσυντίθεται με το πέρασμα του χρόνου.

### 5.2.3 Προσδιορισμός ενεργειακής κατανάλωσης συσκευής οικιακής ξήρανσης

Στο γράφημα που ακολουθεί, παρουσιάζεται η καταγραφή της ενεργειακής κατανάλωσης της συσκευής σε όλη τη διάρκεια του 2ου κύκλου των εργαστηριακών αναλύσεων.



**Διάγραμμα 20: : Μεταβολή ενεργειακής κατανάλωσης 2ου κύκλου**

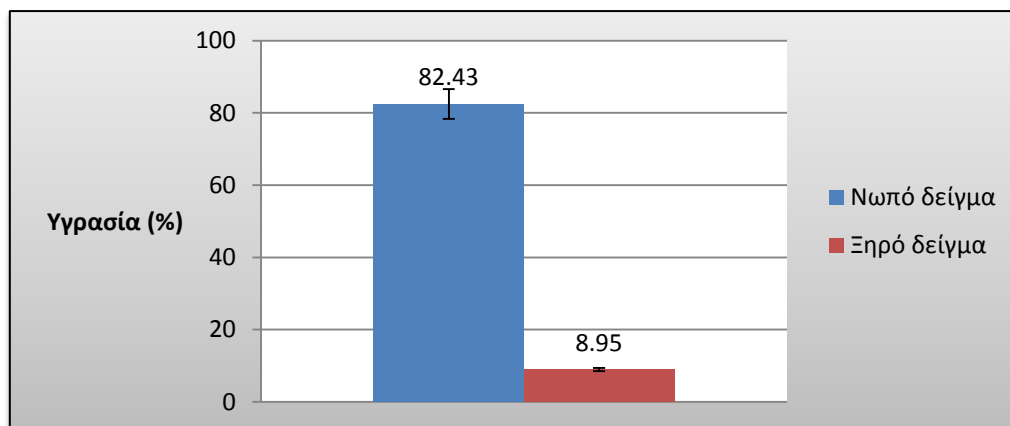
Η συνολική ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος Loofen σε όλη τη διάρκεια του 2<sup>ου</sup> κύκλου των εργαστηριακών δοκιμών, βρέθηκε ίση με **6.4 kWh**. Δεδομένου ότι η συνολική μάζα δείγματος που καταναλώθηκε είναι ίση με 2461 g, προκύπτει ότι:

$$\mathbf{\text{Συνολική Ενεργειακή Κατανάλωση} = 2,6 \text{ kWh/kg}}$$

Ενδεικτικά, το ετήσιο κόστος διαχείρισης των αποβλήτων τροφών σε μονομελή οικογένεια με τη χρήση του εξεταζόμενου οικιακού ξηραντήρα ανέρχεται σε 20,1 ευρώ/έτος θέτοντας 0,071 ευρώ /KWh

#### 5.2.4 Προσδιορισμός μεταβολής υγρασίας

Η μέση τιμή της υγρασίας του νωπού δείγματος που χρησιμοποιήθηκε υπολογίστηκε ίση με 82,43 % ενώ η υγρασία του ξηρού δείγματος στο τέλος της διεργασίας ίση με 8,95 %. Η διαφορά των δύο τιμών απεικονίζεται στο ραβδόγραμμα που ακολουθεί:



Διάγραμμα 21: : Συνολική μεταβολή υγρασίας 2ου κύκλου

Επομένως από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι το **ποσοστό μείωσης υγρασίας** του 2<sup>ου</sup> κύκλου ξήρανσης υπολογίζεται:

$$\text{Συνολική υγρασία νωπού} - \text{Συνολική υγρασία ξηρού} = \mathbf{73,48\%}$$

Παρατηρείται ότι το ποσοστό μείωσης της υγρασίας είναι αρκετά ικανοποιητικό δεδομένου ότι μέσω της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήσαμε αφαιρέσαμε σχεδόν ολόκληρη την ποσότητα της περιεχόμενης υγρασίας γεγονός που επιβεβαιώνει την αποτελεσματικότητα της διεργασίας ξήρανσης.

#### 5.2.5 Προσδιορισμός φυσικοχημικών χαρακτηριστικών τελικού ξηρού υλικού

Στον παρακάτω Πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα των φυσικοχημικών μεγεθών όπως αυτά προσδιορίστηκαν κατά τον 2<sup>ο</sup> κύκλο πειραμάτων για διμελή οικογένεια.

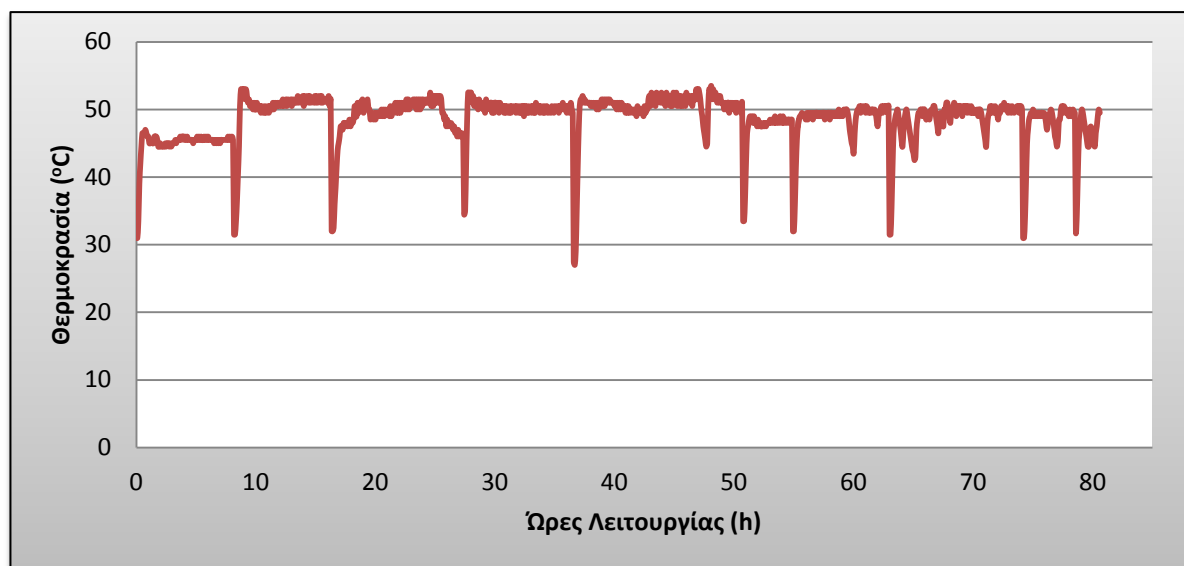
Πίνακας 13: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τελικού ξηρού υλικού 2ου κύκλου

Αποτελέσματα	
TN (%)	2.51
TKN (%)	2.41
NH <sub>4</sub> -N (%)	3.26
N-NO <sub>3</sub> (%)	0.1
TOC (%)	46.93
VS (%)	89.69
pH	5.93
Αγωγιμότητα (mS)	4.65

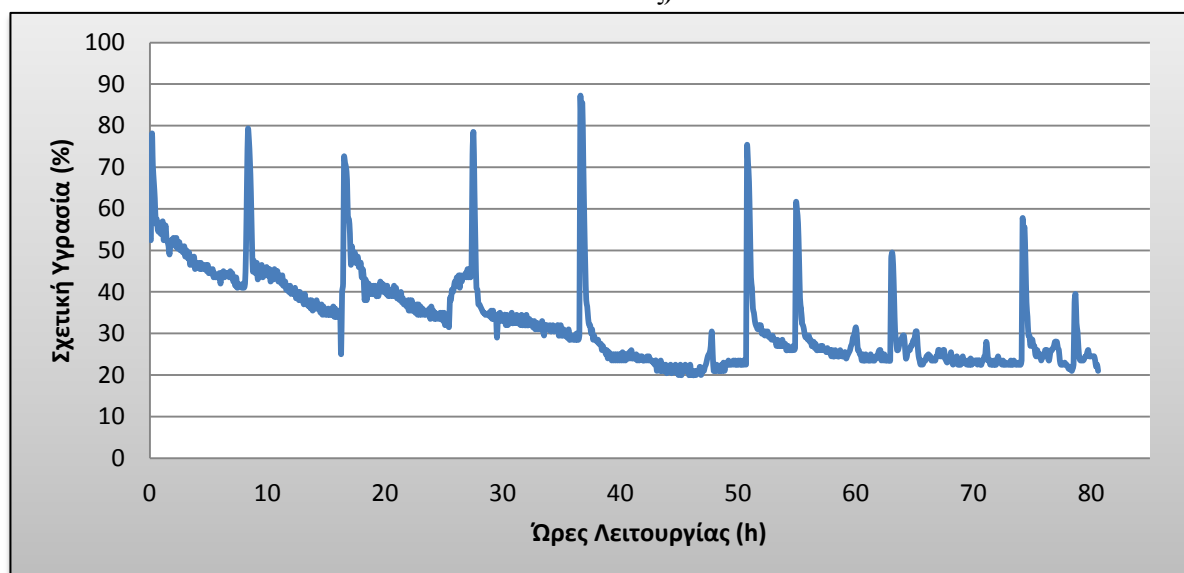
### 5.2.6 Προσδιορισμός συνθηκών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας

Κατά τη διάρκεια του πειραματικού κύκλου της ξήρανσης έγινε καταγραφή των συνθηκών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας εντός του συστήματος οικιακής ξήρανσης με χρήση ειδικού αισθητήρα, ο οποίος πραγματοποιούσε μετρήσεις κάθε 5 λεπτά.

Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται τα δεδομένα των συνθηκών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας εντός του συστήματος οικιακής ξήρανσης καθ' όλη τη διάρκεια του 2<sup>ου</sup> πειραματικού κύκλου.



Διάγραμμα 22: Μεταβολή θερμοκρασίας εντός της συσκευής κατά τη λειτουργία της (2ος κύκλος)



Διάγραμμα 23: Μεταβολή σχετικής υγρασίας εντός της συσκευής κατά τη λειτουργία της (2ος κύκλος)

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι η θερμοκρασία εντός του συστήματος βρίσκεται σε χαμηλές τιμές κατά την έναρξη κάθε οκταώρου λειτουργίας του συστήματος και σταθεροποιείται κοντά στους 50 °C κατά την ομαλή του λειτουργία υπό την επίδραση του θερμού ρεύματος αέρα θερμοκρασίας περίπου 55 °C. Συνολικά η θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του κύκλου κυμάνθηκε μεταξύ 27 °C και 53,5 °C με μέση τιμή τους 48,6 °C.

Αντίστοιχα, η σχετική υγρασία βρίσκεται σε υψηλά αρχικά επίπεδα κοντά στο 70% κατά την έναρξη κάθε οκταώρου λειτουργίας και την προσθήκη φρέσκου νωπού υλικού και σταδιακά μειώνεται κοντά στο 20% προς το τέλος της λειτουργίας της. Συνολικά η σχετική υγρασία κατά τη διάρκεια του κύκλου κυμάνθηκε μεταξύ 20% και 86,5% με μέση τιμή το 33%.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε σύγκριση με τον 1<sup>ο</sup> κύκλο η σχετική υγρασία φαίνεται να μειώνεται πιο αργά και δεν πέφτει ποτέ κάτω από 20% ακόμα και στο τέλος της διεργασίας. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η ποσότητα νωπού υλικού που απορριπτόταν κάθε φορά ήταν διπλάσια από αυτή στον 1<sup>ο</sup> κύκλο και δεν είχε αρκετό χρόνο να ξηραθεί σε ικανοποιητικά επίπεδα προτού εισαχθεί φρέσκο, με αποτέλεσμα να εγκλωβίζεται στο κάτω μέρος του κάδου απόρριψης.

### **5.3. 3<sup>ος</sup> και 4<sup>ος</sup> κύκλος ξήρανσης (τριμελής οικογένεια)**

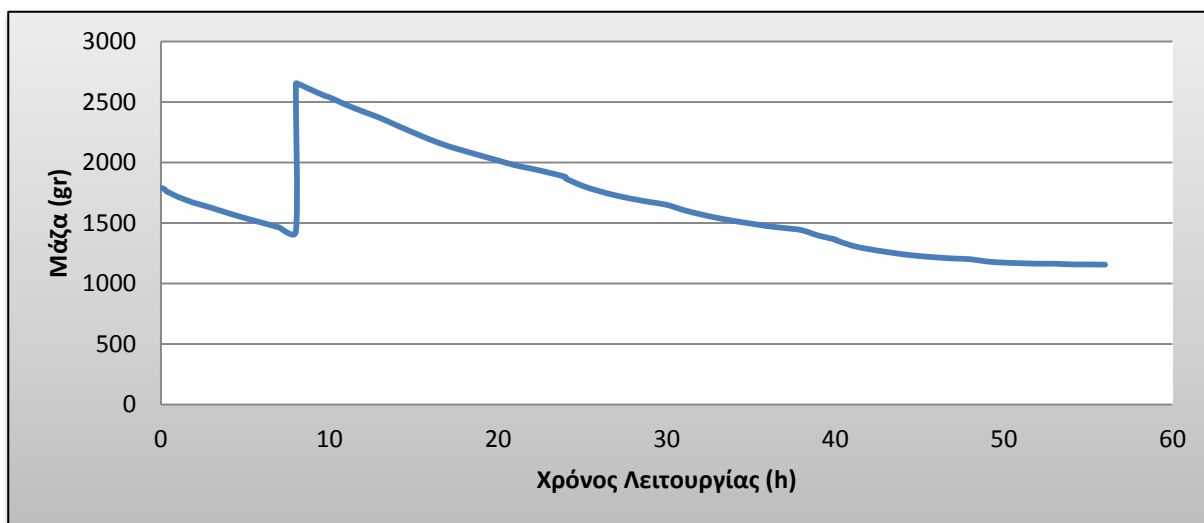
Στην υποενότητα αυτή παρατίθενται οι υπολογισμοί και αποτελέσματα του 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> κύκλου ξήρανσης οι οποίοι αφορούν σε προεπεξεργασία ποσότητας διατροφικών απορριμμάτων 3μελους οικογένειας. Η ποσότητα που απορρίπτονταν σε ημερήσια βάση ήταν 1230 gr νωπού υλικού το οποίο ξηραίνονταν για 8 ώρες ημερησίως. Η διαδικασία επαναλήφθηκε μέχρι την πλήρωση του κάδου απόρριψης της συσκευής οπότε και σταμάτησε η προσθήκη φρέσκου υλικού, ενώ το εναπομείναν υλικό αφέθηκε για επιπλέον ξήρανση μέχρι τη διακοπή της μείωσης της μάζας του.

Η διαφορά μεταξύ των δύο πειραματικών κύκλων έγκειται στην ανάδευση του υλικού εντός του κάδου απόρριψης. Στον 3<sup>ο</sup> κύκλο το υλικό αναδεύονταν χειροκίνητα μετά το πέρας κάθε οκταώρου λειτουργίας του συστήματος, σε αντίθεση με τον 4<sup>ο</sup> κύκλο κατά τη διάρκεια του οποίου το υλικό παρέμενε χωρίς οποιαδήποτε ανάδευση.

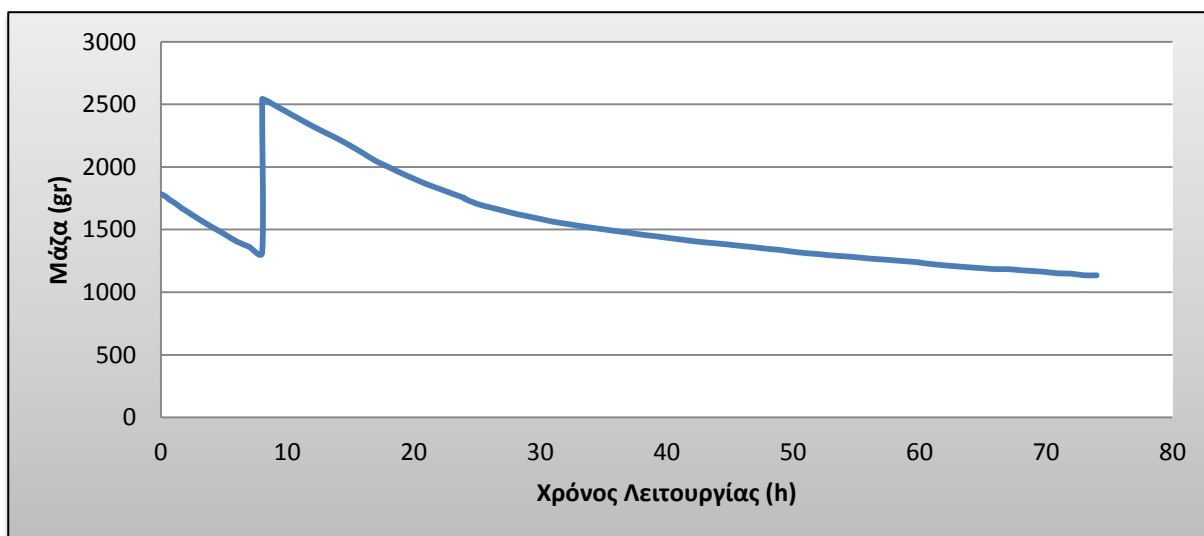
#### **5.3.1 Προσδιορισμός μεταβολής μάζας δείγματος**

Με σκοπό να προσδιοριστεί η μεταβολή της μάζας του δείγματος πραγματοποιήθηκαν τακτικές ημερήσιες ζυγίσεις του περιεχομένου του κάδου απόρριψης ανά 10 λεπτά για τις πρώτες 2 ώρες λειτουργίας και ανά 1 ώρα για τις επόμενες 6 ώρες λειτουργίας. Μετά την πλήρωση του κάδου και τη διακοπή προσθήκης φρέσκου νωπού υλικού οι ζυγίσεις πραγματοποιούνταν μόνο ανά μια ώρα.

