



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΗ ΔΙΑΤΡΟΦΗ ΤΩΝ ΠΤΗΝΩΝ».

Χριστόδουλος Νίκας

Επιβλέπων: Ελευθέριος Μπόνος

Καθηγητής , DVM , PhD

Τόπος έκδοσης, Φεβρουάριος, 2026

"CONTEMPORARY DEVELOPMENTS IN BIRD NUTRITION"

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Επιβλέπων καθηγητής

Ελευθέριος Μπόνος

2. Μέλος επιτροπής

Σωτηρία Βουράκη

3. Μέλος επιτροπής

Ευαγγελία Γκούβα

© Νίκας Χριστόδουλος , 2026 .

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Δήλωση μη λογοκλοπής

Δηλώνω υπεύθυνα και γνωρίζοντας τις κυρώσεις του Ν. 2121/1993 περί Πνευματικής Ιδιοκτησίας, ότι η παρούσα πτυχιακή εργασία είναι εξ ολοκλήρου αποτέλεσμα δικής μου ερευνητικής εργασίας, δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν (κάθε είδους, μορφής και προέλευσης) για τη συγγραφή της περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία.

Νίκας Χριστόδουλος

Υπογραφή

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διατριβή συνιστά μια περιγραφική βιβλιογραφική ανασκόπηση των πρόσφατων εξελίξεων στον τομέα της διατροφής των πτηνών, με βάση δημοσιευμένα άρθρα που εστιάζουν στα εμπορικά πουλερικά, στα άγρια πτηνά και στα πτηνά συντροφιάς. Η παρούσα έρευνα εξετάζει τις εξελίξεις σε διάφορους αλληλένδετους τομείς: στο μικροβίωμα του εντέρου με λειτουργικά πρόσθετα ζωοτροφών (προ-, πρε-, συν- και μεταβιοτικά) ως υποκατάστατα των αντιβιοτικών αυξητικών παραγόντων· στις βιώσιμες πηγές πρωτεϊνών: αλεύρι εντόμων, μικροφύκη και πρωτεΐνες· στα φυτογενή πρόσθετα ζωοτροφών και αιθέρια έλαια, στην αυτοματοποιημένη ανάμειξη ζωοτροφών και στην παρακολούθηση μέσω του διαδικτύου που επιτρέπει τη διατροφή ακριβείας, στη διατροφογενωμική, καθώς και στον επιγενετικό προγραμματισμό, μέσω παρεμβάσεων in ovo. Η εν λόγω ανασκόπηση εξετάζει περαιτέρω τα διατροφικά προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα κατοικίδια και τα άγρια πτηνά, ιδίως τους κινδύνους διατροφικών διαταραχών και ορισμένες οικολογικές συνέπειες της συμπληρωματικής σίτισης. Τα ευρήματα της μελέτης αποκαλύπτουν ότι η διατροφή των πουλερικών έχει σημειώσει μεγάλη πρόοδο τα τελευταία χρόνια, ωστόσο υπάρχουν πολλά ακόμη που παραμένουν άγνωστα. Η εν λόγω έρευνα εξετάζει εάν αυτές οι γνώσεις μπορούν να βοηθήσουν και τα πτηνά που δεν ανήκουν στην κατηγορία των πουλερικών. Η πρόοδος της διατροφής των πτηνών στον 21ο αιώνα απαιτεί την ενσωμάτωση της μοριακής βιολογίας, της ψηφιακής τεχνολογίας και της επιστήμης της βιωσιμότητας.

Λέξεις-κλειδιά: διατροφή πτηνών, μικροβιοκτόνο του εντέρου, εναλλακτικές πηγές πρωτεϊνών, ακριβής σίτιση, διατροφογενωμική

ABSTRACT

This thesis is a descriptive literature review of recent developments in the field of bird nutrition, based on published articles focusing on commercial poultry, wild birds, and companion birds. This research examines developments in several interrelated areas: the gut microbiome with functional feed additives (pro-, pre-, syn- and postbiotics) as substitutes for antibiotic growth promoters; sustainable protein sources: insect meal, microalgae, and proteins; plant-based feed additives and essential oils; automated feed mixing and online monitoring enabling precision feeding; nutrigenomics; and epigenetic programming through in ovo interventions. This review further examines the nutritional problems faced by domestic and wild birds, particularly the risks of nutritional disorders and certain ecological consequences of supplemental feeding. The study's findings reveal that poultry nutrition has made great strides in recent years, but much remains unknown. This research examines whether this knowledge can also help birds that do not belong to the poultry category. Advances in bird nutrition in the 21st century require the integration of molecular biology, digital technology, and sustainability science.

Keywords: avian nutrition, gut microbiome, alternative protein sources, precision feeding, nutrigenomics

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT	7
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	8
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ	10
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
1.1. Η Σημασία της Διατροφής των Πτηνών στον 21ο Αιώνα.....	13
1.2. Πεδίο Εφαρμογής - Στόχοι και Μεθοδολογία Έρευνας.....	15
1.3. Ερευνητικά Ερωτήματα	16
2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ ΤΩΝ ΠΤΗΝΩΝ	18
2.1. Απαιτήσεις Πτηνών σε Μακροθρεπτικά και Μικροθρεπτικά Συστατικά.....	18
2.2. Εξέλιξη των Προσεγγίσεων στη Σύνθεση των Ζωοτροφών	21
3. ΤΟ ΜΙΚΡΟΒΙΩΜΑ ΤΟΥ ΕΝΤΕΡΟΥ ΤΩΝ ΠΤΗΝΩΝ ΚΑΙ ΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΠΡΟΣΘΕΤΑ ..	23
3.1. Το Μικροβίωμα του Εντέρου των Πτηνών: Σύνθεση και Λειτουργία.....	23
3.2. Προβιοτικά - Πρεβιοτικά και Συνβιοτικά ως Λειτουργικά Πρόσθετα Ζωοτροφών	25
4. ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΒΙΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΠΡΩΤΕΪΝΩΝ	29
4.1. Πρωτεΐνες από Έντομα στη Διατροφή των Πτηνών	29
4.2. Φύκια - Μονοκύτταρες Πρωτεΐνες και Άλλα Καινοτόμα Συστατικά	31
5. ΦΥΤΟΓΕΝΗ ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΖΩΟΤΡΟΦΩΝ ΚΑΙ ΑΙΘΕΡΙΑ ΕΛΑΙΑ	35
5.1. Ταξινόμηση και Μηχανισμοί Δράσης.....	35
5.2. Αποτελεσματικότητα στη Διατροφή Ορνίθων και Κατοικίδιων Πτηνών	37
6. ΔΙΑΤΡΟΦΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΖΩΟΤΡΟΦΩΝ	40
6.1. Από τη Διατροφή Κατά Φάσεις στην Καθημερινή Ακριβή Διατροφή	40
6.2. Τεχνολογικές Καινοτομίες στην Παράδοση Ζωοτροφών	42
7. ΔΙΑΤΡΟΦΟΓΕΝΕΤΙΚΗ ΚΑΙ ΕΠΙΓΕΝΕΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΟΦΗ.....	45
7.1. Διατροφογενετική: Πώς η Διατροφή Επηρεάζει την Έκφραση των Γονιδίων στα Πτηνά	45

7.2. Επιγενετικός Προγραμματισμός και Διατροφικές Παρεμβάσεις	47
8. ΔΙΑΤΡΟΦΗ ΠΤΗΝΩΝ ΣΕ ΑΙΧΜΑΛΩΣΙΑ - ΣΥΝΤΡΟΦΙΑΣ ΚΑΙ ΑΓΡΙΩΝ ΠΤΗΝΩΝ	52
8.1. Διατροφική Διαχείριση Πτηνών σε Αιχμαλωσία και Πτηνών Συντροφιάς	52
8.2. Τροφή για Άγρια Πτηνά: Τάσεις - Οφέλη και Οικολογικές Παράμετροι.....	55
9. ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ - ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ - ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ....	58
9.1. Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα της Παραγωγής Τροφών για Πτηνά.....	58
9.2. Μελλοντικές Κατευθύνσεις.....	61
10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	64
11. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	69

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

Συντομογραφία	Πλήρης Ορισμός
16S rRNA	16S Ribosomal RNA (16S Ριβοσωμικό RNA)
AAFCO	Association of American Feed Control Officials (Ένωση Αμερικανών Υπαλλήλων Ελέγχου Ζωοτροφών)
ADG	Average Daily Gain (Μέσο Ημερήσιο Κέρδος Βάρους)
AI	Artificial Intelligence (Τεχνητή Νοημοσύνη)
AMPK	AMP-activated Protein Kinase (Κινάση Πρωτεΐνης Ενεργοποιημένη από AMP)
BSFL	Black Soldier Fly Larvae (Προνύμφες Μαύρης Μύγας Στρατιώτη)
CAGR	Compound Annual Growth Rate (Σύνθετος Ετήσιος Ρυθμός Ανάπτυξης)
CAT	Catalase (Καταλάση)
CFU	Colony Forming Units (Μονάδες Σχηματισμού Αποικιών)
DDGS	Distiller-Dried Grains with Solubles (Αποξηραμένοι Σπόροι Απόσταξης με Διαλυτά)
DEFRA	Department for Environment, Food and Rural Affairs (Υπ. Περιβάλλοντος, Τροφίμων και Αγροτικών Υποθέσεων Η.Β.)
DEGs	Differentially Expressed Genes (Διαφορικά Εκφραζόμενα Γονίδια)
DHA	Docosaehaenoic Acid (Δοκοσαεξαενοϊκό Οξύ)
DNA	Deoxyribonucleic Acid (Δεοξυριβονουκλεϊκό Οξύ)
DSS	Decision Support System (Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων)
EFG	EFG Software (Λογισμικό Μοντελοποίησης Ανάπτυξης Πτηνών)
EPA	Eicosapentaenoic Acid (Εικοσαπεντανοϊκό Οξύ)
EU	European Union (Ευρωπαϊκή Ένωση)
EUFIC	European Food Information Council (Ευρωπαϊκό Συμβούλιο Πληροφοριών Τροφίμων)
FCR	Feed Conversion Ratio (Δείκτης Μετατρεψιμότητας Τροφής)
GPR	G-protein Coupled Receptors (Υποδοχείς Συζευγμένοι με Πρωτεΐνη G)
GPx	Glutathione Peroxidase (Υπεροξειδάση Γλουταθειόνης)
HDAC	Histone Deacetylase (Αποακετυλάση Ιστονών)
IgA	Immunoglobulin A (Ανοσοσφαιρίνη Α)
IL	Interleukin (Ιντερλευκίνη, π.χ. IL-1β, IL-6, IL-8)

IOF	In Ovo Feeding (Ενδοαυλική Σίτιση)
IoT	Internet of Things (Διαδίκτυο των Πραγμάτων)
IPIFF	International Platform of Insects for Food and Feed (Διεθνής Πλατφόρμα Εντόμων για Τρόφιμα και Ζωοτροφές)
ISAPP	International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (Διεθνής Επιστημονική Ένωση για τα Προβιοτικά και τα Πρεβιοτικά)
LPC	Lysophosphatidylcholine (Λυσοφωσφατιδυλοχολίνη)
MAPK	Mitogen-Activated Protein Kinase (Κινάση Πρωτεΐνης Ενεργοποιημένη από Μιτογόνα)
MDA	Malondialdehyde (Μαλονδιαλδεΐδη)
miRNA	MicroRNA (Μικρό RNA)
ML	Machine Learning (Μηχανική Μάθηση)
MOS	Mannan-Oligosaccharides (Μαννανο-ολιγοσακχαρίτες)
mRNA	Messenger Ribonucleic Acid (Αγγελιαφόρο Ριβονουκλεϊκό Οξύ)
MTHFR	Methylenetetrahydrofolate Reductase (Αναγωγήση Μεθυλενοτετραϋδροφυλλικού)
mTOR	Mechanistic Target of Rapamycin (Μηχανιστικός Στόχος της Ραπαμκίνης)
MTRR	Methionine Synthase Reductase (Αναγωγήση Συνθάσης Μεθειονίνης)
NF-κB	Nuclear Factor Kappa-light-chain-enhancer of activated B cells (Πυρηνικός Παράγοντας κB)
NRC	National Research Council (Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας)
Nrf2	Nuclear Factor Erythroid 2-Related Factor 2 (Πυρηνικός Παράγοντας Ερυθροειδούς 2)
PAP	Processed Animal Protein (Επεξεργασμένη Ζωική Πρωτεΐνη)
PFA	Phytogenic Feed Additives (Φυτογενή Πρόσθετα Ζωοτροφών)
PGC	Primordial Germ Cells (Αρχέγονα Γεννητικά Κύτταρα)
PI3K	Phosphoinositide 3-Kinase (Φωσφοϊνοσιτίδη 3-Κινάση)
PLF	Precision Livestock Farming (Κτηνοτροφία Ακριβείας)
PPARα	Peroxisome Proliferator-Activated Receptor Alpha (Υποδοχέας Ενεργοποιημένος από Υπεροξεισωμάτια Άλφα)
PS	Poultry Science (Επιστήμη Πουλερικών)
RISC	RNA-Induced Silencing Complex (Σύμπλεγμα Σίγησης Επαγόμενο από RNA)
RNA	Ribonucleic Acid (Ριβονουκλεϊκό Οξύ)
RNA-Seq	RNA Sequencing (Αλληλούχηση RNA)

ROS	Reactive Oxygen Species (Δραστικές Μορφές Οξυγόνου)
rRNA	Ribosomal Ribonucleic Acid (Ριβοσωμικό RNA)
SAM	S-Adenosyl Methionine (S-Αδενοσυλομεθειονίνη)
SCFA	Short-Chain Fatty Acids (Λιπαρά Οξέα Βραχείας Αλυσίδας)
SCP	Single-Cell Protein (Μονοκύτταρη Πρωτεΐνη)
sIgA	Secretory Immunoglobulin A (Εκκριτική Ανοσοσφαιρίνη Α)
SOD	Superoxide Dismutase (Υπεροξειδική Δισμουτάση)
TLR	Toll-Like Receptor (Υποδοχέας Τύπου Toll)
TNF-α	Tumor Necrosis Factor Alpha (Παράγοντας Νέκρωσης Όγκων Άλφα)

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Η Σημασία της Διατροφής των Πτηνών στον 21ο Αιώνα

Η σημασία της διατροφής στη βιολογία των πτηνών υπογραμμίζεται από στοιχεία που καταδεικνύουν ότι σημαντικές φυσιολογικές λειτουργίες, όπως η ανάπτυξη, η αναπαραγωγή, η ανοσολογική ικανότητα και η διάρκεια ζωής, επηρεάζονται από τη διατροφή. Η διατροφή των οικόσιτων πουλερικών επηρεάζει τον ρυθμό ανάπτυξής τους, την αποδοτικότητα της τροφής, την παραγωγή και την ποιότητα των αυγών, τη σύνθεση του σφαγίου και την ευαισθησία σε λοιμώξεις (Klasing, 2025 και Korver, 2012).

Οι ασθένειες αναπτύσσονται όταν υπάρχει έλλειψη ή ανισορροπία σε απαραίτητα αμινοξέα, βιταμίνες ή μέταλλα. Για παράδειγμα, η έλλειψη βιταμίνης D οδηγεί σε ραχίτιδα, η έλλειψη βιταμίνης A προκαλεί πλακώδη μεταπλασία και η ανισορροπία ασβεστίου-φωσφόρου οδηγεί σε μεταβολική νόσο των οστών. Αυτά επηρεάζουν σημαντικά την ευημερία και την αναπαραγωγική ικανότητα των πτηνών (NRC, 1994; Hoppes, 2024).

Η επιστήμη έχει σημειώσει τεράστια πρόοδο στον τομέα της διατροφής τον τελευταίο αιώνα, επιδεικνύοντας απίστευτη αποδοτικότητα στην παραγωγή. Ένα σύγχρονο κοτόπουλο κρεατοπαραγωγής φτάνει στο βάρος πώλησης εντός 35 ημερών (περίπου το μισό του χρόνου που χρειαζόταν τη δεκαετία του 1960), γεγονός που έχει βελτιώσει σημαντικά την παραγωγικότητα. Αυτό έχει επιτευχθεί μέσω βελτιωμένης γενετικής επιλογής και σταδιακών βελτιώσεων στη σύνθεση των ζωοτροφών.

Η διατροφή είναι ένας ισχυρός ρυθμιστής της ανοσολογικής απόκρισης. Συγκεκριμένα, μπορεί να ενισχύσει τόσο την έμφυτη όσο και την προσαρμοστική ανοσία για θρεπτικά συστατικά και βιοδραστικές ενώσεις. Λόγω αυτού του ανοσορυθμιστικού δυναμικού, η χρήση αντιβιοτικών είναι περιορισμένη (Pierzchała-Koziec et al., 2024).

Η σημασία των ζωοτροφών στην παραγωγή πουλερικών είναι σίγουρα τεράστια. Περίπου το 60-70% του κόστους παραγωγής κρέατος κοτόπουλου οφείλεται στο κόστος των ζωοτροφών. Σε ορισμένα συστήματα παραγωγής, το ποσοστό αυτό είναι ακόμη υψηλότερο, φτάνοντας το 70-80%. Οι τεχνικές σίτισης έχουν αποδειχθεί ότι συμβάλλουν στην υψηλή κερδοφορία των εκμεταλλεύσεων.

Με την άνθηση του κτηνοτροφικού τομέα, την αφθονία καλαμποκιού και σόγιας και την πτώση των τιμών του ιχθυαλεύρου σε παγκόσμιο επίπεδο, τα φιλικά προς την αγορά ρυθμιστικά μέτρα μπορούν να βοηθήσουν τον τομέα να αποτρέψει τον αντίκτυπο των παγκόσμιων τιμών. Σε αυτό το πλαίσιο, μπορεί να αποδοθεί πρακτική σημασία σε πολλές από τις σύγχρονες εξελίξεις που αναλύονται στην παρούσα μελέτη (εναλλακτικές πηγές πρωτεϊνών, τεχνολογία ακριβείας στη διατροφή και λειτουργικά πρόσθετα ζωοτροφών).

Επιπλέον, ο δείκτης μετατρεψιμότητας ζωοτροφής είναι ένα οικονομικό μέτρο και επίσης ένας καλός δείκτης περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Η βελτίωση των τάσεων του δείκτη μετατρεψιμότητας ζωοτροφής δείχνει μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ανά μονάδα παραγωγής. Η ραγδαία αύξηση της δημοτικότητας των κατοικίδιων και των άγριων πτηνών έχει προκαλέσει έντονο ενδιαφέρον .

Ο εκτιμώμενος αριθμός κατοικίδιων πτηνών παγκοσμίως ανέρχεται σε εκατοντάδες εκατομμύρια. Οι ιδιοκτήτες τους συχνά ανησυχούν για την πρόληψη των πιο κοινών διαταραχών που προκαλούνται από την κακή διατροφή (Hoppes, 2024; Stanford, 2006), οι οποίες περιλαμβάνουν παχυσαρκία, ηπατική λιπιδίωση, ανεπάρκεια βιταμίνης Α και ανεπάρκεια ασβεστίου.

Η διαφορά στην κατανάλωση ενέργειας των πτηνών όταν βρίσκονται σε αιχμαλωσία ή ζουν ελεύθερα στη φύση καθιστά την κατάσταση μάλλον περίπλοκη. Οι οικόσιτοι παπαγάλοι εκτιμάται ότι καταναλώνουν 10 έως 15 φορές λιγότερη ενέργεια από τους άγριους ομολόγους τους. Παρόλα αυτά, πολλοί εξ' αυτών εξακολουθούν να τρέφονται με τροφές υψηλής ενέργειας, με βάση τους σπόρους. Όλες αυτές οι τροφές οδηγούν σε μια χρόνια κατάσταση υποκλινικού υποσιτισμού (Koutsos et al., 2001).

Η διατροφική ασφάλεια των αγρίων πτηνών μπορεί να εξασφαλιστεί με την παροχή κατάλληλων συμπληρωμάτων διατροφής. Η καλύτερη στρατηγική είναι η διεξοδική έρευνα. Σύμφωνα με τις εκθέσεις Wise Guy, το 2024, η αξία της παγκόσμιας αγοράς τροφών για άγρια πτηνά ήταν 1,74 δισεκατομμύρια δολάρια. Επίσης, αυξάνεται με ετήσιο σύνθετο ρυθμό ανάπτυξης (CAGR) περίπου 4,4% έως το 2035. Εν τω μεταξύ, η επέκταση της συμπληρωματικής σίτισης των άγριων πτηνών μετατρέπεται σε μια τεράστια παγκόσμια βιομηχανία.

Η βιομηχανία σίτισης πτηνών έχει πράγματι αυξηθεί. Η κοινωνία ανησυχεί όλο και περισσότερο για θέματα που αφορούν τη βιοποικιλότητα. Ωστόσο, δημιουργεί μεγάλα

οικολογικά προβλήματα που σχετίζονται με την αναδιανομή θρεπτικών ουσιών, την καθαριότητα των ταϊστροών και τον αντίκτυπο στα άγρια πτηνά και στο περιβάλλον τους (Abraham et al. 2024; Cox και Gaston 2006). Η διατροφική διαχείριση των πουλερικών, των οικόσιτων και των άγριων πουλιών καλύπτει ένα εξαιρετικά ευρύ πεδίο που είναι επιστημονικό, εμπορικό και κοινωνικό και απαιτεί προσεκτική μελέτη.

