

## Πτηνοτροφικά απόβλητα (κοπριές): μια ανασκόπηση των κυριότερων τεχνολογιών διαχείρισης και αξιοποίησής τους

Γιώργος Μάρκου

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Ιερά οδός 75, 11855 Βοτανικός, Αθήνα  
e-mail: [markoug@aua.gr](mailto:markoug@aua.gr), και [markougior@gmail.com](mailto:markougior@gmail.com)

### Περίληψη

Τα πτηνοτροφικά απόβλητα χαρακτηρίζονται από υψηλό οργανικό και ανόργανο φορτίο αλλά και από την περιεκτικότητά τους σε παθογόνους μικροοργανισμούς. Η ανεξέλεγκτη απόθεση των αποβλήτων αυτών έχει σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και στον άνθρωπο. Στην Ελλάδα, και κυρίως στην Αττική υπάρχει εντατικοποίηση της πτηνοτροφικής παραγωγής, για αυτό είναι σημαντικό να τονιστούν οι σχετικές επιπτώσεις τους στο περιβάλλον και στον άνθρωπο. Στην παρούσα εργασία γίνεται ανασκόπηση των κυριότερων ζητημάτων που σχετίζονται με τα πτηνοτροφικά απόβλητα και την διαχείρισή τους. Παρατίθενται οι σημαντικότερες τεχνολογίες διαχείρισης και αξιοποίησής τους, δίνοντας έμφαση στην κομποστοποίηση και την αναερόβια χώνευση, των οποίων τα τελικά προϊόντα έχουν αξία χρήσης.

**Λέξεις κλειδιά:** Απόβλητα, πτηνοτροφεία, βιοκαύσιμα, βιομάζα, διαχείριση, περιβάλλον, ενέργεια

### 1. Εισαγωγή

Στον τομέα της ελληνικής κτηνοτροφίας, η πτηνοτροφία αποτελεί τον πιο δυναμικό κλάδο. Η πτηνοτροφία καλύπτει το 95-97% των αναγκών της εγχώριας κατανάλωσης σχετικών προϊόντων (κυρίως αυγών και κρέατος). Το 80% περίπου της συνολικής ελληνικής παραγωγής κρέατος παράγεται στις περιφέρειες Ηπείρου και Στερεάς Ελλάδας. Σε ότι αφορά την παραγωγή αυγών ο κύριος όγκος παραγωγής βρίσκεται στην περιφέρεια Αττικής όπου παράγεται σχεδόν η μισή ποσότητα αυγών της Ελλάδας. Η άλλη μισή παραγωγή κατανέμεται σχεδόν σε όλη την υπόλοιπη Ελλάδα (ΥΠΑΤ, 2011). Το μέγεθος και η εντατικοποίηση της πτηνοτροφικής παραγωγής παρουσιάζει αυξητική τάση. Το 67% και 90% της αυγοπαραγωγής και κρεοπαραγωγής, αντίστοιχα, προέρχεται από συστηματικής και εντατικής μορφής παραγωγικές μονάδες (ΥΠΑΤ, 2011).

Τα πτηνοτροφικά απόβλητα (κοπριές) χαρακτηρίζονται από το ότι είναι σε γενικές γραμμές δύσκολα στη διαχείρισή τους. Επιπλέον η εντατική τους παραγωγή δημιουργεί περαιτέρω περιβαλλοντικά προβλήματα. Τα σημαντικότερα από αυτά σχετίζονται με τη ρύπανση και μόλυνση του εδάφους και των υδάτων ως συνέπεια της έκπλυσης και απορροής θρεπτικών στοιχείων, βαρέων μετάλλων και μικροοργανισμών που περιέχονται στα απόβλητα. Επίσης ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των αποβλήτων αυτών είναι τα υψηλά ποσοστά οργανικού και ανόργανου αζώτου (κυρίως αμμωνίας). Ιδιαίτερα η αμμωνία αποτελεί μείζον πρόβλημα, διότι αφενός προκαλεί σημαντική

όχληση στις κοντινές περιοχές λόγω οσμών και αφετέρου λόγω της τοξικότητάς της και της πρόκλησης του φαινομένου του ευτροφισμού, τα απόβλητα δεν μπορούν να εναποτεθούν στο έδαφος χωρίς κατάλληλη επεξεργασία. Κατά τη διάρκεια αποθήκευσης/κομποστοποίησης των πτηνοτροφικών αποβλήτων, το ουρικό οξύ μετατρέπεται με βιολογική αποδόμηση σε αμμωνία εντείνοντας έτσι ακόμα περισσότερο το πρόβλημα των οσμών (Avula et al., 2009; Kirchmann and Witter, 1989; Lahav et al., 2008; Preusch et al., 2002).

Για τη διαχείριση των πτηνοτροφικών αποβλήτων, έχουν προταθεί διάφορες, φυσικό-χημικές και βιολογικές τεχνολογίες. Στις πρώτες συγκαταλέγονται η απευθείας καύση, αεριοποίηση ή πυρόλυση, τεχνολογίες που παράγουν βιοκαύσιμα και ενέργεια. Στις δεύτερες συγκαταλέγονται η αερόβια χώνευση (κομποστοποίηση), η οποία είναι μια αργή διεργασία με τελικό προϊόν το κομπόστ, το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως ως πλούσιο σε οργανοχημικά οξέα εδαφοβελτιωτικό και η αναερόβια χώνευση, τελικά προϊόντα της οποίας είναι το βιοαέριο (παραγωγή θερμικής ή συμπαραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας) και ένα αρκετά σταθεροποιημένο υγρό ή στερεό υπόλειμμα, το οποίο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα και εδαφοβελτιωτικό (Demirbas, 2008; Kelleher et al., 2002; McKendry, 2002). Παρόλα αυτά κάθε μια από τις παραπάνω τεχνολογίες παρουσιάζει προβλήματα και περιορισμούς στην εφαρμογή τους. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να παρουσιάσει τα κυριότερα ζητήματα που αφορούν τα πτηνοτροφικά απόβλητα και τη διαχείρισή τους.

## 2. Φυσικο-χημικά χαρακτηριστικά των πτηνοτροφικών αποβλήτων

Τα πτηνοτροφικά απόβλητα είναι κατά βάση οργανικής προέλευσης με το οργανικό τους φορτίο να ξεπερνάει το 80% των ολικών στερεών. Σε γενικές γραμμές αποτελούνται από τις κοπριές των πτηνών, από φτερά, νεκρά σώματα πτηνών, σπασμένα αυγά, υπολείμματα τροφών κλπ. Τα απόβλητα των πτηνοτροφικών μονάδων αυγοπαραγωγής διαφέρουν από αυτά της κρεοπαραγωγής κυρίως στην περιεκτικότητά τους σε υγρασία. Τα πρώτα περιέχουν υγρασία που κυμαίνεται από 65 ως 80% ενώ τα δεύτερα είναι πιο στεγνά και έχουν υγρασία από 35 ως 45%. Το σύστημα εκτροφής (για παράδειγμα επί δαπέδου με ή χωρίς στρωμή, σε κλωβοστοιχίες κλπ) επηρεάζει καθοριστικά την περιεκτικότητα των αποβλήτων σε υγρασία. Γενικά η σύσταση και τα φυσικο-χημικά χαρακτηριστικά των αποβλήτων εξαρτώνται πολύ από το σιτηρέσιο, το σύστημα εκτροφής, το είδος των πτηνών, την ηλικία τους καθώς και τις πρακτικές συλλογής και της ποσότητας στρωμνής, αν και όπου χρησιμοποιείται (Edwards and Daniel, 1992; Ritz et al., 2004). Στον **Πίνακα 1** παρατίθενται τα σημαντικότερα φυσικο-χημικά χαρακτηριστικά αποβλήτων πτηνοτροφίας διαφόρων ειδών.

Συνήθως τα απόβλητα των πτηνοτροφείων, λόγω της περιεκτικότητάς τους σε αμμωνία, έχουν αλκαλικό pH που κυμαίνεται από 7,5 ως 8,5. Παρόλα αυτά, συχνά συναντάται και όξινο pH που οφείλεται κυρίως σε οργανικά οξέα. Οι διακυμάνσεις στο pH οφείλεται κυρίως στις διαφορές στο σιτηρέσιο. Επίσης λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε άλατα και μεταλλικά στοιχεία τα απόβλητα αυτά παρουσιάζουν σημαντικά μεγαλύτερη περιεκτικότητα τέφρας σε σχέση με τα άλλα κτηνοτροφικά απόβλητα και παρουσιάζουν σχετικά υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, γεγονός που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την εφαρμογή τους στο έδαφος.

**Πίνακας 1.** Ενδεικτικά εύρη τιμών αποβλήτων πτηνοτροφείων (Abouelenien et al., 2009a; Edwards and Daniel, 1992; Irshad et al., 2009; Lanyasunya et al., 2006; Nicholson et al., 1996; Preusch et al., 2002; Tiquia and Tam, 2000).

Παράμετρος	Εύρος τιμών	Μονάδες
pH	6,7-9,1	-
Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (E.C.)	5-16	mS/cm
Ολικά στερεά (TS)	22-65	%
Τέφρα	30-15	%
Νιτρικά και νιτρώδη ( $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ )	0.25	mg/g
Ολικός οργανικός άνθρακας (TOC)	380-490	mg/g
Ολικό άζωτο (TN)	34-60	mg/g
Αμμωνιακό άζωτο ( $\text{NH}_3\text{-N}$ )	6-23	mg/g
Άζωτο ουρικού οξέος (N)	3-21	mg/g
Άζωτο πρωτεϊνών (N)	15-30	mg/g
Λόγος άνθρακα προς άζωτο (C:N)	4,5-9:1	-
Ολικός φώσφορος (TP)	17-26	mg/g
Κάλιο (K)	20	mg/g
Μαγνήσιο (Mg)	4-5	mg/g
Θείο (S)	4-5	mg/g
Ασβέστιο (Ca)	9-22	mg/g
Σίδηρος (Fe)	0.5-1	mg/g
Χαλκός (Cu)	85-160	μg/g
Ψευδάργυρος (Zn)	200-425	μg/g
Μαγγάνιο (Mn)	410-460	μg/g
Νικέλιο (Ni)	20-24	μg/g
Μόλυβδος (Pb)	23-35	μg/g
Αρσενικό (As)	11-38	μg/g

## 2.1 Άζωτο

Μετά τον άνθρακα (οργανικό), το άζωτο είναι το δεύτερο στοιχείο με την υψηλότερη περιεκτικότητα στα πτηνοτροφικά απόβλητα. Είναι χαρακτηριστικό ότι ο λόγος άνθρακα προς άζωτο (C:N) των αποβλήτων αυτών είναι σχετικά χαμηλός, λαμβάνοντας τιμές από 4,5 ως 9, γεγονός που αντικατοπτρίζει την υψηλή περιεκτικότητα σε αζωτούχες ουσίες. Το ολικό άζωτο των πτηνοτροφικών αποβλήτων κυμαίνεται από 35-60 mg/g ξηρού βάρους. Το άζωτο σε φρέσκα απόβλητα περιέχεται σε οργανική μορφή, κυρίως αυτή των πρωτεϊνών (το 16% των πρωτεϊνών είναι άζωτο) και αυτή του ουρικού οξέος (το 33% του ουρικού οξέος είναι άζωτο). Θα πρέπει να τονιστεί ότι περίπου τα 2/3 του αζώτου που παρέχεται στα πτηνά με τις ζωοτροφές, αποβάλλεται ως κοπριά και μόνο το 1/3 αξιοποιείται μεταβολικά από τα πτηνά. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι τα σιτηρέσια για να καλύψουν τις ανάγκες των πτηνών σε ορισμένες πρωτεΐνες και αμινοξέα παρέχουν αρκετά είδη πρωτεϊνών και αμινοξέων σε περίσσεια. Αυτό είναι αποτέλεσμα του γεγονότος ότι οι καρποί που χρησιμοποιούνται (όπως σόγια και αραβόσιτος κλπ) για την κατάρτιση των σιτηρεσίων δεν έχουν τις κατάλληλες αναλογίες των διαφόρων πρωτεϊνών και αμινοξέων. Επίσης ένα μέρος των αζωτούχων ουσιών δεν μπορούν να χωνευτούν πλήρως από τα πτηνά με αποτέλεσμα να αποβάλλονται με τις κοπριές (Ferguson et al., 1998; Ritz et al., 2004).