Με βάση τις μετρήσεις μάζας προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα που απεικονίζουν την μεταβολή της μάζας του υλικού εντός του οικιακού συστήματος ξήρανσης Loofen καθ' όλη τη διάρκεια του 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> κύκλου ξήρανσης.



**Διάγραμμα 24:** Συνολική πορεία μεταβολής μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας (3ος κύκλος)



**Διάγραμμα 25:** Συνολική πορεία μεταβολής μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας (4ος κύκλος)

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται: η ποσότητα της νωπής μάζας που τοποθετούνταν ανά ημέρα στο εσωτερικό της συσκευής, η ποσότητα της ξηρής μάζας που παρέμενε στο εσωτερικό της συσκευής μετά το πέρας των 8 ωρών λειτουργίας και τα αποτελέσματα μείωσης της μάζας του οργανικού υλικού το οποίο επεξεργάστηκε όλη τη διάρκεια του 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> κύκλου με τη χρήση του συστήματος οικιακής ξήρανσης Loofen

**Πίνακας 14: Καταγραφή μεταβολής μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (3ος κύκλος)**

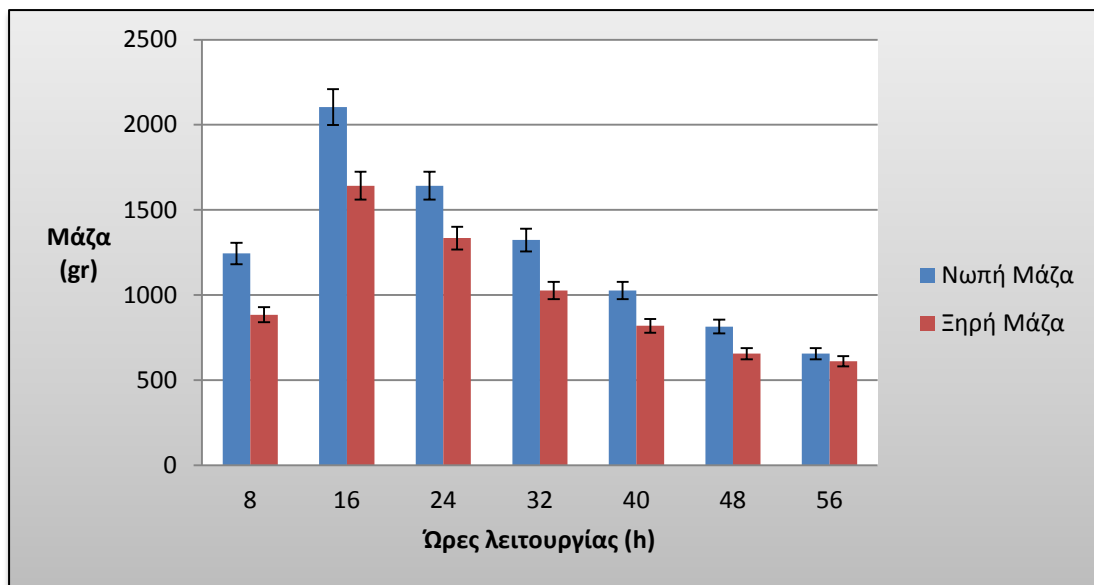
Ώρες Ξήρανσης	Μάζα Νωπού(gr)	Μάζα Ξηρού(gr)	Μείωση Μάζας
8	1244	884	360
16	2105	1642	463
24	1642	1335	307
32	1323	1027	296
40	1027	819	208
48	815	656	159
56	656	611	45

**Πίνακας 15: Καταγραφή μεταβολής μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (4ος κύκλος)**

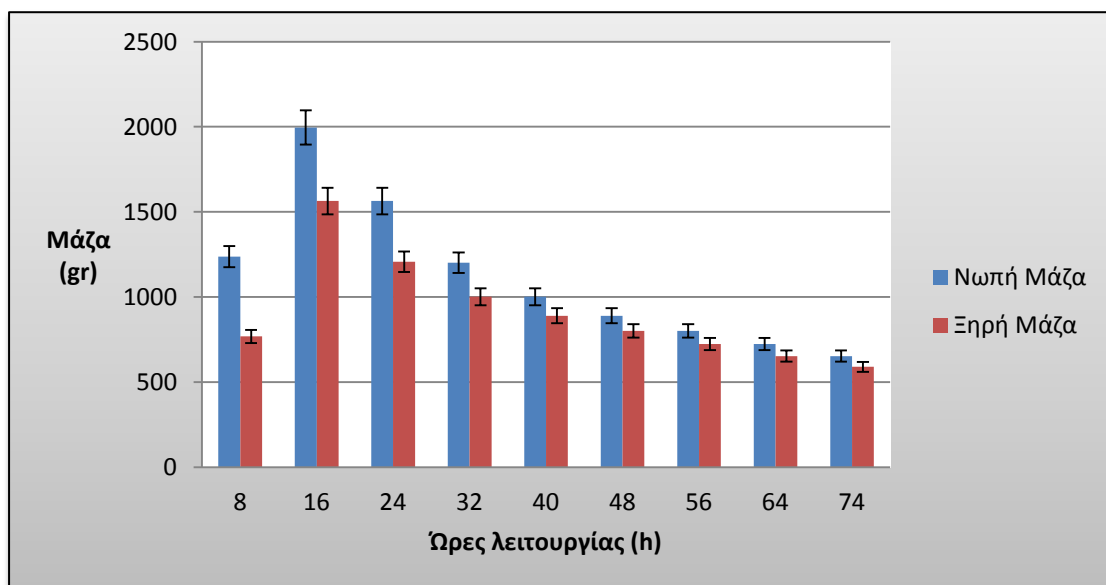
Ώρες Ξήρανσης	Μάζα Νωπού(gr)	Μάζα Ξηρού(gr)	Μείωση Μάζας
8	1238	769	469
16	1996	1564	432
24	1564	1207	357
32	1202	1002	200
40	1002	890	112
48	890	801	89
56	801	724	77
64	724	653	71
74	653	590	63

Στα παρακάτω ραβδογράμματα παρουσιάζεται η μεταβολή της μάζας του δείγματος κατά τη διάρκεια του 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> κύκλου ξήρανσης ανά 8 ώρες.





Διάγραμμα 26: Μεταβολή μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (3ος κύκλος)



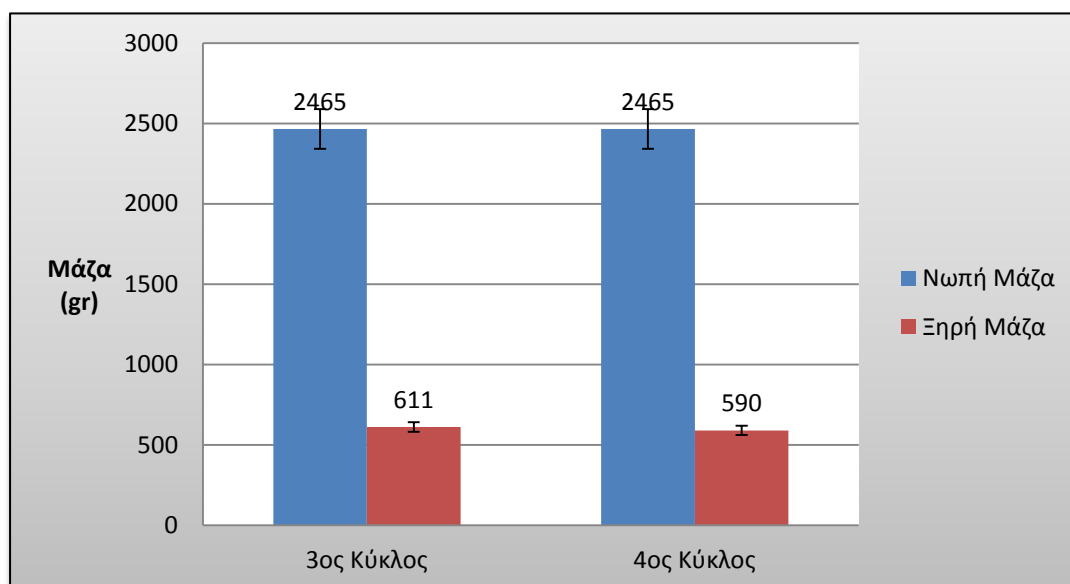
Διάγραμμα 27: Μεταβολή μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (4ος κύκλος)

Στα παραπάνω ραβδογράμματα, παρατηρείται ότι η μάζα του νωπού υλικού αυξάνεται μέχρι και το 2<sup>ο</sup> οκτώωρο. Αυτό συμβαίνει διότι εκείνη τη χρονική στιγμή στο καλάθι στον εσωτερικό χώρο του ξηραντήρα τοποθετούνταν υλικό προκειμένου να επεξεργαστεί με τη χρήση της συσκευής οικιακή ξήρανση. Σε εκείνο το σημείο, η συσκευή έφτασε σε πλήρωση και δεν πραγματοποιήθηκε περαιτέρω προσθήκη νωπού υλικού.

Η διεργασία της ξήρανσης έλαβε τέλος όταν επιτεύχθηκε σχετική σταθεροποίηση του ξηρού υλικού . Η σταθεροποίηση ωστόσο έγινε στον 3<sup>ο</sup> κύκλο σε 40 ώρες μετά την πλήρωση του κάδου απόρριψης, ενώ στον 4<sup>ο</sup> κύκλο σε 58 ώρες μετά τη πλήρωση.

Αυτή η διαφορά σχετίζεται με την ανάδευση του υλικού η οποία στον 3<sup>ο</sup> κύκλο διευκόλυνε την διεργασία της ξήρανσης επιτρέποντας στον θερμό αέρα να έρθει σε επαφή με μεγαλύτερη ποσότητα υλικού. Έτσι στην περίπτωση του 4<sup>ου</sup> κύκλου το μεγάλο ποσοστό υγρασίας που περιείχε το αρχικό νωπό υλικό, το οποίο δεν ξηράνθηκε επαρκώς κατά το πρώτο οκτάωρο, παρέμεινε εγκλωβισμένο κάτω από το φρέσκο νωπό υλικό που προστέθηκε και χωρίς την ύπαρξη ανάδευσης η ξήρανση χρειάστηκε επιπλέον χρόνο για να ολοκληρωθεί.

Στα ραβδογράμματα που ακολουθούν, παρουσιάζεται η συνολική ποσότητα νωπού υλικού που τοποθετήθηκε στο εσωτερικό της συσκευής οικιακής ξήρανσης σε όλη τη διάρκεια του 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> κύκλου.



Διάγραμμα 28: Συνολική μεταβολή μάζας (3ος και 4ος κύκλος)

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι το **ποσοστό μείωσης μάζας του 3<sup>ου</sup> κύκλου ξήρανσης** είναι:

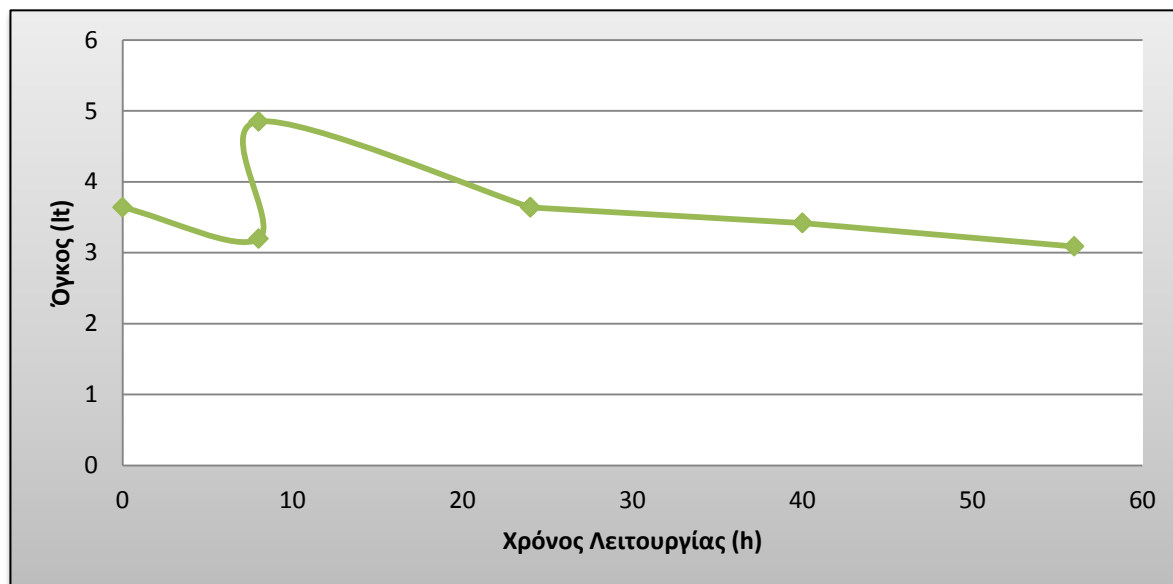
$$\frac{(\text{Συνολική νωπή μάζα} - \text{Συνολική ξηρή μάζα})}{\text{Συνολική νωπή μάζα}} \times 100 =$$

**75,21% για τον 3<sup>ο</sup> κύκλο και 76,06% για τον 4<sup>ο</sup> κύκλο.**

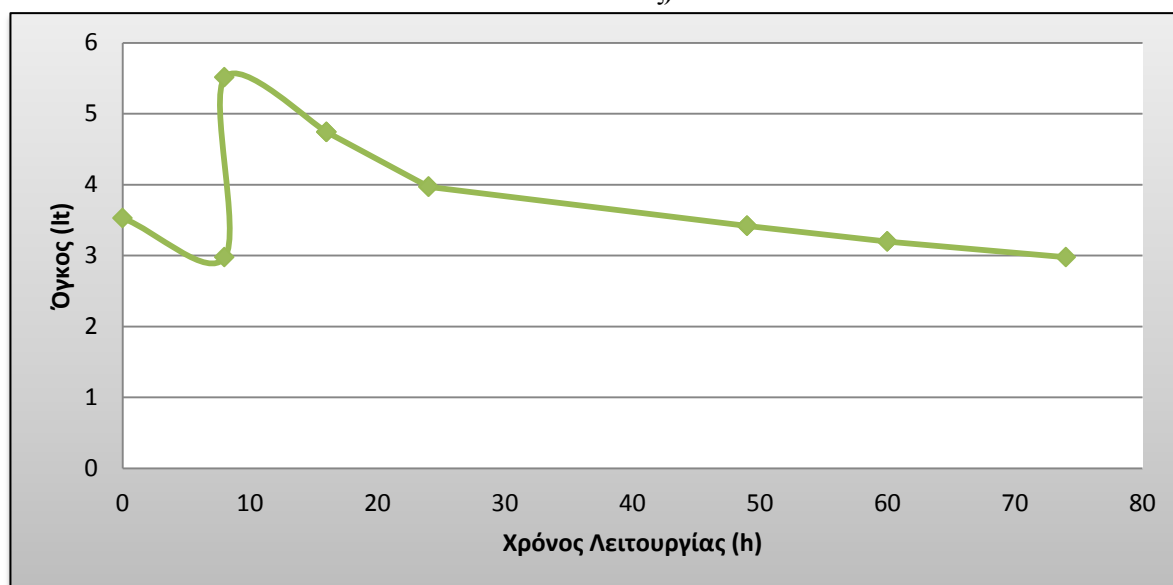
Παρατηρείται ότι το ποσοστό μείωσης μάζας είναι αρκετά υψηλό και για τους 2 πειραματικούς κύκλου, γεγονός που επιβεβαιώνει την αποτελεσματικότητα της διεργασίας της οικιακής ξήρανσης με χρήση του συστήματος Loofen.