1.2. Πεδίο Εφαρμογής - Στόχοι και Μεθοδολογία Έρευνας

Η παρούσα διατριβή αναλύει τις σύγχρονες εξελίξεις στη διατροφή των πτηνών για τρεις κύριες ομάδες πτηνών: τα εμπορικά πουλερικά (κοτόπουλα κρεατοπαραγωγής και ωτόκες όρνιθες), τα πτηνά συντροφιάς και τα κατοικίδια πτηνά (παπαγάλοι, σπίνι, καναρίνια και πτηνά εκτροφής) και τα άγρια πτηνά (στο πλαίσιο της συμπληρωματικής σίτισης και της διατροφής για τη συντήρηση). Οι εξελίξεις στη διατροφή των πτηνών, που έχουν λάβει χώρα κατά τον 21ο αιώνα και που θα αλλάξουν σημαντικά τον τρόπο με τον οποίο ταΐζουμε τα πτηνά, αναλύονται στην παρούσα μελέτη.

Οι στόχοι της διατριβής συνοψίζονται ως ακολούθως: α) εξέταση των βασικών αρχών της διατροφής των πτηνών, β) αξιολόγηση των μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών συστατικών, γ) μελέτη της εξέλιξης στη σύσταση των ζωοτροφών, δ) αξιολόγηση του ρόλου του μικροβιώματος του εντέρου, των προβιοτικών, των πρεβιοτικών, των συνβιοτικών και των μεταβιοτικών στην υγεία των πτηνών, ε) εξέταση της εφαρμογής μη συμβατικών και βιώσιμων πηγών πρωτεϊνών (π.χ. αλεύρι εντόμων, μικροφύκη, πρωτεΐνες και υποπροϊόντα της αγροβιομηχανίας), στ) αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των φυτογενών προσθέτων ζωοτροφών και των αιθέριων ελαίων ως αντιβιοτικών αυξητικών παραγόντων, ζ) μελέτη της διατροφής ακριβείας και της τεχνολογίας χορήγησης ζωοτροφών, η) εισαγωγή της έννοιας της αγρογενομικής επιγενετικής διατροφής, θ) συζήτηση συγκεκριμένων διατροφικών προβλημάτων στα κατοικίδια και στα άγρια πτηνά, ι) αξιολόγηση του αποτυπώματος των ζωοτροφών και των μελλοντικών προοπτικών της διατροφής των πτηνών.

Η επιλεγθείσα μέθοδος ανασκόπησης της βιβλιογραφίας είναι περιγραφικής φύσεως. Οι πληροφορίες και τα δεδομένα που παρουσιάζονται προέρχονται από άρθρα που έχουν δημοσιευτεί στο PubMed, στο ScienceDirect και στο Google Scholar. Για την υλοποίηση της στρατηγικής αναζήτησης, χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός βασικών όρων, όπως:

διατροφή πουλερικών, πρόσθετα ζωοτροφών πουλερικών, πρωτεΐνες εντόμων πουλερικών, πρόσθετα φυτικών ζωοτροφών, διατροφή ακριβείας για κοτόπουλα κρεατοπαραγωγής, γονιδιοματική διατροφή για πουλερικά, διατροφή κατοικίδιων πτηνών, σίτιση άγριων πτηνών και βιώσιμες ζωοτροφές.

Η παρούσα ανασκόπηση στοχεύει στη σύνθεση των υφιστάμενων στοιχείων για την καλύτερη κατανόηση των εξελίξεων στον τομέα της διατροφής των πτηνών. Τα στοιχεία που εξετάστηκαν επικεντρώνονται κυρίως σε μελέτες που δημοσιεύθηκαν κατά την περίοδο 2015-2026. Η ανασκόπηση συνθέτει τα υφιστάμενα στοιχεία, χωρίς να παρέχει νέα πρωτογενή πειραματικά δεδομένα. Υπογραμμίζει τις βασικές τάσεις, τα κενά γνώσης και τις μελλοντικές ερευνητικές προτεραιότητες.

Η παρούσα ανασκόπηση οργανώνεται σε δέκα κεφάλαια. Το κεφάλαιο 2 περιγράφει τις αρχές της επιστήμης της διατροφής, όπως εφαρμόζονται στα πτηνά. Τα κεφάλαια 3 έως 7 ασχολούνται με το μικροβίωμα του εντέρου και τα λειτουργικά πρόσθετα, τις εναλλακτικές και βιώσιμες πηγές πρωτεϊνών (συμπεριλαμβανομένων των φυτικών προσθέτων ζωοτροφών και των αιθέριων ελαίων), τη διατροφή ακριβείας, την τεχνολογία ζωοτροφών, τη διατροφολογία και την επιγενετική.

Οι διατροφικές ανάγκες των κατοικίδιων πτηνών, των πτηνών σε αιχμαλωσία και των άγριων πτηνών έχουν συζητηθεί στο Κεφάλαιο 8. Το Κεφάλαιο 9 αξιολογεί τη βιωσιμότητα, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τις μελλοντικές προοπτικές, ενώ στο Κεφάλαιο 10 αναλύονται τα συμπεράσματα της έρευνας.

1.3. Ερευνητικά Ερωτήματα

Κύρια ερευνητικά ερωτήματα:

1. «Ποια είναι η επίδραση της σύγχρονης επιστήμης και τεχνολογίας στη διαχείριση της διατροφής των πουλερικών, των κατοικίδιων και των αγρίων πτηνών;»
2. «Πώς θα συμβάλουν τα λειτουργικά πρόσθετα ζωοτροφών, οι εναλλακτικές πρωτεΐνες, η ακριβής σίτιση και η διατροφολογία στην επίτευξη των επιθυμητών στόχων;»

Δευτερεύοντα ερευνητικά ερωτήματα:

1. Σε ποιο βαθμό τα προβιοτικά, τα πρεβιοτικά, τα φυτογενή πρόσθετα ζωοτροφών και οι πρωτεΐνες με βάση τα έντομα μπορούν να αποτελέσουν αποτελεσματικές και βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις έναντι των συμβατικών συστατικών ζωοτροφών και των αντιβιοτικών αυξητικών παραγόντων στη διατροφή των πουλερικών και ποιοι είναι οι βασικοί μηχανισμοί, τα οφέλη και οι περιορισμοί εκάστου εξ' αυτών;
2. Τι γνωρίζουμε σήμερα σχετικά με τις προσεγγίσεις θρεπτικής γονιδιωματικής και διατροφής ακριβείας σε όλα τα είδη πτηνών, πέραν των εκτρεφόμενων πουλερικών;
3. Σε ποιους τομείς πρέπει να πραγματοποιηθούν νέες μελέτες προτού μπορέσουμε να αρχίσουμε να χρησιμοποιούμε αυτές τις εξελίξεις στη διατροφή των κατοικίδιων και των αγρίων πτηνών;

2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ ΤΩΝ ΠΤΗΝΩΝ

2.1. Απαιτήσεις Πτηνών σε Μακροθρεπτικά και Μικροθρεπτικά Συστατικά

Η μελέτη του τρόπου με τον οποίον τα πτηνά χρησιμοποιούν πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, λιπίδια, βιταμίνες και μέταλλα για να αναπτυχθούν, να αναπαραχθούν και να διατηρήσουν την υγεία τους ονομάζεται επιστήμη της διατροφής των πτηνών. Ενώ ισχύουν οι βασικές αρχές της διατροφής των σπονδυλωτών, τα πουλιά έχουν ειδικές μεταβολικές και πεπτικές διαδικασίες που τα διακρίνουν από τα θηλαστικά, απαιτώντας έτσι μια ειδική για κάθε είδος προσέγγιση στη διαμόρφωση της διατροφής τους.

Οι πρωτεΐνες είναι αναμφισβήτητα η πιο σημαντική μακροθρεπτική ουσία για τα πτηνά, καθώς παρέχουν τα απαραίτητα αμινοξέα για την ανάπτυξη των μυών, την παραγωγή φτερών, την ωοτοκία και τη λειτουργία του ανοσοποιητικού συστήματος. Ο οργανισμός των πτηνών μπορεί να συνθέσει μερικά από τα αμινοξέα, αλλά όχι όλα.

Επομένως, οι άνθρωποι πρέπει να παρέχουν τα απαραίτητα αμινοξέα μέσω της διατροφής. Πιθανώς περίπου δέκα από τα αμινοξέα στα πτηνά είναι απαραίτητα και πρέπει να παρέχονται μέσω της διατροφής. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι η μεθειονίνη, η λυσίνη, η θρεονίνη και η τρυπτοφάνη (Applegate, 2008).

Στις διατροφές πτηνών με βάση τα δημητριακά, η μεθειονίνη είναι συνήθως το πρώτο αμινοξύ που περιορίζει την ανάπτυξη. Όταν η πηγή πρωτεΐνης είναι κυρίως σόγια, η λυσίνη γίνεται το πρώτο αμινοξύ που περιορίζει την ανάπτυξη. Η ιδέα μιας «ιδανικής» αναλογίας αμινοξέων, όπου κάθε απαραίτητο αμινοξύ εκφράζεται σε όρους λυσίνης, συνιστά ένα πολύτιμο εργαλείο που βοηθά στην αποφυγή ανεπάρκειας και υπερβολικής σπατάλης (Klasing, 2025).

Όταν στα πουλερικά χορηγούνται υπερβολικές ποσότητες αμινοξέων, τα πλεονάζοντα αμινοξέα υφίστανται αποαμίνωση και το άζωτο αποβάλλεται. Περισσότερη «πλεονάζουσα» πρωτεΐνη σημαίνει περισσότερα αζωτούχα απόβλητα και λιγότερο αποτελεσματική χρήση της πρωτεΐνης (Applegate, 2008).

Στην πρακτική της διατροφής των πουλερικών, οι σπόροι δημητριακών θεωρούνται σε μεγάλο βαθμό η κύρια πηγή ενέργειας. Υπάρχουν μικρές ποσότητες λίπους (ακατέργαστα λιπίδια), η ενέργεια των οποίων σε ισοδύναμη βάση βάρους είναι 2,25 φορές μεγαλύτερη από αυτή των υδατανθράκων. Σύμφωνα με τον Ravindran (2013), το λινολεϊκό οξύ είναι ο κύριος περιοριστικός παράγοντας στα λιπαρά οξέα.

Οι λιποδιαλυτές βιταμίνες A, D, E και K απορροφώνται με το λίπος. Η βιταμίνη A βοηθά τα πτηνά να διατηρήσουν την ακεραιότητα του εσωτερικού επιθηλίου και ενισχύει την ικανότητα του ανοσοποιητικού τους συστήματος.

Ο συνδυασμός ασβεστίου και φωσφόρου πραγματοποιείται με αποτελεσματικό τρόπο υπό την επίδραση της βιταμίνης D₃. Σύμφωνα με το NRC (1994), η βιταμίνη E είναι ένα αντιοξειδωτικό που προλαμβάνει τη βλάβη των μεμβρανών και η βιταμίνη K είναι απαραίτητη για την κανονική πήξη του αίματος.

Για να επιτραπούν οι ενζυματικές αντιδράσεις στον ενδιάμεσο μεταβολισμό, απαιτούνται βιταμίνες B (ριβοφλαβίνη, νιασίνη, παντοθενικό οξύ, πυριδοξίνη) σε μικρές αλλά ακριβείς ποσότητες. Υπάρχουν δύο υποκατηγορίες με βάση τις ανάγκες του οργανισμού, τα μακρομεταλλικά στοιχεία και τα ιχνοστοιχεία.

Το ασβέστιο, ο φώσφορος, το νάτριο, το κάλιο και το χλώριο είναι μακρομεταλλικά στοιχεία. Ο σίδηρος, ο ψευδάργυρος, το μαγγάνιο, ο χαλκός, το ιώδιο, το σελήνιο κ.λπ. είναι ιχνοστοιχεία.

Σύμφωνα με το NRC (1994), το ασβέστιο και ο φώσφορος πρέπει να παρέχονται σε σταθερή αναλογία (για τις φωτόκες όρνιθες, περίπου 2:1) για την ακεραιότητα των οστών και την ποιότητα του κελύφους των αυγών.

Όταν οι ποσότητες αυτών των μετάλλων είναι ανεπαρκείς ή υπάρχει ανισορροπία μεταξύ τους, μπορεί να αναπτυχθούν μεταβολικές ασθένειες των οστών, μαζί με μείωση της παραγωγής αυγών και της εκκολαπτικότητας.

Ένα από τα συνεχή προβλήματα της διατροφής των κατοικίδιων πτηνών είναι η διαφορά μεταξύ της διατροφής που τους παρέχεται σε αιχμαλωσία και της ποικίλης διατροφικής επιλογής που υιοθετούν τα άγρια πτηνά. Πολλοί ιδιοκτήτες ταΐζουν τα κατοικίδια πτηνά τους μόνο με σπόρους

Ωστόσο, μια διατροφή που αποτελείται αποκλειστικά από σπόρους στερείται των απαραίτητων αμινοξέων, ασβεστίου και βιταμινών A και D₃ και έχει υψηλή περιεκτικότητα σε λίπος, ιδιαίτερα αν το μείγμα αποτελείται κυρίως από ηλιόσπορους (Lafeber Vet, 2023). Τα πτηνά είναι επιλεκτικά στη διατροφή τους. Τρώνε τους σπόρους, που είναι πιο νόστιμοι και πιο πλούσιοι σε ενέργεια. Η διατροφική ανισορροπία επιδεινώνεται (Skylark Veterinary Centre 2024).

Η λιπώδης διήθηση του ήπατος, η παχυσαρκία, οι σπασμοί που σχετίζονται με το ασβέστιο, οι παραμορφώσεις των φτερών και η ανοσοανεπάρκεια, αποτελούν τις πιο συχνές ασθένειες των πτηνών. Τροφές υπό μορφή σφαιριδίων δημιουργήθηκαν για να αποφευχθεί η επιλεκτική διατροφή.

Τα πτηνά δεν μπορούν να διαχωρίσει τα συστατικά καθώς τα τρώνε, διότι αποτελούν μια ομοιόμορφη μάζα. Οι τρέχουσες κτηνιατρικές συστάσεις υποδεικνύουν ότι τα σφαιρίδια πρέπει να αποτελούν το 60-80% της διατροφής και να συμπληρώνονται με 20-30% φρέσκα λαχανικά και φρούτα και 5-10% σπόρους και ξηρούς καρπούς ως λιχουδιές (Lafeber Vet, 2023; PetMD, 2024).

Η κατανόηση αυτών των διατροφικών αρχών είναι απαραίτητη για το πεπτικό σύστημα των πτηνών. Μετά την κατανάλωση της τροφής, αυτή περνά στον πρόλοβο, ο οποίος είναι ένα προσωρινό αποθηκευτικό όργανο. Επιπλέον, εδώ ξεκινά η διάσπαση της τροφής (Klasing, 1999). Όταν η τροφή καταπίνεται, εισέρχεται στον αδενικό στόμαχο, όπου εκκρίνονται υδροχλωρικό οξύ και πεψινογόνο από σύνθετους αδένες. Η χημική πέψη των πρωτεϊνών ξεκινά στο στομάχι (Porter, 2012).

Τα πτηνά δεν έχουν δόντια, γι' αυτό η φύση τα έχει προικίσει με ένα μυώδες στομάχι για να αλέθουν την τροφή. Τα πτηνά που τρώνε σκληρούς σπόρους και κόκκους έχουν ειδικά μυώδη στομάχια. Τα ανατομικά σημεία απορρόφησης των θρεπτικών συστατικών είναι το δωδεκαδάκτυλο και το νήστιδα του λεπτού εντέρου.

Οι τυφλοί σάκοι στη σύνδεση του λεπτού και του παχέος εντέρου, που ονομάζονται τυφλά έντερα, είναι θάλαμοι ζύμωσης όπου η χλωρίδα παράγει λιπαρά οξέα βραχείας αλύσου και βιταμίνες B. Ο χρόνος που απαιτείται για τη διέλευση της τροφής από το έντερο του πτηνού είναι σύντομος (στις περισσότερες περιπτώσεις, 3-5 ώρες στα πουλερικά), επομένως, η σύνθεση της τροφής πρέπει να έχει υψηλή πυκνότητα θρεπτικών συστατικών και πεπτικότητα.

2.2. Εξέλιξη των Προσεγγίσεων στη Σύνθεση των Ζωοτροφών

Στη διάρκεια της ιστορίας της εγχώριας πτηνοτροφίας, τα πουλερικά τρέφονταν με ό,τι σιτηρά και υπολείμματα κουζίνας υπήρχαν διαθέσιμα. Καθ' όλη τη διάρκεια της ιστορίας, τα πουλερικά τρέφονταν συνήθως με σιτηρά, κόκκους καλαμποκιού, σιταριού, κριθαριού και βρώμης, υπολείμματα ψαριών και υποπροϊόντα κρέατος. Η παραγωγικότητα του συστήματος επηρεαζόταν από την ανισορροπία είτε των αμινοξέων είτε των μικροθρεπτικών συστατικών.

Σύμφωνα με τον Ravindran (2013), οι ρυθμοί ανάπτυξης ήταν μέτριοι, η θνησιμότητα υψηλή και η παραγωγή αυγών εποχική. Η ανακάλυψη των βιταμινών στις αρχές του 20^{ού} αιώνα και η αναγνώριση των ασθενειών που προκαλούνται από την έλλειψη ανόργανων συστατικών προκάλεσαν έντονο επιστημονικό ενδιαφέρον για τη διατροφή των πτηνών – σε τέτοιο βαθμό, ώστε ακόμη και ιώδιο προστέθηκε στις ζωοτροφές των πουλερικών.

Η έλλειψη βιταμίνης D προκαλούσε ραχίτιδα, ενώ η έλλειψη θειαμίνης (ή βιταμίνης B1) προκαλούσε πολυνευρίτιδα. Η πρώτη έκδοση του βιβλίου NRC το 1944 παρουσίασε για πρώτη φορά πίνακες με τις αναγνωρισμένες ελάχιστες απαιτήσεις για ενέργεια, ακατέργαστη πρωτεΐνη, αμινοξέα, βιταμίνες και μέταλλα για κοτόπουλα, γαλοπούλες, πάπιες και χήνες.

Οι επόμενες εκδόσεις (ιδιαίτερα η 9η αναθεωρημένη έκδοση) ενίσχυσαν την αξιοπιστία των προτεινόμενων τιμών, χρησιμοποιώντας ελεγχόμενες δοκιμές σίτισης και μεταβολικές έρευνες (NRC, 1994). Οι πίνακες του NRC εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται παγκοσμίως για την αξιολόγηση των προγραμμάτων σίτισης των πτηνών. Ωστόσο, αναγνωρίζεται ότι η επιλογή για ταχεία ανάπτυξη και υψηλή παραγωγή αυγών έχει αυξήσει τις απαιτήσεις σε θρεπτικά συστατικά.

Η ιδανική πρωτεΐνη χαρακτηρίστηκε αρχικά για τους χοίρους και προσαρμόστηκε αργότερα στα πουλερικά. Σε αυτή την περίπτωση, κάθε απαίτηση σε απαραίτητα αμινοξέα εκφράζεται ως ποσοστό της απαίτησης σε λυσίνη, η οποία θεωρείται ότι είναι 100% (Applegate, 2008).

Η χρήση τιμών αναφοράς πεπτικών αμινοξέων, αντί ακατέργαστης πρωτεΐνης, για τον καθορισμό των διατροφικών απαιτήσεων θα επιτρέψει στους διατροφολόγους να επιτύχουν τις απαιτούμενες μειώσεις της συνολικής πρωτεΐνης στη διατροφή, ικανοποιώντας παράλληλα όλες τις απαιτήσεις σε αμινοξέα.

Αυτή η ακρίβεια ελαχιστοποιεί την απαμίνωση των υπερβολικών αμινοξέων και, κατά συνέπεια, την απελευθέρωση αζώτου. Δεδομένης της κλίμακας παραγωγής στη σημερινή βιομηχανία πουλερικών, το περιβαλλοντικό όφελος είναι τεράστιο (Applegate 2008).

Η ιδέα της ιδανικής πρωτεΐνης έγινε οικονομικά εφικτή με την εισαγωγή των συνθετικών αμινοξέων (κρυσταλλική DL-μεθειονίνη, L-λυσίνη HCl, L-θρεονίνη και L-τρυπτοφάνη) στις δεκαετίες του 1980 και 1990. Η μετάβαση από την εμπειρική στη επιστημονική σύνθεση επιταχύνθηκε από την πρόοδο της αναλυτικής χημείας, των υπολογισμών (γραμμικός προγραμματισμός για τη βελτιστοποίηση της θρεπτικής σύνθεσης με το ελάχιστο κόστος) και της τυποποίησης (δοκιμές πεπτικότητας αμινοξέων στο ειλεό).

Η εφαρμογή εξωγενούς φυτάσης και ενζύμων που αποικοδομούν τους μη αμυλούχους πολυσακχαρίτες έχει αυξήσει την αποτελεσματικότητα της χρήσης ενός ευρύτερου φάσματος πρώτων υλών. Σήμερα, η σύνθεση ζωοτροφών είναι μια άκρως ποσοτική δραστηριότητα που χρησιμοποιεί πίνακες θρεπτικών συστατικών, παράγοντες πεπτικότητας και μαθηματικά μοντέλα που μπορούν να δημιουργήσουν διατροφικές δίαιτες για πτηνά ανάλογα με το γενετικό δυναμικό, την ηλικία, τη φάση παραγωγής και το περιβάλλον διαβίωσης (Klasing, 2025).

3. ΤΟ ΜΙΚΡΟΒΙΩΜΑ ΤΟΥ ΕΝΤΕΡΟΥ ΤΩΝ ΠΤΗΝΩΝ ΚΑΙ ΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΠΡΟΣΘΕΤΑ

3.1. Το Μικροβίωμα του Εντέρου των Πτηνών: Σύνθεση και Λειτουργία

Το μικροβίωμα του εντέρου των πτηνών συνιστά μια μεταβολικά ενεργή μικροβιακή κοινότητα που μπορεί να βελτιώσει τη διατροφή του ξενιστή, την ανάπτυξη του ανοσοποιητικού συστήματος και την αντοχή του σε εντερικά παθογόνα. Το εντερικό επιθήλιο και η λειτουργία των εντέρων των εντερικών μικροβίων διασφαλίζονται από την κοινότητα.