Αμέσως μετά την αποβολή των κοπριών από τα πτηνά, λαμβάνει χώρα γρήγορα η αποδόμηση του ουρικού οξέος και η παραγωγή αμμωνίας. Η αμμωνία είναι η κύρια ανόργανη μορφή του αζώτου που περιέχεται στα πτηνοτροφικά απόβλητα και μπορεί να ανέλθει στα 6 ως 23 mg  $\text{NH}_3\text{-N/g}$  ξηρού βάρους αποβλήτων. Το κυριότερο

ουρικολυτικό βακτήριο είναι το *Bacillus pasteurii* που αναπτύσσεται άριστα όταν το pH είναι κοντά στο 8,5 (Ritz et al., 2004).

Πέρα από την βιοαποδόμηση του ουρικού οξέος, η βιολογική αερόβια ή αναερόβια αποδόμηση των πρωτεϊνών έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή επιπρόσθετου αμμωνιακού αζώτου. Κατά την αερόβια και αναερόβια επεξεργασία των αποβλήτων, η περιεκτικότητά τους σε αμμωνία αυξάνεται με το χρόνο και με ρυθμό ίσο με αυτόν της διάσπασης του οργανικού αζώτου. Κάτω από αναερόβιες συνθήκες η βιοαποδόμηση του οργανικού αζώτου ευνοείται περισσότερο και παρατηρείται αυξημένη ανοργανοποίησή του (αμμωνιοποίηση) σε σχέση με τις αερόβιες συνθήκες. Η πτητικοποίηση (volatilization) όμως του αμμωνιακού αζώτου είναι πιο έντονη κάτω από αερόβιες συνθήκες και η διαφυγή του μπορεί να ξεπεράσει το 75% της αρχικής περιεκτικότητας του αμμωνιακού αζώτου. Κάτω από αναερόβιες συνθήκες η διαφυγή του αμμωνιακού αζώτου περιορίζεται σε επίπεδα χαμηλότερα του 1% (Kirchmann and Witter, 1989; Mahimairaja et al., 1994). Η μειωμένη διαφυγή αμμωνίας κάτω από αναερόβιες συνθήκες οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την αναερόβια βιοαποδόμηση παράγονται οργανικά οξέα (πτητικά λιπαρά οξέα με 2-6 αλυσίδες άνθρακα) που μειώνουν το pH των αποβλήτων. Σε τιμές pH χαμηλότερα του 7,5 το αμμωνιακό άζωτο βρίσκεται στη μορφή του αμμωνίου ( $\text{NH}_4^+$ ) το οποίο είναι δεσμευμένο και δύσκολα πτητικοποιείται. Αντίθετα, όσο αυξάνεται το pH το αμμωνιακό άζωτο παίρνει την ελεύθερη (πτητική) μορφή ( $\text{NH}_3$ ) με ισχυρή τάση να διαφεύγει στην ατμόσφαιρα.

Η πτητικοποίηση και διαφυγή της αμμωνίας προς το περιβάλλον θεωρείται αρνητικό φαινόμενο, αφενός γιατί μειώνεται η περιεκτικότητα των αποβλήτων σε άζωτο, ελαττώνοντας επομένως την αξία τους ως λίπασμα και αφετέρου η αμμωνία προκαλεί οχλήσεις και δημιουργεί περιβαλλοντικά προβλήματα (δες παρακάτω).

Για την μείωση της πτητικοποίησης του αζώτου κατά την κομποστοποίηση (αερόβια σταθεροποίηση) προτείνεται η προσθήκη διαφόρων παραγόντων οι οποίοι έχουν την ικανότητα να δεσμεύουν το αμμωνιακό άζωτο, εμποδίζοντάς το να διαφεύγει στην ατμόσφαιρα. Τέτοιοι προάγοντες είναι διάφορα οργανικά υλικά όπως στελέχη φυτών, πριονίδια, τύρφη κλπ, ανόργανα υλικά όπως ζεόλιθος, χώμα κλπ, χημικές ουσίες όπως άλατα μαγνησίου, ασβεστίου αλουμινίου κλπ, παραγόντες οξίνισης (όπως φωσφορικό ή θεικό οξύ) για την μείωση του pH, παρεμποδιστών των ουρικολυτικών ενζύμων αλλά και βιολογικών παραγόντων (DeLaune et al., 2004; Kithome et al., 1999; Moore et al., 1996; Zhang and Lau, 2007).

Κάτω από αερόβιες συνθήκες ο ρυθμός μετατροπής του αμμωνιακού αζώτου σε νιτρικό άζωτο είναι εντονότερη σε σχέση με την αναερόβια. Παρόλα αυτά ο ρυθμός νιτροποίησης είναι εξαιρετικά χαμηλός λόγω της αυξημένης παρουσίας αμμωνιοπαραγωγών μικροοργανισμών τα οποία παράγουν σε υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνία. Η αμμωνία επιδρά αρνητικά στην ανάπτυξη των νιτροποιητικών μικροοργανισμών (Anthonisen et al., 1976; Mahimairaja et al., 1994). Ο ρυθμός νιτροποίησης είναι πολύ αργός, και όσον αφορά στα πτηνοτροφικά απόβλητα, στην πράξη λαμβάνει χώρα μετά την εφαρμογή τους στο έδαφος (Wong-Chong and Loehr, 1975).

## 2.2 Φώσφορος και κάλιο

Ο φώσφορος και το κάλιο είναι από τα πιο σημαντικά στοιχεία (μακροστοιχεία) για την φυτική παραγωγή. Ο φώσφορος και το κάλιο εφαρμόζονται στη γεωργία κυρίως ως συνθετικά ανόργανα λιπάσματα, και ως εκ τούτου η εφαρμογή τους μέσω των

αποβλήτων είναι σημαντική. Μεταξύ των δύο στοιχείων αυτό που έχει προσελκύσει περισσότερο το ενδιαφέρον είναι ο φώσφορος λόγω των περιβαλλοντικών του επιπτώσεων κατά την έκπλυση, την εκροή και απορροή του στα ύδατα και την πρόκληση του φαινομένου του ευτροφισμού (Sharpley and Moyer, 2000). Η συγκέντρωση του φωσφόρου στα πτηνοτροφικά απόβλητα κυμαίνεται από 17-26 mg/g ξηρού βάρους. Απαντάται σε δύο κύριες μορφές, σε αυτή της οργανικής και αυτή της ανόργανης μορφής. Η μεταξύ τους αναλογία κυμαίνεται σημαντικά και επηρεάζεται από το είδος του πτηνού και το σιτηρέσιο (Toor et al., 2005). Ο φώσφορος απαντάται με ασθενείς δεσμούς ως ανόργανος, κυρίως ως ορθοφωσφορικό ιόν και λιγότερο ως πυροφωσφορική μορφή, φωσφορικό ασβέστιο ή διασβέστιο. Στην οργανική του μορφή ο φώσφορος απαντάται κυρίως ως φωσφορικός μονο- και δυεστέρας (Barnett, 1994; Dou et al., 2000; He et al., 2006; Souza et al., 2012). Λόγω της γενικής μικροβιακής δράσης που λαμβάνει χώρα στα απόβλητα, ο φώσφορος συμμετέχει σε διάφορους βιολογικούς κύκλους και παίρνει κάθε φορά διαφορετική μορφή. Η παρουσία των διαφόρων τύπων φωσφόρου είναι μάλλον μια κατάσταση ισορροπίας μεταξύ της μεταμόρφωσής του στους διαφορετικούς τύπους (Greaves et al., 1999). Παρόλα αυτά, ο οργανικός φώσφορος κατά κύριο λόγο είναι ως φώσφορος του φυτικού οξέος (γνωστό ως ινοσιτολικό εξαφωσφατίδιο). Στη μορφή του αυτή ο φώσφορος δεν είναι βιοδιαθέσιμος από τα πτηνά λόγω της έλλειψης του ενζύμου της φυτάσης, το οποίο υδρολύει το μόριο του φυτικού οξέος και τον απελευθερώνει από αυτό (He et al., 2006).

Οι διάφοροι τύποι φωσφόρου συνήθως κλασματοποιούνται με βάση την εκχύλισή τους σε συγκεκριμένα διαλύματα (σε νερό, HCl, NaHCO<sub>3</sub> και NaOH). Από τα κλάσματα φωσφόρου, αυτό που έχει την μεγαλύτερη σημασία είναι το υδατοδιαλυτό (εκχύλιση σε νερό). Ο υδατοδιαλυτός φώσφορος των αποβλήτων είναι ο πιο σημαντικός γιατί καθορίζει και τον βαθμό απομάκρυνσής τους του από αυτά λόγω έκπλυσης και την εκροή/απορροή του στους υδάτινους τελικούς αποδέκτες προκαλώντας ρύπανση (Kleinman et al., 2005). Δεν είναι όλες οι μορφές του φωσφόρου βιοδιαθέσιμες για την πρόσληψή τους από τα φυτά. Τα φυτά αντιδρούν θετικά μετά την εφαρμογή κομπόστ στο έδαφος και η θετική αντίδραση σχετίζεται με την συγκέντρωση ορθοφωσφορικών ιόντων που είναι και ο αμεσότερα βιοδιαθέσιμη μορφή φωσφόρου. Θα πρέπει όμως να τονιστεί ότι η συνεχής, μακροχρόνια και πλούσια εφαρμογή κομπόστ στο έδαφος πτηνοτροφικών αποβλήτων έχει ως αποτέλεσμα την συσσώρευσή του στο έδαφος με αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον (Barnett, 1994; Eghball, 2003; Sharpley et al., 2004).