### 5.3.2 Προσδιορισμός μεταβολής όγκου δείγματος

Με σκοπό να προσδιοριστεί η μεταβολή του όγκου του δείγματος πραγματοποιήθηκαν ημερήσιες μετρήσεις του κενού χώρου του κάδου απόρριψης πριν την έναρξη της ξήρανσης και μετά το πέρας της. Με βάση τις μετρήσεις όγκου προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα που απεικονίζουν τη μεταβολή του όγκου του υλικού εντός του οικιακού συστήματος ξήρανσης Loofen καθ'όλη τη διάρκεια του 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> κύκλου ξήρανσης.



Διάγραμμα 29: Συνολική πορεία μεταβολής όγκου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας (3ος κύκλος)



Διάγραμμα 30: Συνολική πορεία μεταβολής μάζας συναρτήσει των ωρών λειτουργίας (4ος κύκλος)

Στους πίνακες που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μείωσης του όγκου των διατροφικών απορριμμάτων όπως αυτά προέκυψαν σε όλη τη διάρκεια του 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> κύκλου.

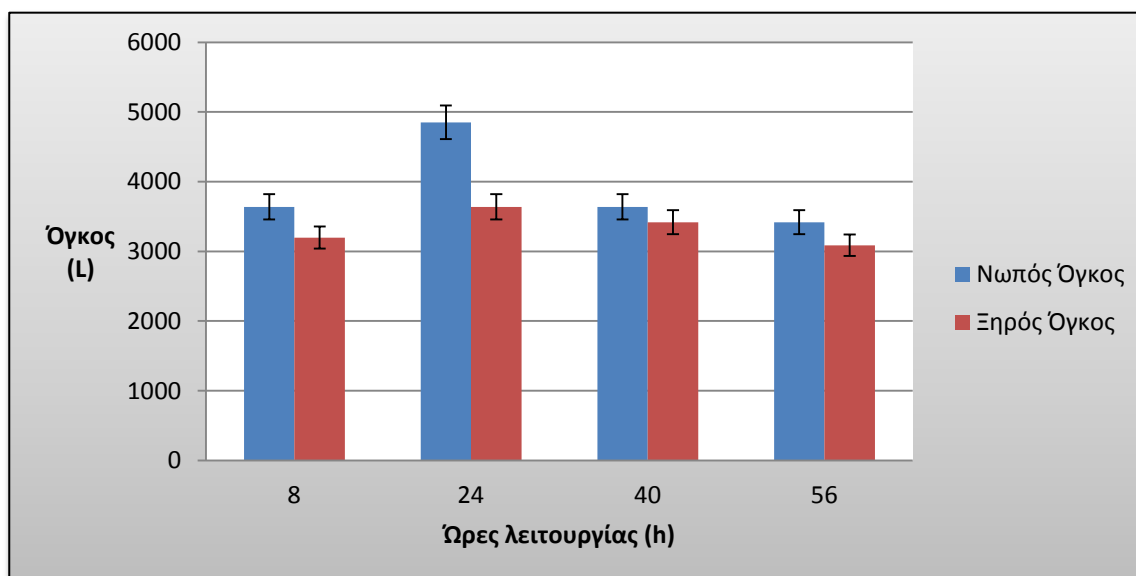
**Πίνακας 16: : Καταγραφή μεταβολής όγκου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (3ος κύκλος)**

Ώρες Λειτουργίας	Όγκος Νωπού (L)	Όγκος Ξηρού (L)	Μείωση Όγκου
8	3638.25	3197.25	441
24	4851	3638.25	1212.75
40	3638.25	3417.75	220.5
56	3417.75	3087	330.75

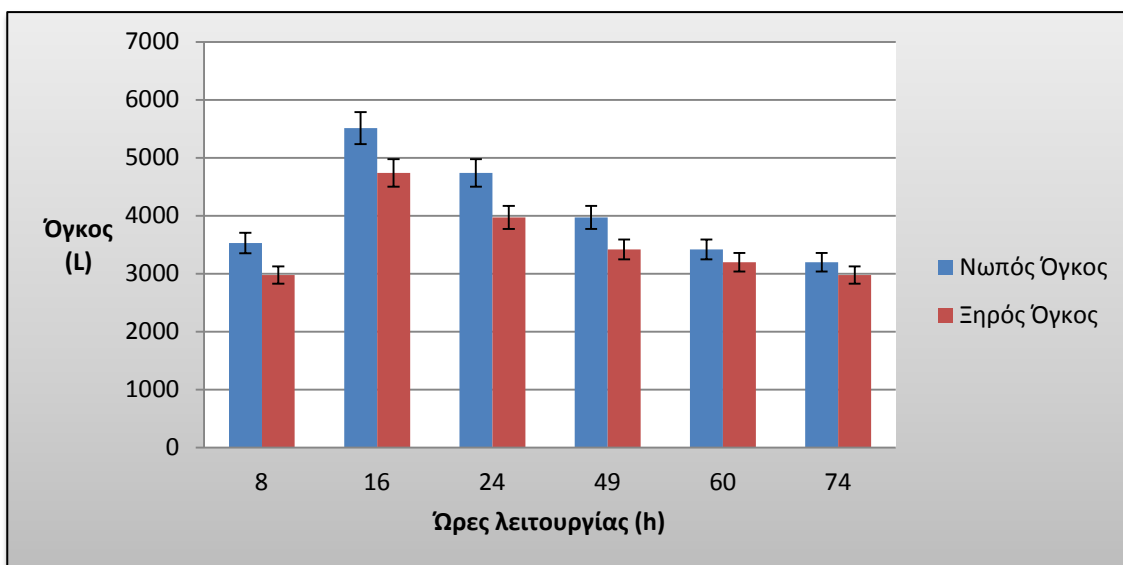
**Πίνακας 17: : Καταγραφή μεταβολής όγκου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (4ος κύκλος)**

Ώρες Λειτουργίας	Όγκος Νωπού (L)	Όγκος Ξηρού (L)	Μείωση Όγκου
8	3528	2976.75	551.25
16	5512.5	4740.75	771.75
24	4740.75	3969	771.75
49	3969	3417.75	551.25
60	3417.75	3197.25	220.5
74	3197.25	2976.75	220.5

Στα παρακάτω ραβδογράμματα παρουσιάζεται η μεταβολή του όγκου του δείγματος κατά τη διάρκεια του 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> κύκλου ξήρανσης.



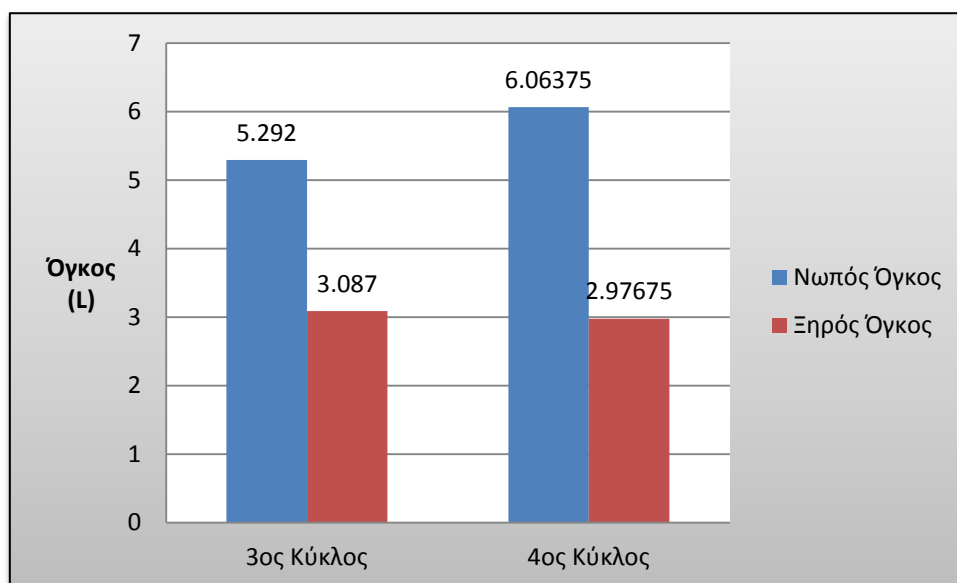
**Διάγραμμα 31: Μεταβολή όγκου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (3ος κύκλος)**



**Διάγραμμα 32: Μεταβολή όγκου συναρτήσει των ωρών λειτουργίας της συσκευής (4ος κύκλος)**

Οι μπλε στήλες απεικονίζουν τον όγκο του νωπού δείγματος και οι κόκκινες τον όγκο του ξηρού. Παρατηρείται ότι ο όγκος του δείγματος μειώνεται σταθερά κατά τη διάρκεια κάθε οκταώρου. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν και το αναμενόμενο εφόσον η διεργασία της ξήρανσης αφαιρεί από το δείγμα την περιεχόμενη σε αυτό υγρασία. Συνεπώς, ο όγκος του δείγματος, όπως και η μάζα του, συνεχώς μειώνεται.

Στο ραβδόγραμμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται ο συνολικός όγκος νωπού υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την ολοκλήρωση των πειραματικών μετρήσεων και ο συνολικός όγκος ξηρού υλικού που παρέμεινε στο εσωτερικό του ξηραντήρα.



**Διάγραμμα 33: Συνολική μεταβολή όγκου (3ος και 4ος κύκλος)**

Προκύπτει ότι το ποσοστό μείωσης όγκου υπολογίζεται:

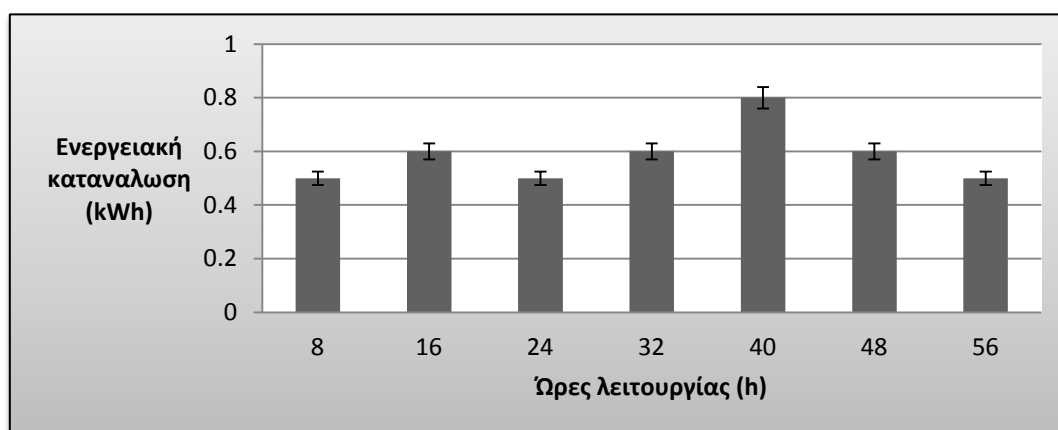
$$\frac{(\text{Συνολικός νωπός όγκος} - \text{Συνολικός ξηρός όγκος})}{\text{Συνολικός νωπός όγκος}} \times 100 =$$

**41,66% για τον 3<sup>ο</sup> κύκλο και 50,90% για τον 4<sup>ο</sup> κύκλο.**

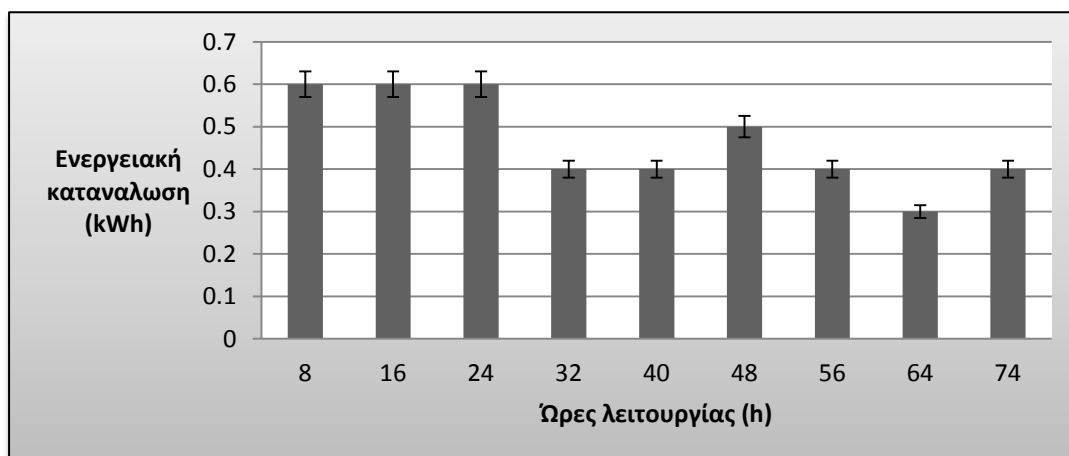
Θεωρώντας ότι μια μέση Ελληνική οικογένεια χρησιμοποιεί σακούλα απορριμμάτων χωρητικότητας 23 L προκειμένου να συλλέξει τα απορρίμματά της και υποθέτοντας ότι το παραγόμενο ξηρό υλικό είναι όγκου 5,5 L ανά 2 μέρες για τριμελή οικογένεια όπως προέκυψε από τον πειραματικό κύκλο, η σακούλα χρειάζεται 8 ημέρες για να γεμίσει προκειμένου να συλλεχθεί καθώς το ξηρό υλικό είναι άοσμο και δεν αποσυντίθεται με το πέρασμα του χρόνου.

### 5.3.3 Προσδιορισμός ενεργειακής κατανάλωσης συσκευής οικιακής ξήρανσης

Στα γραφήματα που ακολουθούν, παρουσιάζεται η καταγραφή της ενεργειακής κατανάλωσης της συσκευής σε όλη τη διάρκεια του 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> κύκλου των εργαστηριακών αναλύσεων.



Διάγραμμα 34: Μεταβολή ενεργειακής κατανάλωσης 3ου κύκλου



Διάγραμμα 35: Μεταβολή ενεργειακής κατανάλωσης 4ου κύκλου

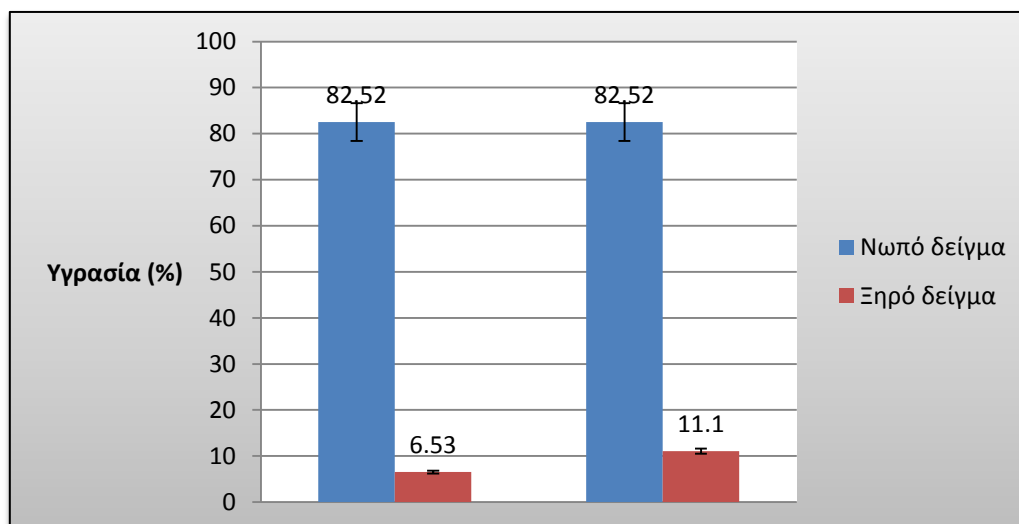
Η συνολική ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος Loofen σε όλη τη διάρκεια του 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> κύκλου των εργαστηριακών δοκιμών, βρέθηκε ίση με **4,1 kWh** και **4,2 kWh** αντίστοιχα. Δεδομένου ότι η συνολική μάζα δείγματος που καταναλώθηκε είναι ίση με 2465 g, προκύπτει κατά μέσο όρο για τους 2 κύκλους ότι

$$\text{Συνολική Ενεργειακή Κατανάλωση} = 1,68 \text{ kWh/kg}$$

Ενδεικτικά, το ετήσιο κόστος διαχείρισης των αποβλήτων τροφών σε μονομελή οικογένεια με τη χρήση του εξεταζόμενου οικιακού ξηραντήρα ανέρχεται σε 53,6 ευρώ/έτος θέτωντας 0,071 ευρώ /KWh.