Η έρευνα καταδεικνύει ότι το μικροβίωμα του εντέρου των πουλερικών διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στην ενίσχυση της αποτελεσματικότητας της αλυσίδας αξίας. Τα κοτόπουλα είναι τα πιο μελετημένα από όλα τα πτηνά. Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει διακύμανση στο μικροβίωμα κατά μήκος του εντέρου. Το τυφλό έντερο έχει την υψηλότερη πυκνότητα και ποικιλία ειδών, λόγω της αναερόβιας ζύμωσης (Yue et al., 2024).

Η χρήση μοριακής τεχνικής ανεξάρτητης από καλλιέργεια, κυρίως η αλληλούχιση υψηλής απόδοσης του γονιδίου 16S ριβοσωμικού RNA (rRNA), έχει βελτιώσει την κατανόησή μας για τη δομή της μικροβιακής κοινότητας. Τα πιο άφθονα μικρόβια στο τυφλό έντερο των κοτόπουλων είναι τα Firmicutes, Bacteroidetes και Proteobacteria. Η σχετική αφθονία εξαρτάται από την ηλικία του ξενιστή, τη σύνθεση της διατροφής, το περιβάλλον εκτροφής και την κατάσταση υγείας του πτηνού (Yue et al., 2024).

Το εντερικό μικροβίωμα των πτηνών έχει λειτουργική σημασία για την ευημερία τους. Τα βακτήρια ζύμωσης, ιδίως τα μέλη των τάξεων Clostridiales και Bacteroidales, διασπούν σύνθετους πολυσακχαρίτες που δεν μπορούν να υδρολυθούν από τα ένζυμα του ξενιστή, με τελικά προϊόντα τα λιπαρά οξέα SCFA, κυρίως το οξικό, το προπιονικό και το βουτυρικό οξύ (Liu et al., 2021).

Τα SCFA αποτελούν πηγή ενέργειας για τα κολονοκύτταρα και μειώνουν το pH του αυλού, εμποδίζοντας έτσι τα ευαίσθητα στο οξύ παθογόνα. Αυτά τα μόρια ελέγχουν επίσης την ανοσολογική σηματοδότηση, ενεργοποιώντας τους υποδοχείς που συνδέονται με την πρωτεΐνη G (GPR) και αναστέλλοντας τις ιστόνες HDAC (Ali et al., 2022).

Το βουτυρικό οξύ παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην ενίσχυση του φραγμού του εντερικού επιθηλίου, προκαλώντας την απελευθέρωση βλεννίνης και εμποδίζοντας την έκφραση προφλεγμονωδών κυτοκινών, που συμβάλουν στην ομοίωση του εντέρου (Liu et al., 2021). Το μικροβίωμα δεν είναι σταθερό, αλλά διαμορφώνεται από πολλούς αλληλοεπιδρώντες βιολογικούς παράγοντες.

Όπως υποστηρίζουν οι Ali et al. (2022), η διατροφή είναι ο ισχυρότερος ρυθμιστής που έχει την ικανότητα να προκαλεί αλλαγή στη σύνθεση της μικροβιακής κοινότητας, εντός ολίγων ημερών. Οι αλλαγές οφείλονται στη μετάβαση από μια διατροφή με βάση τα δημητριακά σε μια διατροφή με βάση τα σφαιρίδια, στην αλλαγή των ινών και στην προσθήκη συγκεκριμένων προσθέτων ζωοτροφών.

Ένας άλλος βασικός παράγοντας είναι η ηλικία. Το μικροβίωμα του εντέρου των στείρων νεοσσών υφίσταται ταχεία αρχική αποικιοποίηση, φτάνοντας σε σχετική σταθερότητα κατά τις πρώτες ημέρες. Μετά από αυτό το χρονικό διάστημα, η σύνθεση των μικροβιακών κοινοτήτων γίνεται παρόμοια με εκείνη των ενηλίκων (3 εβδομάδες). Οι περιβαλλοντικοί και διαχειριστικοί παράγοντες επηρεάζουν την αντοχή στα αντιβιοτικά των μικροβίων των πουλερικών.

Η έκθεση σε φάρμακα μπορεί να αλλοιώσει τη μικροβιακή ποικιλομορφία και να δημιουργήσει μια οικολογική θέση για παθογόνα ανθεκτικά στα φάρμακα. Ως αποτέλεσμα της παγκόσμιας τάσης για περιορισμό της χρήσης αντιβιοτικών αυξητικών παραγόντων, το φαινόμενο αυτό έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας.

Με τη χρήση αλληλούχισης του γονιδίου 16S rRNA και της μεταγονιδιωμιακής ανάλυσης shotgun, πέραν της απλής ταξινόμησης προφίλ και συμπεριλαμβάνεται και ο λειτουργικός χαρακτηρισμός του μικροβιώματος. Το 2019, οι Wu et al. διεξήγαγαν μια μελέτη που χρησιμοποίησε αλληλούχιση 16S rRNA σε δείγματα που ελήφθησαν από το τυφλό έντερο 13 φυλών κοτόπουλων.

Η σχετική αφθονία των Firmicutes και Proteobacteria ήταν υψηλότερη στις όρνιθες με υψηλή παραγωγή αυγών, συγκριτικά με εκείνες με χαμηλή παραγωγή αυγών. Αυτές οι ταξινομήσεις συνδέονται με την αύξηση της αποτελεσματικότητας στην απορρόφηση και το μεταβολισμό των θρεπτικών ουσιών.

Οι Edwards et al. (2023) δοκίμασαν ποικίλες μεθόδους για τη συντήρηση του DNA και την εξαγωγή του από τα κόπρανα φυλογενετικά διαφορετικών πτηνών. Επιπλέον, τα ευρήματα επιβεβαίωσαν ότι τα προφίλ κοινοτήτων με βάση το 16S είναι ανεξάρτητα από τη μέθοδο. Αυτά τα μοριακά εργαλεία συμβάλουν στη διατήρηση της άγριας ζωής, ενώ η ιατρική των πτηνών συντροφιάς εξασφαλίζει βασικές γνώσεις για το μικροβίωμά τους, ώστε να συμβάλει στο σχεδιασμό διατροφικών και θεραπευτικών παρεμβάσεων.

3.2. Προβιοτικά - Πρεβιοτικά και Συνβιοτικά ως Λειτουργικά Πρόσθετα Ζωοτροφών

Καθώς χώρες σε όλο τον κόσμο επιβάλλουν περιορισμούς στη χρήση αντιβιοτικών στις ζωοτροφές ως αυξητικούς παράγοντες, η έρευνα για διάφορες εναλλακτικές λύσεις που στοχεύουν στη διατήρηση της υγείας του εντέρου και της παραγωγής κερδίζει γρήγορα έδαφος. Μεταξύ αυτών των εναλλακτικών λύσεων, τα προβιοτικά, τα πρεβιοτικά και τα συνβιοτικά έχουν προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον τόσο από τους επιστήμονες όσο και από τη βιομηχανία.

Τα προβιοτικά είναι ουσιαστικά ζωντανοί μικροοργανισμοί που, όταν χορηγούνται σε επαρκή ποσότητα, προσφέρουν οφέλη για την υγεία του ξενιστή. Διαφορετικά γένη προβιοτικών που έχουν ερευνηθεί για χρήση ως πρόσθετα ζωοτροφών πουλερικών είναι τα: *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Bacillus* και *Enterococcus* (Atuahene et al., 2025).

Τα προβιοτικά δρουν με διάφορους τρόπους. Ο ανταγωνιστικός αποκλεισμός ήταν ένας από τους πρώτους μηχανισμούς που αναγνωρίστηκαν και ορίζεται ως η φυσική κατάληψη θέσεων προσκόλλησης στο έντερο και ο ανταγωνισμός για θρεπτικά συστατικά, προκειμένου να αποτραπεί η αποικιοποίηση παθογόνων (π.χ. *Salmonella* και *Clostridium perfringens*) (Lee et al., 2023).

Έχει αποδειχθεί ότι τα προβιοτικά προκαλούν ανοσολογική αντίδραση διεγείροντας την έκκριση της εκκριτικής ανοσοσφαιρίνης A (sIgA) και των ρυθμιστικών κυτοκινών, και τροποποιούν το περιβάλλον, μέσω της έκκρισης SCFA και βακτηριοκινών (Atuahene et al., 2025). Ελεγχόμενες δοκιμές καταδεικνύουν ότι η συμπλήρωση της διατροφής με προβιοτικά με βάση το *Lactobacillus* ενισχύει την αύξηση του σωματικού βάρους, τον δείκτη

μετατρεψιμότητας της τροφής (FCR) και το ύψος των εντερικών λαχνών σε κοτόπουλα κρεατοπαραγωγής (Opazo et al., 2025).

Η προσθήκη προβιοτικών στη διατροφή των ωοτόκων ορνίθων έχει συνδεθεί με βελτιωμένη παραγωγή και ποιότητα αυγών, καθώς και με υψηλότερους τίτλους αντισωμάτων σε κοινά εμβόλια (Atuahene et al., 2025). Τα πρεβιοτικά είναι ένας ιδιαίτερος τύπος διαλυτών ινών που συχνά έχουν πρεβιοτικές λειτουργίες που προσφέρουν οφέλη για την υγεία με διάφορους τρόπους.

Το εξωτερικό κυτταρικό τοίχωμα του *Saccharomyces cerevisiae* περιέχει ένα πρεβιοτικό που ονομάζεται MOS (mannanooligosaccharides) και χρησιμοποιείται ευρέως στις ζωοτροφές πουλερικών. Το MOS προσκολλάται στα fimbriae τύπου 1 των παθογόνων *Enterobacteriaceae* για να αναστείλει την προσκόλλησή τους στα εντερικά επιθηλιακά κύτταρα. Επίσης, διεγείρει τον πολλαπλασιασμό των ωφέλιμων *Lactobacilli* και *Bifidobacteria* (Teng et al., 2021).

Τα κοτόπουλα παράγουν μια ποικιλία αυγών, τα οποία μπορεί να έχουν καφέ, λευκό και κρεμ χρώμα και είναι ιδιαίτερα ελκυστικά για τους καταναλωτές. Οι Youssef et al. (2024) ανέφεραν ότι οι όρνιθες ωοπαραγωγής που τράφηκαν με MOS σε δόση 0,1 έως 0,5 g/kg τροφής είχαν σημαντικά υψηλότερη παραγωγή αυγών με καλύτερη απόδοση μετατροπής της τροφής.

Επιπλέον, ενισχύθηκε η χυμική ανοσοαπόκριση κατά του ιού σε κοτόπουλα που τράφηκαν με τη συγκεκριμένη τροφή. Η τροφή προκάλεσε την παραγωγή σημαντικά περισσότερων αυγών, βελτίωσε την απόδοση μετατροπής της τροφής και ενίσχυσε επίσης τις χυμικές ανοσοαποκρίσεις κατά του ιού της γρίπης των πτηνών (H9N2) και του ιού της μολυσματικής βρογχίτιδας.

Οι β-γλυκάνες, ένας τύπος γραμμικού πολυσακχαρίτη αποτελούμενου από μονομερή γλυκόζης συνδεδεμένα με γλυκοζιτικούς δεσμούς β-1 και 6, είναι μια σημαντική κατηγορία πρεβιοτικών. Έρευνα που διεξήχθη από τους Teng et al. (2021) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το MOS σε συνδυασμό με τη β-γλυκάνη στη διατροφή βελτίωσε το βάρος και το ύψος σε κοτόπουλα κρεατοπαραγωγής.

Σύμφωνα με μια μελέτη που διεξήχθη από τους Fadl et al (2020), αποδείχθηκε ότι η ενσωμάτωση MOS και β-γλυκάνης στη διατροφή μείωσε τον αποικισμό από *Escherichia*

coli O78 και κατέστειλε τον προφλεγμονώδη παράγοντα μεταγραφής NF-κB στο ήπαρ των ορνίθων κρεατοπαραγωγής που υποβλήθηκαν σε πρόκληση. Στον τομέα των συμπληρωμάτων διατροφής, τα συνβιοτικά συνιστούν ένα μείγμα ή συνδυασμό προβιοτικών και πρεβιοτικών.

Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου σε ορισμένους τομείς μπορεί να ενισχύσει τον αποικισμό και τη λειτουργικότητα των μικροβίων που χρησιμοποιούνται. Ένα συνθετικό μείγμα μπορεί να διεγείρει το πρεβιοτικό συστατικό που «τροφοδοτεί» τα συν-χορηγούμενα προβιοτικά στελέχη, αυξάνοντας τη βιωσιμότητα και τη μεταβολική τους δραστηριότητα στο έντερο.

Η μελέτη αποκάλυψε ότι η προσθήκη συνβιοτικών πλούσιων σε ολιγοσακχαρίτες χιτοζάνης και προβιοτικών πολλαπλών ειδών στη διατροφή των ορνίθων κρεατοπαραγωγής βελτιώνει την αύξηση βάρους και την κατανάλωση τροφής. Τα κοτόπουλα κρεατοπαραγωγής στα οποία χορηγήθηκαν συνβιοτικά είχαν αυξημένο σωματικό βάρος και απόδοση σφαγίου (Sarangi et al., 2016), ενώ οι δραστηριότητες των πεπτικών ενζύμων δε διέφεραν μεταξύ των ομάδων θεραπείας.

Σύμφωνα με τους Abdel-Hafeez et al. (2017), η αρνητική επίδραση του περιορισμού της τροφής στην απόδοση των ορνίθων κρεατοπαραγωγής δύναται να μετριαστεί εν μέρει με την προσθήκη συνβιοτικών σε αυτή την τροφή. Πρόσφατα, τα μεταβιοτικά ταξινομήθηκαν ως μοναδικά λειτουργικά πρόσθετα ζωοτροφών.

Σύμφωνα με τη Διεθνή Επιστημονική Ένωση για τα Προβιοτικά και τα Πρεβιοτικά (ISAPP), τα μεταβιοτικά είναι παρασκευάσματα μη βιώσιμων μικροοργανισμών και/ή των συστατικών τους που προσφέρουν οφέλη για την υγεία του ξενιστή (Waqas et al., 2024). Τα μεταβιοτικά και τα προβιοτικά διαφέρουν στο ότι τα πρώτα είναι σταθερά στη θερμότητα, στο οξυγόνο και στις μεθόδους αποθήκευσης που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή σβόλων ζωοτροφών.

Οι Urban et al. (2024) υπογραμμίζουν ότι τα μεταβιοτικά μπορούν να ενισχύσουν την ανάπτυξη, το μικροβίωμα του τυφλού εντέρου, την αντιοξειδωτική δράση και την ποιότητα του κρέατος στα κοτόπουλα κρεατοπαραγωγής. Λόγω αυτού, τα μεταβιοτικά έχουν το δυναμικό να αποτελέσουν πρόσθετα ζωοτροφών επόμενης γενιάς.

Η χρήση προβιοτικών στην ιατρική των πτηνών συντροφιάς μπορεί να μην έχει μελετηθεί τόσο εκτενώς όσο στην επιστήμη των πουλερικών, αλλά κερδίζει ολοένα και περισσότερο

έδαφος. Οι παπαγάλοι μπορούν να επωφεληθούν από τα προβιοτικά κατά την πρώτη εβδομάδα της ζωής τους.

Τα προβιοτικά σκευάσματα για πτηνά που πωλούνται στο εμπόριο είναι μείγματα διαφόρων ειδών (*Lactobacillus acidophilus*, *Bifidobacterium animalis*, *Pediococcus acidilactici* και *Bifidobacterium bifidum*) σε συγκεντρώσεις 1-5 δισεκατομμυρίων CFU/kg σε μορφή σκόνης αναμειγμένης σε τροφή ή νερό (EquaHolistics, n.d.). Κτηνιατρικές κλινικές περιπτώσεις καταδεικνύουν ότι αυτά τα προϊόντα δύνανται να σταθεροποιήσουν το pH του στομάχου, να βοηθήσουν στην ανάρρωση από την αντιβιοτική αγωγή και να διαχειριστούν τις διαταραχές του πεπτικού συστήματος που σχετίζονται με το άγχος.

Ωστόσο, δεν υφίστανται ακόμη αξιόπιστες ελεγχόμενες μελέτες για τα πτηνά συντροφιάς. Τα λειτουργικά πρόσθετα ζωοτροφών έχουν μεγάλο δυναμικό, αλλά παρουσιάζουν προκλήσεις. Τα θετικά αποτελέσματα ενός συγκεκριμένου προβιοτικού ενδέχεται να μην είναι τα ίδια για όλα τα είδη (ειδικότητα στελέχους) ή ακόμη και για όλες τις φυλές πουλερικών, γι' αυτό και η ειδικότητα του στελέχους έχει σημασία (Atuahene et al., 2025).

Η διαδικασία βελτιστοποίησης της δοσολογίας είναι εμπειρική και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το περιβάλλον. Η βελτιστοποίηση της δοσολογίας θα εξαρτηθεί από το μικροβιακό φορτίο στο περιβάλλον, την υγεία του ξενιστή και το χρονοδιάγραμμα χορήγησης της τροφής.

Άλλα σημαντικά τεχνικά κωλύματα σχετίζονται με τον περιορισμό των βιώσιμων ζωντανών προβιοτικών κατά τη διάρκεια των διαδικασιών παραγωγής τροφών (ιδίως κατά τη διάρκεια της σφαιροποίησης σε θερμοκρασίες άνω των 80 °C) και τη διάρκεια ζωής του προϊόντος. Ορισμένες από τις λύσεις περιλαμβάνουν τη χρήση τεχνολογίας ενθυλάκωσης και προβιοτικών που σχηματίζουν σπόρια, όπως το *Bacillus subtilis*, καθώς και εμπόδια που σχετίζονται με το κόστος.

4. ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΒΙΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΠΡΩΤΕΪΝΩΝ

4.1. Πρωτεΐνες από Έντομα στη Διατροφή των Πτηνών

Οι παραδοσιακές πηγές πρωτεϊνών για τα πουλερικά, όπως η σόγια και το ιχθυάλευρο, υφίστανται αυξανόμενη πίεση όσον αφορά τη βιωσιμότητα. Η παγκόσμια παραγωγή σόγιας οδηγεί στην αποδάσωση των οικοσυστημάτων του Αμαζονίου και του Cerrado, ενώ η συγκομιδή ιχθυαλεύρου οδηγεί στην υπεραλίευση.

Με την αύξηση των τιμών των βασικών προϊόντων, η οικονομία της παραγωγής πουλερικών έχει επηρεαστεί σημαντικά στις αναπτυσσόμενες περιοχές που εξαρτώνται από τις εισαγωγές πρωτεϊνών (Salahuddin et al., 2024). Σε αυτό το πλαίσιο, οι πρωτεΐνες με βάση τα έντομα μπορούν να χρησιμεύσουν ως μια υγιεινή εναλλακτική λύση που απαιτεί πολύ λιγότερη γη, νερό και εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από την κτηνοτροφία.

Από τα είδη εντόμων που εξετάζονται, η μαύρη μύγα στρατιώτης (*Hermetia illucens*), ο κίτρινος σκώρος (*Tenebrio molitor*) και η κοινή οικιακή μύγα (*Musca domestica*) είναι τα πιο ερευνημένα. Οι προνύμφες της μαύρης μύγας στρατιώτη μπορούν να εκτραφούν σε πολύ φθηνά υποστρώματα οργανικών αποβλήτων και να μετατρέψουν βιομάζα χαμηλής αξίας σε πρωτεΐνες και λιπίδια υψηλής αξίας. Αυτά μπορεί να είναι απορρίμματα τροφίμων, κοπριά, υποπροϊόντα ζυθοποιίας κ.ά.

Η μαύρη μύγα στρατιώτης και τα συστατικά της περιέχουν περίπου 40-44% ακατέργαστη πρωτεΐνη και 30-35% λιπίδια (σε βάση ξηρής ουσίας). Μολονότι το προφίλ αμινοξέων είναι σε γενικές γραμμές συγκρίσιμο με αυτό του ιχθυαλεύρου, τα επίπεδα μεθειονίνης είναι χαμηλότερα (Li et al., 2022).

Το λιπαρό κλάσμα της μαύρης μύγας στρατιώτη περιέχει σημαντική ποσότητα λαυρικού οξέος, το οποίο έχει αντιμικροβιακές ιδιότητες. Έτσι, προσφέρει ευεργετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά και όχι μόνο θρεπτικά συστατικά (Salahuddin et al., 2024).

Σύμφωνα με τους Jajić et al. (2022), οι προνύμφες του κίτρινου αλευρώδους σκώληκα έχουν 47-60% ακατέργαστη πρωτεΐνη και υψηλή περιεκτικότητα σε λυσίνη 3,18% και θρεονίνη 1,34%. Η καλύτερη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη σύμφωνα με τους Jajić et al. (2022) για προνύμφες που τρέφονταν με πίτουρο σιταριού ήταν 71% (ξηρό βάρος), ενώ η

περιεκτικότητα σε λίπος ήταν η χαμηλότερη (7%). Αυτό καταδεικνύει πόσο μπορεί να ποικίλει η θρεπτική αξία του τελικού προϊόντος, ανάλογα με τα υποστρώματα.