Σε αντίθεση με το φώσφορο, και παρόλο που το κάλιο είναι ένα από τα βασικά στοιχεία για την ανάπτυξη των φυτών, δεν έχει προσελκύσει ιδιαίτερα το ερευνητικό ενδιαφέρον, ενδεχομένως λόγω και των μικρών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλεί κατά την εφαρμογή κομπόστ πτηνοτροφικών αποβλήτων σε εδάφη. Η συγκέντρωση καλίου είναι στα ίδια επίπεδα με αυτά του φωσφόρου. Σε γενικές γραμμές η παροχή καλίου από τα απόβλητα στο έδαφος έχει θετική επίδραση στην ανάπτυξη φυτών (He et al., 2001; Hirzel and Walter, 2008). Η εκτεταμένη όμως εφαρμογή κομπόστ πλούσιων σε κάλιο μπορεί να αυξήσει την ηλεκτρική αγωγιμότητα και αλατότητα στα εδάφη με αρνητικές επιπτώσεις για τα φυτά (Liebhardt and Shortall, 1974).

### 2.3 Άλλα στοιχεία

Τα πτηνοτροφικά απόβλητα πέρα από τα βασικά στοιχεία άνθρακα, άζωτο, φώσφορο και κάλιο, περιέχουν και πολυάριθμα άλλα στοιχεία όπως μαγνήσιο, θείο, σίδηρο,



ασβέστιο, χαλκό, ψευδάργυρο, μαγγάνιο, νικέλιο, μόλυβδο και αρσενικό. Η πλειοψηφία των παραπάνω στοιχείων είναι ιχνοστοιχεία αναγκαία για την ανάπτυξη των φυτών. Ακόμα και τα βαρέα μέταλλα από τα παραπάνω στοιχεία είναι απαραίτητα για τις μεταβολικές διεργασίες των φυτών γιατί συμμετέχουν ως συστατικά σε πολυάριθμα μεταλλοένζυμα (Taiz and Zeiger, 2010). Επομένως η παρουσία τους στο έδαφος είναι απαραίτητη. Παρόλα αυτά, η εκτεταμένη και συνεχής εφαρμογή αποβλήτων στο έδαφος ενέχει τον κίνδυνο συσσώρευσης αυτών των στοιχείων, και ειδικά στις περιπτώσεις του χαλκού και του ψευδαργύρου έχουν αναφερθεί αρκετές φορές φυτοτοξικότητες λόγω της αυξημένης συγκέντρωσής τους (Irshad et al., 2009). Ένα σημαντικό περιβαλλοντικό ζήτημα που έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον είναι η τύχη του αρσενικού που περιέχεται στα πτηνοτροφικά απόβλητα. Το αρσενικό κατάγεται κυρίως από τη χρήση οργανοαρσενικών σκευασμάτων και ενέχει σημαντικούς περιβαλλοντικούς κινδύνους (Jackson et al., 2006).

### **3. Περιβαλλοντικά και υγειονομικά προβλήματα πτηνοτροφικών αποβλήτων**

Η εντατικοποίηση της πτηνο-κτηνοτροφικής παραγωγής δημιουργεί σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα (Martinez et al., 2009; Pelletier, 2008). Όσον αφορά την Ελλάδα τα περιβαλλοντικά προβλήματα οφείλονται κυρίως στο γεγονός ότι στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπάρχει σύστημα αποτελεσματικής διαχείρισης των αποβλήτων. Όσον αφορά τα πτηνοτροφικά απόβλητα συνήθως εναποτίθενται απλά σε ανοιχτούς χώρους πλησίον των μονάδων για να σταθεροποιηθούν αεροβίως και στη συνέχεια εφαρμόζονται στα εδάφη. Σε πολλές περιπτώσεις έχουν διαπιστωθεί ανεξέλεγκτες, παράτυπες ή και παράνομες εναποθέσεις πτηνοτροφικών αποβλήτων σε ακατάλληλες και ευαίσθητες τοποθεσίες. Τα κυριότερα περιβαλλοντικά προβλήματα σχετίζονται με το υψηλό οργανικό και ανόργανο φορτίο αλλά και την εν δυνάμει εξάπλωση παθογόνων μικροοργανισμών. Παρακάτω θα αναλυθούν με περισσότερες λεπτομέρειες οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των πτηνοτροφικών αποβλήτων.

#### **3.1 Έδαφος**

Η εφαρμογή των κοπριών από πτηνά στο έδαφος γίνεται παραδοσιακά από πολύ παλιά. Είναι γνωστές οι θετικές επιδράσεις του στη δομή και τα φυσικο-χημικά χαρακτηριστικά των εδαφών. Με την εφαρμογή τους βελτιώνεται η δομή των εδαφών και αυξάνει η ικανότητα κατακράτησης υγρασίας αλλά και ρυθμίζεται η στραγγιστική τους ικανότητα, αυξάνει η συσσωμάτωση των εδαφικών κόκκων εμποδίζοντας την διάβρωση των εδαφών, αυξάνει την ιοντο-ανταλλακτική ικανότητα, αυξάνει η περιεκτικότητα σε οργανικό άνθρακα και εμπλουτίζονται με οργανικά και ανόργανα θρεπτικά στοιχεία. Σε γενικές γραμμές με την εφαρμογή κομπόστ στα εδάφη βελτιώνεται η παραγωγικότητα και η στρεμματική φυτική απόδοσή τους (Edwards and Daniel, 1992; Kingery et al., 1994; Martinez et al., 2009). Η εφαρμογή όμως θα πρέπει να γίνεται με βάση τα επίπεδα των διαθέσιμων θρεπτικών στοιχείων στα απόβλητα, αυτά στο έδαφος και τις θρεπτικές ανάγκες των καλλιεργούμενων φυτών. Αν ο ρυθμός εφαρμογής είναι μεγαλύτερος του ρυθμού πρόσληψης των θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά τότε εγκυμονούν κίνδυνοι φυτοτοξικότητας από τη συσσώρευση αμμωνίας, νιτρώδους αζώτου, διαλυτών αλάτων και βαρέων μετάλλων (Cang et al., 2004). Σε αυτή τη περίπτωση θα πρέπει να διακριθεί ο σκοπός της εφαρμογής, αν δηλαδή σκοπός είναι η βελτίωση των αγρονομικών χαρακτηριστικών των εδαφών ή αν σκοπός είναι η εναπόθεση των αποβλήτων ως διαχειριστική μέθοδος (Edwards and Daniel, 1992). Το έδαφος είναι ο πρώτος αποδέκτης των αποβλήτων και σε αυτό λαμβάνουν χώρα όλες

εκείνες οι βιολογικές δραστηριότητες που μετατρέπουν τις διάφορες μορφές των στοιχείων σε άλλες. Επομένως το επίπεδο ρύπανσης του εδάφους επηρεάζει και την ρύπανση των υδάτων και του αέρα (Martinez et al., 2009).

### 3.2 Αέριοι ρύποι

Οι κυριότεροι αέριοι ρύποι που εκλύονται κατά την πτηνοτροφική παραγωγή είναι η αμμωνία, το υδρόθειο, πτητικές οργανικές ενώσεις (volatile organic compounds, VOCs) και διάφορες άλλες πτητικές ενώσεις που προκαλούν δυσοσμίες και οχλήσεις. Οι κυριότερες ενώσεις που θεωρούνται ότι προκαλούν τις δυσοσμίες είναι η αμμωνία, το υδρόθειο, οι ινδόλες και οι μερκαπτάνες, αλλά η δυσοσμία είναι μάλλον το αποτέλεσμα της μίξης πολλών και διάφορων αέριων ενώσεων (Burnett, 1969). Οι αέριοι ρύποι των πτηνοτροφικών μονάδων έχουν σχετιστεί με προβλήματα υγείας των πτηνών μειώνοντας την αποδοτικότητά τους. Στους ανθρώπους έχουν σχετιστεί με αναπνευστικά προβλήματα, διάρροια, ερεθισμούς δέρματος και ματιών, πυρετό κλπ (Lahav et al., 2008; Ritz et al., 2004).

Επίσης τα πτηνοτροφικά απόβλητα συμβάλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου με την εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), μεθανίου (CH<sub>4</sub>) και υποξειδίου του αζώτου (N<sub>2</sub>O), τα οποία είναι τα τρία βασικά αέρια του θερμοκηπίου. Κατά την αερόβια σταθεροποίηση εκλύεται CO<sub>2</sub> από την βιοαποδομηση των οργανικών στοιχείων των αποβλήτων. Το εκλυόμενο CO<sub>2</sub> μπορεί να ανέλθει στο 30% του αρχικού περιεχόμενου άνθρακα. Σε αντίθεση η αναερόβια σταθεροποίηση έχει πολύ χαμηλότερη έκλυση CO<sub>2</sub> αλλά κατά την διεργασία αυτή παράγεται μεθάνιο (Mahimairaja et al., 1994; Thornton et al., 1998), που αν δεν αξιοποιηθεί ενεργειακά (κάυση για την παραγωγή θερμότητας ή/και ηλεκτρισμού) διαφεύγει στην ατμόσφαιρα, συμβάλλοντας στο φαινόμενο του θερμοκηπίου με πολλαπλάσιο βαθμό επίδρασης σε σχέση με το CO<sub>2</sub>.

### 3.3 Υδατικοί αποδέκτες

Τα πτηνοτροφικά απόβλητα συμβάλλουν αρκετά στην ρύπανση και μόλυνση των υδάτων. Ρύποι όπως το άζωτο και ο φώσφορος προκαλούν το φαινόμενο του ευτροφισμού στάσιμων και κινούμενων νερών με αρνητικές επιπτώσεις στην αισθητική αλλά και στο γύρω οικοσύστημα. Επίσης μια πιθανή σημαντική αρνητική επίδραση των πτηνοτροφικών αποβλήτων είναι και η ρύπανση των υδάτων με βαρέα μέταλλα και οργανικές ουσίες αυξάνοντας το οργανικό φορτίο τους. Τα βαρέα μέταλλα είναι άκρως επιζήμια λόγω της βιοσυσσώρευσής τους και της μη βιοαποδόμησής τους. Τα βαρέα μέταλλα βιοσυσσωρεύονται σε διάφορα μέρη του σώματος και λόγω της τοξικότητάς τους προκαλώντας μη αναστρέψιμες ζημιές (Aroga et al., 2008). Η αύξηση του οργανικού φορτίου των υδάτων προκαλεί την ανάπτυξη ετερότροφων μικροοργανισμών και τη διατάραξη της ισορροπίας του διαλυμένου οξυγόνου στα ύδατα.

Επίσης, ειδικά τα νωπά και ακατέργαστα πτηνοτροφικά απόβλητα όταν εναποτίθεται στο έδαφος, υπάρχει μεγάλος κίνδυνος μόλυνσης των υδάτων και εξάπλωσης με παθογόνους για τον άνθρωπο μικροοργανισμούς. Οι κυριότεροι παθογόνοι που μπορούν να απαντηθούν σε απόβλητα του πτηνοτροφικού τομέα είναι οι *Escherichia coli*, *Salmonella* sp., *Listeria* και *Campylobacter*. Από αυτούς η *Salmonella* sp. είναι η κυριότερη αιτία για την εμφάνιση γαστρεντερικών παθήσεων και μεταδίδεται σχετικά εύκολα μέσω μολυσμένων νερών (Ghosh et al., 2009; Nicholson et al., 2005).