#### 5.3.4 Προσδιορισμός μεταβολής υγρασίας

Η μέση τιμή της υγρασίας του νωπού δείγματος που χρησιμοποιήθηκε υπολογίστηκε ίση με 82,52 %, ενώ η υγρασία του ξηρού δείγματος στο τέλος της διεργασίας ίση με 6,53 % για τον 3<sup>ο</sup> κύκλο και 11,1% για τον 4<sup>ο</sup>. Η διαφορά των δύο τιμών απεικονίζεται στο ραβδόγραμμα που ακολουθεί:



Διάγραμμα 36: Συνολική μεταβολή υγρασίας 3ου και 4ου κύκλου

Επομένως από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι το **ποσοστό μείωσης υγρασίας** υπολογίζεται:

$$\text{Συνολική υγρασία νωπού} - \text{Συνολική υγρασία ξηρού} =$$

**76 % για τον 3<sup>ο</sup> κύκλο και 71,42 % για τον 4<sup>ο</sup> κύκλο.**

Το ποσοστό μείωσης της υγρασίας είναι αρκετά ικανοποιητικό δεδομένου ότι μέσω της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήσαμε αφαιρέσαμε σχεδόν ολόκληρη την ποσότητα της περιεχόμενης υγρασίας γεγονός που επιβεβαιώνει την αποτελεσματικότητα της διεργασίας ξήρανσης

Ωστόσο η μεγάλη διαφορά μεταξύ της τελικής υγρασίας του ξηρού υλικού μεταξύ των 2 κύκλων δείχνει ότι η ανάδευση του υλικού στον 3<sup>ο</sup> κύκλο επηρέασε σημαντικά την ταχύτητα, αλλά και την απόδοση της ξήρανσης του.

### 5.3.5 Προσδιορισμός φυσικοχημικών χαρακτηριστικών τελικού ξηρού υλικού

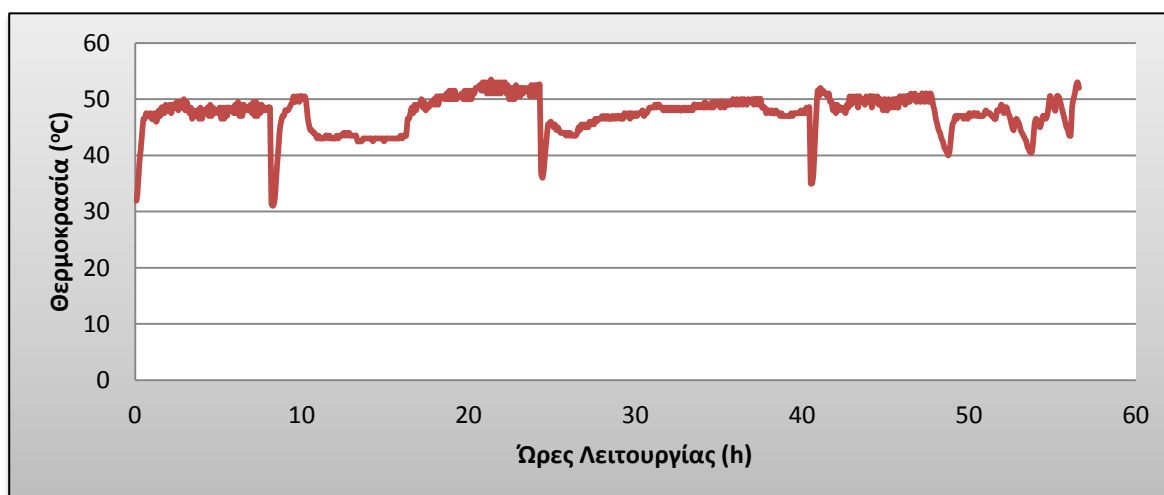
Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα των φυσικοχημικών μεγεθών όπως αυτά προσδιορίστηκαν μέσω της πειραματικής διαδικασίας κατά τον 3<sup>ο</sup> και 4<sup>ο</sup> κύκλο πειραμάτων για τριμελή οικογένεια

Πίνακας 18: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τελικού ξηρού υλικού 3ου και 4ου κύκλου

Αποτελέσματα	3ος κύκλος	4ος κύκλος
TN (%)	2.65	2.5
TKN (%)	2.51	2.5
NH4-N (%)	3.59	2.59
N-NO3 (%)	0.14	0
TOC (%)	48.65	46.58
VS (%)	87.93	90.55
pH	5.28	5.21
Αγωγιμότητα (mS)	4.61	7.1

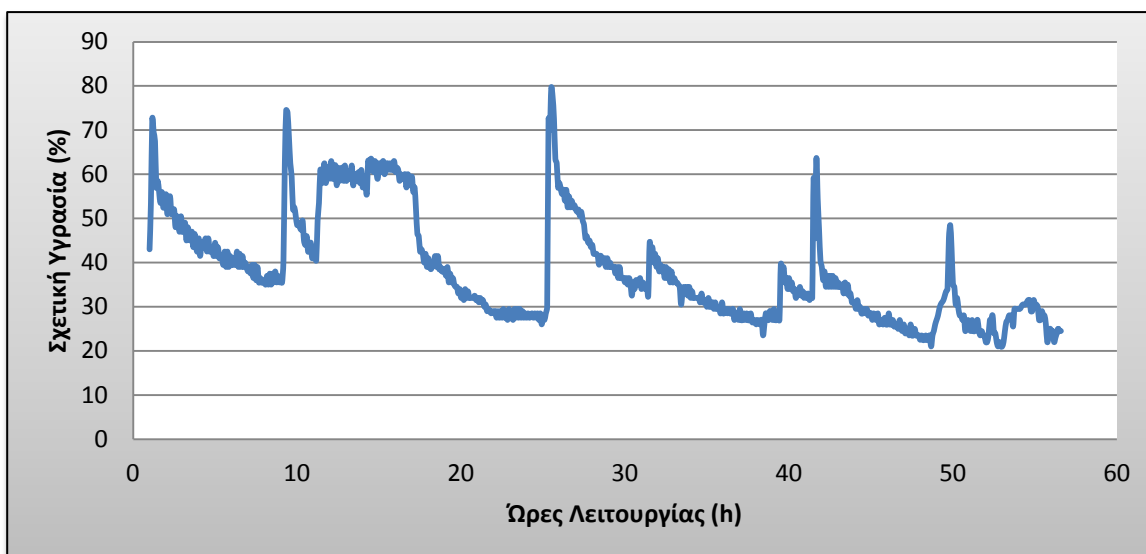
### 5.3.6 Προσδιορισμός συνθηκών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας

Κατά τη διάρκεια του πειραματικού κύκλου της ξήρανσης έγινε καταγραφή των συνθηκών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας εντός του συστήματος οικιακής ξήρανσης με χρήση ειδικού αισθητήρα, ο οποίος πραγματοποιούσε μετρήσεις κάθε 5 λεπτά. Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται τα δεδομένα των συνθηκών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας εντός του συστήματος οικιακής ξήρανσης καθ'όλη τη διάρκεια του 3<sup>ου</sup> πειραματικού κύκλου.



Διάγραμμα 37: Μεταβολή θερμοκρασίας εντός της συσκευής κατά τη λειτουργία της (3ος κύκλος)





**Διάγραμμα 38: Μεταβολή σχετικής υγρασίας εντός της συσκευής κατά τη λειτουργία της (3ος κύκλος)**

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι η θερμοκρασία εντός του συστήματος βρίσκεται σε χαμηλές τιμές κατά την έναρξη κάθε οκταώρου λειτουργίας του συστήματος και σταθεροποιείται κοντά στους 50 °C κατά την ομαλή του λειτουργία υπό την επίδραση του θερμού ρεύματος αέρα θερμοκρασίας περίπου 55 °C. Συνολικά η θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του κύκλου κυμάνθηκε μεταξύ 31 °C και 53,5 °C με μέση τιμή τους 47,3 °C.

Αντίστοιχα, η σχετική υγρασία βρίσκεται σε υψηλά αρχικά επίπεδα κοντά στο 70% κατά την έναρξη κάθε οκταώρου λειτουργίας και την προσθήκη φρέσκου νωπού υλικού και σταδιακά μειώνεται κοντά στο 30% προς το τέλος της λειτουργίας της. Συνολικά η σχετική υγρασία κατά τη διάρκεια του κύκλου κυμάνθηκε μεταξύ 18,5% και 79,5 % με μέση τιμή το 38%.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε σύγκριση με τον 1<sup>ο</sup> κύκλο η σχετική υγρασία φαίνεται να μειώνεται πιο αργά και δεν πέφτει ποτέ κάτω από 20% ακόμα και στο τέλος της διεργασίας. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η ποσότητα νωπού υλικού που απορριπτόταν κάθε φορά ήταν τριπλάσια από αυτή στον 1<sup>ο</sup> κύκλο και δεν είχε αρκετό χρόνο να ξηραθεί σε ικανοποιητικά επίπεδα προτού εισαχθεί φρέσκο, με αποτέλεσμα να εγκλωβίζεται στο κάτω μέρος του κάδου απόρριψης.

#### 5.4. Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων

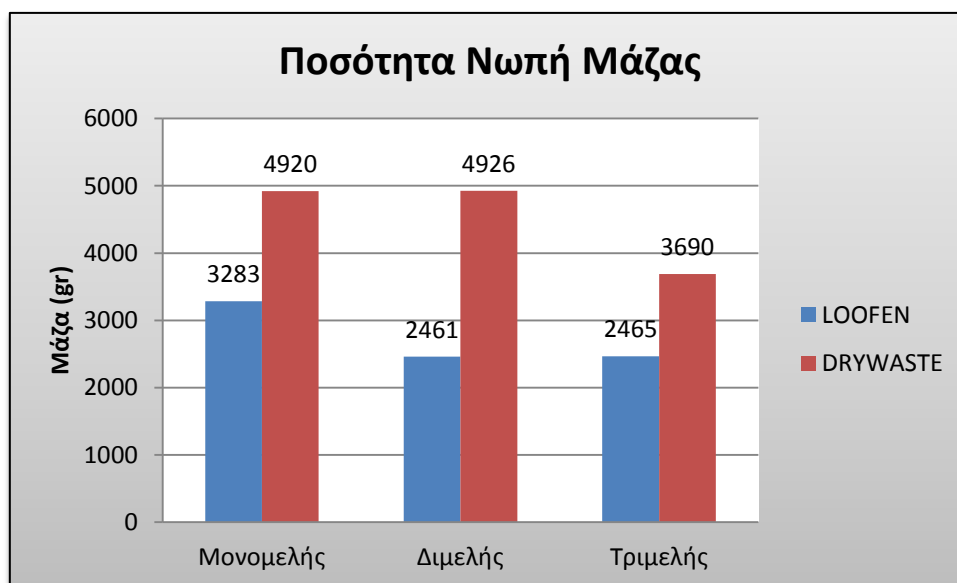
Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται συγκριτική μελέτη των πειραματικών αποτελεσμάτων των κύκλων ξήρανσης με χρήση του συστήματος **Loofen**, τόσο μεταξύ τους όσο και με τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την χρήση του συστήματος οικιακής ξήρανσης **DRYWASTE** το οποίο αναπτύχθηκε και κατασκευάστηκε στη Μονάδα Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας του ΕΜΠ.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω για τα δύο συστήματα χρησιμοποιήθηκε η ίδια αρχική σύσταση υποστρώματος για τους 3 πειραματικούς κύκλους (1μελή, 2μελή και 3μελή οικογένεια), ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων των 2 συσκευών ξήρανσης.

Για τους σκοπούς της σύγκρισης του πειραματικού κύκλου για την 3μελή οικογένεια χρησιμοποιείται η μέση τιμή των δεδομένων που προέκυψαν από τον 3<sup>ο</sup> και 4<sup>ο</sup> κύκλο.

##### 5.4.1 Μάζα Διαχειρισθέντος Νωπού Υλικού

Στο παρακάτω ραβδόγραμμα παρουσιάζεται η συνολική μάζα που διαχειρίστηκε το κάθε σύστημα σε κάθε έναν από τους 3 πλήρεις κύκλους λειτουργίας του (1<sup>ος</sup> για μονομελή, 2<sup>ος</sup> διμελή και 3<sup>ος</sup> τριμελή οικογένεια).



**Διάγραμμα 39:** Συνολική μάζα που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε σύστημα ξήρανσης

Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι το σύστημα DRYWASTE ήταν ικανό να διαχειριστεί πολύ μεγαλύτερη ποσότητα νωπής μάζας σε σχέση με το σύστημα LOOFEN και στους 3 κύκλους λειτουργίας.

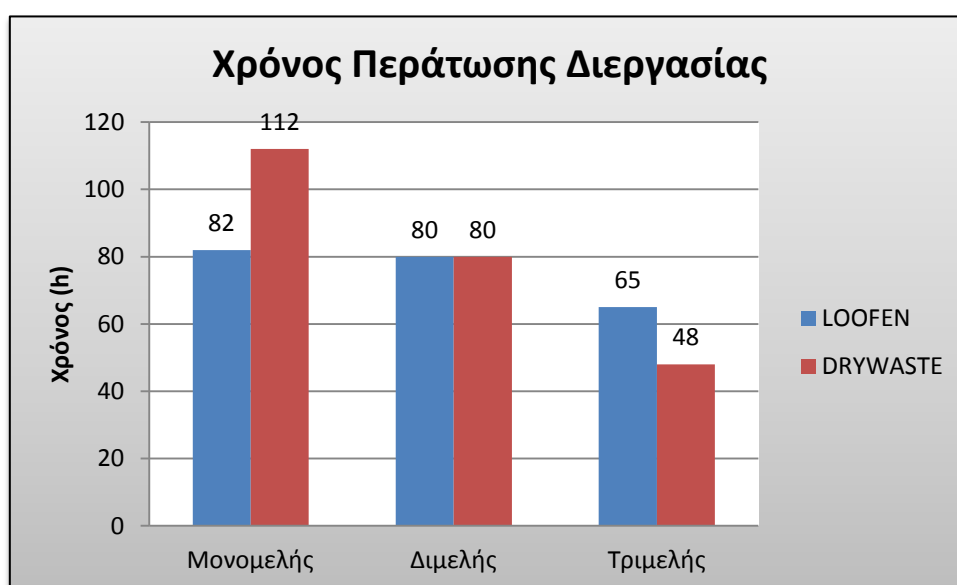
Αξίζει να σημειωθεί ότι το σύστημα DRYWASTE μπορεί σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα της βιβλιογραφίας να διαχειριστεί μέχρι και ποσότητα νωπού υλικού που αντιστοιχεί σε 4μελή οικογένεια λόγω της μεγάλης χωρητικότητας του κάδου απόρριψης. Κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατό ωστόσο για το σύστημα LOOFEN

λόγω του αρκετά μικρότερου όγκου του κάδου του. Εφόσον η ονομαστική χωρητικότητα του καλαθιού είναι 5 L, υπολογίζεται ότι για να μπορέσει να διαχειριστεί την ποσότητα νωπού υλικού που παράγει καθημερινά μια 4μελής οικογένεια το σύστημα χρειάζεται καλάθι χωρητικότητας τουλάχιστον 7,5 L.

#### 5.4.2 Χρόνος περάτωσης διεργασίας ξήρανσης

Ως χρόνο περάτωσης θεωρούμε τον χρόνο που απαιτείται μέχρι ο ρυθμός μείωσης της μάζας να είναι πλέον αμελητέος, ώστε να μην παρατηρείται περαιτέρω ξήρανση του νωπού υλικού. Σε αυτό το σημείο το υλικό περιέχει την ελάχιστη δυνατή υγρασία και θεωρείται σταθεροποιημένο με αποτέλεσμα να μπορεί να απορριφθεί με ασφάλεια.

Στο παρακάτω ραβδόγραμμα παρουσιάζεται ο συνολικός χρόνος που χρειάστηκε το κάθε σύστημα για να διαχειριστεί το απορριπτόμενο νωπό υλικό σε κάθε έναν από τους 3 πλήρεις κύκλους λειτουργίας του (1<sup>ος</sup> για μονομελή, 2<sup>ος</sup> διμελή και 3<sup>ος</sup> τριμελή οικογένεια).