Ομοίως, οι προνύμφες της οικιακής μύγας (*Musca domestica*) περιέχουν πάνω από 50% ακατέργαστη πρωτεΐνη και έχουν καλή ισορροπία αμινοξέων, αλλά η αντίληψη του κοινού αποτελεί εμπόδιο για την εμπορευματοποίησή τους (Osuch et al., 2024). Σύμφωνα με μια μελέτη των Salahuddin et al. (2024), δοκιμές σίτισης σε όρνιθες κρεατοπαραγωγής έχουν καταδείξει ότι η τροφή BSFL έχει τη δυνατότητα να αντικαταστήσει το 50-100% της πρωτεΐνης της σόγιας.

Επιπλέον, αυτή η αντικατάσταση δεν έχει αρνητικές συνέπειες στην αύξηση του σωματικού βάρους, στο δείκτη μετατρεψιμότητας της τροφής ή στην ποιότητα του σφαγίου. Επιπλέον, τα κατάλληλα ποσοστά προσθήκης είναι γενικά έως 10-15% επί της συνολικής διατροφής. Οι De Marco et al. (2015) πραγματοποίησαν μια διατροφική ανάλυση των αλευρωδών γευμάτων *Tenebrio molitor* και *Hermetia illucens* σε όρνιθες κρεατοπαραγωγής.

Οι ερευνητές δε βρήκαν σημαντικές διαφορές στην εμφανή μεταβολισθείσα ενέργεια από τις δύο πηγές εντόμων. Ο μέσος εμφανής συντελεστής πεπτικότητας των αμινοξέων ήταν σημαντικά υψηλότερος για το *Tenebrio molitor* (De Marco et al., 2015).

Τα έντομα έχουν επίσης σχετιστεί με αλλαγές στην υγεία του εντέρου, που μετρώνται με την αύξηση του ύψους των λαχνών και την ενίσχυση της μικροβιακής ποικιλομορφίας του τυφλού εντέρου, καθώς και με την τόνωση των φυσικών ανοσολογικών αντιδράσεων (Salahuddin et al., 2024). Η προσθήκη ζωντανών προνυμφών εντόμων στη διατροφή των πουλερικών προσφέρει μια επιπλέον διάσταση στην ευημερία τους.

Οι ζωντανές προνύμφες είναι πιο εύκολα διαθέσιμες στα κοτόπουλα, επιτρέποντάς τους να εκδηλώνουν τη συμπεριφορά τους ως θηρευτές, αποτρέποντας παράλληλα το υπερβολικό κούρεμα των φτερών και αυξάνοντας τη δραστηριότητά τους. Δεν παρατηρήθηκαν αρνητικές επιπτώσεις από τις δοκιμές σίτισης με ζωντανές προνύμφες (έως και 10% της ημερήσιας τροφής). Ωστόσο, απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για την επαλήθευση των βέλτιστων επιπέδων προσθήκης υπό εμπορικές συνθήκες (Ferrante et al., 2024).

Οι κατευθυντήριες γραμμές για τη χρήση πρωτεϊνών εντόμων στις ζωοτροφές έχουν αλλάξει. Οι επεξεργασμένες ζωικές πρωτεΐνες (Paps) από επτά είδη εντόμων επιτρέπονται σύμφωνα με τον κανονισμό (EE) 2017/893 της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η έγκριση επεκτάθηκε

ώστε να περιλαμβάνει τις ζωοτροφές για πουλερικά και χοίρους τον Αύγουστο του 2021 (IPIFF, 2024).

Πρόσφατα, το όγδοο είδος (*Bombyx mori*) προστέθηκε στον κατάλογο των εγκεκριμένων ειδών εντόμων σύμφωνα με τον κανονισμό (ΕΕ) 2021/1925 (IPIFF, 2024). Εκτός της ΕΕ, οι κανονισμοί ποικίλλουν. Η Ένωση Αμερικανών Υπαλλήλων Ελέγχου Ζωοτροφών (AAFCO) στις ΗΠΑ έχει συστήσει τη χρήση αλεύρου BSFL στις ζωοτροφές πουλερικών.

Στον Καναδά, στην Κίνα και σε πολλές χώρες της Νοτιοανατολικής Ασίας, οι πρωτεΐνες εντόμων έχουν ευρεία αποδοχή. Στο Ηνωμένο Βασίλειο επιτρέπεται η σίτιση πτηνών με ζωντανούς αλευρώδεις σκόληκες. Ωστόσο, σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία της ΕΕ, η σίτιση με επεξεργασμένη σκόνη εντόμων (PAP) εξακολουθεί να είναι παράνομη (Chitexo, 2025).

4.2. Φύκια - Μονοκύτταρες Πρωτεΐνες και Άλλα Καινοτόμα Συστατικά

Η *Spirulina platensis* (ένα κυανοβακτήριο) και η *Chlorella vulgaris* (ένα πράσινο φύκι) προσελκύουν μεγάλο ενδιαφέρον ως συμπληρώματα διατροφής για τα πουλερικά. Η *Spirulina* περιέχει 55% έως 70% ακατέργαστη πρωτεΐνη σε ξηρή ύλη και έχει καλύτερο προφίλ απαραίτητων αμινοξέων από τη σόγια. Επιπλέον, περιέχει καροτενοειδή, φυκοκυανίνη, γ-λινολενικό οξύ, βιταμίνες του συμπλέγματος Β, σίδηρο και μαγνήσιο (Ogbuewu & Mbajiorgu, 2025).

Οι βιοδραστικές ενώσεις της σπιρουλίνας έχουν αντιοξειδωτικές, αντιφλεγμονώδεις, υπολιπιδαιμικές και αντιμικροβιακές ιδιότητες, επομένως δεν είναι απλώς μια πηγή πρωτεϊνών, αλλά ένα λειτουργικό φάρμακο. Η *Chlorella vulgaris* έχει υψηλή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες (50-60% σε βάση ξηρής ουσίας) και ένα κυτταρικό τοίχωμα πλούσιο σε β-γλυκάνες που μπορούν να διεγείρουν την έμφυτη ανοσία (Sugiharto, 2020).

Τα ποσοστά προσθήκης μικροφυκών σε δοκιμές διατροφής κυμαίνονται κυρίως από 0,5-10% της διατροφής. Στην έρευνά τους, οι Wlazlak et al. (2025) ανέφεραν ότι η χορήγηση 10g σπιρουλίνας ανά κιλό τροφής στη διατροφή των πουλερικών κρεατοπαραγωγής βελτιώνει τις επιδράσεις του θερμικού στρες, ενώ ταυτόχρονα ενισχύει την αντιοξειδωτική ικανότητα.

Μελέτες που πραγματοποιήθηκαν σε μεγάλα υψόμετρα έδειξαν ότι σε χαμηλότερα επίπεδα προσθήκης, η πιο οικονομικά αποδοτική στρατηγική βελτίωσης του σωματικού βάρους και του δείκτη μετατρεψιμότητας της τροφής των ορνίθων κρεατοπαραγωγής ήταν η συμπλήρωση της βασικής διατροφής με 2,5% σπιρουλίνα (Kulshreshtha et al., 2022).

Ο Sugiharto (2020) αναφέρει ότι η σπιρουλίνα, καθώς και η χλωρέλλα, μπορούν να βελτιώσουν την εντερική μορφολογία, να αυξήσουν τα ευεργετικά βακτήρια του τυφλού εντέρου και να ενισχύσουν την αντιοξειδωτική δράση, επομένως μπορούν ενδεχομένως να αντικαταστήσουν τα αντιβιοτικά στις ζωοτροφές. Ωστόσο, η προσθήκη μικροφυκών σε ποσοστό άνω του 10% μείωσε την πρόσληψη τροφής σε ορισμένες περιπτώσεις, πιθανώς λόγω της έντονης γεύσης και οσμής της βιομάζας των φυκών ή λόγω των εύπεπτων πολυσακχαριτών του κυτταρικού τοιχώματος, που περιορίζουν τη διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών (Sugiharto, 2020).

Η εφαρμογή ενζύμων ενεργών στους υδατάνθρακες για τη διάσπαση του κυτταρικού τοιχώματος των φυκών δύναται να ενισχύσει την απελευθέρωση θρεπτικών ουσιών. Οι πρωτεΐνες μονοκύτταρων (SCP) είναι ένας ευρύτερος όρος για υλικά πλούσια σε πρωτεΐνες που προέρχονται από ζύμωση, βακτήρια και μύκητες που αναπτύσσονται σε βιομηχανικά απόβλητα.

Αρχικά αναπτύχθηκε από το εμπορικό προϊόν Pruteen της δεκαετίας του 1970 και συγκεκριμένα από το μεθυλοτροφικό βακτήριο *Methylophilus methylotrophus* που αναπτύσσεται σε μεθανόλη. Η ιδέα δεν είναι καινούργια, αλλά οι πρόοδοι στη βιοτεχνολογία έχουν αναζωπυρώσει το ενδιαφέρον. Η αποδοτικότητα των ζωοτροφών αυξήθηκε έως και 7% με την προσθήκη Pruteen στη διατροφή των ορνίθων κρεατοπαραγωγής, με συνοδό αύξηση του βάρους.

Δύο από τις πιο μελετημένες ζυμώσεις είναι η *Saccharomyces cerevisiae* και η *Yarrowia lipolytica*. Η τελευταία, μια ελαιώδης ζύμωση που περιέχει περίπου 20% λιπίδια σε βάση κυτταρικού βάρους, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή πρωτεϊνών και ενέργειας στις δίαιτες των πουλερικών. Η συμπλήρωση της διατροφής σε αναλογία 3% ενισχύει την απόδοση της ανάπτυξης (Ledbetter, 2025).

Καθώς αυξάνονται τα προστιθέμενα ποσοστά, η πεπτικότητα των θρεπτικών συστατικών δύναται να ελαττωθεί λόγω της παρουσίας άθικτων κυττάρων ζύμωσης με παχιά κυτταρικά τοιχώματα που περιορίζουν την πρόσβαση στα ενδοκυτταρικά θρεπτικά συστατικά των

κυττάρων ζύμωσης. Σύμφωνα με τον Ledbetter (2025), η λύση ή η αυτολύση του κυτταρικού τοιχώματος πριν από την εισαγωγή των σκευασμάτων ζωοτροφών θα μπορούσε να βελτιώσει τη βιοδιαθεσιμότητα.

Η παραγωγή SCP είναι επωφελής από οικονομικής και περιβαλλοντικής απόψεως. Οι μικροοργανισμοί αναπτύσσονται σε διαφορετικά υποστρώματα με ταχύτερους ρυθμούς και χρόνους διπλασιασμού που μετρώνται σε ώρες. Τα υποστρώματα περιλαμβάνουν μελάσα, υδρολύματα λιγνινοκυτταρίνης, μεθάνιο ακόμη και διοξείδιο του άνθρακα (στην περίπτωση των αυτοτροφικών μικροφυκών).

Η ανάπτυξη των πουλερικών δεν εξαρτάται από επιπλέον καλλιεργήσιμη γη, κλίμα ή εποχή, ενώ η απόδοση πρωτεϊνών ανά μονάδα εισροής πόρων φαίνεται να είναι αρκετές φορές μεγαλύτερη από αυτήν της συμβατικής γεωργίας. Παρά το δυναμικό εμπορευματοποίησης, παραμένουν αρκετές προκλήσεις.

Η εμπορευματοποίηση συχνά παρεμποδίζεται από το υψηλό κόστος παραγωγής σε σύγκριση με το σόγιαλευρο, την αναγκαία επεξεργασία (συγκομιδή κυττάρων, ξήρανση, διάσπαση κυτταρικών τοιχωμάτων) και τις αργές διαδικασίες έγκρισης από τις ρυθμιστικές αρχές. Η αποδοχή από τους καταναλωτές είναι επίσης ένας σημαντικός παράγων, ιδίως όταν το SCP αφορά ζώα που προορίζονται για βρώση.

Τα υποπροϊόντα της αγροβιομηχανίας και τα υπολείμματα καλλιεργειών αποτελούν ένα άλλο παράδειγμα νέων πηγών συστατικών ζωοτροφών που μπορούν να μειώσουν την εξάρτηση από τις κύριες πηγές πρωτεϊνών και να συμβάλουν στην κυκλική οικονομία. Συγκεκριμένα παραδείγματα περιλαμβάνουν: τα σπορέλαια (ηλιέλαιο, ελαιοκράμβη), τους αποξηραμένους σπόρους DDGS από τη βιομηχανία βιοαιθανόλης, τα υπολείμματα εσπεριδοειδών και ελιάς, τον πολτό ντομάτας και τα υπολείμματα ζυθοποιίας (Achilonu et al., 2018).

Λόγω της τοπικής διαθεσιμότητας, του χαμηλού κόστους και της αφθονίας τους, τα υλικά αυτά αποτελούν μια πιο οικονομική εναλλακτική λύση σε σχέση με διάφορες παραδοσιακές ζωοτροφές. Ωστόσο, η θρεπτική τους αξία ποικίλλει σημαντικά. Επιπλέον, η υψηλή περιεκτικότητα σε ίνες τείνει να περιορίζει τη χρήση τους.

Ομοίως, η παρουσία μη θρεπτικών παραγόντων (τανίνες, φυτικά άλατα, γλυκοσινολάτες) και η κακή ισορροπία αμινοξέων τα καθιστούν ενίοτε άχρηστα. Τα υποπροϊόντα μπορούν

να αποτελέσουν ένα πολύτιμο συστατικό των συνταγών ζωοτροφών (PMC, 2025) όταν υποβάλλονται σε κατάλληλη κατεργασία μέσω ενσίρωσης, ζύμωσης, ενζυμικής ή θερμικής επεξεργασίας.

Πρόσφατες έρευνες καταδεικνύουν ότι η συμπερίληψη ενσίρωσης από υποπροϊόντα ελιάς και οινοποιείων σε μέτρια επίπεδα στη διατροφή χοίρων και πουλερικών διατήρησε την απόδοση της ανάπτυξης, ενώ εμπλούτισε το κρέας με αντιοξειδωτικές πολυφαινόλες και ρύθμιζε το μικροβίωμα του εντέρου (PMC, 2025). Η αξιολόγηση των εναλλακτικών πηγών πρωτεϊνών απαιτούσε μια πολυδιάστατη ανάλυση των αντισταθμίσεων.

Στις τρέχουσες κλίμακες, τα έντομα παρέχουν μια πιο πλήρη σύνθεση αμινοξέων (υψηλή πεπτικότητα) από οποιοδήποτε άλλο συστατικό ζωοτροφών, αλλά το κόστος παραγωγής τους εξακολουθεί να είναι δύο έως πέντε φορές υψηλότερο από αυτό της σόγιας. Τα μικροφύκη αποτελούν πηγή πρωτεϊνών και βιοδραστικών ενώσεων με ιδιότητες που προάγουν την υγεία, αλλά το κυτταρικό τους τοίχωμα περιορίζει τη βιοδιαθεσιμότητα και η καλλιέργειά τους σε ευρεία κλίμακα απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ύδατος και ενέργειας.

Η παραγωγή πρωτεϊνών από υπολείμματα υποστρωμάτων είναι εφικτή, αλλά η μεταγενέστερη επεξεργασία καθίσταται πολύπλοκη και η έγκριση από τις ρυθμιστικές αρχές ποικίλλει ανάλογα με τη δικαιοδοσία. Η φθηνότερη επιλογή για ζωοτροφές με δυνατότητα αξιοποίησης αποβλήτων είναι τα αγροβιομηχανικά υποπροϊόντα. Ωστόσο, συνήθως έχουν ανεπαρκή συγκέντρωση πρωτεϊνών και ισορροπία αμινοξέων για να καλύψουν το σύνολο των πρωτεϊνικών αναγκών ως υποκατάστατο (Achilonu et al., 2018).

Στην πραγματικότητα, η καλύτερη λύση θα είναι πιθανώς ο συνδυασμός αυτών των εναλλακτικών συστατικών, σε ζωοτροφές που είναι προσαρμοσμένες στις διατροφικές προδιαγραφές των ειδών-στόχων, του συστήματος παραγωγής και της αγοράς.

5. ΦΥΤΟΓΕΝΗ ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΖΩΟΤΡΟΦΩΝ ΚΑΙ ΑΙΘΕΡΙΑ ΕΛΑΙΑ

5.1. Ταξινόμηση και Μηχανισμοί Δράσης

Τα φυτικά πρόσθετα ζωοτροφών (PFA) αποτελούν μια ευρεία και ετερογενή ομάδα βιοδραστικών ενώσεων φυτικής προέλευσης. Κερδίζουν έδαφος ως εναλλακτικές λύσεις των αντιβιοτικών αυξητικών παραγόντων. Ο όρος «πρόσθετα ζωοτροφών» αναφέρεται σε δευτερογενείς μεταβολίτες φυτών που χορηγούνται στα ζώα για καλύτερη παραγωγικότητα, γενική υγεία και ποιότητα παραγόμενων προϊόντων.

Τα PFA μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με ποικίλα κριτήρια. Με βάση τη βοτανική τους προέλευση, τα βότανα είναι τα ανθισμένα, μη ξυλώδη μέρη ενός φυτού, συμπεριλαμβανομένων των φύλλων και των λουλουδιών, ενώ τα μπαχαρικά είναι μέρη ενός φυτού (πλην των φύλλων), όπως: σπόροι, φρούτα, φλοιός και ρίζες, τα οποία είναι πιο πικάντικα ή αρωματικά.

Ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για την απόκτηση των βιοδραστικών συστατικών, τα PFA ταξινομούνται σε αιθέρια έλαια (τα οποία είναι συνήθως πτητικές, λιπόφιλες ουσίες που λαμβάνονται με κρύα εκχύλιση ή απόσταξη με ατμό) και ελαιορητίνες (τα εκχυλίσματα που λαμβάνονται με μη υδατικά διαλύματα) (Abdelli et al., 2021). Τα βασικά βιοδραστικά συστατικά των PFA σε χημικό επίπεδο περιλαμβάνουν πολυφαινόλες (η κυρίαρχη ομάδα), τερπενοειδή (μονο- και σесκιτερπένια, στεροειδή), φαινολικά (τανίνες), γλυκοσίδες, φλαβονοειδή, σαπωνίνες και αλκαλοειδή (Aminullah et al., 2025).

Η σύνθεση και η συγκέντρωση αυτών των ενώσεων διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με το είδος και τα μέρη του φυτού που χρησιμοποιούνται, τη γεωγραφική προέλευση, την εποχή συγκομιδής, τις περιβαλλοντικές συνθήκες, την εκχύλιση και τις συνθήκες αποθήκευσης (Abdelli et al., 2021). Μεταξύ των πιο μελετημένων PFA στη διατροφή των πουλερικών είναι τα αιθέρια έλαια της ρίγανης (*Origanum vulgare*), του θυμαριού (*Thymus vulgaris*) και της κανέλας (*Cinnamomum verum*), ενώ τα κύρια βιοδραστικά συστατικά τους είναι η καρβακρόλη, η θυμόλη και η κινναμαλδεΐδη.

Η καρβακρόλη και η θυμόλη, που αποτελούν σχεδόν το 80% του αιθερίου ελαίου ρίγανης, έχουν προταθεί ως τα βασικά συστατικά που εμπλέκονται στις αντιβακτηριδιακές και

αντιοξειδωτικές ιδιότητές του. Ένα άλλο φαινολοπροπανοειδές μεγάλου ενδιαφέροντος είναι η κινναμαλδεΐδη του φλοιού της κανέλας, η οποία έχει αντιμικροβιακές και ανοσορυθμιστικές ιδιότητες (Aminullah et al., 2025).

Οι ενώσεις του σκόρδου *Allium sativum*, και συγκεκριμένα τα οργανικά θειούχα συστατικά του, έχουν δείξει ισχυρή αντιβακτηριακή δράση έναντι των Gram θετικών και Gram αρνητικών παθογόνων των πουλερικών, με αποτέλεσμα τον πολλαπλασιασμό των ωφέλιμων μικροοργανισμών στο γαστρεντερικό σωλήνα (Adjei-Mensah et al., 2023). Η κουρκούμη (*Curcuma longa*), της οποίας η κύρια πολυφαινόλη κουρκουμίνη είναι ένα διφαινυλομεθάνιο, είναι γνωστή για τις αντιοξειδωτικές, αντιφλεγμονώδεις και ηπατοπροστατευτικές της ιδιότητες σε σχέση με τα πουλερικά (Yarru et al., 2009).

Η ελαιορητήνη Capsicum, μια σημαντική πηγή καψαϊκίνης, συνιστά μια άλλη κατηγορία PFA που έχει συνδεθεί με βελτιωμένη πεπτική ενζυμική δραστηριότητα, ενίσχυση της λειτουργίας του στομάχου και μειωμένο λόγο τροφής προς κέρδος στις όρνιθες (Liu et al., 2021). Οι τρόποι με τους οποίους λειτουργούν τα PFA για να επιτύχουν τα ευεργετικά τους αποτελέσματα είναι πολύπλοκοι και μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες.

Τα PFA, κατ' αρχήν, καταστρέφουν τις βακτηριακές μεμβράνες, τις ενδοκυττάρειες πρωτεΐνες, το κυτταρόπλασμα και παράγουν ROS στα μικροβιακά κύτταρα (Aminullah et al., 2025). Ένα παράδειγμα λιποσωμικής επαγόμενης έκχυσης είτε στο ενδοκυττάριο διαμέρισμα των βακτηρίων είτε στη μεμβράνη τους παρουσιάζεται από τη θυμόλη. Η μεταφορά της καρβακρόλης στο κύτταρο ενισχύεται λόγω της παρουσίας του p-κυμενίου, το οποίο δρα ως πρόδρομη ουσία.