#### 4. Τεχνολογίες διαχείρισης και αξιοποίησης των πτηνοτροφικών αποβλήτων

##### 4.1 Κομποστοποίηση

Η κομποστοποίηση είναι μια βιολογική αερόβια διεργασία που χρησιμοποιείται παραδοσιακά για την σταθεροποίηση οργανικών αποβλήτων. Στο τέλος της διεργασίας παράγεται το κομπόστ το οποίο είναι ένα πολύτιμο προϊόν που χρησιμοποιείται γενικά στη γεωργία, αλλά έχει ιδιαίτερη σημασία για τη βιολογική γεωργία και για την παραγωγή φυτών υψηλής αξίας (Moral et al., 2009; Raviv, 2005). Το κομπόστ σε γενικές γραμμές είναι ασφαλέστερο σε σχέση με τα νωπά απόβλητα λόγω του περιορισμού διαφόρων ανεπιθύμητων χαρακτηριστικών. Κατά την σταθεροποίηση των αποβλήτων επιτυγχάνεται σε μεγάλο βαθμό η απολύμανσή τους και καταπολεμούνται διάφοροι παθογόνοι μικροοργανισμοί, σπόροι ζιζανίων αλλά και διάφορα άλλα επιβλαβή στοιχεία όπως αντιβιοτικά (Dolliver et al., 2008). Επίσης το κομπόστ είναι ευκολότερο στη μεταφορά, αποθήκευση, ενσάκκιση και στην εφαρμογή του στο έδαφος επειδή έχει αρκετά μειωμένο όγκο και υγρασία σε σχέση με τα νωπά οργανικά απόβλητα (Preusch et al., 2002).

Με την εφαρμογή κομπόστ στο έδαφος, παράγονται συνθήκες αργής αποδέσμευσης των θρεπτικών στοιχείων, αυξάνεται ο οργανικός άνθρακας των εδαφών και βελτιώνεται η δομή τους και η ικανότητά τους για ιοντο-ανταλλαγή και επομένως βελτιώνει την ικανότητα των εδαφών για κατακράτηση θρεπτικών στοιχείων (Preusch et al., 2002). Ως εκ τούτου, τα βασικότερα χαρακτηριστικά ενός ποιοτικού κομπόστ θα πρέπει να είναι: η ισορροπημένη περιεκτικότητα σε θρεπτικά στοιχεία (άζωτο, φώσφορο, κάλιο κ.α.), να εμφανίζει κατάλληλα φυσικά χαρακτηριστικά έτσι ώστε να βελτιώνει την υδατοχωρητικότητα, την στράγγιση, και τη δομή του εδάφους, να απουσιάζουν φυτοπαθογόνοι μικροοργανισμοί, να παρουσιάζει αυξημένο βαθμό χουμοποίησης και να απουσιάζουν οι οσμές (Moral et al., 2009; Raviv, 2005).

Η κομποστοποίηση είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος διαχείρισης των πτηνοτροφικών αποβλήτων μέχρι σήμερα. Η καλή και αποτελεσματική κομποστοποίηση όμως προϋποθέτει συγκεκριμένες εγκαταστάσεις και διαδικασίες που αυξάνουν το κόστος διαχείρισης (Bernal et al., 2009). Για τον λόγο αυτό στην πράξη παρατηρείται το φαινόμενο της απλής εναπόθεσης αποβλήτων σε ανεξέλεγκτους σωρούς και της αναποτελεσματικής κομποστοποίησής τους. Αυτό έχει ως συνέπεια την κακής ποιότητας παραγωγή κομπόστ αλλά και την πρόκληση όχλησης στις γύρω περιοχές λόγω των έντονων οσμών από την έκλυση αμμωνίας και όχι μόνο.

Κατά την κομποστοποίηση το οργανικό κλάσμα των αποβλήτων βιοαποδομείται, ένα μέρος του οποίου ανοργανοποιείται, παράγοντας κυρίως διοξείδιο του άνθρακα και αμμωνία, και ένα άλλο μέρος μετατρέπεται σε οργανικά οξέα (χουμικά οξέα). Κατά την κομποστοποίηση παράγεται επίσης θερμότητα, το ύψος της οποίας μεταβάλλεται ανάλογα με τη φάση της διεργασίας που εξαρτάται από τους κυρίαρχους κάθε φάσης μικροοργανισμούς (μεσόφιλους ή θερμοφίλους). Η κομποστοποίηση είναι μια αυθόρμητη διεργασία που λαμβάνει χώρα κάτω από μεγάλο εύρος καταστάσεων. Παρόλα αυτά, για την ελαχιστοποίηση του χρόνου που απαιτείται για τον τερματισμό της διεργασίας αλλά και για την βελτιστοποίηση της ποιότητας του τελικού προϊόντος (κομπόστ) διάφορες παράμετροι θα πρέπει να ελέγχονται και να ρυθμίζονται. Οι κυριότερες παράμετροι κομποστοποίησης είναι: υγρασία (50-60%), λόγος άνθρακα προς άζωτο (25-35:1), θερμοκρασία (52-60°C κατά την θερμοφιλή φάση), ρυθμός αερισμού και τα φυσικά χαρακτηριστικά: πυκνότητα και πορώδες (35-50% να καταλαμβάνεται από αέρα), pH (6,7-9) (Bernal et al., 2009; Gao et al., 2010;



Georgacakis et al., 1996; Imbeah, 1998). Παρακάτω θα γίνει συνοπτική ανάλυση της σημαντικότητας της κάθε παραμέτρου.

#### 4.1.1 Υγρασία

Η υγρασία είναι μια σημαντική παράμετρος γιατί καθορίζει την μικροβιακή δραστηριότητα κατά την κομποστοποίηση. Η βέλτιστη περιεκτικότητα της υγρασίας των πτηνοτροφικών αποβλήτων για κομποστοποίηση είναι 45% (Brake, 1992) αλλά μπορεί να ανέλθει και στο 60% (Walker, 2004). Υψηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της κίνησης του οξυγόνου στους πόρους εντός του σωρού με πιθανή αναερόβιωσή του. Η επικράτηση αναερόβιων συνθηκών έχει ως αποτέλεσμα την ανικανότητα δράσης των αερόβιων μικροβίων και την ανάπτυξη αναερόβιων μικροοργανισμών (Ryckeboer et al., 2003). Επιτυχής κομποστοποίηση επιτυγχάνεται μόνο όταν επικρατούν και αναπτύσσονται αερόβιοι μικροοργανισμοί.

Κατά την αερόβια διεργασία και επειδή η θερμοκρασία αυξάνεται (δες παρακάτω) (Ryckeboer et al., 2003) μεγάλο μέρος της περιεχόμενης υγρασίας απομακρύνεται λόγω εξάτμισης. Αν η υγρασία πέσει κάτω από τα ελάχιστα όρια (30-35%), έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της δραστηριότητας των μικροβίων και την παράταση της σταθεροποίησης. Για τον λόγο αυτό η υγρασία θα πρέπει να ελέγχεται και να κρατείται στα επιθυμητά επίπεδα (Bernal et al., 2009). Παρόλα αυτά, σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι αναγκαίο να προστίθεται τεχνητά υγρασία στους σωρούς λόγω της παραγωγής H<sub>2</sub>O κατά την διάρκεια της βιοαποδόμησης που αναπληρώνει το εξατμισμένο νερό (Stentiford, 1996). Το ποσοστό της εξάτμισης εξαρτάται από το είδος της κομποστοποίησης. Γενικά η εξάτμιση είναι υψηλότερη σε κομποστοποίηση με αναστροφή ή με βεβιασμένο αέρα από ότι σε στάσιμους σωρούς (Erstein, 2011).

Αν επικρατήσουν όμως αναερόβιες συνθήκες, και επειδή η θερμοκρασία του σωρού δεν αυξάνεται (κάτω από αναερόβιες συνθήκες η βιοαποδόμηση δεν είναι εξώθερμη διεργασία), η σταθεροποίηση των αποβλήτων παρατείνεται πολύ και επίσης επειδή η υγρασία δεν μειώνεται το τελικό προϊόν είναι δύσκολο στον χειρισμό του (Brake, 1992).

Όταν τα πτηνοτροφικά απόβλητα έχουν περισσότερη υγρασία από την συνιστώμενη τότε θα πρέπει να μειωθεί στα επιθυμητά επίπεδα. Σε αυτή την περίπτωση είτε μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαχωριστήρας υγρών/στερεών (Burton, 2007) είτε αν προστεθεί κάποιο υλικό για την διόρθωση του λόγου άνθρακα προς άζωτο να είναι στεγνό έτσι ώστε το τελικό μίγμα να έχει την επιθυμητή υγρασία. Επίσης ο βεβιασμένος αερισμός μπορεί να αποτελέσει μέθοδο ελέγχου της υγρασίας (Luo et al., 2008).

#### 4.1.2 Λόγος άνθρακα προς άζωτο

Για μια επιτυχή κομποστοποίηση, ο λόγος άνθρακα προς άζωτο θα πρέπει να κυμαίνεται από 25-35:1. Η κομποστοποίηση μπορεί να λάβει χώρα και σε μεγαλύτερο εύρος λόγου άνθρακα προς άζωτο, αλλά παρουσιάζονται διάφορα προβλήματα. Και τα δύο στοιχεία (άνθρακας και άζωτο) είναι αναγκαία για την ομαλή δραστηριότητα των αερόβιων μικροοργανισμών. Όταν ο λόγος άνθρακα προς άζωτο είναι πολύ υψηλός, τότε υπάρχει αφενός έλλειψη αζώτου για την υποστήριξη της μικροβιακής δραστηριότητας και αφετέρου περίσσεια βιοαποδομήσιμου άνθρακα με αποτέλεσμα την επιβράδυνση και την παράταση της σταθεροποίησης των αποβλήτων (Bernal et al., 2009). Αντίθετα, κομποστοποίηση με απόβλητα με χαμηλό λόγο άνθρακα προς άζωτο

έχει ως αποτέλεσμα μεγάλες απώλειες αζώτου λόγω της παραγωγής αμμωνίας και της πτητικοποίησής της (δες **κεφάλαιο 2.1**). Τα πτηνοτροφικά απόβλητα έχουν πολύ χαμηλό λόγο άνθρακα προς άζωτο που κυμαίνεται από 4,5:1 ως 9:1 και για τον λόγο αυτό είναι αναγκαία η προσθήκη κάποιου υλικού πλούσιου σε άνθρακα έτσι ώστε το τελικό μίγμα να έχει τον επιθυμητό λόγο άνθρακα προς άζωτο (Georgacakis et al., 1996).