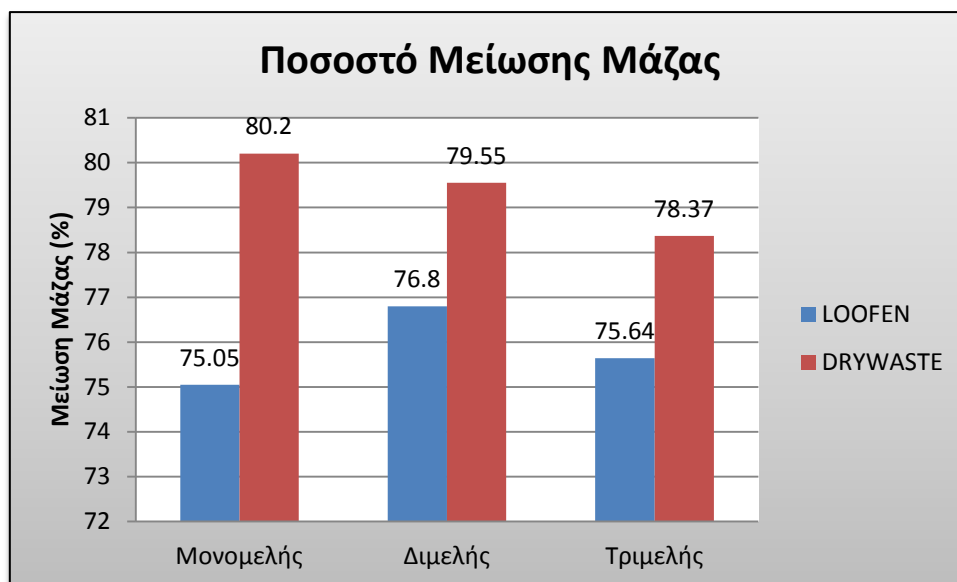


Διάγραμμα 40: Συνολικός χρόνος που χρειάστηκε για ένα πλήρη κύκλο κάθε σύστημα ξήρανσης

Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι για τον 1<sup>ο</sup> κύκλο το σύστημα LOOFEN ολοκλήρωσε σε μικρότερο χρόνο την διεργασία της ξήρανσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το σύστημα έφτασε σε πλήρωση σε μικρότερο χρόνο από το σύστημα DRYWASTE, το οποίο εξακολούθησε να δέχεται φρέσκο υλικό και μετά το 8<sup>ο</sup> οκτώωρο. Επίσης παρατηρούμε ότι για τον 3<sup>ο</sup> κύκλο πειραμάτων το σύστημα LOOFEN χρειάστηκε πολύ περισσότερο χρόνο για να ολοκληρώσει τη διεργασία παρότι είχε να διαχειριστεί μικρότερη ποσότητα νωπού υλικού από το σύστημα DRYWASTE. Αυτό δείχνει ότι στο σύστημα DRYWASTE η κυκλοφορία του θερμού αέρα πραγματοποιείται ευκολότερα επομένως επιταχύνεται η διεργασία της ξήρανσης.

### 5.4.3 Ποσοστό μείωσης μάζας νοπού υλικού

Στο παρακάτω ραβδόγραμμα παρουσιάζεται το συνολικό ποσοστό μείωσης της μάζας του υπό ξήρανση υλικού που επιτεύχθηκε σε κάθε έναν από τους 3 πλήρεις κύκλους λειτουργίας του (1<sup>ος</sup> για μονομελή, 2<sup>ος</sup> διμελή και 3<sup>ος</sup> τριμελή οικογένεια).



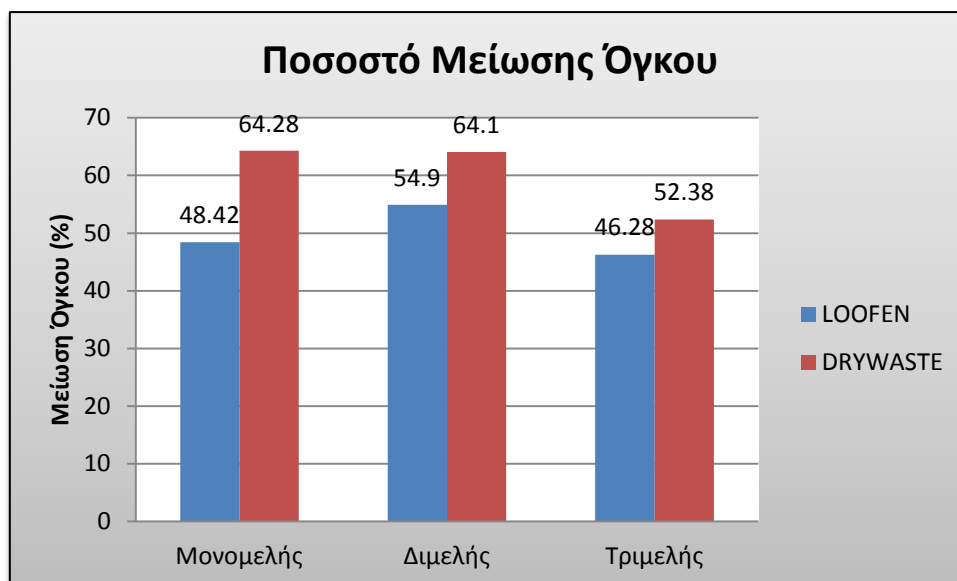
Διάγραμμα 41: Συνολική απώλεια μάζας νοπού υλικού σε κάθε σύστημα ξήρανσης

Είναι εμφανές ότι το σύστημα DRYWASTE επιτυγχάνει μεγαλύτερη μείωση της μάζας του νοπού υλικού και στους 3 κύκλους λειτουργίας σε σχέση με το σύστημα LOOFEN.

Για το σύστημα DRYWASTE παρατηρείται ότι το ποσοστό (%) μείωσης της μάζας εμφανίζει μέγιστη τιμή (80,2%) στον 1<sup>ο</sup> κύκλο ξήρανσης και ελάχιστη (78,37%) στον 3<sup>ο</sup> κύκλο ξήρανσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε κάθε κύκλο ξήρανσης η ποσότητα νοπού υλικού αυξανόταν με αποτέλεσμα στον 1<sup>ο</sup> κύκλο να έχουμε μάζα νοπού 420 g και στον 3<sup>ο</sup> 1230 g. Επομένως, σε μεγαλύτερη ποσότητα νοπών διατροφικών απορριμμάτων η διεργασία της ξήρανσης δεν αποφέρει τα ίδια αποτελέσματα εφόσον το ρεύμα αέρα δε διαπερνά και δεν αφαιρεί την περιεχόμενη υγρασία με την ίδια ευκολία όπως στα δείγματα μικρότερης ποσότητας.

### 5.4.4 Ποσοστό μείωσης όγκου νοπού υλικού

Στο παρακάτω ραβδόγραμμα παρουσιάζεται το συνολικό ποσοστό μείωσης του όγκου του υπό ξήρανση υλικού που επιτεύχθηκε σε κάθε έναν από τους 3 πλήρεις κύκλους λειτουργίας του (1<sup>ος</sup> για μονομελή, 2<sup>ος</sup> διμελή και 3<sup>ος</sup> τριμελή οικογένεια).



**Διάγραμμα 42: Συνολική απόλεια όγκου νοπού υλικού σε κάθε σύστημα ξήρανσης**

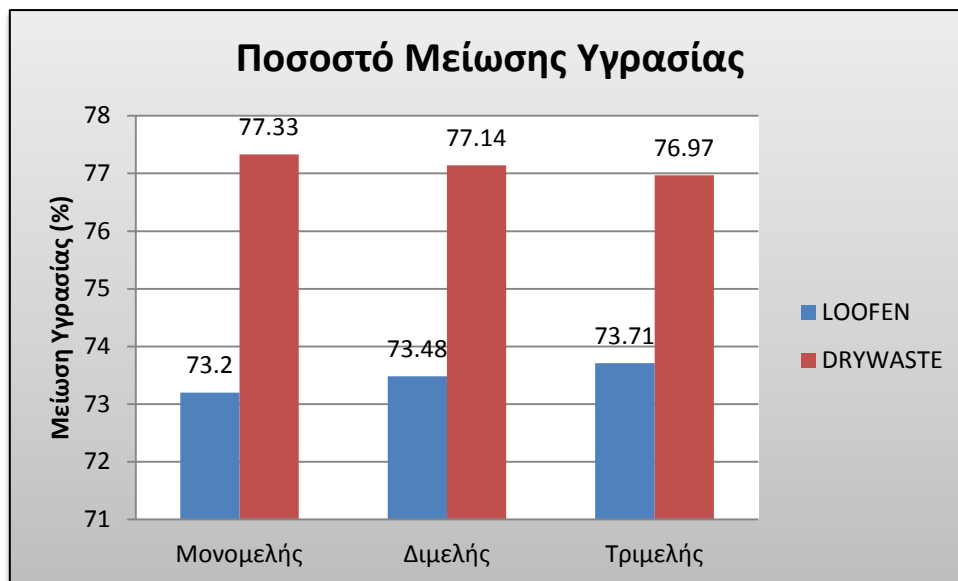
Είναι εμφανές ότι το σύστημα DRYWASTE επιτυγχάνει μεγαλύτερη μείωση του όγκου του νοπού υλικού και στους 3 κύκλους λειτουργίας σε σχέση με το σύστημα LOOFEN. Πρέπει ωστόσο να ληφθεί υπόψη ότι το DRYWASTE διαχειρίστηκε μεγαλύτερο όγκο υλικού σε σχέση με το σύστημα LOOFEN.

Παρατηρείται ότι το ποσοστό (%) μείωσης του όγκου από τον 1<sup>ο</sup> στον 3<sup>ο</sup> κύκλο ξήρανσης είναι μικρότερο από το ποσοστό (%) μείωσης της μάζας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη διεργασία της ξήρανσης η μείωση του όγκου επιτυγχάνεται με μεγαλύτερη δυσκολία από τη μείωση της μάζας.

Για το σύστημα DRYWASTE παρατηρείται ότι το ποσοστό (%) μείωσης του όγκου εμφανίζει μέγιστη τιμή στον 1<sup>ο</sup> κύκλο ξήρανσης και ελάχιστη στον 3<sup>ο</sup> κύκλο ξήρανσης. Ταυτόχρονα το σύστημα LOOFEN εμφανίζει μέγιστη τιμή μείωσης του όγκου στον 2<sup>ο</sup> κύκλο ξήρανσης.

#### **5.4.5 Ποσοστό μείωσης υγρασίας νοπού υλικού**

Στο παρακάτω ραβδόγραμμα παρουσιάζεται το συνολικό ποσοστό μείωσης της υγρασίας του υπό ξήρανση υλικού που επιτεύχθηκε σε κάθε έναν από τους 3 πλήρεις κύκλους λειτουργίας του (1<sup>ος</sup> για μονομελή, 2<sup>ος</sup> διμελή και 3<sup>ος</sup> τριμελή οικογένεια).

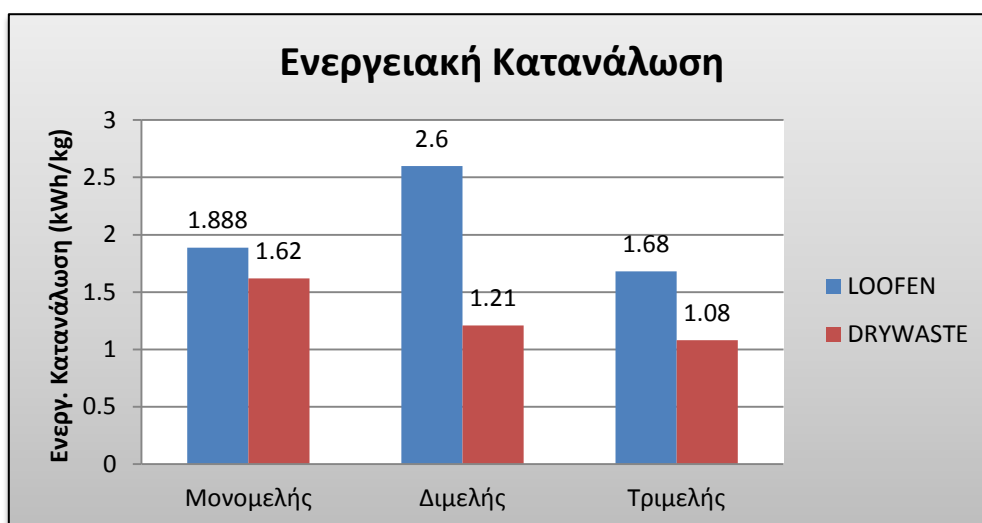


**Διάγραμμα 43:** Συνολική απώλεια υγρασίας νωπού υλικού σε κάθε σύστημα ξήρανσης

Είναι εμφανές ότι το σύστημα DRYWASTE επιτυγχάνει αρκετά μεγαλύτερη μείωση της υγρασίας του νωπού υλικού και στους 3 κύκλους λειτουργίας σε σχέση με το σύστημα LOOFEN. Παρατηρείται ακόμα ότι τα ποσοστά (%) μείωσης υγρασίας των τριών κύκλων για κάθε σύστημα εμφανίζουν πολύ μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα νωπά δείγματα και των 3 κύκλων και στα 2 συστήματα αποτελούνται από τα ίδια υλικά (τρόφιμα) με κάποιες διαφορές στις ποσότητες (εκεί οφείλονται και οι αποκλίσεις),

#### 5.4.6 Ενεργειακή Κατανάλωση ανά kg νωπού υλικού

Στο παρακάτω ραβδόγραμμα παρουσιάζεται η συνολική ενεργειακή κατανάλωση ανά κιλό νωπού υλικού σε κάθε έναν από τους 3 πλήρεις κύκλους λειτουργίας του (1<sup>ος</sup> για μονομελή, 2<sup>ος</sup> διμελή και 3<sup>ος</sup> τριμελή οικογένεια).



**Διάγραμμα 44:** Συνολική ενεργειακή κατανάλωση σε κάθε σύστημα ξήρανσης

Από το διάγραμμα είναι εμφανές ότι το σύστημα DRYWASTE παρουσιάζει μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση και στους 3 κύκλους λειτουργίας σε σχέση με το σύστημα LOOFEN, παρότι διαχειρίζεται μεγαλύτερη μάζα νωπού υλικού ανά κύκλο από αυτό.

#### 5.4.7 Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τελικού ξηρού υλικού

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του τελικού ξηρού προϊόντος που προέκυψε από κάθε σύστημα οικιακής ξήρανσης.

**Πίνακας 19: Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του τελικού ξηρού υλικού που προέκυψε από το κάθε σύστημα ξήρανσης**

Φυσικοχημικά Χαρακτηριστικά	LOOFEN				DRYWASTE
	Μονομελής	Διμελής	Τριμελής	M.O.	M.O.
TN (%)	2.65	2.51	2.58	<b>2.58</b>	<b>1.23</b>
TKN (%)	2.63	2.41	2.52	<b>2.52</b>	<b>1.16</b>
NH <sub>4</sub> -N (%)	2.88	3.26	3.07	<b>3.07</b>	<b>0.07</b>
N-NO <sub>3</sub> (%)	0.02	0.1	0.06	<b>0.06</b>	<b>0.07</b>
TOC (%)	48.23	46.93	47.58	<b>47.58</b>	<b>53.16</b>
VS (%)	90.96	89.69	90.325	<b>90.325</b>	<b>95.01</b>
pH	5.23	5.93	5.58	<b>5.58</b>	<b>4.96</b>
Αγωγιμότητα (mS)	4.75	4.65	4.7	<b>4.7</b>	<b>2.21</b>

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι το ξηρό υλικό που προέκυψε με χρήση του συστήματος LOOFEN εμφανίζει αυξημένο άζωτο, αλλά ακόμα πιο αυξημένα αμμωνιακά ιόντα σε σχέση με το υλικό που προέκυψε από το σύστημα DRYWASTE. Η μεγάλη αυτή ποσότητα αμμωνιακών είναι δείκτης ενδεχόμενης ανάπτυξης μικροβιακής δραστηριότητας εντός του συστήματος λόγω της εγκλωβισμένης εντός του υλικού υγρασίας που δεν ήταν δυνατό για το σύστημα ξήρανσης να απομακρύνει. Η ύπαρξη αμμωνιακών σχετίζεται με το σχετικά αυξημένο pH του υλικού του συστήματος LOOFEN. Ο ολικός οργανικός άνθρακας αποτελεί το σύνολο των στερεών σε ένα οργανικό υλικό που περιέχουν οργανικό άνθρακα στο μόριο τους, ο μέσος όρος για τα δείγματα του συστήματος LOOFEN ήταν 47,58 %, ενώ του συστήματος DRYWASTE 53,16%. Έτσι προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα δείγματα περιείχαν υψηλή περιεκτικότητα σε οργανική ύλη άρα τα δείγματα αποτελούνται από καθαρά οργανικές ενώσεις. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα στο σύστημα LOOFEN εμφανίζονται στα ίδια σχεδόν επίπεδα με τις βιβλιογραφικές τιμές που κυμαίνονται από 47,1%-49,2% και από 40,38%-48,04%.

[19] [40]. Παρατηρείται ακόμα μεγάλο ποσοστό πτητικών στερεών στο υλικό και των 2 συστημάτων, ενώ η ιδιαίτερα αυξημένη αγωγιμότητα του υλικού του συστήματος LOOFEN οφείλεται στην ύπαρξη ιόντων από διάσπαση του οργανικού αζώτου λόγω της μικροβιακής δραστηριότητας.

### 5.5. Προσαρμογή Κινητικών Μοντέλων

Τα πέντε κινητικά μοντέλα ξήρανσης, τα οποία περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 3 προσαρμόστηκαν στα πειραματικά δεδομένα της ξήρανσης, για να διερευνηθεί η κινητική εξίσωση η οποία αποτυπώνει καλύτερα τις πειραματικές τιμές. Οι τιμές των παραμέτρων οι οποίες υπολογίστηκαν για κάθε μοντέλο ξήρανσης για κάθε πειραματικό κύκλο παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες. Ακόμα να σημειωθεί ότι το κινητικό μοντέλο του κύκλου ξήρανσης για τριμελή οικογένεια προέκυψε από συνδυασμό των δεδομένων από 3<sup>ο</sup> και 4<sup>ο</sup> πειραματικό κύκλο.