Επίσης, τα PFA προσφέρουν ισχυρή αντιοξειδωτική προστασία. Τα πολυφαινολικά συστατικά τους απομακρύνουν τις ελεύθερες ρίζες μέσω μηχανισμών μεταφοράς ατόμων υδρογόνου και μεταφοράς ενός ηλεκτρονίου, χηλικοποιούν προ-οξειδωτικά μέταλλα μετάπτωσης (Fe II και Cu II), ρυθμίζουν προς τα επάνω τα ενδογενή αντιοξειδωτικά ένζυμα [υπεροξειδική δισμουτάση (SOD), καταλάση (CAT), γλουταθειόνη υπεροξειδάση (GPx)] και μειώνουν τη μαλονδιαλδεΐδη (MDA) (Oni & Oke, 2025).

Οι εκκρίσεις των πεπτικών ενζύμων (τρυψίνη, αμυλάση, λιπάση), του σιέλου, των χολικών οξέων και του εντερικού βλεννογόνου διεγείρονται από τα PFA, τα οποία αυξάνουν την πεπτικότητα των θρεπτικών συστατικών και την αξιοποίηση των τροφών. Επιπλέον, έχει αναφερθεί ότι διάφορα PFA βελτιώνουν την εντερική μορφολογία, όπως αποδεικνύεται από

την αύξηση του ύψους και του πλάτους των λαχνών, καθώς και του λόγου ύψους λαχνών προς βάθος κρύπτων, με αποτέλεσμα την αύξηση της απορροφητικής επιφάνειας και την ενίσχυση της λειτουργίας φραγμού (Oni και Oke, 2025).

5.2. Αποτελεσματικότητα στη Διατροφή Ορνίθων και Κατοικίδιων Πτηνών

Έχει πραγματοποιηθεί μεγάλος αριθμός μελετών με χρήση PFA σε παραμέτρους παραγωγής σε πουλερικά κρεατοπαραγωγής, οι οποίες έχουν δώσει σε μεγάλο βαθμό θετικά και μεταβλητά αποτελέσματα. Σύμφωνα με μια μετα-ανάλυση 13 δοκιμών, η φυτογενής συμπλήρωση αύξησε την απόδοση ανάπτυξης, την αποδοτικότητα της τροφής και τις βιοχημικές παραμέτρους των ορνίθων κρεατοπαραγωγής (Aminullah et al., 2025).

Ειδικότερα, έχει αναφερθεί ότι η συμπλήρωση της διατροφής με αιθέριο έλαιο ρίγανης σε δόση 300-600 mg/kg αύξησε το σωματικό βάρος κατά 7,8-9,6%, σε σύγκριση με τους μάρτυρες που δεν έλαβαν συμπλήρωμα. Περαιτέρω μείγματα καρβακρόλης και θυμόλης σε δόση 200 mg/kg διατροφής μείωσαν τον δείκτη μετατρεψιμότητας τροφής (FCR), έως και 11,8%, στη φάση της τελικής πάχυνσης (Abdelli et al., 2021).

Οι Li et al. (2023) υπογραμμίζουν ότι διαπιστώθηκε ενίσχυση της απορρόφησης και της μεταφοράς θρεπτικών ουσιών. Μια συστηματική ανασκόπηση που διεξήχθη από τους Gholami-Ahangaran et al. (2022) ανέφερε ότι η καρβακρόλη και η θυμόλη μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρόσθετα ζωοτροφών για τη βελτίωση της απόδοσης ανάπτυξης και των βιολογικών δεικτών στα πουλερικά.

Η κουρκουμίνη ενισχύει τη δραστηριότητα των αντιοξειδωτικών ενζύμων (SOD, CAT) (MDA) και του τριγλυκεριδίου ορού στα πουλερικά κρεατοπαραγωγής. Επιπλέον, βελτιώνει την αρνητική επίδραση του θερμικού στρες στην ανάπτυξη και στα χαρακτηριστικά των σφαγίων (Nouzarian et al., 2011). Αυτό το εκχύλισμα (80 mg/kg διατροφής) βελτίωσε σημαντικά τη μέση ημερήσια πρόσληψη βάρους (ADG) κατά τη διάρκεια όλων των φάσεων ανάπτυξης.

Ουσιαστικά προκάλεσε ανάπτυξη παρόμοια με την χλωροτετρακυκλίνη. Εκτός από την ανάπτυξη, είχε αντιοξειδωτική δράση και ενίσχυσε την ανοσολογική λειτουργία στα κοτόπουλα κρεατοπαραγωγής (Liu et al., 2021).

Η μετα-αντιβιοτική εποχή τόνισε τον ρόλο των PFA ως εναλλακτικών των αντιβιοτικών αυξητικών παραγόντων. Το 2006, τα αντιβιοτικά που χρησιμοποιούνταν ως πρόσθετα ζωοτροφών αποσύρθηκαν από τη χρήση στην κτηνοτροφία εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Εν συνεχεία, διάφοροι κανονισμοί παρόμοιοι με αυτούς της ΕΕ έχουν θεσπιστεί σε παγκόσμιο επίπεδο.

Η επέκταση των κανονισμών δημιουργεί μεγάλη πίεση για την εξεύρεση ενός αποτελεσματικού υποκατάστατου. Τα PFA πληρούν πολλά από αυτά τα κριτήρια, πράγμα που σημαίνει ότι οι πολλαπλοί τρόποι δράσης τους (ασκούν ανοσορυθμιστική δράση με επίκεντρο τον ξενιστή και αντιμικροβιακή δράση με επίκεντρο τα βακτήρια) μειώνουν τον κίνδυνο ανάπτυξης μικροβιακής αντοχής, σε σύγκριση με τα αντιβιοτικά (Aminullah et al., 2025).

Επιπλέον, οι συνδυασμένες φόρμουλες των PFA με οργανικά οξέα έχουν αποδειχθεί ότι παρουσιάζουν συνεργιστικά αποτελέσματα, ενισχύοντας την αντιμικροβιακή τους δράση και τα οφέλη για την υγεία του εντέρου σε περιπτώσεις πρόκλησης παθογόνων όπως το *Clostridium perfringens* και το *Eimeria spp.* (Abdelli et al., 2021).

Η διατροφική γονιδιωματική ανάλυση σε μοριακό επίπεδο έχει ρίξει φως στις σημαντικές οδούς σηματοδότησης των PFA στο έντερο των ορνίθων κρεατοπαραγωγής. Οι Griela και Mountzouris (2023) μελέτησαν την έκφραση 26 γονιδίων κατά μήκος του εντέρου των πουλερικών κρεατοπαραγωγής και διαπίστωσαν ότι ένα φυτογενές πρόσθετο ζωοτροφών με βάση αιθέρια έλαια και εκχυλίσματα μπαχαρικών ρυθμίζει τη σηματοδότηση των υποδοχέων toll-like (TLR), την αποπτωτική πρωτεϊνική κινάση που ενεργοποιείται από μιτογόνο (MAPK) και τα γονίδια της οδού PI3K-Akt-mTOR.

Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, τα PFA που συμπεριλήφθηκαν είχαν την τάση να ρυθμίζουν προς τα κάτω τους προφλεγμονώδεις δείκτες, καθώς και να ρυθμίζουν την κυτταρική ανάπτυξη και τα γονίδια που σχετίζονται με το μεταβολισμό των θρεπτικών ουσιών στη νήστιδα, στον ειλέο και στο τυφλό έντερο. Σύμφωνα με την μελέτη των Paraskeuas και Mountzouris (2019), η συμπλήρωση με PFA μεταβάλλει τη σύνθεση του εντερικού μικροβιόκοσμου και ρυθμίζει την έκφραση των TLR, των πρωτεϊνών στενής σύνδεσης και των φλεγμονωδών κυτοκινών στο δευτερεύον λεμφοειδές σύστημα των ορνίθων κρεατοπαραγωγής.

Οι Flees et al. (2021) απέδειξαν περαιτέρω ότι τα φυτογενή πρόσθετα ζωοτροφών βελτίωσαν την αποδοτικότητα της διατροφής των ορνίθων κρεατοπαραγωγής ρυθμίζοντας τις οδούς σηματοδότησης που σχετίζονται με τον ενδιάμεσο μεταβολισμό των λιπιδίων και των πρωτεϊνών, δηλαδή τη φωσφορυλιωμένη mTOR καθώς και την AMP-ενεργοποιημένη πρωτεϊνική κινάση (AMPK) στο ήπαρ, στο λιπώδη ιστό και στους θωρακικούς μυς.

Παρά τα παραπάνω δεδομένα, εξακολουθούν να υφίστανται ορισμένα κωλύματα. Οι σχέσεις δόσης-απόκρισης για τα PFA είναι συχνά μη γραμμικές και δεν έχουν χαρακτηριστεί επαρκώς. Κατά συνέπεια, μπορεί να υπάρχει ένα βέλτιστο ποσοστό προσθήκης για διαφορετικά είδη και στάδια παραγωγής. Η μεταβλητότητα των φυτικών προϊόντων δύναται να εμποδίσει την τυποποίηση της περιεκτικότητας σε δραστικές ουσίες στις παρτίδες PFA (Aminullah et al., 2025).

Επιπλέον, οι αλληλεπιδράσεις των PFA με άλλα προϊόντα ζωοτροφών, δηλαδή λίπη, ίνες, μέταλλα και άλλα πρόσθετα ζωοτροφών, δεν είναι πλήρως γνωστές και θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη δράση τους (Abdelli et al., 2021). Όσον αφορά τα είδη πτηνών συντροφιάς, η έρευνα σχετικά με τη χρήση των PFA είναι εξαιρετικά περιορισμένη.

Σχεδόν όλα τα διαθέσιμα δημοσιευμένα στοιχεία αφορούν τα εμπορικά είδη πουλερικών. Ως εκ τούτου, επί του παρόντος είναι υποθετικό εάν οι δόσεις, οι ενώσεις και οι εκτιμώμενες επιδράσεις μπορούν να εφαρμοστούν στα κατοικίδια πτηνά. Δεδομένου του αυξανόμενου ενδιαφέροντος των πτηνιάτρων και των ιδιοκτητών πτηνών για τη φυσική και δίχως αντιβιοτικά διατροφή, είναι ζωτικής σημασίας να διεξαχθούν ειδικές έρευνες για την αξιολόγηση της ασφάλειας, της γευστικότητας και της αποτελεσματικότητας των PFA στα κατοικίδια πτηνά.

6. ΔΙΑΤΡΟΦΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΖΩΟΤΡΟΦΩΝ

6.1. Από τη Διατροφή Κατά Φάσεις στην Καθημερινή Ακριβή Διατροφή

Τα σύγχρονα κοτόπουλα κρεατοπαραγωγής έχουν ταχεία ανάπτυξη και οι διατροφικές τους ανάγκες αλλάζουν καθημερινά, καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου παραγωγής (Moss et al., 2021). Ωστόσο, στην πράξη, υποβάλλονται σε ένα πρόγραμμα σίτισης που αποτελείται από 3 έως 5 διαφορετικές διατροφικές φάσεις, οι οποίες είναι γνωστές ως: διατροφή εκκίνησης, ανάπτυξης, τελικής φάσης και απόσυρσης.

Η συμβατική αυτή προσέγγιση διατροφής σε φάσεις οδηγεί αναπόφευκτα σε ανεπαρκή ή υπερβολική παροχή θρεπτικών συστατικών στα πουλερικά. Όπως δείχνουν οι Moss et al. (2021), όταν οι καμπύλες των προβλεπόμενων απαιτήσεων για την εύπεπτη λυσίνη και τη μεταβολιζόμενη ενέργεια επικαλύπτονται με την κλιμακωτή παροχή θρεπτικών συστατικών ενός τυπικού προγράμματος τεσσάρων φάσεων, παρατηρείται σημαντική απόκλιση κατά το μεγαλύτερο μέρος του κύκλου παραγωγής, με τη μεγαλύτερη ανισορροπία να παρατηρείται κατά το πρώτο ήμισυ της ανάπτυξης.

Η αναντιστοιχία θρεπτικών ουσιών έχει σημαντικές βιολογικές και οικονομικές επιπτώσεις. Όταν τα πουλερικά προσλαμβάνουν υπερβολική ποσότητα αμινοξέων από τη διατροφή τους, τα αποαμινοποιούν (μια δαπανηρή διαδικασία που σπαταλά ενέργεια και παράγει αμμωνία, η οποία εκκρίνεται ως ουρικό οξύ και μπορεί να προκαλέσει ρύπανση μέσω του άζωτου των περιττωμάτων) (Moss et al., 2021).

Από την άλλη πλευρά, η πλεονάζουσα ενέργεια μετατρέπεται σε λιπώδη αντί για άπαχο μυϊκό ιστό, περιορίζοντας την απόδοση και την οικονομική αξία των πουλερικών. Συγχρόνως, η ανεπαρκής παροχή θρεπτικών ουσιών κατά τη διάρκεια κρίσιμων περιόδων ελαττώνει το ρυθμό ανάπτυξης και καθιστά τα πουλερικά ευάλωτα σε παθογόνα βακτήρια, αφήνοντας αχώνευτο υλικό στο οπίσθιο έντερο για ζύμωση από μικροοργανισμούς (Moss et al., 2021).

Έχει αναφερθεί ότι η μείωση της περιεκτικότητας σε ακατέργαστη πρωτεΐνη στη διατροφή των ορνίθων κρεατοπαραγωγής κατά λιγότερο από δύο ποσοστιαίες μονάδες μειώνει το άζωτο των απορριμμάτων κατά 18%, γεγονός που καταδεικνύει τα πιθανά οφέλη από μια

πιο ακριβή σύνθεση (Ferguson et al., 1998; Moss et al., 2021). Επί αρκετές δεκαετίες, έχει μελετηθεί η ιδέα της αύξησης του αριθμού των διατροφικών φάσεων ώστε να γεφυρωθεί το χάσμα μεταξύ της προσφοράς και της ανάγκης σε θρεπτικά συστατικά.

Σύμφωνα με μια μελέτη των Warren και Emmert (2002), διερευνήθηκε η επίδραση της παροχής σε κοτόπουλα κρεατοπαραγωγής, είτε ενός τριφασικού καθεστώτος είτε μιας ενιαίας διατροφής με βάση τις συστάσεις του NRC στην απόδοση και στο κόστος της σίτισης. Τα αποτελέσματα της μελέτης καταδεικνύουν ότι το τριφασικό πρόγραμμα βελτίωσε την πρόσληψη εύπεπτης λυσίνης κατά 6,5% και μείωσε το κόστος σίτισης ανά πτηνό.

Ο Kleyn (2013) παρουσίασε παρόμοια οικονομικά δεδομένα που καταδεικνύουν ότι μια διατροφή τριών φάσεων μειώνει το κόστος διατροφής κατά 3,72% συγκριτικά με μια διατροφή δύο φάσεων. Οι Hauschild et al. (2015) διερεύνησαν την ιδέα της πολυφασικής διατροφής συνδυάζοντας δύο τροφές για να δημιουργήσουν ένα πρόγραμμα διατροφής 14 φάσεων σε έναν κύκλο παραγωγής 42 ημερών. Αναφέρθηκε αύξηση 2,1% στην ημερήσια πρόσληψη βάρους σε σύγκριση με ένα τυπικό πρόγραμμα τεσσάρων φάσεων, χωρίς σημαντική επίδραση στη μετατροπή της τροφής.

Η έννοια της διατροφής ακριβείας είναι μια εξάπλωση της προσέγγισης πολλαπλών φάσεων στο μέγιστο δυνατό βαθμό. Περιλαμβάνει την τροποποίηση της σύνθεσης της διατροφής σε καθημερινή βάση, ώστε να ανταποκρίνεται στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις του κοπαδιού σε θρεπτικά συστατικά (Moss et al., 2021).

Στην πράξη, η πρόβλεψη της ημερήσιας πρόσληψης και της ανάπτυξης πραγματοποιείται είτε με τη χρήση του μηχανιστικού μοντέλου ανάπτυξης κοτόπουλου EFG είτε με την προσαρμογή πολυωνυμικών καμπυλών στις τρέχουσες προδιαγραφές θρεπτικών συστατικών της φυλής. Εν συνεχεία, διαμορφώνεται ένα μείγμα διατροφικών συστατικών υψηλής ενεργειακής και πρωτεϊνικής πυκνότητας, ώστε να ανταποκρίνεται στις προβλεπόμενες ημερήσιες απαιτήσεις για βασικά θρεπτικά συστατικά, εύπεπτη λυσίνη και μεταβολιστέα ενέργεια (Moss et al., 2021).

Μια στρατηγική ακριβείας στη διατροφή (PS) βασισμένη σε ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων (DSS) επικυρώθηκε σε μια πειραματική δοκιμή που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού προγράμματος Feed-a-Gene. Ένα μαθηματικό μοντέλο βοήθησε

το DSS να αξιολογήσει τη βέλτιστη παροχή θρεπτικών συστατικών κάθε μέρα για την επόμενη μέρα, βασισμένο στο σωματικό βάρος που επιτυγχάνεται ημερησίως.

Οι ομάδες που τροφοδοτήθηκαν με ακρίβεια παρουσίασαν μια μικρή αύξηση στο δείκτη μετατρεψιμότητας της τροφής, αλλά σημείωσαν σημαντική μείωση στο κόστος της τροφής ανά κιλό αύξησης σωματικού βάρους και στις εκκρίσεις θρεπτικών συστατικών, γεγονός που δικαιολογεί την προσέγγιση από οικονομικής και περιβαλλοντικής απόψεως (Gidenne et al., 2018). Οι Moss et al. (2021) εξέτασαν πρόσφατα τη διατροφή ακριβείας για όρνιθες κρεατοπαραγωγής χρησιμοποιώντας το σύστημα «Feed Logic», το οποίο συνδυάζει μια διατροφή πλούσια σε πρωτεΐνες και μια διατροφή πλούσια σε ενέργεια ώστε να καλύψει τις καθημερινές διατροφικές απαιτήσεις κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής 42 ημερών.

Όλες οι μέθοδοι διατροφής ακριβείας αύξησαν σημαντικά το βάρος και το ποσοστό σφαγής, σε σύγκριση με το τυπικό τριφασικό πρόγραμμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η βελτίωση δεν επιτεύχθηκε με την αύξηση του ζωντανού βάρους, αλλά με μια πιο ευνοϊκή σύνθεση του σώματος, δηλαδή με πιο αποτελεσματική εναπόθεση αμινοξέων στους μύς και λιγότερη μετατροπή ενέργειας σε λίπος.

6.2. Τεχνολογικές Καινοτομίες στην Παράδοση Ζωοτροφών

Η εμπορική χρήση της διατροφής ακριβείας απαιτεί τεχνολογίες που μπορούν να μετρήσουν με ακρίβεια την ποσότητα της τροφής που χορηγείται και να αναμείξουν διάφορα διατροφικά συστατικά στο αγρόκτημα. Στο παρελθόν, η λογιστική πολυπλοκότητα και το κόστος της σφαιροποίησης, της μεταφοράς και της αποθήκευσης τεσσάρων ή περισσότερων διατροφικών συστατικών καθιστούσαν την πολυφασική προσέγγιση ανέφικτη για τις περισσότερες ολοκληρωμένες επιχειρήσεις (Moss et al., 2021).

Ωστόσο, νέες και καινοτόμες τεχνολογίες ζύγισης και ανάμειξης τροφών έχουν αρχίσει να αλλάζουν αυτή την κατάσταση. Τα συστήματα AIRFEED (TEWE Elektronik) και Electronic Feed Weigher (Skov) είναι από τα πιο συνηθισμένα συστήματα, τα οποία λειτουργούν ήδη σε πτηνοτροφεία και χοιροτροφικές μονάδες σε πολλές χώρες (Moss et al., 2021). Αυτά τα συστήματα λαμβάνουν ζωοτροφές από ένα ή περισσότερα σιλό που χρησιμοποιούν ζυγαριές και βαθμονομημένους κοχλίες για να καταγράψουν την ακριβή ποσότητα που αποστέλλεται στις γραμμές τροφοδοσίας, με δυνατότητα ανάμειξης ζωοτροφών από πολλαπλούς κοχλίες σε επιλεγμένες αναλογίες.

Μολονότι η λειτουργία ανάμειξης δε χρησιμοποιείται ακόμη συχνά, προσφέρει τη δυνατότητα εφαρμογής ακριβούς διατροφής στην εκμετάλλευση. Όταν δύο σιλό είναι συνδεδεμένα με αυτό το σύστημα, είναι δυνατόν να αναμειχθεί ένα συμπύκνωμα πρωτεϊνών και ένα συμπύκνωμα ενέργειας ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη αναλογία αμινοξέων προς ενέργεια για κάθε ημέρα παραγωγής (Moss et al., 2021).

Η ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων διανομής τροφής, όπως τα Superdrop και Polyfeeder, μπορεί να ελαχιστοποιήσει ακόμη περισσότερο την ανθρώπινη παρέμβαση, ενισχύοντας την ομοιομορφία του κοπαδιού και μειώνοντας το κόστος εργασίας. Αυτά τα αυτοματοποιημένα συστήματα τροφοδοσίας με λεκάνη, διανέμουν ομοιόμορφα την τροφή σε ολόκληρο το πτηνοτροφείο.

Επιπλέον, είναι συμβατά με συστήματα διαχείρισης δεδομένων που καταγράφουν τα πρότυπα κατανάλωσης τροφής σε επίπεδο υπόστεγου ή κλουβιού. Η εκτεταμένη επανάσταση της κτηνοτροφίας ακριβείας (PLF) επιδιώκει την ενσωμάτωση αισθητήρων, IoT και ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο στον τομέα της πτηνοτροφίας.