#### 4.1.3 Θερμοκρασία

Κατά την διάρκεια κομποστοποίησης η θερμοκρασία μεταβάλλεται ανάλογα με το στάδιο της διεργασίας. Σε γενικές γραμμές διακρίνονται τέσσερις διακριτές φάσεις. 1<sup>η</sup> φάση: μεσόφιλη φάση (10-42°C) κατά την οποία η θερμοκρασία αυξάνεται και στο τέλος της αναπτύσσονται θερμοφιλοι μικροοργανισμοί οι οποίοι χαρακτηρίζουν την 2<sup>η</sup> φάση (45-70°C). Η 2<sup>η</sup> φάση περιλαμβάνει μια παρατεταμένη περίοδο υψηλών θερμοκρασιών και προς το τέλος αυτής αρχίζει και μειώνεται σταδιακά η θερμοκρασία και η κομποστοποίηση εισέρχεται στην 3<sup>η</sup> φάση όπου η θερμοκρασία πέφτει σταδιακά από τους 65°C περίπου στους 50°C. Τέλος η 4<sup>η</sup> φάση είναι αυτή της ωρίμανσης όπου η θερμοκρασία μειώνεται σταδιακά για να πάρει τιμές του περιβάλλοντος (Σκιαδά, 2012). Η θερμοκρασία θα πρέπει να ελέγχεται και κυρίως κατά την 2<sup>η</sup> (θερμόφιλη) φάση όπου υπάρχει τάση υπερβολικής αύξησης της θερμοκρασίας. Αν ο σωρός δεν αερίζεται σωστά η παραγόμενη θερμότητα εγκλωβίζεται και μπορεί να ανέλθει σε επίπεδα (πάνω από 70°C) ανασταλτικά ή ακόμα και θανατηφόρα για τους μικροοργανισμούς με αποτέλεσμα την παράταση της κομποστοποίησης. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας μπορεί να γίνει με αναστροφή του σωρού ή με βεβιασμένο αερισμό (Erstein, 2011; Γεωργακάκης, 2011).

#### 4.1.4 Άλλες παράμετροι

Πέρα από την υγρασία, τον λόγο άνθρακα προς άζωτο και τη θερμοκρασία, η επιτυχής κομποστοποίηση εξαρτάται και από τον έλεγχο του αερισμού, της πυκνότητας και του πορώδους αλλά και του pH του σωρού των αποβλήτων. Ο αερισμός είναι απαραίτητος αφενός για την παροχέτευση στον σωρό με οξυγόνο για την συνέχιση της δράσης των αερόβιων μικροβίων (ο οποίοι καταναλώνουν οξυγόνο κατά την βιοαποδόμιση της οργανικής ύλης) και αφετέρου για να ελεγχθεί σε ένα βαθμό η θερμοκρασία του σωρού (δες 4.1.3 Θερμοκρασία). Μειωμένος αερισμός μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητες αναερόβιες συνθήκες ή σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά υπερβολικός αερισμός μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την ψύξη του σωρού και την μείωση της δραστηριότητας των θερμοφίλων μικροβίων. Ο ρυθμός αερισμού εξαρτάται από το τελικό μίγμα προς κομποστοποίηση. Σε συστήματα βεβιασμένου αερισμού ο αερισμός μπορεί να κυμανθεί από 0,3 ως 0,7 L/min/kg οργανικής ύλης (Gao et al., 2010).

Ο αερισμός και η ποσότητα αποθηκευμένου οξυγόνου στο σωρό εξαρτάται πολύ από την πυκνότητα και το πορώδες των αποβλήτων. Ακόμα και με βεβιασμένο αερισμό, το πορώδες του σωρού έχει μεγάλη σημασία για τον καταμερισμό και τη διαθεσιμότητα του οξυγόνου στους μικροοργανισμούς. Σημαντική παράμετρος για την διαθεσιμότητα οξυγόνου είναι ο χώρος του πορώδους που δεν καταλαμβάνεται από νερό αλλά είναι ελεύθερος και καταλαμβάνεται από αέρα (ελεύθερος χώρος αέρα, free air space) (Erstein, 2011). Η συγκέντρωση οξυγόνου στο σωρό για μια επιτυχή κομποστοποίηση θα πρέπει να είναι 15-20% αλλά σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να είναι πάνω από 5% (Bernal et al., 2009; Γεωργακάκης, 2011).

Τέλος σημαντική παράμετρος είναι και το pH των αποβλήτων. Το επιθυμητό εύρος pH για καλή μικροβιακή δραστηριότητα είναι 6,7-9. Τα πτηνοτροφικά απόβλητα γενικά έχουν pH σε αυτό το εύρος οπότε δεν παρουσιάζουν κάποιο ζήτημα που να σχετίζεται με δυσλειτουργία λόγω pH. Γενικά όμως θα πρέπει το pH να είναι κάτω από 7,5 για να ελαχιστοποιείται η πτητικοποίηση και η διαφυγή της αμμωνίας προς την ατμόσφαιρα (Bernal et al., 2009).

## 4.2 Αναερόβια χώνευση

Η αναερόβια χώνευση είναι μια βιολογική διεργασία κατά την οποία η οργανική ουσία βιοαποδομείται από αναερόβιους μικροοργανισμούς παράγοντας βιοαέριο, το οποίο είναι ένα μίγμα κυρίως από μεθάνιο (50-70%) και διοξείδιο του άνθρακα (30-50%). Το μεθάνιο είναι καύσιμο αέριο και έχει ενεργειακό περιεχόμενο περίπου 10 kWh/m<sup>3</sup> και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού. Αν καθαριστεί και αναβαθμιστεί μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως καύσιμο κίνησης ή να εγχυθεί στο δίκτυο φυσικού αερίου (Bötgesson and Mattiasson, 2008; FNR, 2013). Μετά την ολοκλήρωση της αναερόβιας χώνευσης, τα υγρά υπολείμματα είναι σταθεροποιημένα, πλούσια σε θρεπτικά στοιχεία και μπορούν να εφαρμοστούν στο έδαφος και να χρησιμοποιηθούν ως λίπασμα ή/και εδαφοβελτιωτικό για την παραγωγή φυτών (Möller and Müller, 2012).

Η αναερόβια χώνευση είναι μια πολύπλοκη βιολογική διεργασία που ολοκληρώνεται σε τέσσερις κύριες φάσεις: (1) Υδρολυτική φάση, όπου υδρολυτικά βακτήρια διασπούν τις μεγαλομοριακές οργανικές ενώσεις, (πολυμερή όπως υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λίπη κλπ) σε απλούστερες ενώσεις (μονομερή, διμερή όπως μόνο-, δι- και ολιγασακχαρίτες, αμινοξέα, λιπαρά οξέα κλπ.), (2) Οξεογόνος φάση, όπου οξεογόνα (ή οξεοπαραγωγά) βακτήρια ζυμώνουν τα προϊόντα της πρώτης φάσης δίδοντας οργανικά πτητικά οξέα μικρής αλυσίδας (C1-C5, όπως βουτυρικό οξύ, προπιονικό οξύ, οξικό οξύ κλπ), αλκοόλες, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα, (3) Οξικογόνος φάση όπου τα προϊόντα της δεύτερης φάσης μετατρέπονται σε οξικό οξύ, διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο και (4) ) Μεθανογόνος φάση όπου μεθανογόνοι μικροοργανισμοί (*Archea*) μετατρέπουν έναν μικρό αριθμό από τα προϊόντα των προηγούμενων φάσεων σε βιοαέριο (Angelidaki et al., 2011; Gavala et al., 2003).

Η παραγωγή βιοαερίου και βιομεθανίου από πτηνοτροφικά απόβλητα κυμαίνεται σημαντικά γεγονός που οφείλεται στις διαφορετικές συνθήκες χώνευσης. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται κάποιες ενδεικτικές τιμές παραγωγής βιομεθανίου κάτω από διαφορετικές πειραματικές διατάξεις.

**Πίνακας 2.** Παραγωγή βιοαερίου και βιομεθανίου από πτηνοτροφικά απόβλητα κάτω από διαφορετικές πειραματικές διατάξεις και συνθήκες

m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /COD	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kgΠΣ	m <sup>3</sup> βιοαερίου/kgΠΣ	Σχόλια	Βιβλιογραφική αναφορά
0,21-0,26			Υγρά ξεπλύματος, με απομάκρυνση αμμωνίας μέσω πτητικοποίησης	(Gangagni Rao et al., 2008)
	0,103		Πολυφασικό σύστημα, όπου στην πρώτη φάση παράγεται αμμωνία υπό αναερόβιες συνθήκες, στη δεύτερη φάση πτητικοποιείται και απομακρύνεται η αμμωνία, στην τρίτη φάση γίνεται παραγωγή βιοαερίου, στην τέταρτη φάση ξαναγίνεται απομάκρυνση αμμωνίας και στη	(Abouelenien et al., 2009a)

		πέμπτη φάση ξαναγίνεται παραγωγή βιοαερίου	
0,157-0.195		Σύστημα με απομάκρυνσης αμμωνίας μέσω της παροχέτευσης του βιοαερίου σε όξινο διάλυμα και την ανακύκλωσή του στον αντιδραστήρα	(Abouelenien et al., 2010)
0,1-0,5		Μακροχρόνιες πειραματικές δοκιμές με αλλαγή στη συγκέντρωση της αμμωνίας.	(Niu et al., 2013)
0.031		Παραγωγή βιοαερίου κάτω από υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνίας. Ο εγκλιματισμός των μικροβίων αυξάνει την απόδοση του συστήματος	(Abouelenien et al., 2009b)
	0,4-0,7	Μικτή χώνευση με τυρόγαλο	(Gelegenis et al., 2007)
0,019-0,145		Η θερμοχημική προεπεξεργασίας των πτηνοτροφικών αποβλήτων δεν βελτίωσε την παραγωγή βιοαερίου	(Costa et al., 2012)
0,16		Πειραματική διάταξη που αφορά ένα καινοτόμο πολυφασικό σύστημα	(Gangagni Rao et al., 2011)
	0,41-0,44	Πειραματική διάταξη με διαφορετικά επίπεδα οργανικού φορτίου και χρόνου παραμονής	(Webb and Hawkes, 1985)
	0,38	Αναφορά από μεγάλης εγκατάστασης αναερόβιο αντιδραστήρα	(Safley Jr et al., 1987)
147-215		Θερμική απομάκρυνση αμμωνίας μετά από φάση αναεροβίωσης	(Markou, 2015)

#### 4.2.1 pH

Κάθε μικροβιακή ομάδα έχει ένα δικό της βέλτιστο εύρος τιμών pH, που για τα οξεογόνα βακτήρια είναι 5,5-6,5 ενώ για τα μεθανογόνα μικρόβια είναι 7,8-8,2 (Khanal, 2008). Η βέλτιστη τιμή για τις συνδυασμένες δράσεις των μικροβιακών πληθυσμών στον αντιδραστήρα είναι 6,8-7,5. Όταν το pH πέσει κάτω από 6,6 οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί παρεμποδίζονται με αποτέλεσμα να μην καταναλώνουν τα παραγόμενα οξέα τα οποία συσσωρεύονται μειώνοντας περαιτέρω το pH του βιοαντιδραστήρα. Όσο το pH πλησιάζει τις τιμές 6,5 μέχρι 5,5 τα οξεοπαραγωγά βακτήρια εισέρχονται στην βέλτιστη περιοχή τους με αποτέλεσμα την δυσανάλογη ανάπτυξη των βακτηριακών ομάδων και την ανικανότητα κατανάλωσης των πτητικών λιπαρών οξέων. Πτώση του pH κάτω από 6 έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία τοξικού περιβάλλοντος για τους μεθανογόνους μικροοργανισμούς οδηγώντας την όλη διαδικασία σε κατάρρευση (Angelidaki et al., 2003; Kayhanian and Tchobanoglous, 2007).