Πίνακας 20: Κινητικά Μοντέλα Ξήρανσης

α/α	Όνομα Κινητικού Μοντέλου	Κινητικό Μοντέλο
1	Newton / Lewis	$X_t = X_0 \exp(-kt)$
2	Two term	$X_t = X_0 (a \exp(-kt) + b \exp(-k't))$
3	Modified Henderson and Pabis	$X_t = X_0 (a \exp(-kt) + b \exp(-k't) + c \exp(-k''t))$
4	Page	$X_t = X_0 \exp(-kt^n)$
5	Midilli et al.	$X_t = X_0 (a \exp(-kt^n) + bt)$

Πίνακας 21: Παράμετροι των Μοντέλων Ξήρανσης για κύκλο 1μελούς οικογένειας (1ος)

Μοντέλα									
Exponential (Lewis)		Two term		Modified Henderson and Pabis		Page		Modified Midilli	
<b>ko</b>	0.028349869	<b>ko</b>	0.350105325	<b>ko</b>	0.659354667	<b>ko</b>	3.50E-02	<b>ko</b>	4.60E-05
<b>k1</b>	0.670074022	<b>k1</b>	0.376542451	<b>k1</b>	0.212599167	<b>k1</b>	0.68758	<b>k1</b>	2.16258
<b>k2</b>	-0.212418828	<b>k2</b>	-0.478682372	<b>k2</b>	-0.61718298	<b>k2</b>	-0.29899	<b>k2</b>	-0.07237
<b>k3</b>	0.304380804	<b>k3</b>	0.310084407	<b>k3</b>	0.319673771	<b>k3</b>	0.40392	<b>k3</b>	0.27600
<b>k4</b>	-0.137667886	<b>k4</b>	-1.60954981	<b>k4</b>	-2.1188639	<b>k4</b>	-0.14688	<b>k4</b>	-0.14020
		<b>ko_</b>	0.816625953	<b>g</b>	0.21289	<b>n</b>	1.03590	<b>n</b>	0.98757
		<b>k1_</b>	0.210248919	<b>h</b>	0.21295			<b>a</b>	1.01949
		<b>k2_</b>	-0.651634587	<b>a</b>	0.15259			<b>b</b>	0.00002
		<b>k3_</b>	0.314897764	<b>b</b>	0.45956				
		<b>k4_</b>	0.332149393	<b>c</b>	0.41085				
		<b>a</b>	0.31101						
		<b>b</b>	0.71122						



Πίνακας 22: Παράμετροι Μοντέλων Ξήρανσης για κύκλο διμελούς οικογένειας (2ος )

Μοντέλα									
Exponential (Lewis)		Two term		Modified Henderson and Pabis		Page		Modified Midilli	
<b>ko</b>	0.00127757	<b>ko</b>	5.83E-05	<b>ko</b>	0.001325343	<b>ko</b>	0.001176104	<b>ko</b>	0.000221
<b>k1</b>	1.305562028	<b>k1</b>	2.08261	<b>k1</b>	1.337217499	<b>k1</b>	1.350759823	<b>k1</b>	1.751877
<b>k2</b>	-0.074259474	<b>k2</b>	-0.16632	<b>k2</b>	-0.09306763	<b>k2</b>	-0.107549587	<b>k2</b>	-0.09682
<b>k3</b>	0.499743907	<b>k3</b>	0.27978	<b>k3</b>	0.498518726	<b>k3</b>	0.498187649	<b>k3</b>	0.497328
<b>k4</b>	-0.590846969	<b>k4</b>	-0.36215	<b>k4</b>	-0.59762318	<b>k4</b>	-0.602632223	<b>k4</b>	-0.5598
		<b>ko_</b>	4.11E-04	<b>g</b>	0.14386	<b>n</b>	1.01944	<b>n</b>	1.00770
		<b>k1_</b>	1.53083	<b>h</b>	4.93599			<b>a</b>	1.00198
		<b>k2_</b>	-9.30E-02	<b>a</b>	1.15778			<b>b</b>	0.00002
		<b>k3_</b>	0.15521	<b>b</b>	-0.15577				
		<b>k4_</b>	-0.39042	<b>c</b>	-0.00021				
		<b>a</b>	1.18052						
		<b>b</b>	-0.17784						

Πίνακας 23: Παράμετροι των Μοντέλων Ξήρανσης για κύκλο τριμελούς οικογένειας (3ος και 4ος)

Μοντέλα									
Exponential (Lewis)		Two term		Modified Henderson and Pabis		Page		Modified Midilli	
<b>ko</b>	0.001043237	<b>ko</b>	0.000439008	<b>ko</b>	0.001063469	<b>ko</b>	0.001014831	<b>ko</b>	0.00021
<b>k1</b>	1.226843204	<b>k1</b>	1.437793524	<b>k1</b>	1.385583226	<b>k1</b>	1.201265685	<b>k1</b>	1.515198
<b>k2</b>	-0.164602543	<b>k2</b>	-0.22121201	<b>k2</b>	-0.30092449	<b>k2</b>	-0.186985193	<b>k2</b>	-0.09927
<b>k3</b>	0.502561319	<b>k3</b>	0.495107599	<b>k3</b>	0.496674538	<b>k3</b>	0.503439687	<b>k3</b>	0.498734
<b>k4</b>	-0.222850003	<b>k4</b>	-0.20677096	<b>k4</b>	-0.16705114	<b>k4</b>	-0.225849131	<b>k4</b>	-0.22535
		<b>ko_</b>	7.12E-07	<b>g</b>	0.27344	<b>n</b>	1.13184	<b>n</b>	1.13344
		<b>k1_</b>	1.56020	<b>h</b>	4.94422			<b>a</b>	0.99996
		<b>k2_</b>	-6.69E-02	<b>a</b>	1.12531			<b>b</b>	0.00002
		<b>k3_</b>	0.15417	<b>b</b>	-0.12311				
		<b>k4_</b>	-0.39874	<b>c</b>	-0.00110				
		<b>a</b>	1.24393						
		<b>b</b>	-0.23442						

Συμφώνα με την συνάρτηση της σταθεράς ξήρανσης, η οποία εξαρτάται από την επίδραση των παραγόντων του φαινομένου της απομάκρυνσης της υγρασίας:

$$K = k_o T^{k_1} a_w^{k_2} u^{k_3} d^{k_4} \quad (8)$$

Όπου:  $d$  το πάχος του υλικού,

$T$  η θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης,

$u$  η ταχύτητα του αέρα ξήρανσης

$a_w$  η σχετική υγρασία του αέρα ξήρανσης

$k_o, k_1, k_2, k_3, k_4$  εμπειρικές σταθερές που υπολογίστηκαν στους παραπάνω πίνακες

Η μελέτη των παραμέτρων των μοντέλων ξήρανσης για τους 3 πειραματικούς κύκλους οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία και η ταχύτητα του ρεύματος αέρα ξήρανσης επιδρούν θετικά στην κινητική της ξήρανσης ( $k_1 > 0$ ) και ( $k_3 > 0$ ). Αναλυτικότερα η σταθερά  $k_1$  της θερμοκρασίας λαμβάνει εύρος τιμών από 0,2861 έως 2.1945, ενώ αντίστοιχα η σταθερά  $k_3$  της ταχύτητας από 0.27603 έως 0.50343. Διαπιστώνεται ότι οι σταθερές  $k_1$  και  $k_3$  έχουν θετικό πρόσημο και επομένως η αύξηση της θερμοκρασίας και της ταχύτητας του ρεύματος αέρα επιταχύνει τη διεργασία της ξήρανσης των διατροφικών απορριμμάτων. Επιπλέον, οι τιμές της  $k_1$  είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της  $k_3$  υποδηλώνοντας ότι η μεταβολή της θερμοκρασία επιδρά περισσότερο από ότι η μεταβολή της ταχύτητα του αέρα στο ρυθμό της ξήρανσης του οργανικού υποστρώματος.

Σε αντίθεση η σχετική υγρασία του ρεύματος αέρα και το πάχος του υλικού που επιδρούν αρνητικά στην κινητική της ξήρανσης ( $k_2 < 0$ ) και ( $k_4 < 0$ ). Αναλυτικότερα η σταθερά  $k_2$  της σχετικής υγρασίας λαμβάνει εύρος τιμών από -0.55629 έως -0,8936 ενώ αντίστοιχα η σταθερά  $k_4$  του πάχους του υλικού από -0,7372 έως -0.14144. Διαπιστώνεται ότι οι σταθερές  $k_2$  και  $k_4$  έχουν αρνητικό πρόσημο και επομένως η αύξηση της σχετικής υγρασίας του ρεύματος αέρα και του πάχους του υλικού επιβραδύνει τη διεργασία της ξήρανσης των διατροφικών απορριμμάτων. Επιπλέον, οι τιμές της  $k_4$  είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες της  $k_2$  υποδηλώνοντας ότι η μεταβολή του πάχους του υλικού επιδρά περισσότερο από ότι η σχετική υγρασία του ρεύματος αέρα στο ρυθμό της ξήρανσης.

Όσον αφορά για το πιο κινητικό μοντέλο ανταποκρίνεται καλύτερα στις πειραματικές τιμές της υγρασίας, υπολογίστηκε η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE – Root Mean Square Error) μεταξύ των πειραματικών τιμών υγρασίας και των αντίστοιχων τιμών που προκύπτουν από το εκάστοτε προς μελέτη μοντέλο ξήρανσης για κάθε πείραμα. Τα αποτελέσματα των ριζών του μέσου τετραγωνικού σφάλματος

για το κάθε μοντέλο και για τον κάθε πειραματικό κύκλο παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 24: RMSE των Εμπειρικών Μοντέλων Ξήρανσης**

Κύκλοι Ξήρανσης	RMSE Μοντέλων				
	Exponential (Lewis)	Two Term	Modified Henderson and Pabis	Page	Modified Midilli
1ος (μονομελής)	0.618219776	0.4497	0.475475933	0.59002	0.538562269
2ος (διμελής)	0.04982654	0.04854	0.045838157	0.04658	0.046119022
3ος & 4ος (τριμελής)	0.089365495	0.045572828	0.024755044	0.0261	0.026097225

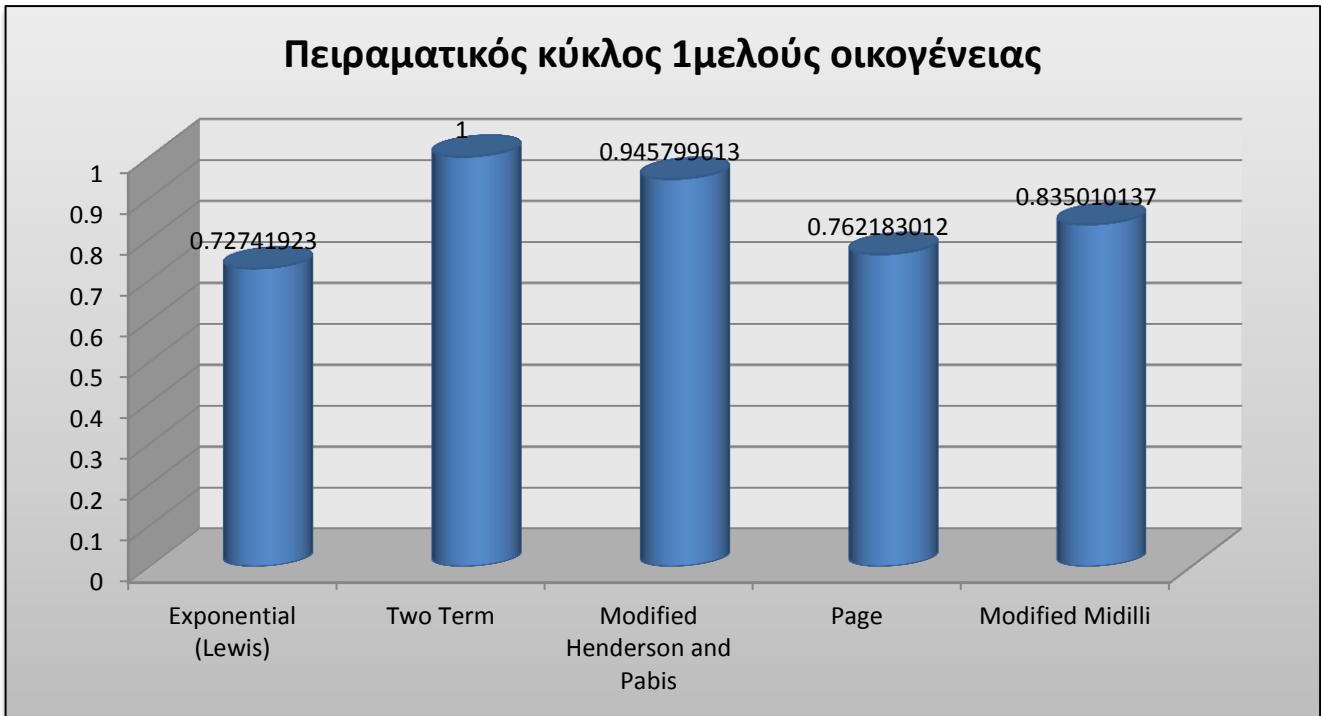
Από το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών πειραματικής και θεωρητικής τιμής, κατά την υπολογιστική ελαχιστοποίηση (RMSE) των πέντε μοντέλων προκύπτει το συμπέρασμα ότι:

Για τον 1<sup>ο</sup> κύκλο ξήρανσης το εμπειρικό μοντέλο **Two Term** ανταποκρίνεται καλύτερα από τα υπόλοιπα μοντέλα στις πειραματικές τιμές που προκύπτουν λόγω του ότι το RMSE του συγκεκριμένου μοντέλου συγκλίνει περισσότερο στο μηδέν από ότι τα υπόλοιπα μοντέλα. Ωστόσο και το μοντέλο **Modified Henderson and Pabis** εκφράζει ικανοποιητικά τις πειραματικές τιμές.

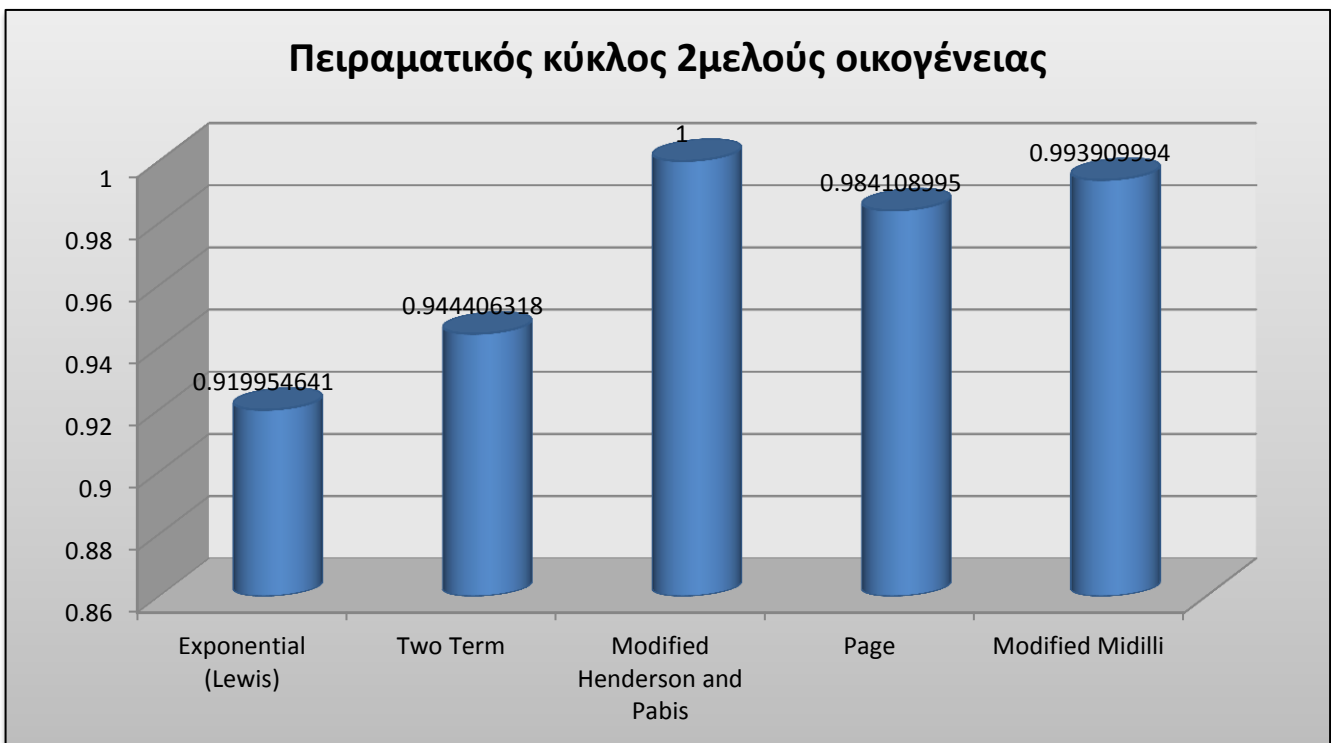
Για τον 2<sup>ο</sup> κύκλο ξήρανσης το εμπειρικό μοντέλο **Modified Henderson and Pabis** ανταποκρίνεται καλύτερα από τα υπόλοιπα μοντέλα στις πειραματικές τιμές που προκύπτουν λόγω του ότι το RMSE του συγκεκριμένου μοντέλου συγκλίνει περισσότερο στο μηδέν από ότι τα υπόλοιπα μοντέλα. Ωστόσο και τα μοντέλα **Page** και **Modified Midilli** εκφράζουν αρκετά ικανοποιητικά τις πειραματικές τιμές.