Είναι δυνατή η χρήση σύγχρονων αισθητήρων βασισμένων στο IoT τόσο στο περιβάλλον όσο και σε φορητές συσκευές με στόχο τη συνεχή παρακολούθηση της θερμοκρασίας, της υγρασίας, της ποιότητας του αέρα, του σωματικού βάρους, των προτύπων δραστηριότητας και της συμπεριφοράς σίτισης. Η συνδυασμένη χρήση αυτής της ροής δεδομένων με τεχνητή νοημοσύνη (AI) και πλατφόρμες ανάλυσης που βασίζονται στο cloud, επιτρέπει τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο, ώστε οι παραγωγοί να εντοπίζουν τα πρώιμα σημάδια της νόσου, να βελτιστοποιούν τα προγράμματα σίτισης και να διατηρούν τις βέλτιστες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η ανάμειξη ζωοτροφών για ένα συγκεκριμένο κοπάδι ή ομάδα ορνίθων είναι ένα νέο εργαλείο στη διατροφή ακριβείας, το οποίο δύναται να επιτρέψει έναν κύκλο ανατροφοδότησης όπου η ανάμειξη αλλάζει καθημερινά (ή ακόμα και ενδοημερησίως) μετά την παρακολούθηση του σωματικού βάρους και της πρόσληψης τροφής του κοπαδιού σε πραγματικό χρόνο, αντί για απλές προβλέψεις των αριθμών που τοποθετούνται στο εκκολαπτήριο. Τα πιθανά πλεονεκτήματα της ακριβούς διατροφής υπερβαίνουν την αποδοτικότητα της τροφής και τη σύνθεση του σφαγίου.

Καθώς οι δίαιτες προσαρμόζονται σε πραγματικό χρόνο, ο παραγωγός έχει την ευελιξία να αντιμετωπίσει προβλήματα που θα προκύψουν ξαφνικά στο περιβάλλον. Ένα παράδειγμα

θα ήταν τα επεισόδια θερμικού στρες σε ζεστά κλίματα, όπου η αναλογία της υψηλής πρωτεΐνης (και επομένως της υψηλότερης θερμικής αύξησης) μπορεί να μειωθεί. Ένα άλλο παράδειγμα θα ήταν οι μεταβαλλόμενες απαιτήσεις της αγοράς, όπου τα κοτόπουλα κρεατοπαραγωγής μπορεί να εκτρέφονται με διαφορετικούς στόχους βάρους και σωματικής σύστασης (Moss et al., 2021).

Μέσω της τεχνολογίας ακριβείας στη διατροφή, η διαχείριση της διατροφής σε μεγάλες ολοκληρωμένες εκμεταλλεύσεις θα καθορίζεται ανά εκμετάλλευση, έτσι ώστε οι έμπειροι παραγωγοί ή εκείνοι που βρίσκονται σε σχετικά καλές τοποθεσίες να μπορούν να λειτουργούν με ελαφρώς χαμηλότερη πυκνότητα θρεπτικών συστατικών και, ως εκ τούτου, χαμηλότερο κόστος ζωοτροφών. Επιπλέον, αυτά τα πρόσθετα βραχυπρόθεσμης δράσης (π.χ. φυτογενή πρόσθετα ζωοτροφών, οργανικά οξέα ή φάρμακα) μπορούν εύκολα να προστεθούν με την ανάμιξη ενός τροποποιημένου συμπυκνώματος στη ζωοτροφή, στην απαιτούμενη δόση, για το απαιτούμενο χρονικό διάστημα, δίχως την ταλαιπωρία της σφαιροποίησης και αποθήκευσης πρόσθετων διατροφικών συμπληρωμάτων (Moss et al., 2021).

Παρόλο που υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα, υπάρχουν επίσης πολλές προκλήσεις. Η δημιουργία υποδομών ακριβείας στη διατροφή απαιτεί επενδύσεις κεφαλαίου, οι οποίες μειώνονται με την καινοτομία. Ωστόσο, τέτοιες επενδύσεις συνιστούν εμπόδιο για τους μικρούς και μεσαίους παραγωγούς πουλερικών στις αναπτυσσόμενες χώρες.

Οι περισσότεροι αγρότες πρέπει να έρθουν σε επαφή με την τεχνολογία πριν την υιοθετήσουν. Επιπλέον, η αποτελεσματική εφαρμογή μεθόδων ακριβείας στη διατροφή εξαρτάται από τον ακριβή χαρακτηρισμό των συστατικών και την κατάλληλη μοντελοποίηση των απαιτήσεων σε θρεπτικά συστατικά, γεγονός που απαιτεί χρόνο.

Η προσέγγιση της τυχαίας σίτισης αναμένεται να βελτιώσει την αξιοπιστία της σύνθεσης, καθώς λαμβάνει υπόψιν τις κατανομές πιθανότητας αντί των εκτιμήσεων αξιοπιστίας (Moss et al., 2021). Ωστόσο, προϋποθέτει βάσεις δεδομένων υψηλής ποιότητας.

Τέλος, σχεδόν όλες οι τεκμηριωμένες αποδείξεις για τη διατροφή ακριβείας των πουλερικών προέρχονται από αποδείξεις για τα πουλερικά κρεατοπαραγωγής. Επομένως, η εφαρμοσιμότητα της ιδέας για τις όρνιθες ωοπαραγωγής, τις γαλοπούλες, τις πάπιες και τα είδη πτηνών συντροφιάς μένει να διαπιστωθεί.

7. ΔΙΑΤΡΟΦΟΓΕΝΕΤΙΚΗ ΚΑΙ ΕΠΙΓΕΝΕΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΟΦΗ

7.1. Διατροφογενετική: Πώς η Διατροφή Επηρεάζει την Έκφραση των Γονιδίων στα Πτηνά

Η διατροφογενετική περιλαμβάνει τη μελέτη της επίδρασης των θρεπτικών συστατικών και άλλων βιοδραστικών ενώσεων στην έκφραση των γονιδίων. Επιπλέον, εξετάζει την επίδραση των θρεπτικών συστατικών στο φαινότυπο ενός οργανισμού (Hassan et al., 2022). Η διατροφογενετική αναπτύχθηκε αρχικά στην Αυστρία, λόγω προβλημάτων στα βιολογικά προϊόντα διατροφής.

Ως αποτέλεσμα, αυτοί οι επιστημονικοί κλάδοι σηματοδοτούν μια επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο η διατροφή και η γενετική θεωρούνται δύο αλληλεπιδρώντα συστήματα και όχι δύο ανεξάρτητες μεταβλητές. Η σχέση μεταξύ των θρεπτικών συστατικών που υπάρχουν στη διατροφή και της φαινοτυπικής έκφρασης των χαρακτηριστικών παραγωγής (ρυθμός ανάπτυξης, αποδοτικότητα τροφής, σύνθεση σφαγίου, αντοχή σε ασθένειες) στα πουλερικά είναι πολύ σημαντική από οικονομικής απόψεως (Cao et al., 2020).

Τα θρεπτικά συστατικά ενεργοποιούν τα γονίδια, μέσω της επιγενετικής σε μοριακό επίπεδο. Σύμφωνα με τους Dunislawska et al. (2022), οι τρεις κύριες οδοί είναι η μεθυλίωση του DNA, οι τροποποιήσεις των ιστονών και το μη κωδικοποιημένο RNA. Η μεθυλίωση του DNA αναφέρεται στην προσθήκη υπολειμμάτων κυτοσίνης στην περιοχή του προαγωγού γονιδίου σε διμερή CpG.

Η έκφραση των γονιδίων αναστέλλεται όταν συμβαίνει υπερμεθυλίωση και επιτρέπεται όταν συμβαίνει υπομεθυλίωση. Οι ιστόνες έχουν διάφορα είδη χημικών τροποποιήσεων, όπως ακετυλίωση, μεθυλίωση, φωσφορυλίωση, ουβικιτίνωση των υπολειμμάτων της ουράς, που ρυθμίζουν τη δομή της χρωματίνης και την απόκριση της μεταγραφής των γονιδίων.

Τα μικροRNA (miRNA) είναι μη κωδικοποιημένα RNA που ελέγχουν μεταγραφικά την έκφραση των γονιδίων. Είναι ενδιαφέρον ότι λειτουργούν κατευθύνοντας το RISC (RNA-induced silencing complex) σε μερικώς συμπληρωματικό mRNA για να εκμεταλλευτούν την αποικοδόμηση του mRNA ή την αναστολή της μετάφρασης (Dunislawska et al., 2021). Τα cis-ρυθμιστικά στοιχεία του γονιδίου, οι trans-ενεργοί παράγοντες και οι επιγενετικές

τροποποιήσεις καθορίζουν συνήθως τα επίπεδα της μεταγραφής, της αποικοδόμησης του mRNA και της μετάφρασης.

Μια μεγάλη ποικιλία θρεπτικών ουσιών αλληλεπιδρά με το γονιδίωμα των πουλερικών. Σύμφωνα με τους Rudkowska et al. (2009), τα ωμέγα-3 λιπαρά οξέα, ειδικά το εικοσαπεντανοϊκό οξύ και το δοκοσαεξανοϊκό οξύ, λειτουργούν ως φυσικά ligands για το PPAR. Η ενεργοποίηση του PPAR φέρεται να προκαλεί αλλαγές στην έκφραση γονιδίων των οποίων οι λειτουργίες σχετίζονται με το μεταβολισμό των λιπιδίων, την οξειδωση των λιπαρών οξέων και τη φλεγμονώδη σηματοδότηση.

Μια μελέτη που εξέτασε τη διατροφική γονιδιωματική των ωοτόκων ορνίθων με αλληλούχηση RNA ή RNA-seq καταδεικνύει ότι τα γονίδια ρυθμίζονταν από τη συμπλήρωση ωμέγα-3 λιπαρών οξέων. Η έρευνα των (Khodaei et al., 2023), εντόπισε γονίδια στο ήπαρ.

Επιπλέον, συμπλήρωσαν τις μεταβολικές οδούς που ήταν η βιοσύνθεση στεροειδών και χοληστερόλης, η αποικοδόμηση λιπαρών οξέων, η σηματοδότηση AMPK και η ανοσοαπόκριση. Η ομάδα ωμέγα-3 έδειξε χαμηλότερη έκφραση αυτών των δύο γονιδίων. Αυτό υποδηλώνει ότι η γλουταμινεργική νευρωνική δραστηριότητα μεταφέρει τη ρύθμιση της απόκρισης στο στρες (Khodaei et al, 2023).

Σύμφωνα με μια νέα μελέτη, οι φλεγμονώδεις ιδιότητες διαφόρων πολυφαινολών, ειδικά της κουρκουμίνης και της ρεσβερατρόλης, μπορεί να οφείλονται στη ρύθμιση πολλών γονιδίων που σχετίζονται με τη φλεγμονή. Οι πολυφαινόλες δρουν ως καθαριστές των αντιδραστικών ειδών οξυγόνου, αναστέλλουν την ενεργοποίηση του NF-kB και της ιστόνης ακετυλοτρανσφεράσης, ενεργοποιούν την εξαρτώμενη από τη σιρτουίνη αποακετυλίωση της ιστόνης και ρυθμίζουν προς τα επάνω τη διαδρομή αντιοξειδωτικής απόκρισης Nrf2 (Rahman, 2008). Η ενεργοποίηση του Nrf2 αυξάνει την έκφραση των γονιδίων κυτταροπροστασίας και αποτοξίνωσης (Kouvedaki et al., 2024).

Σύμφωνα με μια μελέτη που διεξήχθη από τους Yarru et al. (2009), η συμπλήρωση κουρκουμίνης όχι μόνο προστατεύει τα κοτόπουλα από τις τοξικές επιδράσεις της αφλατοξίνης B₁, αλλά και μετριάζει τη γενετική βλάβη. Αυτό μπορεί να είναι ένας μηχανισμός διατροφογονιδιωματικής για την ηπατοπροστατευτική δράση της κουρκουμίνης.

Η δράση των λυσοφωσφολιπιδίων στην έκφραση των γονιδίων και τη μορφολογία του εντέρου στα κοτόπουλα κρεατοπαραγωγής είναι ένα θρεπτικογενετικό συστατικό της λιπιδικής διατροφής. Σύμφωνα με τους Cloft et al. (2021), το επίπεδο έκφρασης 36 διαφορετικών γονιδίων, συμπεριλαμβανομένης της ανθρακικής ανυδράσης VII και της ιντερλευκίνης 8, στον πρόλοβο των κοτόπουλων κρεατοπαραγωγής αυξήθηκε με τη συμπλήρωση λυσοφωσφολιπιδίων.

Η χρήση της λυσοφωσφατιδυλοχολίνης από τους Li et al. (2022) για τη μεταγραφική ανάλυση σε επίπεδο γονιδιώματος πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μικροσυστοιχία έκφρασης γονιδίων GSE94622. Σύμφωνα με τη μελέτη, η συμπλήρωση LPC μπορεί ενδεχομένως να βελτιώσει τα χαρακτηριστικά των φτερών στα κοτόπουλα κρεατοπαραγωγής.

Σύμφωνα με τους συγγραφείς, παρατηρήθηκαν 98, 194 ή 217 DEGs. Η επακόλουθη ανάλυση αποκάλυψε επίσης ότι τα DEGs ήταν εμπλουτισμένα σε διάφορες οδούς σηματοδότησης, όπως η αλληλεπίδραση εξωκυτταρικής μήτρας-υποδοχέα, η εστιακή προσκόλληση και η σηματοδότηση MAPK.

Σύμφωνα με τους Boontiam et al. (2017), η προσθήκη συμπληρώματος λυσοφωσφολιπιδίου ενίσχυσε την πεπτικότητα των θρεπτικών συστατικών και την εντερική μορφολογία και μείωσε τη σύνθεση των μυών των κάτω άκρων σε πτηνά που εκτρέφονται με δίαιτες κακής ποιότητας. Πρόσφατες μεταγραφικές αναλύσεις επικεντρώθηκαν στα προφίλ έκφρασης δειγμάτων ήπατος για να εξετάσουν τις μεταβολικές προσαρμογές του ήπατος πουλερικών που παράγουν κρέας σε μειωμένη διατροφική πρωτεΐνη.

Σύμφωνα με μια μελέτη των Asiamah et al. (2025), τα γονίδια που είναι σημαντικά για τη διάσπαση των αμινοξέων, τη βιοσύνθεση των λιπιδίων και την ενεργειακή ομοιόσταση εμφανίζουν διαφορετική έκφραση στις δίαιτες χαμηλής πρωτεΐνης των ορνίθων κρεατοπαραγωγής.

7.2. Επιγενετικός Προγραμματισμός και Διατροφικές Παρεμβάσεις

Ένα από τα πιο συναρπαστικά μέτωπα της διατροφολογίας των πτηνών είναι αυτό του προγεννητικού και πρώιμου διατροφικού προγραμματισμού, η έννοια ότι η διατροφική έκθεση κατά τη διάρκεια κρίσιμων αναπτυξιακών περιόδων μπορεί να οδηγήσει σε

«επιγενετικά σημάδια» που επηρεάζουν σταθερά τον μεταβολισμό, την ανοσία και την ανάπτυξη καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του πτηνού και ίσως ακόμη και των απογόνων του. Το αυγό είναι ένα μοναδικό σύστημα στα πουλερικά που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για να εξετάσουμε την εμβρυϊκή ανάπτυξη.

Έχουμε τη δυνατότητα να χειριστούμε το διατροφικό περιβάλλον του εμβρύου κατά τη διάρκεια της προγεννητικής ζωής με τεχνολογίες σίτισης ή έγχυσης *in ovo* (Dunislawska et al., 2022). Το φολικό οξύ είναι ένας βασικός συν-παράγοντας του μεταβολισμού του άνθρακα και της μεθυλίωσης του DNA.

Η σίτιση *in ovo* (IOF) έχει δείξει διαταραχή του μεταβολικού κύκλου του φολικού οξέος, της ανοσολογικής απόκρισης και της επιγενετικής τροποποίησης των μορίων του ανοσοποιητικού συστήματος στις όρνιθες κρεατοπαραγωγής. Οι Li et al. (2016) διαπίστωσαν ότι η ένεση φολικού οξέος στα αυγά αύξησε τη δραστηριότητα της μεθυλενοτετραϋδροφολικής αναγωγάσης (MTHFR) και της μεθειονίνης συνθάσης αναγωγάσης (MTRR) και αύξησε τα επίπεδα της ηπατικής S-αδενοσυλμεθειονίνης (SAM) και τη μεθυλίωση του DNA των ανοσολογικών γονιδίων.

Σύμφωνα με τους Dunislawska et al. (2021), η επώαση των αυγών μπορεί να επηρεαστεί μέσω της διέγερσης *in ovo* την 12η ημέρα με πρεβιοτικά (*Lactococcus lactis* subsp. *cremoris*) και συνβιοτικά. Στον σπλήνα των ορνίθων ενεργοποιούνται επιγενετικοί μηχανισμοί, δηλαδή αλλαγές στη μεθυλίωση του DNA τόσο σε γενικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο συγκεκριμένων γονιδίων του ήπατος, όπως τα NR4A3 και ANGPTL4, καθώς και αλλαγές στο προφίλ έκφρασης miRNA των ανοσολογικών ιστών.

Η χορήγηση πρεβιοτικών και συνβιοτικών *in ovo* προκαλεί αλλαγές στο επίπεδο της μεθυλίωσης του DNA με τρόπο που εξαρτάται από τον ιστό και τον γονότυπο. Διακριτά μοτίβα παρατηρήθηκαν στα κοτόπουλα Ross 308 και στα κοτόπουλα Green-legged Partridge-like (Dunislawska et al., 2021).

Η διαγενεακή πτυχή του διατροφικού επιγενετικού προγραμματισμού έχει αποδειχθεί στα πουλερικά σε μια μελέτη των Wu et al. (2019). Σε αυτή τη μελέτη, οι κόκορες αναπαραγωγής τράφηκαν με πέντε διαφορετικούς τύπους διατροφής καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής τους και περιείχαν βαθμονομημένα επίπεδα φολικού οξέος (0-5,00 mg/kg).

Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η χρόνια συμπλήρωση φολικού οξέος από τον πατέρα είχε αναπτυξιακές και μεταβολικές επιδράσεις στους νεοσσούς, οι οποίες μεταδόθηκαν στη γενιά F₂. Τα στοιχεία υποστηρίζουν την ιδέα ότι οι δότες μεθυλίου στη διατροφή μπορούν να τροποποιήσουν το επιγονιδίωμα.

Πρόσφατες έρευνες έχουν υπογραμμίσει περαιτέρω ορισμένα αρχέγονα γεννητικά κύτταρα (PGC) πουλερικών ως ένα ισχυρό μοντέλο αξιολόγησης των διαγενεακών διατροφικών-επιγενετικών και μεταβολικών αλληλεπιδράσεων, λόγω της ιδιόμορφης βιολογίας τους, καθώς και της προσβασιμότητας του εμβρύου των πτηνών (Ibrahim et al., 2025). Οι Roura et al. (2025) παρείχαν μια εκτενή επισκόπηση του αναπτυξιακού προγραμματισμού των ορνίθων, συμπεριλαμβανομένης της διαγενεακής διατροφής και των επιγενετικών επιδράσεων που προκαλούνται από τη χορήγηση αιθέριων ελαίων, οργανικών οξέων, προ-, προ- και συνβιοτικών *in ovo*.

Η έρευνα του δυναμικού των φυτοχημικών και των λειτουργικών τροφίμων που ρυθμίζουν την έκφραση των γονιδίων τα οποία σχετίζονται με την ανοσία και τα αντιοξειδωτικά μέσω της επιγενετικής είναι ένας άλλος δυναμικός τομέας έρευνας. Η κουρκουμίνη, η ρεσβερατρόλη, η κερσετίνη και οι κατεχίνες ενεργοποιούν τον παράγοντα μεταγραφής Nrf2 και αναστέλλουν την προφλεγμονώδη σηματοδότηση που μεσολαβείται από τον NF-κB, η οποία αναδιαμορφώνει τη χρωματίνη, μέσω της ρύθμισης των ακετυλοτρανσφερασών και των αποακετυλασών/σιρτουινών (Rahman, 2008; Kouvedaki et al., 2024).

Στο πλαίσιο της πτηνοτροφίας, τέτοια συστατικά ζωοτροφών έχουν ως αποτέλεσμα την υπερέκφραση γονιδίων για SOD, CAT, GPx και γλουταθειόνη S-τρανσφεράση στο ήπαρ και το έντερο. Επιπλέον, αυτά τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν την υπορρύθμιση των προφλεγμονωδών κυτοκινών IL-1β, IL-6, TNF-α και IL-8 (Kouvedaki et al., 2024).

Η διατροφική γονιδιωματική ανάλυση των φυτογενών προσθέτων ζωοτροφών σε πουλερικά κρεατοπαραγωγής έχει επιβεβαιώσει ότι τέτοιες ενώσεις μπορούν να ρυθμίζουν τα γονίδια κατά μήκος του εντέρου από τις οδούς TLR-signalling και MAPK-apoptosis έως τις οδούς PI3K-Akt-mTOR. Όπως εξηγούν οι Griela και Mountzouris (2023), οι επιδράσεις τους στην υγεία και στην απόδοση του εντέρου είναι συνέπεια του μεταγραφικού επαναπρογραμματισμού.

Η χρήση τεχνολογιών αλληλούχισης υψηλής απόδοσης, ειδικά RNA-Seq, έχει αλλάξει τα δεδομένα στον τομέα της διατροφικής γονιδιωματικής των πτηνών. Οι Hasan et al. (2019)

ανέφεραν ότι η RNA-Seq επιτρέπει την ταυτόχρονη παρακολούθηση όλων των γονιδιακών εκφράσεων, μέσω διατροφικής παρέμβασης. Αυτό έχει προσφέρει μια συνολική εικόνα του μεταγραφώματος, κάτι που δεν ήταν δυνατό με την προηγούμενη πλατφόρμα που βασιζόταν σε μικροσυστοιχίες.