Ρυθμιστικός παράγοντας του pH των βιοαντιδρατήρων είναι η αλκαλικότητα των υγρών χώνευσης. Η ρυθμιστική ικανότητα των υγρών χώνευσης εμποδίζει την πτώση του pH κάτω από το 6,5. Η ρυθμιστική ικανότητα των υγρών χώνευσης οφείλεται κυρίως στην παρουσία των ρυθμιστικών υποσυστημάτων του ανθρακικού/διτανθρακικού ιόντος και αυτού του αμμωνίου/αμμωνίας. Το αμμώνιο προστατεύει το διτάνθρακικό ιόν αντιδρώντας με τα λιπαρά οξέα αφήνοντας το διτάνθρακικό ιόν να λειτουργήσει ως ρυθμιστής υψηλού pH. Επιθυμητά επίπεδα αλκαλικότητας είναι 2.500 – 6.000 mg/L HCO<sub>3</sub> (Georgacakis et al., 1982). Τα πτηνοτροφικά απόβλητα, σε γενικές γραμμές θεωρούνται ότι έχουν υψηλά επίπεδα

αλκαλικότητας και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ως μέρος του υποστρώματος για την μικτή χώνευση διαφόρων αποβλήτων (Gelegenis et al., 2007).

#### 4.2.2 Συγκέντρωση αμμωνίας

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η αμμωνία είναι το τελικό προϊόν της αποδόμησης των οργανικών αζωτούχων ουσιών όπως οι πρωτεΐνες, τα αμινοξέα και η ουρία ή το ουρικό οξύ. Η αμμωνία είναι αναγκαίο στοιχείο για τους αναερόβιους αντιδραστήρες γιατί αφενός αποτελεί θρεπτικό στοιχείο των μικροβίων για την αναπαραγωγή τους και αφετέρου αποτελεί ένα σημαντικό ρυθμιστικό παράγοντα κρατώντας το pH του αντιδραστήρα στα επιθυμητά επίπεδα. Παρόλα αυτά υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνίας έχουν αρνητικά αποτελέσματα για την μικροβιακή δραστηριότητα. Σε γενικές γραμμές αμμωνιακό άζωτο πάνω από 3g/L έχει τοξική επίδραση. Τα επιθυμητά όρια της συγκέντρωσης αμμωνίας είναι κάτω από 1 g/L. Ο βαθμός τοξικότητας της αμμωνίας βέβαια εξαρτάται από δύο κύριους παράγοντες, τη θερμοκρασία και κυρίως το pH. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία και το pH τόσο αυξάνεται και τοξικότητα της αμμωνίας. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι σε υψηλές θερμοκρασίες όσο και σε υψηλά pH η μορφή της διαλυμένης στα υγρά αμμωνίας που αρχίζει να επικρατεί είναι η ελεύθερη μορφή (NH<sub>3</sub>) η οποία λόγω του ότι διαπερνά τις κυτταρικές μεμβράνες πολύ εύκολα, δρα τοξικά στα μικρόβια παρεμποδίζοντας την μεθανογένεση (Angelidaki and Ahring, 1993; Chen et al., 2008; Rajagopal et al., 2013).

Τα πτηνοτροφικά απόβλητα ακριβώς επειδή περιέχουν πολύ υψηλές συγκεντρώσεις σε πρωτεΐνες και ουρικό οξύ, η χρήση τους ως υπόστρωμα για την αναερόβια χώνευση και παραγωγή βιοαερίου είναι προβληματική (Abouelenien et al., 2009b; Krylova et al., 1997). Η παραγωγή υψηλών συγκεντρώσεων αμμωνίας κατά τη διάρκεια της αναερόβιας χώνευσης είναι ο κυριότερος λόγος για τον οποίο στην πράξη ο αριθμός των μονάδων παραγωγής βιοαερίου που να έχουν ως μόνο υπόστρωμα πτηνοτροφικά απόβλητα είναι περιορισμένος. Για την αντιμετώπιση αυτού του θέματος έχουν προταθεί κατά καιρούς διάφορες λύσεις, περιλαμβάνοντας την ρύθμιση του pH, τον έλεγχο της θερμοκρασίας, την ρύθμιση του λόγου άνθρακα προς άζωτο, την ακινητοποίηση των μικροβίων σε διάφορα μέσα, την αραίωση των αποβλήτων, την απομάκρυνση της αμμωνίας μέσω πτητικοποίησης (stripping), απομάκρυνση της αμμωνίας κατά την παροχέτευση του βιοαερίου σε όξινο διάλυμα και την χρήση της τεχνολογίας Anammox (Abouelenien et al., 2010; Dong and Tollner, 2003; Gelegenis et al., 2007; Krylova et al., 1997; Markou, 2015; Rajagopal et al., 2013). Επίσης ο μακροχρόνιο εγκλιματισμός των μικροβίων σε υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνίας έχει δείξει ότι βελτιώνει σημαντικά την μικροβιακή δραστηριότητα και επομένως και την παραγωγή βιοαερίου (Abouelenien et al., 2009b).

#### 4.2.3 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων

Τα πτητικά λιπαρά οξέα αποτελούν ενδιάμεσα προϊόντα κατά την βιοαποδόμηση και την μετατροπή της οργανικής ουσίας σε βιοαέριο. Από τα πτητικά λιπαρά οξέα αυτά που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι το οξικό και το προπιονικό οξύ. Το άθροισμα των δύο αυτών ειδών ανέρχεται στο 85% της συγκέντρωσης του συνόλου των πτητικών λιπαρών οξέων (βουτυρικό, βαλερικό, ισοβαλερικό κ.α.). Τα πτητικά λιπαρά οξέα, όπως και η αμμωνία, δρουν παρεμποδιστικά στα μεθανογόνα μικρόβια και για το λόγο αυτό η συγκέντρωσή τους θα πρέπει να ελέγχεται στα επιθυμητά επίπεδα. Η συσσώρευση πτητικών λιπαρών οξέων στον αντιδραστήρα μαρτυρά την εντονότερη δραστηριότητα συγκεκριμένων (υδρολυτικών) μικροβιακών ομάδων, και



αν η συγκέντρωσή τους αυξηθεί πάνω από ένα όριο ενδέχεται να οδηγήσει την όλη αναερόβια διεργασία σε κατάρρευση. Από τα πτητικά λιπαρά οξέα το προπιονικό οξύ είναι το πιο παρεμποδιστικό στα μεθανογόνα μικρόβια (Wang et al., 2009). Όταν η συγκέντρωση του οξικού και προπιονικού οξέος ξεπεράσει τα 1.000 mg/L τότε αναμένεται παρεμπόδιση της αναερόβιας διεργασίας. Συγκεντρώσεις ολικών πτητικών λιπαρών οξέων πάνω από 1.000 mg/L έχουν σημαντική αρνητική επίδραση στην διεργασία της υδρόλυσης, ενώ η διεργασία της ζύμωσης παρεμποδίζεται σημαντικά όταν η συγκέντρωση των ολικών πτητικών λιπαρών οξέων ανέλθει πάνω από 6.000 mg/L (Siegert and Banks, 2005). Ένας καλός δείκτης για την σταθερότητα της αναερόβιας χώνευσης είναι όταν ο λόγος του προπιονικού οξέος προς το οξικό οξύ είναι χαμηλότερος του 1,4. Η επιθυμητή συγκέντρωση οξικού οξέος είναι <750 mg/L (Hill et al., 1987). Ο βαθμός συσσώρευσης των πτητικών λιπαρών οξέων καθώς και της αμμωνίας εξαρτάται στενά από το οργανικό φορτίο κάτω από το οποίο λειτουργεί ο αντιδραστήρας. Σε γενικές γραμμές, όταν το οργανικό φορτίο είναι μεγάλο τότε υπάρχει κίνδυνος συσσώρευσης αυτών σε επίπεδα που να έχουν αρνητική επίδραση στην αναερόβια χώνευση και την τελική παραγωγή βιοαερίου (Ahrling et al., 1995; Angelidaki et al., 2011; Weiland, 2008).

#### 4.3 Θερμο-χημικές τεχνολογίες διαχείρισης και παραγωγής βιοκαυσίμων και ενέργειας

Τα πτηνοτροφικά απόβλητα, όπως όλα τα οργανικά απόβλητα κατατάσσονται στην κατηγορία της «βιομάζας» και ως εκ τούτου θεωρούνται πιθανή πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοκαυσίμων και ενέργειας, όχι μόνο μέσω βιολογικών τεχνολογιών όπως η αναερόβια χώνευση, αλλά και μέσω θερμο-χημικών τεχνολογιών όπως η απευθείας καύση, η αεριοποίηση, υδροθερμική ρευστοποίηση και πυρόλυση. Οι τρεις τελευταίες τεχνολογίες παράγουν υγρά και αέρια βιοκαύσιμα και προσιδιάζουν περισσότερο σε υγρή βιομάζα, όπως τα πτηνοτροφικά απόβλητα, σε αντίθεση με την απευθείας καύση κατά την οποία παράγεται θερμική ενέργεια και προϋποθέτει σχετικά ξηρή βιομάζα (Kumar et al., 2009; McKendry, 2002; Mohan et al., 2006; Toor et al., 2011).

Σε πρακτικό επίπεδο, μόνο η αεριοποίηση και η απευθείας καύση έχουν εφαρμοστεί σε εμπορικές εγκαταστάσεις (Crawford, 2013). Στο Ηνωμένο Βασίλειο και στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής λειτουργούν ορισμένες μεγάλες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής μεγέθους 10-50MW με απευθείας καύση πτηνοτροφικών αποβλήτων. Παρόλα αυτά η λειτουργία τους έχει κατηγορηθεί ότι συνοδεύεται με σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω των καυσαερίων<sup>1</sup>. Τα κυριότερα ζητήματα από την θερμο-χημική αξιοποίηση των πτηνοτροφικών αποβλήτων σχετίζονται κυρίως με τις εκπομπές NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO και σωματιδίων αλλά και με ζητήματα διάβρωσης των εγκαταστάσεων λόγω της υψηλής συγκέντρωσης χλωρίου στα πτηνοτροφικά απόβλητα (Bock, 2004).

#### 4.4 Άλλοι τρόποι αξιοποίησης πτηνοτροφικών αποβλήτων

Τα πτηνοτροφικά απόβλητα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως υπόστρωμα για την σκωληκοκαλλιέργεια (vermiculture) για την παραγωγή υψηλής ποιότητας βιολιπάσματος. Η σκωληκοκαλλιέργεια έχει διερευνηθεί επαρκώς και πλέον αποτελεί μια ώριμη τεχνολογία (Edwards et al., 2010). Για την σκωληκοκαλλιέργεια όμως τα πτηνοτροφικά απόβλητα θα πρέπει να αναμιχθούν με κάποιο άλλο υλικό με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα έτσι ώστε να αυξηθεί ο λόγος C/N (Guerra-Rodriguez et

---

<sup>1</sup> Για λεπτομέρειες δες <http://www.energyjustice.net/fibrowatch>

al., 2001; Khan, 2006). Επίσης τα πτηνοτροφικά απόβλητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέρος του μίγματος για την καλλιέργεια μανιταριών (όπως *Pleurotus* sp.) (Noble and Gaze, 1994; Sivagurunathan and Sivasankari, 2015) καθώς και για την καλλιέργεια μικροφυκών (όπως σπιρουλίνα και χλωρέλλα) για την παραγωγή βιομάζας πλούσιας σε πρωτεΐνες, τα οποία θα μπορούσε να αντικαταστήσει μέρος της σόγιας (ή όποιας άλλης πηγής πρωτεϊνών) από την πτηνοτροφή (Lemahieu et al., 2013; Markou et al., 2016).