Για τον 3<sup>ο</sup> και 4<sup>ο</sup> κύκλο ξήρανσης το εμπειρικό **Modified Henderson and Pabis** ανταποκρίνεται καλύτερα από τα υπόλοιπα μοντέλα στις πειραματικές τιμές που προκύπτουν λόγω του ότι το RMSE του συγκεκριμένου μοντέλου συγκλίνει περισσότερο στο μηδέν από ότι τα υπόλοιπα μοντέλα. Ωστόσο και τα μοντέλα **Page** και **Modified Midilli** εκφράζουν αρκετά ικανοποιητικά τις πειραματικές τιμές.

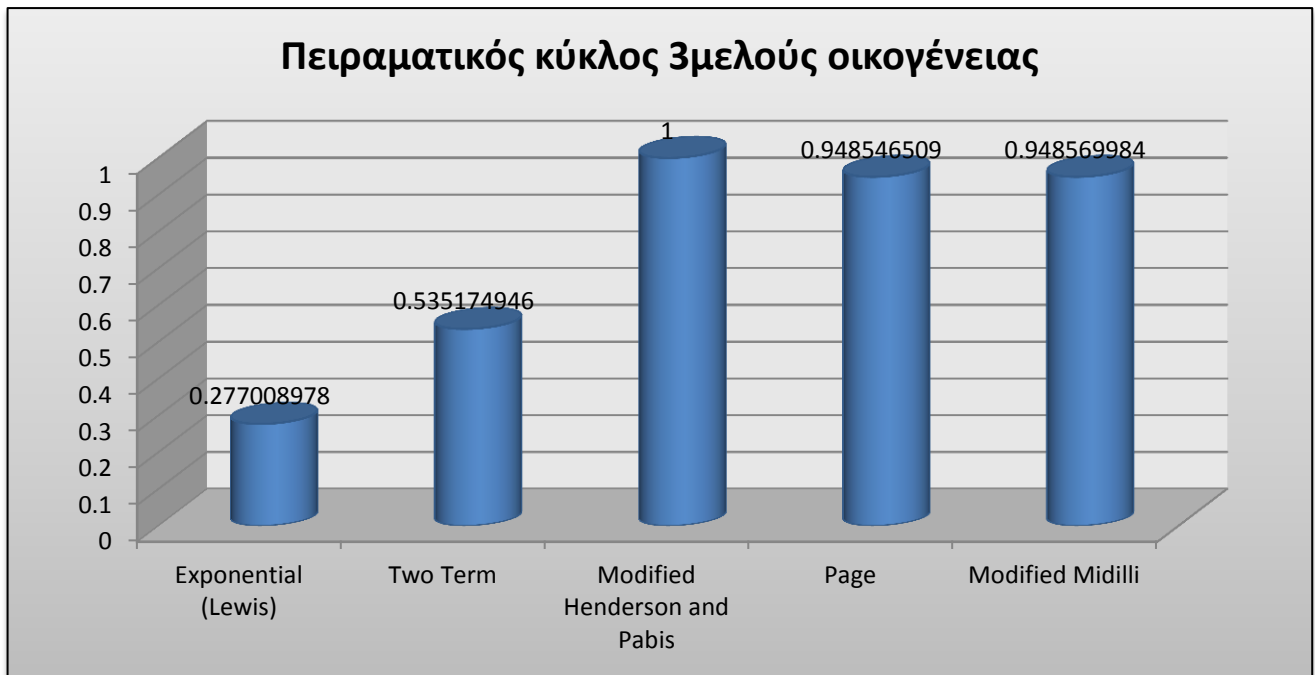
Στα παρακάτω διαγράμματα, αναπαρίσταται γραφικά ο λόγος του RMSE του βέλτιστου μοντέλου προς το RMSE του εκάστου κινητικού μοντέλου για κάθε πειραματικό κύκλο.



Διάγραμμα 45: RMSE του βέλτιστου μοντέλου προς το RMSE του κάθε κινητικού μοντέλου για πειραματικό κύκλο 1μελούς οικογένειας



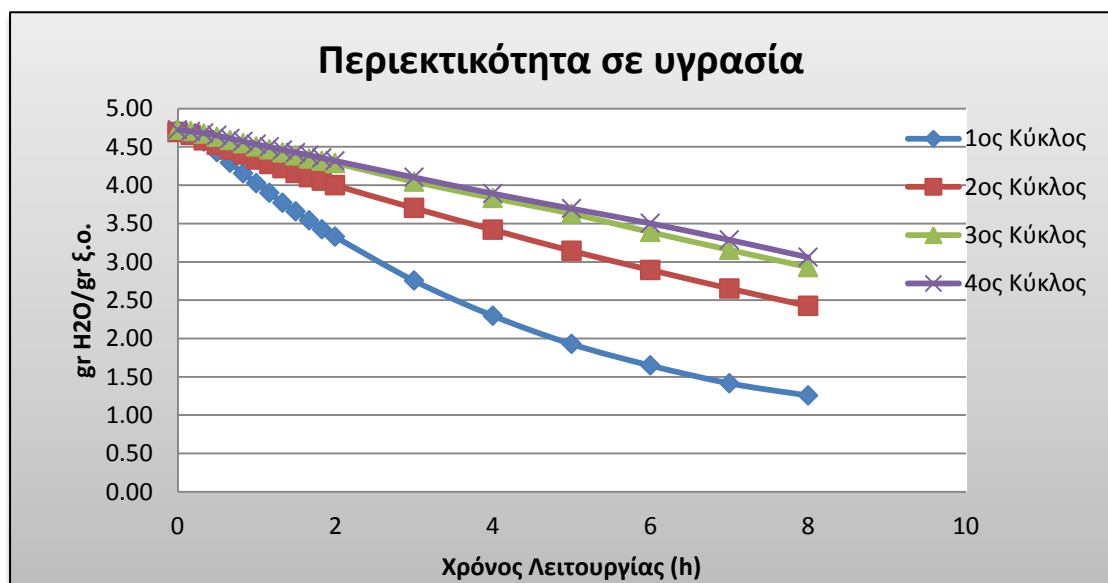
Διάγραμμα 46: RMSE του βέλτιστου μοντέλου προς το RMSE του κάθε κινητικού μοντέλου για πειραματικό κύκλο 2μελούς οικογένειας



**Διάγραμμα 47: RMSE του βέλτιστου μοντέλου προς το RMSE του κάθε κινητικού μοντέλου για πειραματικό κύκλο 1μελούς οικογένειας**

Από τα διαγράμματα επιβεβαιώνονται τα συμπεράσματα για το βέλτιστο κινητικό μοντέλο κάθε κύκλου.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η περιεκτικότητα σε υγρασία συναρτήσει του χρόνου ξήρανσης συγκριτικά για τους 4 κύκλους ξήρανσης. Το διάγραμμα προέκυψε από τις μέσες τιμές της περιεκτικότητας σε υγρασία όλων των οκτάωρων λειτουργίας στα οποία υπήρξε προσθήκη φρέσκου νωπού υλικού για κάθε κύκλο.



**Διάγραμμα 48: Περιεκτικότητα σε υγρασία για τους 4 κύκλους**

Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι ο ρυθμός μείωσης της περιεχόμενης υγρασίας είναι πολύ μεγαλύτερος στον 1<sup>ο</sup> πειραματικό κύκλο σε σχέση με τους υπόλοιπους. Αυτό οφείλεται στη σχετικά μικρή φρέσκια ποσότητα νωπού υλικού που είχε να διαχειριστεί το σύστημα ξήρανσης κάθε οκτάωρο για τον 1<sup>ο</sup> πειραματικό κύκλο. Αντίθετα στους υπόλοιπους 3 κύκλους ο ρυθμός αυτός ήταν μικρότερος λόγω της μεγάλης ποσότητας νωπού υλικού που προσθέταμε στο σύστημα ανά οκτάωρο, ενώ η τελική περιεκτικότητα σε υγρασία στο τέλος του οκταώρου είναι μεγαλύτερη στον 2<sup>ο</sup> κύκλο και ακόμα μεγαλύτερη στον 3<sup>ο</sup> και 4<sup>ο</sup>, γεγονός που δείχνει ότι το σύστημα δεν μπορεί να διαχειριστεί ικανοποιητικά την ποσότητα διατροφικών απορριμμάτων που παράγει μια 3μελής οικογένεια.

Στα διαγράμματα του παραρτήματος, όπου παρουσιάζεται η περιεκτικότητα σε υγρασία συναρτήσει του χρόνου ξήρανσης για κάθε οκτάωρο ξήρανσης κάθε κύκλου, πραγματοποιείται οπτική προσαρμογή των πέντε κινητικών μοντέλων ξήρανσης συγκριτικά με τα πειραματικά δεδομένα της ξήρανσης. Σκοπός της παρουσίασης αυτών των διαγραμμάτων είναι για να φανεί γραφικά ποιά κινητικά μοντέλα περιγράφουν αποτελεσματικά και με συνέπεια τα πειραματικά δεδομένα. Πρέπει να διευκρινιστεί ότι τα πειραματικά δεδομένα παρουσιάζονται στα διαγράμματα ως σημεία και τα δεδομένα των μοντέλων ως γραφήματα.

## **5.6. Συμπεράσματα**

Από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών, εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τις επιδόσεις και δυνατότητες του εμπορικού συστήματος οικιακής ξήρανσης **LOOFEN LF-07** σε σχέση με το σύστημα οικιακής ξήρανσης **DRYWASTE** του εργαστηρίου Μ.Π.Ε.Τ. του Ε.Μ.Π.

Συγκεκριμένα για το σύστημα **LOOFEN LF-07**:

Η μείωση της μάζας των οικιακών βιοαποβλήτων, μέσω της αφαίρεσης της περιεχόμενης σε αυτά υγρασίας με το σύστημα LOOFEN, προσδιορίστηκε κατά μέσο όρο για τους 4 πειραματικούς κύκλους ίση με **75,83% κ.β.**. Η μείωση αυτή είναι αρκετά ικανοποιητική και δείχνει την αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος οικιακής ξήρανσης. Το ποσοστό κυμάνθηκε στο εύρος τιμών μεταξύ 75,05-76,8 γεγονός που οφείλεται στη διαφορετική ποσότητα του υλικού που εναποτέθηκε σε κάθε κύκλο ξήρανσης. Ωστόσο τα ποσοστά μείωσης της μάζας προσδιορίστηκαν μικρότερα σε σχέση με αυτά του συστήματος DRYWASTE (78,52% κ.β.), γεγονός που οφείλεται, σε μη σωστή προεπεξεργασία των διατροφικών απορριμμάτων πριν την είσοδό τους στο εσωτερικό του θαλάμου ξήρανσης (μη σωστή κοπή τους προκειμένου να μειωθεί η επιφάνεια ξήρανσης) καθώς επίσης και στην καλύτερη κυκλοφορία του ρεύματος θερμού αέρα εντός του συστήματος DRYWASTE που διευκόλυνε τη διεργασία της ξήρανσης. Επίσης, η διαφορά των τιμών οφείλεται και στην ύπαρξη καλύτερης μόνωσης στην πειραματική διαδικασία με το σύστημα DRYWASTE γεγονός που εμπόδισε την ύπαρξη θερμικών απωλειών.

Ο χρόνος περάτωσης της διεργασίας της ξήρανσης για τους πειραματικούς κύκλους κυμάνθηκε μεταξύ **56-112 h**. Ο 1<sup>ος</sup> πειραματικός κύκλος χρειάστηκε τον περισσότερο χρόνο για την ολοκλήρωση επειδή η πλήρωση του καλάθιού απόρριψης με προσθήκη φρέσκου νωπού υλικού άργησε να επέλθει σε σχέση με τους υπόλοιπους κύκλους που λόγω μεγαλύτερης ποσότητας απόρριψης έφτασαν στην πλήρωση πιο σύντομα. Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί ότι στον 2<sup>ο</sup> και 4<sup>ο</sup> πειραματικό κύκλο μεσολάβησε μεγάλο χρονικό διάστημα από την πλήρωση του καλάθιού απόρριψης μέχρι τη σταθεροποίηση του τελικού ξηρού προϊόντος και το πέρας της διεργασίας. Αυτό οφείλεται στο μεγάλο ποσοστό της εγκλωβισμένης εντός του υλικού υγρασίας, η οποία δε απομακρύνθηκε επαρκώς κατά το πρώτο οκτάωρο ξήρανσης και παγιδεύτηκε κάτω από το φρέσκο νωπό υλικό που προστέθηκε στη συνέχεια. Από την άλλη πλευρά το σύστημα DRYWASTE ενώ χρειάστηκε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μέχρι τη πλήρωση του, έφτασε συντομότερα μετά την πλήρωση στην σταθεροποίηση του τελικού προϊόντος σε σχέση με το σύστημα LOOFEN.

Η μείωση του όγκου των οικιακών βιοαποβλήτων προσδιορίστηκε κατά μέσο όρο για τους 4 πειραματικούς κύκλους ίση με **49,87 %**. Το ποσοστό κυμάνθηκε στο εύρος τιμών μεταξύ 41,66-54,9 % γεγονός που οφείλεται στη διαφορετική ποσότητα του υλικού που εναποτέθηκε σε κάθε κύκλο ξήρανσης. Το μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης του όγκου παρατηρήθηκε στον 2<sup>ο</sup> πειραματικό κύκλο, ενώ η μεγάλη διαφορά του ποσοστού αυτού μεταξύ 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> κύκλου (41,66 και 50,9% αντίστοιχα) αποδεικνύει ότι η **ανάδευση του υπό ξήρανση υλικού** βελτιώνει ιδιαίτερα την απόδοση της ξήρανσης, καθιστώντας δυνατό για το ρεύμα του θερμού αέρα να έρθει σε επαφή με μεγαλύτερο τμήμα της επιφάνειας του υλικού. Παρατηρείται ακόμα ότι λόγω του μικρού ονομαστικού όγκου (5 L) του καλάθιού απόρριψης δεν ήταν δυνατή η διαχείριση ποσότητας νωπού υλικού που αντιστοιχεί σε 4μελή οικογένεια, καθώς η ποσότητα υπερχειλίζει το καλάθι απόρριψης. Από την άλλη πλευρά το σύστημα DRYWASTE λόγω της μεγαλύτερης χωρητικότητας του καλάθιού απόρριψης του (8,5 L) ήταν ικανό να διαχειριστεί και την ποσότητα που παράγει μια 4μελής οικογένεια, ενώ πέτυχε μεγαλύτερη μείωση όγκου του νωπού υλικού κατά μέσο όρο (58,77%) για τους αντίστοιχους πειραματικούς κύκλους, γεγονός που δηλώνει την καλύτερη απόδοση του.

Η μείωση της υγρασίας του τελικού ξηρού προϊόντος προσδιορίστηκε κατά μέσο όρο για τους 4 πειραματικούς κύκλους ίση με **73,46 % κ.β.**, ενώ κυμάνθηκε στο εύρος τιμών 73,2-76% κ.β, γεγονός που αποδεικνύει την αποδοτικότητα του συστήματος στην απομάκρυνση της υγρασίας από το εσωτερικό των οικιακών βιοαποβλήτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης της υγρασίας του τελικού ξηρού υλικού επιτεύχθηκε στον 3<sup>ο</sup> κύκλο, λόγω της τακτικής ανάδευσης του υπό ξήρανση υλικού. Η υγρασία του τελικού ξηρού υλικού που προέκυψε από το σύστημα DRYWASTE υπολογίστηκε κατά μέσο όρο 77,13 % για τους αντίστοιχους πειραματικούς κύκλους, γεγονός που δηλώνει την αποτελεσματικότερη δράση της συσκευής.