Το μεταγραφόμενο του ήπατος ορνίθων ωοπαραγωγής που τρέφονταν με ωμέγα-3 λιπαρά οξέα υποβλήθηκε σε αυτή την τεχνολογία (Khodaei et al., 2023). Επιπλέον, αναλύθηκε το τρανσκριπτόγραμμα της νήστιδας ορνίθων κρεατοπαραγωγής που έλαβαν λυσοφωσφολιπίδια (Li et al., 2022) και το ηπατικό τρανσκριπτόγραμμα πουλερικών κρεατοπαραγωγής, που προσαρμόστηκαν σε δίαιτες με μειωμένη περιεκτικότητα σε ακατέργαστη πρωτεΐνη (Asiamah et al., 2025).

Η διερεύνηση των αλληλεπιδράσεων θρεπτικών συστατικών-γονιδίων μπορεί να ενισχυθεί περαιτέρω με ολοκληρωμένες προσεγγίσεις πολλαπλών ομικών, συμπεριλαμβανομένης της μεταγραφωμικής σε συνδυασμό με τη μεταβολομική, την πρωτεωμική και την επιγενωμική, οι οποίες θα μπορούσαν να βοηθήσουν στη δημιουργία στρατηγικών ακριβείας για τη διατροφή συγκεκριμένων γενετικών υποβάρθρων (Hassan et al., 2022). Ο πιθανός αντίκτυπος της διατροφογενομικής και της επιγενετικής διατροφής στη μελλοντική σύνθεση των ζωοτροφών είναι σημαντικός.

Καθώς το κόστος της γονότυπησης μειώνεται και οι βιοπληροφορικές διαδικασίες καθίστανται πιο προηγμένες, είναι πλέον τεχνικά εφικτό να σχεδιαστούν ζωοτροφές νέας γενιάς που είναι προσαρμοσμένες στη γενετική σύσταση συγκεκριμένων φυλών (ή γραμμών) – ή ακόμη και μεμονωμένων κοπαδιών. Η παροχή θρεπτικών συστατικών κατά τη διάρκεια της επώασης μέσω σίτισης in ovo και/ή αμέσως μετά την εκκόλαψη μπορεί να επιτρέψει στους παραγωγούς να αποτυπώσουν ευεργετικά επιγενετικά σημάδια που βελτιώνουν την απόδοση, την αντοχή στις ασθένειες και την ευημερία εφ' όρου ζωής.

Η έρευνα βρίσκεται ακόμη σε εξέλιξη και η διαπίστωση οποιασδήποτε αιτιώδους σχέσης μεταξύ συγκεκριμένων θρεπτικών συστατικών, επιγενετικών φαινομένων και φαινοτύπου θα απαιτούσε προσεκτικά σχεδιασμένα και επαρκώς τεκμηριωμένα διαχρονικά πειράματα (Hassan et al., 2022). Μεγάλο μέρος της βιολογικής σημασίας των επιγενετικών αλλαγών που προκαλούνται από τη διατροφή και παρατηρούνται στους ιστούς των πουλερικών δεν είναι ακόμη κατανοητό, ενώ υπό συνθήκες εμπορικής παραγωγής τα ζητήματα της

σταθερότητας, της αναστρεψιμότητας και της κληρονομικότητας αυτών των χαρακτηριστικών παραμένουν ανοιχτά.

Καθώς ο τομέας εξελίσσεται, θα είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψιν τα ηθικά και κανονιστικά ζητήματα που σχετίζονται με τη σκόπιμη χειραγώγηση της διαγενεακής επιγενετικής κληρονομικότητας. Λόγω αυτών των περιορισμών, η διατροφολογική και η επιγενετική διατροφή θα αποτελέσουν τους μελλοντικούς πυλώνες της επιστήμης της διατροφής των πτηνών τα επόμενα δέκα χρόνια.

8. ΔΙΑΤΡΟΦΗ ΠΤΗΝΩΝ ΣΕ ΑΙΧΜΑΛΩΣΙΑ - ΣΥΝΤΡΟΦΙΑΣ ΚΑΙ ΑΓΡΙΩΝ ΠΤΗΝΩΝ

8.1. Διατροφική Διαχείριση Πτηνών σε Αιχμαλωσία και Πτηνών Συντροφιάς

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι πτηνοτρόφοι είναι η επιτυχής απομίμηση της διατροφής των αγρίων πτηνών σε συνθήκες αιχμαλωσίας. Ο Brightsmith (2012) ανέφερε ότι τα άγρια είδη, σε σύγκριση με τα πτηνά που βρίσκονται σε αιχμαλωσία σε καταστήματα λιανικής πώλησης, για παράδειγμα, τρώνε μια μεγάλη ποικιλία τροφών.

Επιπλέον, η διατροφή τους περιλαμβάνει άγουρους σπόρους, μπουμπούκια, κουκούτσια φρούτων, φλοιούς, προνύμφες εντόμων και εκκρίματα φυτών. Τα περισσότερα από αυτά τα τρόφιμα είναι πλούσια σε δευτερογενείς μεταβολίτες, τους οποίους τα πτηνά σε αιχμαλωσία δε θα δοκιμάσουν ποτέ. Υπάρχουν λίγες επιστημονικές έρευνες που αξιολογούν τη θρεπτική αξία αυτών των τροφίμων της άγριας φύσης, αλλά η κατανόησή της είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση των διατροφικών προσαρμογών και απαιτήσεων της άγριας φύσης (Jarman et al., 2024).

Τα εμπορικά μείγματα σπόρων και τα εξωθημένα σφαιρίδια μπορεί να μας διευκολύνουν, αλλά απέχουν πολύ από αυτή την εξελικτική διατροφή και η διαφορά μεταξύ των δύο είναι μία από τις κύριες αιτίες των διατροφικών ασθενειών στα πτηνά. Αυτή η πρόκληση επιτείνεται από την ενεργειακή διαφοροποίηση μεταξύ των πτηνών που ζουν σε αιχμαλωσία και εκείνων που ζουν ελεύθερα στη φύση.

Οι παπαγάλοι συντροφιάς καταναλώνουν ενέργεια σε ποσοστό που εκτιμάται ότι είναι 10 έως 15 φορές χαμηλότερο από αυτό των άγριων παπαγάλων, λόγω των περιορισμών στο χώρο και του ακίνητου τρόπου ζωής τους (Koutsos et al., 2001). Λόγω των μειωμένων θερμιδικών απαιτήσεων, τα πτηνά που ζουν σε αιχμαλωσία τρώνε μικρότερες κατ' απόλυτη τιμή ποσότητες τροφής.

Επομένως, κάθε γραμμάριο που μπορούν να καταναλώσουν πρέπει να περιέχει αναλογικά υψηλότερη πυκνότητα βασικών μικροθρεπτικών συστατικών, για την πρόληψη της ανεπάρκειας. Πολλοί ιδιοκτήτες εξακολουθούν να προσφέρουν διατροφές με βάση σπόρους υψηλής ενεργειακής πυκνότητας. Οι σπόροι είναι υψηλής ενεργειακής πυκνότητας και

ικανοποιούν τις θερμιδικές απαιτήσεις πολύ πριν ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις σε μικροθρεπτικά συστατικά, με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται χρόνια υποκλινική υποθρεψία (Stanford, 2006).

Τα πτηνά σε αιχμαλωσία έχουν διαφορετικές απαιτήσεις σε πρωτεΐνες από αυτά που ζουν στην άγρια φύση. Τα πτηνά που ζουν ελεύθερα, στα στάδια της μετανάστευσης, της αναπαραγωγής και της πτερόρροιας, χρειάζονται περισσότερες πρωτεΐνες από εκείνα που ζουν σε αιχμαλωσία.

Τα πτηνά σε αιχμαλωσία ζουν σε θερμοουδέτερα περιβάλλοντα και έχουν ελάχιστη σωματική δραστηριότητα. Επομένως, χρειάζονται λιγότερες αλλά καλύτερης βιολογικής αξίας πρωτεΐνες (Koutsos et al., 2001). Σε αυτό το πλαίσιο, μια σειρά από διατροφικές ασθένειες έχει αποκτήσει σημασία στον τομέα της ιατρικής των πτηνών συντροφιάς.

Μία από τις συχνότερες ασθένειες των πτηνών είναι η παχυσαρκία. Κλινικά ορίζεται ως σωματικό βάρος που υπερβαίνει το ιδανικό κατά είκοσι τοις εκατό ή περισσότερο, και οι παπαγάλοι Αμαζονίου, οι μακάο, οι κοκατίλ και τα παπαγαλάκια είναι ιδιαίτερα επιρρεπείς σε αυτήν (Horpes, 2024). Μια διατροφή πλούσια σε λίπη, σε συνδυασμό με λιγότερη σωματική δραστηριότητα, οδηγεί σε υπερβολική παχυσαρκία, η οποία με τη σειρά της καθιστά τα πτηνά επιρρεπή σε ηπατική λιπιδωση, αθηροσκλήρωση και καρδιαγγειακές παθήσεις (Samanta & Bandyopadhyay, 2017).

Η ηπατική λιπιδωση, μια ασθένεια που εμφανίζεται ως αποτέλεσμα της παθολογικής συσσώρευσης λίπους στα ηπατοκύτταρα, οφείλεται σε επίμονη δυσλειτουργία του μεταβολισμού των λιπαρών οξέων. Αυτή η πάθηση διαγιγνώσκεται συνήθως σε ψιττακοειδή, που τρέφονται κυρίως με σπόρους (Khalilzadeh Houjaqan et al., 2023). Οι δίαιτες υψηλών θερμίδων με σπόρους ή ξηρούς καρπούς συνδέονται με καρδιομυοπάθεια, αθηροσκλήρωση και σύνδρομο λιπώδους ήπατος, που υποδεικνύουν μεταβολική βλάβη (Bandyopadhyay, 2017).

Η υποβιταμίνωση Α είναι μια άλλη σημαντική ασθένεια που εμφανίζεται στα πτηνά τα οποία τρέφονται αποκλειστικά με σπόρους, πτωχούς σε βιταμίνη Α. Η τελευταία συμβάλει στη διατήρηση της ακεραιότητας των επιθηλιακών ιστών και στην ενίσχυση της ανοσίας. Η έλλειψη βιταμίνης Α προκαλεί πλακώδη μεταπλασία του επιθηλίου του στοματοφάρυγγα, των χοανών, των ιγμορείων, του γαστρεντερικού σωλήνα, του ουρογεννητικού συστήματος

και του ουροπυγικού αδένου. Προκαλεί επίσης υπερκέρατωση των κάτω άκρων (Hoppes, 2024).

Μια διατροφή που αποτελείται κατά το ήμισυ από σπόρους και κατά το ήμισυ από σφαιρίδια, δίχως έλεγχο των μερίδων, μπορεί επίσης να είναι ανεπαρκής σε βιταμίνη Α (Hoppes, 2024). Η ανισορροπία ασβεστίου και φωσφόρου είναι επίσης πολύ συχνή. Δεδομένου ότι πρόκειται για διατροφή με βάση τους σπόρους, η αναλογία ασβεστίου προς φώσφορο θα είναι αρκετά ανισόρροπη.

Επιπλέον, η ανεπάρκεια βιταμίνης D₃, η οποία είναι συχνή στα πτηνά που διαβιούν σε εσωτερικούς χώρους, καθώς δεν εκτίθενται σε υπεριώδη ακτινοβολία, επιδεινώνει το πρόβλημα. Αυτό οδηγεί σε μεταβολική οστική νόσο, σε κόλλημα αυγών στις όρνιθες και σε υποασβεστιαμικές κρίσεις (Peng et al., 2021).

Σύμφωνα με τον Hoppes (2024), τα είδη που τρέφονται με φρούτα (όπως οι τουκάνες και οι μαινάδες) και έχουν καλή απορρόφηση σιδήρου από δίαιτες χαμηλής περιεκτικότητας σε σίδηρο μπορεί να υποφέρουν από αιμοχρωμάτωση, η οποία τα καθιστά ευαίσθητα στην τοξικότητα του σιδήρου, όταν τρέφονται με εμπορικά τρόφιμα πλούσια σε σίδηρο. Καθώς οι διατροφικές απαιτήσεις των περισσότερων ειδών αγρίων πτηνών δεν είναι τεκμηριωμένες, οι διατροφολόγοι των ζωολογικών κήπων και των οργανισμών προστασίας της φύσης στρέφονται ολοένα και περισσότερο προς τα διατροφικά μοντέλα των οικόσιτων ειδών.

Οι διατροφικές ανάγκες των οικόσιτων πουλερικών είναι καλύτερα κατανοητές από αυτές οποιασδήποτε άλλης ομάδας πτηνών. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των διατροφικών αναγκών ορισμένων άγριων ειδών, ιδίως εκείνων με παρόμοιο ιστορικό ζωής και πεπτική φυσιολογία (Jarman et al., 2024).

Η προσέγγιση της διατροφής είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε προγράμματα αναπαραγωγής σε αιχμαλωσία, που στοχεύουν στη διατήρηση των ειδών. Οι διατροφικές εισροές επηρεάζουν την αναπαραγωγική απόδοση, την πορεία των ασθενειών και τη μακροζωία. Παρά ταύτα, η βιβλιογραφία για τη διατροφή των αιχμάλωτων ζώων σε ζωολογικούς κήπους έχει επικεντρωθεί κυρίως στην έρευνα για τα θηλαστικά, ενώ εξακολουθεί να υφίσταται σχετική έλλειψη πληροφοριών αναφορικά με τη διατροφική διαχείριση για τα πτηνά.

Υπάρχει ανάγκη για μεγαλύτερη συνεργασία μεταξύ των ιδρυμάτων φροντίδας και των επιστημόνων διατροφής (Jarman et al., 2024). Η αγορά των πτηνών συντροφιάς έχει σημειώσει σαφή ανοδική τάση προς τις premium διατροφές για κάθε είδος, παράλληλα με τις εξελίξεις στη διατροφή των ζώων σε ζωολογικούς κήπους.

Οι σύγχρονες τροφές υπό μορφή σφαιριδίων έχουν σχεδιαστεί ώστε να παρέχουν ένα ισορροπημένο προφίλ μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών συστατικών, σύμφωνα με τις απαιτήσεις συγκεκριμένων ταξινομικών ομάδων. Επιπλέον, πολλές από αυτές τις τροφές περιέχουν πρόσθετες βιταμίνες, οργανικά μέταλλα και προβιοτικά που προορίζονται να ωφελήσουν την υγεία του γαστρεντερικού συστήματος (Stanford, 2006).

Η προσθήκη προβιοτικών στις τροφές για πτηνά συντροφιάς αντικατοπτρίζει τις τάσεις που παρατηρούνται, όπου αναγνωρίζεται ολοένα και περισσότερο ότι το υγιές μικροβίωμα του εντέρου παίζει ουσιαστικό ρόλο στη διαμεσολάβηση της ανοσολογικής λειτουργίας, της απορρόφησης θρεπτικών συστατικών και της υγείας γενικότερα (Ritchie et al. 2023).

8.2. Τροφή για Άγρια Πτηνά: Τάσεις - Οφέλη και Οικολογικές Παράμετροι

Η ευρέως διαδεδομένη σίτιση των άγριων πτηνών αποτελεί πλέον μια σημαντική παγκόσμια βιομηχανία. Σύμφωνα με την Wise Guy Reports (2025), η παγκόσμια αγορά τροφών για άγρια πτηνά είχε αξία περίπου 1736,3 εκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ, ενώ έφτασε τα 1812,7 εκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ το 2025, με ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης (CAGR) περίπου 4,4% μέχρι το 2035.

Η μεγαλύτερη περιφερειακή αγορά για την παρατήρηση πτηνών είναι η Βόρεια Αμερική, η οποία έχει μακρά παράδοση σε αυτό. Η αγορά στην περιοχή Ασίας-Ειρηνικού προβλέπεται να σημειώσει την ταχύτερη ανάπτυξη, λόγω του αυξανόμενου ενδιαφέροντος για τη διατήρηση των πουλιών, καθώς και των πυκνών αναπτύξεων που φέρνουν τους λάτρεις της φύσης πιο κοντά στην άγρια ζωή (Wise Guy Reports, 2025).

Η ποικιλία των προϊόντων έχει αυξηθεί. Τα μείγματα με βάση τους σπόρους είναι η πιο δημοφιλής κατηγορία, αλλά τα προϊόντα με βάση το λίπος, οι τροφοδότες νέκταρ και τα προϊόντα με βάση τους αλευρώδεις σκώληκες έχουν κερδίσει σημαντικό έδαφος. Σήμερα,

ως παγκόσμια τάση, παρατηρείται μια σημαντική στροφή προς τα βιολογικά και τα προϊόντα άνευ φυτοφαρμάκων.

Οι καταναλωτές αναγνωρίζουν την αύξηση των υπολειμμάτων στο δέρμα τους και στα τρόφιμα, λόγω των χημικών ουσιών και την επίδρασή τους σε μη στοχευόμενους οργανισμούς. Ολοένα και περισσότερο, διατίθενται premium και gourmet τροφές για άγρια πτηνά, που προσελκύουν συγκεκριμένα είδη, και με την αύξηση των πωλήσεων αυτών των προϊόντων στο διαδίκτυο, είναι διαθέσιμα στο ευρύ κοινό.

Εταιρείες όπως η Kaytee, η Audubon Park και η Pennington επενδύουν πόρους σε καινοτομίες προϊόντων και βιώσιμες συσκευασίες, καθώς κατανοούν ότι οι περιβαλλοντικά ευαισθητοποιημένοι καταναλωτές αναμένουν συνοχή μεταξύ της αποστολής διατήρησης της σίτισης των πουλιών και των οικολογικών πιστοποιητικών των προϊόντων που αγοράζουν. Ωστόσο, οι οικολογικές επιπτώσεις της συμπληρωματικής σίτισης σε κλίμακα τοπίου αξίζουν ιδιαίτερης προσοχής.

Μια μελέτη των Abraham et al. (2024) έδειξε ότι οι τροφοδότες πτηνών εισήγαγαν συνολικά τεράστιες ποσότητες θρεπτικών ουσιών που προέρχονταν από όλο τον κόσμο και μεταφέρθηκαν χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά στο τοπικό περιβάλλον. Χρησιμοποιώντας το Ηνωμένο Βασίλειο ως μελέτη περίπτωσης, οι συγγραφείς διαπίστωσαν ότι ο φώσφορος που παρέχεται από συμπληρωματικές τροφές για πτηνά κήπου και θηράματα ήταν σε ποσότητα παρόμοια με εκείνη που παρέχεται από βιομηχανικά απόβλητα και λανθασμένες συνδέσεις αποχέτευσης (Abraham et al., 2024).

Αυτή η ανακατανομή θρεπτικών ουσιών μπορεί να επηρεάσει τα εδάφη, τη σύνθεση των ειδών και τον ευτροφισμό των υδάτινων οδών στο θαλάσσιο περιβάλλον. Όταν οι θρεπτικές ουσίες εισέρχονται στο περιβάλλον σε υψηλότερο ρυθμό για μεγάλο χρονικό διάστημα, μέσω της σίτισης των πτηνών, μπορεί να διαταράξουν την ισορροπία του οικοσυστήματος (Abraham et al., 2024).

Η συμπληρωματική διατροφή των άγριων πτηνών έχει μεγάλη αξία για τη διατήρηση και την εμπλοκή με τη βιοποικιλότητα. Σύμφωνα με τους Martin και Greig (2019), το Project FeederWatch που διευθύνεται από το Cornell Lab, ένα πρόγραμμα πολιτικής επιστήμης, συλλέγει δεδομένα παρατήρησης από πολλούς συμμετέχοντες πολίτες σε όλο τον κόσμο. Η διατροφή αγρίων πτηνών είναι ένα από τα προγράμματα στα οποία μπορούμε εύκολα να συμμετάσχουμε.

Μέσω αυτών των πληροφοριών, οι επιστήμονες μπορούν να παρακολουθούν τις μεταναστευτικές διαδρομές και τις τάσεις του πληθυσμού, να αξιολογούν την επιτυχία της φωλιάσματος και να εντοπίζουν νέες απειλές, γεγονός που βοηθά στο σχεδιασμό της διατήρησης με βάση τα αποδεικτικά στοιχεία. Αυτή η πρακτική συνιστά ένα ισχυρό μέσο καλλιέργειας της δημόσιας υποστήριξης για τη διατήρηση της βιοποικιλότητας, αλλά έχει σφαιρικές οικολογικές συνέπειες (Cox & Gaston, 2006).

9. ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ - ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ - ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

9.1. Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα της Παραγωγής Τροφών για Πτηνά

Η παραγωγή ζωοτροφών είναι ένα από τα στάδια της αλυσίδας εφοδιασμού ζωικού κεφαλαίου που απαιτεί τους περισσότερους πόρους. Επιπλέον, οι ζωοτροφές για πτηνά, είτε πρόκειται για πουλερικά, πτηνά συντροφιάς ή άγρια πτηνά, δε διαφέρουν. Έχει αναφερθεί (Sustell 2024) ότι οι ζωοτροφές αντιπροσωπεύουν το 50-80% του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος της παραγωγής κρέατος και αυγών και αποτελούν τον σημαντικότερο παράγοντα βιωσιμότητας.

Η αλλαγή στη χρήση της γης, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, η άντληση ύδατος και η απώλεια βιοποικιλότητας οφείλονται κυρίως στην καλλιέργεια ζωοτροφών, ιδίως σόγιας και καλαμποκιού. Περισσότερο από τα τρία τέταρτα της παγκόσμιας παραγωγής σόγιας προορίζονται για ζωοτροφές. Επιπλέον, η καλλιέργεια σόγιας στη Νότια Αμερική συνδέεται με την αποδάσωση στα βιοσυστήματα του Αμαζονίου και του Cerrado (EUFIC, 2024).