### Ευχαριστίες

Το παρόν κείμενο γράφτηκε στα πλαίσια έργου εντασσόμενου στην Πράξη «Εκπόνηση σχεδίων Ερευνητικών & Τεχνολογικών Αναπτυξιακών έργων Καινοτομίας (ΑγροΕΤΑΚ)» με MIS 453350, στο πλαίσιο του ΕΠ «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού», ΕΣΠΑ 2007-2013.

### Βιβλιογραφικές αναφορές

1. Abouelenien, F., Fujiwara, W., Namba, Y., Kosseva, M., Nishio, N., Nakashimada, Y. 2010. Improved methane fermentation of chicken manure via ammonia removal by biogas recycle. *Bioresour. Technol.*, 101, 6368-6373.
2. Abouelenien, F., Kitamura, Y., Nishio, N., Nakashimada, Y. 2009a. Dry anaerobic ammonia-methane production from chicken manure. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 82, 757-764.
3. Abouelenien, F., Nakashimada, Y., Nishio, N. 2009b. Dry mesophilic fermentation of chicken manure for production of methane by repeated batch culture. *J. Biosci. Bioeng.*, 107, 293-295.
4. Ahring, B., Sandberg, M., Angelidaki, I. 1995. Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digestors. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 43, 559-565.
5. Angelidaki, I., Ahring, B.K. 1993. Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste: the effect of ammonia. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 38, 560-564.
6. Angelidaki, I., Ellegaard, L., Ahring, B. 2003. Applications of the anaerobic digestion process. in: *Biomethanation II*, (Eds.) B. Ahring, B. Ahring, I. Angelidaki, J. Dolfing, L. Euegaard, H. Gavala, F. Haagensen, A. Mogensen, G. Lyberatos, P. Pind, J. Schmidt, I. Skiadas, K. Stamatelatos, Vol. 82, Springer Berlin / Heidelberg, pp. 1-33.
7. Angelidaki, I., Karakashev, D., Batstone, D.J., Plugge, C.M., Stams, A.J.M. 2011. Biomethanation and its potential. in: *Methods Enzymol.*, (Eds.) C.R. Amy, W.R. Stephen, Vol. Volume 494, Academic Press, pp. 327-351.
8. Anthonisen, A., Loehr, R., Prakasam, T., Srinath, E. 1976. Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 835-852.
9. Arora, M., Kiran, B., Rani, S., Rani, A., Kaur, B., Mittal, N. 2008. Heavy metal accumulation in vegetables irrigated with water from different sources. *Food Chem.*, 111, 811-815.
10. Avula, R.Y., Nelson, H.M., Singh, R.K. 2009. Recycling of poultry process wastewater by ultrafiltration. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 10, 1-8.

11. Barnett, G.M. 1994. Phosphorus forms in animal manure. *Bioresour. Technol.*, 49, 139-147.
12. Bernal, M.P., Alburquerque, J.A., Moral, R. 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresour. Technol.*, 100, 5444-5453.
13. Bock, B. 2004. Poultry litter to energy: Technical and economic feasibility. *Carbon*, 24, 27.2.
14. Börjesson, P., Mattiasson, B. 2008. Biogas as a resource-efficient vehicle fuel. *Trends Biotechnol.*, 26, 7-13.
15. Brake, J.D. 1992. A practical guide for composting poultry litter. Bulletin-Mississippi Agricultural and Forestry Experiment Station (USA).
16. Burnett, W.E. 1969. Air pollution from animal wastes. Determination of malodors by gas chromatographic and organoleptic techniques. *Environ. Sci. Technol.*, 3, 744-749.
17. Burton, C.H. 2007. The potential contribution of separation technologies to the management of livestock manure. 112, 208-216.
18. Cang, L., Wang, Y.-j., Zhou, D.-m., Dong, Y.-h. 2004. Heavy metals pollution in poultry and livestock feeds and manures under intensive farming in Jiangsu Province, China. *Journal of Environmental Sciences*, 16, 371-374.
19. Chen, Y., Cheng, J.J., Creamer, K.S. 2008. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresour. Technol.*, 99, 4044-4064.
20. Costa, J., Barbosa, S., Alves, M., Sousa, D. 2012. Thermochemical pre-and biological co-treatments to improve hydrolysis and methane production from poultry litter. *Bioresour. Technol.*, 111, 141-147.
21. Crawford, K.W. 2013. A review of energy production systems through the utilization of poultry litter as a fuel source and determination of feasibility for North Carolina farming operations, North Carolina State University.
22. DeLaune, P., Moore, P., Daniel, T., Lemunyon, J. 2004. Effect of chemical and microbial amendments on ammonia volatilization from composting poultry litter. *J. Environ. Qual.*, 33, 728-734.
23. Demirbas, A. 2008. *Biofuels, Securing the planet's future energy needs*. Springer.
24. Deublein, D., Steinhauser, A. 2010. *Biogas from waste and renewable resources: An Introduction. Second ed.* Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
25. Dolliver, H., Gupta, S., Noll, S. 2008. Antibiotic degradation during manure composting. *J. Environ. Qual.*, 37, 1245-1253.
26. Dong, X., Tollner, E.W. 2003. Evaluation of Anammox and denitrification during anaerobic digestion of poultry manure. *Bioresour. Technol.*, 86, 139-145.
27. Dou, Z., Toth, J.D., Galligan, D.T., Ramberg, C.F., Ferguson, J.D. 2000. Laboratory Procedures for Characterizing Manure Phosphorus. *J. Environ. Qual.*, 29, 508-514.
28. Edwards, C.A., Arancon, N.Q., Sherman, R.L. 2010. *Vermiculture technology: earthworms, organic wastes, and environmental management*. CRC press.
29. Edwards, D., Daniel, T. 1992. Environmental impacts of on-farm poultry waste disposal—A review. *Bioresour. Technol.*, 41, 9-33.
30. Eghball, B. 2003. Leaching of phosphorus fractions following manure or compost application. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 34, 2803-2815.

31. 31. Epstein, E. 2011. *Industrial composting: Environmental engineering and facilities management*. CRC Press.
32. 32. Ferguson, N., Gates, R., Taraba, J., Cantor, A., Pescatore, A., Straw, M., Ford, M., Burnham, D. 1998. The effect of dietary protein and phosphorus on ammonia concentration and litter composition in broilers. *Poult. Sci.*, 77, 1085-1093.
33. 33. FNR. 2013. Leitfaden Biogas – Von der Gewinnung zur Nutzung [Biogas handbook - From production to valorization]. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow, Germany.
34. 34. Gangagni Rao, A., Sasi Kanth Reddy, T., Surya Prakash, S., Vanajakshi, J., Joseph, J., Jetty, A., Rajashekhara Reddy, A., Sarma, P. 2008. Biomethanation of poultry litter leachate in UASB reactor coupled with ammonia stripper for enhancement of overall performance. *Bioresour. Technol.*, 99, 8679-8684.
35. 35. Gangagni Rao, A., Surya Prakash, S., Joseph, J., Rajashekhara Reddy, A., Sarma, P. 2011. Multi stage high rate biomethanation of poultry litter with self mixed anaerobic digester. *Bioresour. Technol.*, 102, 729-735.
36. 36. Gao, M., Li, B., Yu, A., Liang, F., Yang, L., Sun, Y. 2010. The effect of aeration rate on forced-aeration composting of chicken manure and sawdust. *Bioresour. Technol.*, 101, 1899-1903.
37. 37. Gavala, H.N., Angelidaki, I., Ahring, B.K. 2003. Kinetics and modeling of anaerobic digestion process. in: *Biomethanation I*, (Ed.) B.K. Ahring, Springer. Berlin, pp. 37.
38. 38. Gelegenis, J., Georgakakis, D., Angelidaki, I., Mavris, V. 2007. Optimization of biogas production by co-digesting whey with diluted poultry manure. *Renewable Energy*, 32, 2147-2160.
39. 39. Georgacakis, D., Sievers, D.M., Iannotti, E.L. 1982. Buffer stability in manure digesters. *Agricultural Wastes*, 4, 427-441.
40. 40. Georgacakis, D., Tsavdaris, A., Bakouli, J., Symeonidis, S. 1996. Composting solid swine manure and lignite mixtures with selected plant residues. *Bioresour. Technol.*, 56, 195-200.
41. 41. Ghosh, M., Ganguli, A., Pathak, S. 2009. Application of a novel biopolymer for removal of Salmonella from poultry wastewater. *Environ. Technol.*, 30, 337-344.
42. 42. Greaves, J., Hobbs, P., Chadwick, D., Haygarth, P. 1999. Prospects for the Recovery of Phosphorus from Animal Manures: A Review. *Environ. Technol.*, 20, 697-708.
43. 43. Guerra-Rodríguez, E., Diaz-Ravina, M., Vazquez, M. 2001. Co-composting of chestnut burr and leaf litter with solid poultry manure. *Bioresour. Technol.*, 78, 107-109.
44. 44. He, Z., Senwo, Z.N., Mankolo, R.N., Honeycutt, C.W. 2006. Phosphorus fractions in poultry litter characterized by sequential fractionation coupled with phosphatase hydrolysis. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 4, 304.
45. 45. He, Z., Yang, X., Kahn, B.A., Stoffella, P.J., Calvert, D.V. 2001. Plant nutrition benefits of phosphorus, potassium, calcium, magnesium, and micronutrients from compost utilization. CRC Press LLC, *Compost utilization in horticultural cropping systems*, 307-317.
46. 46. Hill, D., Cobb, S., Bolte, J. 1987. Using volatile fatty acid relationships to predict anaerobic digester failure. *Transactions of the ASAE American Society of Agricultural Engineers*.