Η μέση τιμή ενεργειακής κατανάλωσης των τεσσάρων κύκλων μετρήθηκε ίση με **2,05 kWh/kg**. Η ενεργειακή κατανάλωση κυμάνθηκε στο εύρος τιμών 1,68-2,6 kWh/kg. Η μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια του 2<sup>ου</sup> πειραματικού κύκλου. Στη διάρκεια της ξήρανσης με τη χρήση του συστήματος DRYWASTE, η μέση ενεργειακή κατανάλωση της συσκευής για τους αντίστοιχους κύκλους μετρήθηκε ίση με 1,4 kWh/kg. Η μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση για το σύστημα αυτό οφείλεται πιθανόν στην καλύτερη μόνωση του σε σχέση με το σύστημα LOOFEN η οποία περιόρισε τις θερμικές απώλειες.

Όσον αφορά τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του τελικού ξηρού υλικού αξίζει να σημειωθεί ότι το σύστημα LOOFEN έδωσε προϊόν με μεγαλύτερη συγκέντρωση TN, TKN και NH<sub>4</sub>-N (2.58,2.52 και 3,07 % αντίστοιχα) σε σχέση με το ξηρό υλικό που προέκυψε από το σύστημα DRYWASTE, γεγονός που αποδίδεται στην εντονότερη ύπαρξη μικροβιακής δραστηριότητας εντός του υλικού του LOOFEN λόγω της εγκλωβισμένης υγρασίας. Στη μεγαλύτερη συγκέντρωση αμμωνιακών ιόντων αποδίδεται το αυξημένο μέσο pH (5.58) του υλικού του LOOFEN σε σχέση με το αντίστοιχο pH (4,96) που προέκυψε από το σύστημα DRYWASTE. Η μέση τιμή (%) TOC μετρήθηκε ίση με 47,58 % σε οργανικό φορτίο και έτσι προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα δείγματα περιείχαν υψηλή περιεκτικότητα σε οργανική ύλη άρα τα δείγματα αποτελούνται από καθαρά οργανικές ενώσεις. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα εμφανίζονται στα ίδια σχεδόν επίπεδα με τις βιβλιογραφικές τιμές. Το μέσο ποσοστό (%) VS ίσο με 90,325 για το υλικό του συστήματος LOOFEN, γεγονός που δηλώνει ότι το ξηρό υλικό είναι πλούσιο σε πτητικά στερεά. Το ξηρό υλικό ωστόσο του συστήματος DRYWASTE παρουσίασε υψηλότερες τιμές των χαρακτηριστικών αυτών (TOC=53,168%, VS=95,01%). Πρέπει να αναφερθεί επίσης ότι τα N-NO<sub>3</sub> ιόντα βρέθηκαν σε πολύ χαμηλά επίπεδα στο τελικό υλικό και των 2 συστημάτων, ενώ η αγωγιμότητα του υλικού του συστήματος LOOFEN βρέθηκε σχεδόν διπλάσια (4,7 mS ) σε σχέση με την αγωγιμότητα του υλικού του συστήματος DRYWASTE (2.21 mS).

Κατά τη διάρκεια των πειραματικών κύκλων η θερμοκρασία εντός του συστήματος οικιακής ξήρανσης μετρήθηκε κατά μέσο όρο ίση με 48,35°C και κυμάνθηκε μεταξύ 23.5-57.5 °C. Η μέση τιμή αυτή είναι λογική εφόσον το ρεύμα θερμού αέρα εντός της συσκευής είχε μέση θερμοκρασία 54,92 °C. Αξίζει επίσης να παρατηρηθεί ότι η θερμοκρασία έφτασε στα χαμηλότερα επίπεδα στον 3<sup>ο</sup> πειραματικό κύκλο και στα υψηλότερα στον 1<sup>ο</sup> πειραματικό κύκλο

Επίσης η σχετική υγρασία εντός του συστήματος οικιακής ξήρανσης μετρήθηκε κατά μέσο όρο ίση με 34,11 % και κυμάνθηκε μεταξύ 16-86,5 %. Αξίζει επίσης να παρατηρηθεί ότι η σχετική υγρασία έφτασε στα χαμηλότερα επίπεδα στον 1<sup>ο</sup> πειραματικό κύκλο και στα υψηλότερα στον 3<sup>ο</sup> πειραματικό κύκλο λόγω της μεγαλύτερης ποσότητας εγκλωβισμένης στο εσωτερικό του υλικού υγρασίας.

Από την εξέταση των πέντε κινητικών μοντέλων ξήρανσης με ρεύμα αέρα (**Exponential (Lewis), Modified Henderson and Pabis, Two Term, Page** και



**Modified Midilli**) επιβεβαιώνεται και από τα πέντε κινητικά μοντέλα ότι η θερμοκρασία του ρεύματος αέρα επιδρά θετικά ( $k_1 > 0$ ) στην κινητική της ξήρανσης έτσι με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται ο ρυθμός ξήρανσης, το ίδιο συμβαίνει και με την ταχύτητα ( $k_3 > 0$ ) του ρεύματος αέρα ξήρανσης. Σε αντίθεση με την υγρασία του ρεύματος αέρα, όπου σύμφωνα πάλι και από τα πέντε μοντέλα, επιδρά αρνητικά ( $k_2 < 0$ ) στην κινητική της ξήρανσης έτσι με την αύξηση της σχετικής υγρασίας του ρεύματος αέρα ο ρυθμός ξήρανσης μειώνεται, το ίδιο συμβαίνει και με το πάχος του υλικού ( $k_4 < 0$ ). Όσον αφορά για το πιο κινητικό μοντέλο ανταποκρίνεται καλύτερα στις πειραματικές τιμές της υγρασίας, συμπεραίνεται ότι το εμπειρικό μοντέλο **Modified Henderson and Pabis** ανταποκρίνεται καλύτερα από τα υπόλοιπα μοντέλα στις πειραματικές τιμές του 2<sup>ου</sup> κύκλου που αντιστοιχεί σε διμελή, και 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> κύκλου που αντιστοιχούν σε τριμελή οικογένεια, ενώ το εμπειρικό μοντέλο **Two Term** ανταποκρίνεται καλύτερα από τα υπόλοιπα μοντέλα στις πειραματικές τιμές του 1<sup>ου</sup> κύκλου για μονομελή οικογένεια, δεδομένου ότι το RMSE του μοντέλου συγκλίνει περισσότερο στο μηδέν από ότι τα υπόλοιπα μοντέλα ενώ παρουσιάζει την καλύτερη προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα όπως προκύπτει από την οπτική ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Συνοψίζοντας συμπεραίνουμε από τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από το σύστημα LOOFEN ότι μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά για την διαχείριση διατροφικών απορριμμάτων που παράγονται από μονομελείς, διμελείς οικογένειες, ωστόσο δεν μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά για την διαχείριση διατροφικών απορριμμάτων που παράγονται από τριμελείς και τετραμελείς οικογένειες. Επίσης συνολικά το σύστημα οικιακής ξήρανσης DRYWASTE παρουσίασε συνολικά καλύτερη απόδοση από το σύστημα LOOFEN, αφού :

- ✓ Πέτυχε μεγαλύτερη μείωση της μάζας, του όγκου και της υγρασίας του αρχικού νωπού υλικού προσφέροντας καλύτερη κυκλοφορία του ρεύματος ξηρού αέρα εντός της συσκευής.
- ✓ Μπόρεσε να διαχειριστεί μεγαλύτερη ποσότητα διατροφικών απορριμμάτων λόγω της μεγαλύτερης χωρητικότητάς του.
- ✓ Χρειάστηκε λιγότερο χρόνο μετά τη πλήρωση του για να σταθεροποιήσει το υπό ξήρανση υλικό.
- ✓ Παρουσίασε μικρότερη μικροβιακή δραστηριότητα κατά τη διάρκεια της διεργασίας.
- ✓ Παρουσίασε μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση, λόγω καλύτερης θερμικής μόνωσης.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα προαναφερόμενα συμπεράσματα καταλήγουμε ότι η διεργασία της ξήρανσης με ρεύμα αέρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά ως εναλλακτικός τρόπος διαχείρισης του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων προσφέροντας σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη. Η περεταίρω διερεύνηση θα μπορούσε να συντέλεση στη αριστοποίηση των συστημάτων ξήρανσης και να δώσει τη δυνατότητα για εφαρμογή τους σε οικιακό και μεγαλύτερης κλίμακας επίπεδο.



## 6. Βιβλιογραφία

- [1] ΕΠΠΕΡΑΑ, (2012). «Οδηγός εφαρμογής προγραμμάτων Διαλογή στη Πηγή & συστημάτων διαχείρισης των βιοαποβλήτων»
- [2] Μαρία Λοϊζίδου, (2006). «Στερεά απόβλητα», σημειώσεις για το μάθημα: Περιβαλλοντική Επιστήμη, ΕΜΠ, Αθήνα.
- [3] Μουστάκας Κ., (2011). «Αεριοποίηση / υαλοποίηση αποβλήτων με την τεχνική του πλάσματος», Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- [4] Βιώσιμη Διαχείριση Σκουπιδιών (2010). [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο διαδικτυακό χώρο: <http://diaxeirisi-skoupidiwn.blogspot.gr/>
- [5] Γιδαράκος, Ε.,(2006). «Επικίνδυνα Απόβλητα, Διαχείριση - Επεξεργασία- Διάθεση, Εκδόσεις Ζυγός», Θεσσαλονίκη.
- [6] Καραπάντσιος Θεωδωρής «Ξήρανση», [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο διαδικτυακό χώρο: [www.eng.auth.gr/~chemtech/foititika/fd/dry/dry01.pdf](http://www.eng.auth.gr/~chemtech/foititika/fd/dry/dry01.pdf)
- [7] Μαργαρίτης Μάρκος, (2012). «Αξιοποίηση του βιοαποδομήσιμου κλάσματος απορριμμάτων με χρήση πρότυπου συστήματος οικιακού τύπου», Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα.
- [8] Φραγγελάκης Εμμανουήλ, (2006) «Κομποστοποίηση Οργανικού Κλάσματος Οικιακών Απορριμμάτων», Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα.
- [9] Μπάβα Νικολέττα, (2014), «Διερεύνηση της επίδρασης της διεργασίας της ξήρανσης στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των οικιακών διατροφικών απορριμμάτων» Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα.
- [10] Σιάμαρης Κυριάκος, (2012), «Διεργασία ξήρανσης με ρεύμα αέρα ως εναλλακτικός τρόπος διαχείρισης του στερεού οργανικού κλάσματος των οικιακών αποβλήτων», Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα.
- [11] Γιαρντ Μισελ, (2011), «Διερεύνηση των ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών του τελικού προϊόντος ενός καινοτόμου συστήματος ξήρανσης των οικιακών οργανικών απορριμμάτων στη πηγή», Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα.
- [12] Βαρελά Π. Ευαγγελία, (2011). «Αξιολόγηση τεχνολογιών μηχανικής και βιολογικής επεξεργασίας αστικών στερεών αποβλήτων», Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- [13] Κουτσομπίνας Κων/νος, (2012) «Βιολογική Ξήρανση Απορριμμάτων», Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα.
- [14] Κασιδώνη Σ. Μαρία, (2012), «Οικιακή Ξήρανση Βιοαποβλήτων Με Πιλοτική Εφαρμογή Στο Δήμο Παπάγου-Χολαργού» Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα.
- [15] Οικολογική εναλλακτική πρωτοβουλία, (2009). [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο διαδικτυακό χώρο: <http://sikam.wordpress.com/>
- [16] Σημειώσεις στο μάθημα «Διαχείριση Απορριμμάτων», (2002). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εργαστήριο μετάδοσης θερμότητας και περιβαλλοντικής μηχανικής. Επιμέλεια: Νικόλαος Μουσιόπουλος, Αβραάμ Καραγιαννίδης. [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο διαδικτυακό χώρο: <http://aix.meng.auth.gr/lhtee/education/swm intro.pdf>

- Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (2012). [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο διαδικτυακό χώρο: <http://www.ypeka.gr/>
- [17] Χαμπούρης Ευάγγελος, (2009) «Έρευνα για τη χρήση πρόσθετων στην παραγωγή εδαφοβελτιωτικού, από οργανικό κλάσμα απορριμμάτων σε πρότυπο σύστημα οικιακής κομποστοποίησης», Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα
- [18] Μουζέλης Ν. (2007). Από την πρόωμη στην ύστερη νεωτερικότητα. *ΒΗΜΑ ΔΙΕΘΝ*, 7 Σεπτεμβρίου 2007. [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο διαδικτυακό χώρο: [http://www.antifono.gr/portal/index.php?option=com\\_content&view=article&id=408&catid=82&Itemid=150](http://www.antifono.gr/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=408&catid=82&Itemid=150)
- [19] Μαλαμής Δημήτριος, (2011), «Σχεδιασμός, κατασκευή και λειτουργία βιοαντιδραστήρα για την επεξεργασία οργανικών αποβλήτων», Διδακτορική Διατριβή, Ε. Μ.Π., Αθήνα.
- [20] Ελληνική Εταιρεία Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων, (2006),. “Το νομοθετικό πλαίσιο διαχείρισης των ΑΣΑ στην Ελλάδα”, [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο διαδικτυακό χώρο: [www.eedsa.gr](http://www.eedsa.gr)
- [21] Environmental statistics and accounts in Europe, 2010, [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο διαδικτυακό χώρο: <http://ec.europa.eu/eurostat>
- [22] ATHENS BIOWASTE, (2011) «Ολοκληρωμένη Διαχείριση Βιοαποβλήτων στην Ελλάδα, η περίπτωση της Αθήνας 1<sup>ο</sup> Ανασκόπηση και αξιολόγηση συστημάτων διαλογής των βιοαποβλήτων στην πηγή», Αθήνα.
- [23] Favoino E., Ricci M., (2006). «The Economics of Different Separate Collection Schemes for Biowaste», 2006. ECN/ORBIT e.V. - First Baltic Biowaste Conference 2006 Pres. Nr. 07.
- [24] US EPA, (2008), «Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste»
- [25] Σιούλας, Κ. et al, (2010), «Εγχειρίδιο Βιοαερίου» Δημοσιεύτηκε από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας, [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο διαδικτυακό χώρο: <http://www.cres.gr>
- [26] Ανδρεαδάκης Α. «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» σημειώσεις για το μάθημα Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων και Ιλύος Αρχές και Μέθοδοι Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων, ΕΜΠ.
- [27] Συμβούλιο Ενεργειακής Αξιοποίησης Αποβλήτων (2010), «Τεχνολογίες Διαχείρισης Αποβλήτων» [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο διαδικτυακό χώρο <http://www.wtert.gr/>
- [28] McCabe, Smith, Harriott, (2003) «Βασικές Φυσικές Διεργασίες Μηχανικής», Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα
- [29] Μ. Κροκίδα, Δ. Μαρίνος-Κουρής, Ζ.Μαρουλης, (2003) «Σχεδιασμός Θερμικών Διεργασιών», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π
- [30] Γαλανού Βασιλεία, (2010), «Ανάλυση Ηλιακών Ξηραντήρων» Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα
- [31] Αναστάσιος Ζουμπούλης, Θοδωρής Καραπάντσιος, Κώστας Μάτης, Παύλος Μαύρος, (2009), «Στοιχεία Φυσικών Διεργασιών», Εκδόσεις Τζιόλα

- [32] Ρασογιάννη Παναγιώτα, (2010), «Μελέτη Κινητικής Ξήρανσης Προϊόντος Κρέατος» Διπλωματική εργασία, Αθήνα
- [33] Duo Enterprise Ltd, (2014), [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο διαδικτυακό χώρο:  
<http://duoent.en.ec21.com/>
- [34] Ecowell Ltd., (2014), [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο διαδικτυακό χώρο:  
<http://ecowell.en.alibaba.com/>
- [35] Coway, (2014) [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στον διαδικτυακό χώρο:  
<http://www.coway.com/>
- [36] Loofen., (2014) [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο διαδικτυακό χώρο:  
<http://www.loofenireland.com/>
- [37] SAMOH NK, (2014) [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο διαδικτυακό χώρο:  
<http://samohnk.en.ec21.com/>
- [38] Waste2bio project, (2014). [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο διαδικτυακό χώρο:  
<http://www.waste2bio.eu/>
- [39] WRAP., (2012). “Evaluation of the WRAP Separate Food Waste Collection Trials”, Final Report . [Ηλεκτρονικό] Διαθέσιμο στο διαδικτυακό χώρο:  
[http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Evaluation of the WRAP FW Collection Trials Update June 2009.pdf](http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Evaluation%20of%20the%20WRAP%20FW%20Collection%20Trials%20Update%20June%202009.pdf)
- [40] Komilis, D.P., R.K.Ham, (2006), «Carbon dioxide and ammonia emissions during composting of mixed paper, yard waste and food waste»

## 7. Παράρτημα