47. Hirzel, J., Walter, I. 2008. Availability of nitrogen, phosphorus and potassium from poultry litter and conventional fertilizers in a volcanic soil cultivated with silage corn. *Chilean J. Agric. Res.*, 68, 264-273.
48. Imbeah, M. 1998. Composting piggery waste: A review. *Bioresour. Technol.*, 63, 197-203.
49. Irshad, M., Yamamoto, S., Honna, T., Eneji, A.E. 2009. Characterization of trace elements in chicken and duck litter ash. *Waste Manag.*, 29, 265-271.
50. Jackson, B., Seaman, J., Bertsch, P. 2006. Fate of arsenic compounds in poultry litter upon land application. *Chemosphere*, 65, 2028-2034.
51. Kayhanian, M., Tchobanoglous, G. 2007. *Biomass conversion processes for energy recovery*. Taylor & Francis Group LLC. .
52. Kelleher, B., Leahy, J., Henihan, A., O'dwyer, T., Sutton, D., Leahy, M. 2002. Advances in poultry litter disposal technology—a review. *Bioresour. Technol.*, 83, 27-36.
53. Khan, A.A. 2006. Vermicomposting of poultry litter using *Eisenia foetida*, Oklahoma State University.
54. Khanal, S.K. 2008. *Microbiology and biochemistry of anaerobic biotechnology*. John, Wiley & Sons Inc.
55. Kingery, W., Wood, C., Delaney, D., Williams, J., Mullins, G. 1994. Impact of long-term land application of broiler litter on environmentally related soil properties. *J. Environ. Qual.*, 23, 139-147.
56. Kirchmann, H., Witter, E. 1989. Ammonia volatilization during aerobic and anaerobic manure decomposition. *Plant Soil*, 115, 35-41.
57. Kithome, M., Paul, J.W., Bomke, A.A. 1999. Reducing Nitrogen Losses during Simulated Composting of Poultry Manure using Adsorbents or Chemical Amendments. *J. Environ. Qual.*, 28, 194-201.
58. Kleinman, P.J., Wolf, A.M., Sharpley, A.N., Beegle, D.B., Saporito, L.S. 2005. Survey of water-extractable phosphorus in livestock manures. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69, 701-708.
59. Krylova, N.I., Khabiboulline, R.E., Naumova, R.P., Nagel, M.A. 1997. The influence of ammonium and methods for removal during the anaerobic treatment of poultry manure. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 70, 99-105.
60. Kumar, A., Jones, D.D., Hanna, M.A. 2009. Thermochemical biomass gasification: a review of the current status of the technology. *Energies*, 2, 556-581.
61. Lahav, O., Mor, T., Heber, A.J., Molchanov, S., Ramirez, J.C., Li, C., Broday, D.M. 2008. A new approach for minimizing ammonia emissions from poultry houses. *Water, Air, Soil Pollut.*, 191, 183-197.
62. Lanyasunya, T., Rong, W.H., Abdulrazak, S., Kaburu, P., Makori, J., Onyango, T., Mwangi, D. 2006. Factors limiting use of poultry manure as protein supplement for dairy cattle on smallholder farms in Kenya. *Int. J. Poult. Sci*, 5, 75-80.
63. Lemahieu, C., Bruneel, C., Termote-Verhalle, R., Muylaert, K., Buyse, J., Foubert, I. 2013. Omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acid enriched eggs by microalgal supplementation. *Lipid Technology*, 25, 204-206.
64. Lieberhardt, W.C., Shortall, J.G. 1974. Potassium is responsible for salinity in soils amended with poultry manure. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 5, 385-398.
65. Luo, W., Chen, T.B., Zheng, G.D., Gao, D., Zhang, Y.A., Gao, W. 2008. Effect of moisture adjustments on vertical temperature distribution during forced-



- aeration static-pile composting of sewage sludge. *Resources, Conservation and Recycling*, 52, 635-642.
66. 66. Mahimairaja, S., Bolan, N., Hedley, M., Macgregor, A. 1994. Losses and transformation of nitrogen during composting of poultry manure with different amendments: an incubation experiment. *Bioresour. Technol.*, 47, 265-273.
67. 67. Markou, G. 2015. Improved anaerobic digestion performance and biogas production from poultry litter after lowering its nitrogen content. *Bioresour. Technol.*, 196, 726-730.
68. 68. Markou, G., Iconomou, D., Muylaert, K. 2016. Applying raw poultry litter leachate for the cultivation of *Arthrospira platensis* and *Chlorella vulgaris*. *Algal Res.*, 13, 79-84.
69. 69. Martinez, J., Dabert, P., Barrington, S., Burton, C. 2009. Livestock waste treatment systems for environmental quality, food safety, and sustainability. *Bioresour. Technol.*, 100, 5527-5536.
70. 70. McKendry, P. 2002. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresour. Technol.*, 83, 47-54.
71. 71. Mohan, D., Pittman, C.U., Steele, P.H. 2006. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy Fuels*, 20, 848-889.
72. 72. Möller, K., Müller, T. 2012. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: a review. *Eng. Life Sci.*, 12, 242-257.
73. 73. Moore, P., Daniel, T., Edwards, D., Miller, D. 1996. Evaluation of chemical amendments to reduce ammonia volatilization from poultry litter. *Poult. Sci.*, 75, 315-320.
74. 74. Moral, R., Paredes, C., Bustamante, M., Marhuenda-Egea, F., Bernal, M. 2009. Utilisation of manure composts by high-value crops: Safety and environmental challenges. *Bioresour. Technol.*, 100, 5454-5460.
75. 75. Nicholson, F.A., Chambers, B.J., Smith, K.A. 1996. Nutrient composition of poultry manures in England and Wales. *Bioresour. Technol.*, 58, 279-284.
76. 76. Nicholson, F.A., Groves, S.J., Chambers, B.J. 2005. Pathogen survival during livestock manure storage and following land application. *Bioresour. Technol.*, 96, 135-143.
77. 77. Niu, Q., Qiao, W., Qiang, H., Hojo, T., Li, Y.-Y. 2013. Mesophilic methane fermentation of chicken manure at a wide range of ammonia concentration: stability, inhibition and recovery. *Bioresour. Technol.*, 137, 358-367.
78. 78. Noble, R., Gaze, R. 1994. Controlled environment composting for mushroom cultivation: substrates based on wheat and barley straw and deep litter poultry manure. *The Journal of Agricultural Science*, 123, 71-79.
79. 79. Pelletier, N. 2008. Environmental performance in the US broiler poultry sector: Life cycle energy use and greenhouse gas, ozone depleting, acidifying and eutrophying emissions. *Agric. Sys.*, 98, 67-73.
80. 80. Preusch, P., Adler, P., Sikora, L., Tworowski, T. 2002. Nitrogen and phosphorus availability in composted and uncomposted poultry litter. *J. Environ. Qual.*, 31, 2051-2057.
81. 81. Rajagopal, R., Massé, D.I., Singh, G. 2013. A critical review on inhibition of anaerobic digestion process by excess ammonia. *Bioresour. Technol.*, 143, 632-641.
82. 82. Raviv, M. 2005. Production of high-quality composts for horticultural purposes: a mini-review. *HortTechnology*, 15, 52-57.

83. 83. Ritz, C., Fairchild, B., Lacy, M. 2004. Implications of ammonia production and emissions from commercial poultry facilities: A review. *The Journal of Applied Poultry Research*, 13, 684-692.
84. 84. Ryckeboer, J., Mergaert, J., Vaes, K., Klammer, S., De Clercq, D., Coosemans, J., Insam, H., Swings, J. 2003. A survey of bacteria and fungi occurring during composting and self-heating processes. *Ann. Microbiol.*, 53, 349-410.
85. 85. Safley Jr, L., Vetter, R., Smith, D. 1987. Operating a full-scale poultry manure anaerobic digester. *Biological wastes*, 19, 79-90.
86. 86. Sharpley, A., Moyer, B. 2000. Phosphorus Forms in Manure and Compost and Their Release during Simulated Rainfall. *J. Environ. Qual.*, 29, 1462-1469.
87. 87. Sharpley, A.N., McDowell, R.W., Kleinman, P.J. 2004. Amounts, forms, and solubility of phosphorus in soils receiving manure. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68, 2048-2057.
88. 88. Siegert, I., Banks, C. 2005. The effect of volatile fatty acid additions on the anaerobic digestion of cellulose and glucose in batch reactors. *Process Biochem.*, 40, 3412-3418.
89. 89. Sivagurunathan, P., Sivasankari, S. 2015. Influence of Chicken Manure on Biological Efficiency of *Pleurotus* spp. *Waste and Biomass Valorization*, 6, 23-28.
90. 90. Souza, C.R.d., Ghosh, A.K., Silva, I.R.d., Alvarenga, E.S.d., Novais, R.F., Jesus, G.L.d. 2012. Phosphorus transformation in poultry litter and litter-treated Oxisol of Brazil assessed by <sup>31</sup>P-NMR and wet chemical fractionation. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36, 1516-1527.
91. 91. Stentiford, E.I. 1996. Composting Control: Principles and Practice. in: *The Science of Composting*, (Eds.) M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes, T. Papi, Springer Netherlands, pp. 49-59.
92. 92. Taiz, L., Zeiger, E. 2010. *Plant physiology. 5th ed.* Sinauer Associates.
93. 93. Thornton, F.C., Shurpali, N.J., Bock, B.R., Reddy, K.C. 1998. N<sub>2</sub>O and no emissions from poultry litter and urea applications to Bermuda grass. *Atmos. Environ.*, 32, 1623-1630.
94. 94. Tiquia, S., Tam, N. 2000. Fate of nitrogen during composting of chicken litter. *Environ. Pollut.*, 110, 535-541.
95. 95. Toor, G.S., Peak, J.D., Sims, J.T. 2005. Phosphorus speciation in broiler litter and turkey manure produced from modified diets. *J. Environ. Qual.*, 34, 687-697.
96. 96. Toor, S.S., Rosendahl, L., Rudolf, A. 2011. Hydrothermal liquefaction of biomass: A review of subcritical water technologies. *Energy*, 36, 2328-2342.
97. 97. Walker, F. 2004. On-farm composting of poultry litter. The Agricultural Extension Service, The University of Tennessee Institute of Agriculture.
98. 98. Wang, Y., Zhang, Y., Wang, J., Meng, L. 2009. Effects of volatile fatty acid concentrations on methane yield and methanogenic bacteria. *Biomass Bioenergy*, 33, 848-853.
99. 99. Webb, A., Hawkes, F.R. 1985. The anaerobic digestion of poultry manure: variation of gas yield with influent concentration and ammonium-nitrogen levels. *Agricultural Wastes*, 14, 135-156.
100. 100. Weiland, P. 2008. *Wichtige Messdaten für den Prozessablauf und Stand der Technik in der Praxis.*
101. 101. Wong-Chong, G., Loehr, R. 1975. The kinetics of microbial nitrification. *Water Res.*, 9, 1099-1106.

- 102.102. Zhang, W., Lau, A. 2007. Reducing ammonia emission from poultry manure composting via struvite formation. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 82, 598-602.
- 103.103. Γεωργακάκης, Δ. 2011. Διαχείριση αποβλήτων, Τεύχος 3ο, Δευτεροβάθμια (Βιολογική) επεξεργασία γεωργο-βιομηχανικών αποβλήτων, Μέρος β', Αερόβιες διεργασίες, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.
- 104.104. Σκιαδά, Β.Γ. 2012. Μελέτη της μικροβιακής ποικιλότητας κατά τη συγκομποστοποίηση στερεών και υγρών αγροτοβιομηχανικών υποπροϊόντων με τη χρήση μοριακών τεχνικών. Μεταπτυχιακή μελέτη. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- 105.105. ΥΠΑΤ. 2011. *Ελληνική Κτηνοτροφία, Γενική Διεύθυνση Ζωικής Παραγωγής, Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων.*