Παρά πρωτοβουλίες όπως το Μορατόριουμ για τη Σόγια του Αμαζονίου, που περιορίζει την αποδάσωση λόγω της καλλιέργειας σόγιας σε ορισμένες περιοχές, η μετατόπιση της εκτροφής βοοειδών και η επέκταση της γεωργίας σε μη προστατευόμενες περιοχές συνεχίζουν να αποτελούν σοβαρές απειλές (EUFIC, 2024).

Μια ανάλυση του κύκλου ζωής που πραγματοποιήθηκε στις αλυσίδες εφοδιασμού ζωοτροφών για την παραγωγή χοίρων και πουλερικών στις Ηνωμένες Πολιτείες έδειξε ότι η παραγωγή και η χρήση ζωοτροφών συνέβαλαν εν πολλοίς στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και στη χρήση ορυκτών καυσίμων. Η προσθήκη DDGS ήταν ο μεγαλύτερος συντελεστής μεταξύ των κοινών συστατικών (Putman et al., 2020).

Ο δείκτης μετατρεψιμότητας ζωοτροφής (FCR) είναι ένας βασικός δείκτης οικονομικής απόδοσης και θεωρείται επίσης ένα έμμεσο μέτρο περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Ο FCR αφορά στην ποσότητα ζωοτροφής που απαιτείται για την παραγωγή ενός κιλού ζωικού προϊόντος. Μια χαμηλή τιμή υποδηλώνει υψηλότερη απόδοση.

Το κόστος των ζωοτροφών αντιπροσωπεύει περίπου το 70 % του κόστους παραγωγής ζώντων πουλερικών στην τρέχουσα παραγωγή κοτόπουλων κρεατοπαραγωγής. Επομένως, ακόμη και μια μικρή βελτίωση του FCR μπορεί να προσφέρει τεράστια οικονομικά, καθώς και ανάλογα περιβαλλοντικά οφέλη (Adisseo, 2024).

Σύμφωνα με μελέτη που διεξήχθη από το Υπουργείο Περιβάλλοντος, Τροφίμων και Αγροτικών Υποθέσεων του Ηνωμένου Βασιλείου (DEFRA), ο FCR αποτελεί αξιόπιστο δείκτη της έντασης εκπεμπόμενων αερίων του θερμοκηπίου στις γεωργικές εκμεταλλεύσεις. Σημειώνεται ότι η βελτίωση του FCR έχει ως αποτέλεσμα χαμηλό αποτύπωμα άνθρακα ανά μονάδα παραγωγής.

Η βελτίωση της αποδοτικότητας των ζωοτροφών έχει ως άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση της ανάγκης για ζωοτροφές. Αυτό περιορίζει άμεσα τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, μειώνει τον όγκο των αποβλήτων, καθώς και την πίεση στις καλλιεργήσιμες εκτάσεις που χρησιμοποιούνται για την καλλιέργεια ζωοτροφών.

Η χρήση υψηλής απόδοσης μύλων pellet εξοπλισμένων με κινητήρες μεταβλητής ταχύτητας και συστήματα ανάκτησης ενέργειας (π.χ. εναλλάκτες θερμότητας) δύναται να μειώσει τη συνολική κατανάλωση ενέργειας σε επίπεδο εργοστασίου, κατά περίπου 30%, στην παραγωγή ζωοτροφών. Ο στόχος των πιστοποιήσεων υπεύθυνης προμήθειας, όπως οι δεσμεύσεις για σόγια χωρίς αποψίλωση δασών και η πιστοποίηση Round Table on Responsible Soy, είναι να διαχωριστεί η προμήθεια συστατικών ζωοτροφών από την καταστροφή των οικοτόπων.

Φιλικές προς το περιβάλλον και όλο και πιο ανακυκλώσιμες συσκευασίες χρησιμοποιούνται σε μοντέλα κυκλικής οικονομίας που μειώνουν τα απόβλητα και την απαίτηση για πρώτες ύλες. Τα υποπροϊόντα από τα τρόφιμα για ανθρώπινη κατανάλωση ανακυκλώνονται και μετατρέπονται σε ζωοτροφές. Οι Ferraris et al. (2022) διερευνούν επίσης την εξαγωγή βιοδραστικών ενώσεων από αγροβιομηχανικά υπολείμματα χρησιμοποιώντας μεθόδους πράσινης χημείας, όπως βαθιά ευτηκτικά διαλύματα (Deep Eutectic Solvents - DES), για την ανάπτυξη ζωοτροφών με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.

Η δημιουργία εναλλακτικών πηγών πρωτεϊνών είναι πιθανώς η καλύτερη μέθοδος ελαχιστοποίησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των ζωοτροφών στα πτηνά. Οι προνύμφες των *Hermetia illucens* (μαύρη μύγα στρατιώτης) και *Tenebrio molitor* (κίτρινος σκόληκας) είναι από τις πιο υποσχόμενες βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις σε σχέση με τις

συμβατικές πηγές πρωτεϊνών. Επιπλέον, η περιεκτικότητα των εντόμων σε πρωτεΐνες είναι παρόμοια με αυτήν της σόγιας. Η παραγωγή εντόμων είναι πιο αποδοτική από άποψη γης, ύδατος και ενέργειας, σε σύγκριση με άλλες πηγές πρωτεϊνών (Belhadj Slimen et al., 2023).

Η εκτροφή εντόμων συνδέεται με κυκλικά συστήματα, καθώς οι προνύμφες τρέφονται με παλιά τρόφιμα και οργανικά απόβλητα. Έτσι, υποστρώματα χαμηλής αξίας μετατρέπονται σε πρωτεΐνες υψηλής αξίας και τα απόβλητα απομακρύνονται από τους χώρους υγειονομικής ταφής. Σύμφωνα με τον κανονισμό (ΕΕ) 2021/1372 της Επιτροπής, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει εγκρίνει τη χρήση επεξεργασμένων ζωικών πρωτεϊνών από έντομα στις ζωοτροφές για χοίρους και πουλερικά.

Η απόφαση άνοιξε τις πύλες για ευρεία εμπορευματοποίηση και επενδύσεις στον τομέα (IPIFF, 2021). Μια άλλη πιθανή επιλογή είναι τα φύκια. Τα μικροφύκη, όπως η σπιρουλίνα και η χλωρέλλα, περιέχουν 50-70% πρωτεΐνες (περισσότερο από τη σόγια) μαζί με ωμέγα-3 λιπαρά οξέα, βιταμίνες, μέταλλα και αντιοξειδωτικές ενώσεις (Abdel-Wareth et al., 2024).

Σύμφωνα με τους Abdel-Wareth et al. (2024), η προσθήκη φυκών στις ζωοτροφές πουλερικών θα μπορούσε να βελτιώσει τη διατροφή, τη βιωσιμότητα και την αντοχή στις ασθένειες. Οργανισμοί όπως τα είδη *Methylococcus* μπορούν να παράγουν μονοκύτταρες πρωτεΐνες μέσω της ζύμωσης υποστρωμάτων, όπως το μεθάνιο ή η μεθανόλη.

Έτσι, αποτελούν μια άλλη εναλλακτική επιλογή. Τα SCP περιέχουν αμινοξέα που είναι συγκρίσιμα με αυτά του ιχθυαλεύρου. Επιπλέον, η παραγωγή SCP σε ελεγχόμενη ζύμωση δύναται να επιτύχει ιχνηλασιμότητα και σταθερότητα στην ποιότητα και δεν εξαρτάται από τη γεωργική γη (Hombegowda et al., 2021).

Τα ευρήματα της μελέτης έδειξαν ότι η λάσπη κατηγορίας SCP μπορεί να συμπεριληφθεί σε επίπεδα που θα αντικαταστήσουν πλήρως το 30-40% της συνολικής ακατέργαστης πρωτεΐνης στις δίαιτες των ορνίθων παραγωγής κρέατος, χωρίς καμία αρνητική επίπτωση στην απόδοση ανάπτυξης και στην ενεργειακή απόδοση των ζωοτροφών (Hombegowda et al., 2021).

9.2. Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Το μέλλον της διατροφής των πτηνών προβλέπει τη συγχώνευση της ψηφιακής τεχνολογίας, της μοριακής βιολογίας και της επιστήμης της βιωσιμότητας. Ένα από τα πιο αναμενόμενα γεγονότα είναι η αύξηση της χρήσης της τεχνητής νοημοσύνης (AI) και της μηχανικής μάθησης (ML) στη σύνθεση των ζωοτροφών.

Οι παραδοσιακές μέθοδοι σύνθεσης διαχειρίζονται τα επίπεδα θρεπτικών συστατικών, ώστε να καλύπτουν τις μέσες ανάγκες ενός κοπαδιού. Ωστόσο, δε λαμβάνουν υπόψιν τις δυναμικές διακυμάνσεις στους ρυθμούς ανάπτυξης, την κατάσταση της υγείας και τις περιβαλλοντικές συνθήκες (Martinez et al., 2024).

Τα μοντέλα πρόβλεψης που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη αναλύουν τεράστιες ποσότητες δεδομένων – ιστορικά δεδομένα παραγωγής, πραγματική απόδοση του κοπαδιού, περιβαλλοντικούς παράγοντες και άλλα. Τα μοντέλα αυτά προσφέρουν μια βελτιωμένη πρόβλεψη της ποσότητας των θρεπτικών συστατικών που απαιτούνται και βοηθούν στη συνεχή βελτιστοποίηση της τροφής (Martinez et al., 2024).

Η ανάπτυξη βασικών συστημάτων υποστήριξης είναι απαραίτητη για την πλήρη αξιοποίηση του δυναμικού της σύνθεσης με τεχνητή νοημοσύνη. Κατά συνέπεια, αναπτύσσονται συγχρόνως εξοπλισμός ακριβούς παραγωγής ζωοτροφών, προηγμένοι αισθητήρες και καινοτόμα συστήματα αξιολόγησης ενέργειας.

Εταιρείες όπως η Bestmix δοκιμάζουν ήδη τεχνολογία σύνθεσης με τεχνητή νοημοσύνη που δύναται να δημιουργήσει αρχικές συνταγές με βάση οδηγίες βασισμένες σε δεδομένα, διατροφικές ανάγκες, διαθεσιμότητα συστατικών, περιορισμούς κόστους και νομοθεσία (Bestmix, 2025). Η δημιουργία προβιοτικών ακριβείας και στοχευμένων συνβιοτικών αποτελεί ένα άλλο μέτωπο.

Πρόσφατες συστηματικές ανασκοπήσεις επιβεβαιώνουν ότι τα προβιοτικά βελτιώνουν την απόδοση της ανάπτυξης και τον δείκτη μετατρεψιμότητας της τροφής. Βελτιώνουν επίσης την υγεία του εντέρου στα πουλερικά, μειώνοντας παράλληλα το φορτίο των παθογόνων και την ανάγκη για θεραπευτικά αντιβιοτικά (Mahdi et al., 2025).

Ο συνδυασμός προβιοτικών με πρεβιοτικά υποστρώματα, που ονομάζονται συμβιωτικά, έχει δείξει ένα συνεργιστικό αποτέλεσμα που βοηθά στη διαφοροποίηση και σταθεροποίηση του εντερικού μικροβιόκοσμου, στην ενίσχυση της απορρόφησης θρεπτικών ουσιών και

στην ενίσχυση της ακεραιότητας του βλεννογόνου (Okanlawon et al., 2025). Η επερχόμενη γενιά προϊόντων δεν θα αφορά μόνο τα είδη και το στάδιο παραγωγής, αλλά θα περιλαμβάνει και τις προκλήσεις για την υγεία που επικρατούν εκείνη τη στιγμή. Ως εκ τούτου, η πρώτη «ενιαία λύση» δεν θα είναι κατάλληλη για τη διαχείριση της υγείας του εντέρου.

Η διατροφογενετική, δηλαδή η μελέτη της επίδρασης των θρεπτικών συστατικών της διατροφής στην έκφραση των γονιδίων και στην επιγενετική τροποποίηση, είναι ένας από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους τομείς της επιστήμης στη διατροφή των πτηνών, αν και το μεγαλύτερο μέρος της μέχρι σήμερα έρευνας έχει επικεντρωθεί κυρίως στα πουλερικά (Hassan et al., 2022). Η έρευνα στη θρεπτική γονιδιωματική έχει δείξει ότι τα θρεπτικά συστατικά και τα λειτουργικά τρόφιμα μπορούν να τροποποιήσουν την έκφραση των γονιδίων που σχετίζονται με την ανοσία, το μεταβολισμό, την ανάπτυξη και την αντιοξειδωτική ικανότητα.

Επιπλέον, ο διατροφικός προγραμματισμός κατά τη διάρκεια της προγεννητικής και μεταγεννητικής ζωής μπορεί να έχει μακροχρόνιες επιπτώσεις στην υγεία και στην απόδοση των πτηνών (Hassan et al., 2022). Η τεχνολογία αλληλούχισης RNA έχει δημιουργήσει ένα νέο μέτωπο για αυτή την εφαρμογή, καθώς επιτρέπει την ταυτόχρονη καταγραφή όλων των αλλαγών στην έκφραση του mRNA σε μια διατροφική παρέμβαση και, ως εκ τούτου, παρέχει μια πλήρη εικόνα όλων των ενδοκυτταρικών μεταγραφικών γεγονότων (Hasan et al., 2019).

Το επόμενο βήμα είναι η επέκταση αυτών των προσεγγίσεων, ώστε να συμπεριλάβουν τα κατοικίδια και τα άγρια πτηνά, ως φυσικό επακόλουθο της χρήσης τους στα εμπορικά πουλερικά. Η έρευνα σχετικά με τα διατροφικά γονιδιωματικά προφίλ των παπαγάλων, των ωδικών πτηνών και των απειλούμενων ειδών θα μπορούσε να συμβάλει στη διαμόρφωση διατροφικών προγραμμάτων που βελτιστοποιούν την αναπαραγωγική επιτυχία, την ανοσολογική λειτουργία και τη μακροζωία σε προγράμματα αναπαραγωγής σε αιχμαλωσία.

Ωστόσο, η ερευνητική υποστήριξη και η χρηματοδότηση που θα το επέτρεπαν αυτό απουσιάζουν σε μεγάλο βαθμό, εκτός από τα πουλερικά. Η κάλυψη αυτού του κενού γνώσης θα απαιτούσε μεγαλύτερη συνεργασία μεταξύ ζωολογικών κήπων, ιδρυμάτων διατήρησης και επιστημόνων διατροφής. Οι Jarman et al. (2024) έχουν παροτρύνει την ευρύτερη

ζωολογική κοινότητα να μοιραστεί δεδομένα και να συνεργαστεί για να βοηθήσει τους φορείς προστασίας της φύσης στη διατροφική διαχείριση των αγρίων πτηνών.

Όλα τα διατροφικά πειράματα που διεξάγονται σε ζωολογικούς κήπους είναι δυνητικά ευεργετικά για την υγεία και την ευημερία των ζώων. Ωστόσο, σπάνια δημοσιεύονται αυτά τα πειράματα στη βιβλιογραφία και, ως εκ τούτου, δε συμβάλλουν θετικά στον ευρύτερο τομέα (Jarman et al., 2024). Οι διαχειριστές του έργου συγκάλεσαν ένα συμπόσιο για να διερευνήσουν νέες ιδέες σχετικά με την προώθηση της κατανάλωσης άγριων τροφίμων και τη μείωση της εξάρτησης από τα καλλιεργημένα τρόφιμα.

Η δημιουργία κεντρικών βάσεων δεδομένων με στοιχεία για τη διατροφική σύνθεση των άγριων τροφίμων, η τυποποίηση των πρωτοκόλλων για την αξιολόγηση της διατροφής των πληθυσμών σε αιχμαλωσία και η ενσωμάτωση εργαλείων διατροφικής γονιδιωματικής στα πρωτόκολλα αναπαραγωγής για τη διατήρηση είναι μερικές από τις προτεραιότητες που θα μπορούσε να αντιμετωπίσει ένα πλαίσιο συνεργασίας. Οι κατευθυντήριες γραμμές και ορισμένες απαιτήσεις για νέα συστατικά ζωοτροφών έχουν αλλάξει ραγδαία.

Μετά την έγκριση από την Ευρωπαϊκή Ένωση το 2021 για τη χρήση πρωτεϊνών εντόμων στις ζωοτροφές πουλερικών και χοίρων, διάφορα είδη εντόμων εγκρίθηκαν για ανθρώπινη κατανάλωση ως νέα τρόφιμα. Μέχρι το τέλος του 2024, η Ευρωπαϊκή Αρχή για την Ασφάλεια των Τροφίμων δημοσίευσε διάφορες ποικίλες γνωμοδοτήσεις σχετικά με την ασφάλεια (IPIFF, 2025).

Ωστόσο, τα κανονιστικά πλαίσια διαφέρουν μεταξύ των δικαιοδοσιών. Κρίνεται απαραίτητο να εναρμονιστούν τα πρότυπα για τις πρωτεΐνες εντόμων, τα φύκια και τις μονοκύτταρες πρωτεΐνες σε παγκόσμιο επίπεδο, προκειμένου να διευκολυνθεί το εμπόριο και να εξασφαλιστεί η εμπιστοσύνη των καταναλωτών. Αυτό θα επιτρέψει την κλιμάκωση και την ταχύτερη υιοθέτηση αυτών των συστατικών.

Στην ΕΕ, η τάση είναι προς μεγαλύτερη κανονιστική αποδοχή, αλλά οι ίδιες οι διαδικασίες έγκρισης είναι χρονοβόρες και απαιτούν πολλούς πόρους. Αυτό δημιουργεί προβλήματα για τους μικρότερους παραγωγούς και επιβραδύνει το ρυθμό με τον οποίον τα καινοτόμα προϊόντα φτάνουν στην αγορά. Τελικώς, ο τομέας της σύγχρονης διατροφής των πτηνών αντιμετωπίζει σοβαρά διεπιστημονικά προβλήματα και σχετίζεται άμεσα με τη βιοχημεία, τη μικροβιολογία, την οικολογία, τη γονιδιωματική και τη μηχανική.

10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα στοιχεία που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή καταδεικνύουν ότι η διατροφή των πτηνών περιλαμβάνει μια ταχέως μεταβαλλόμενη και πολύπλευρη διαδικασία, η οποία καθοδηγείται από τη σύγκλιση πιέσεων από την επιστήμη, την τεχνολογία, την οικονομία, τη νομοθεσία και τις κοινωνικές προσδοκίες. Το κύριο ερευνητικό ερώτημα που πραγματεύεται η παρούσα μελέτη είναι «πώς αλλάζει η διατροφική διαχείριση των πουλερικών, των πτηνών συντροφιάς και των άγριων πτηνών με τις επιστημονικές και τεχνολογικές εξελίξεις».

Η ανασκόπηση υπογραμμίζει ότι η αλλαγή λαμβάνει χώρα σε πολλές διαστάσεις ταυτόχρονα. Οι βασικές γνώσεις σχετικά με τις απαιτήσεις των πτηνών σε μακροθρεπτικά και μικροθρεπτικά συστατικά βελτιώνονται συνεχώς στο επίπεδο της βασικής διατροφικής επιστήμης με νέες έννοιες όπως η σύνθεση με βάση τα εύπεπτα αμινοξέα, η έννοια της ιδανικής πρωτεΐνης και η βελτιωμένη κατανόηση της βιοδιαθεσιμότητας (Klasing, 2025).

Οι βελτιώσεις επιτυγχάνουν αύξηση της απόδοσης, η οποία επιτρέπει στους σχεδιαστές ζωοτροφών να μεταβούν από τη διατροφή με βάση την ακατέργαστη πρωτεΐνη στη διατροφή με βάση τα αμινοξέα ακριβείας, μειώνοντας έτσι τη διατροφική σπατάλη και την έκκριση αζώτου στο περιβάλλον. Το μικροβίωμα του εντέρου είναι ένας σημαντικός μεσολαβητής μεταξύ της διατροφής και της υγείας του ξενιστή.

Επιπλέον, η αλληλούχηση υψηλής απόδοσης καταδεικνύει ότι το εντερικό μικροβίωμα των πτηνών είναι πολύ πιο περίπλοκο και λειτουργικά σημαντικό από ό,τι είχε προηγουμένως συνειδητοποιηθεί. Επιπλέον, τα ζυμωτικά βακτήρια στο τυφλό έντερο παράγουν λιπαρά οξέα βραχείας αλύσου, τα οποία ρυθμίζουν την ανοσολογική σηματοδότηση και καταστέλλουν τον αποικισμό παθογόνων (Ali et al., 2022).

Η παγκόσμια απαγόρευση των αντιβιοτικών αυξητικών παραγόντων στις ζωοτροφές έχει δημιουργήσει μια κρίσιμη ζήτηση για εναλλακτικές λύσεις, που διατηρούν την υγεία του εντέρου δίχως να συμβάλλουν στην αντοχή στα αντιμικροβιακά. Η χρήση προβιοτικών, πρεβιοτικών, συνβιοτικών και μεταβιοτικών έχει μεγάλο δυναμικό, το οποίο έχει αποδειχθεί επανειλημμένως σε ελεγχόμενες δοκιμές. Αυτές έχουν δείξει βελτιώσεις στο σωματικό

βάρος, στο δείκτη μετατρεψιμότητας της τροφής και στην εντερική μορφολογία των ορνίθων κρεατοπαραγωγής (Teng et al., 2021).

Τα μεταβιοτικά παρασκευάσματα, που αποτελούνται από νεκρούς μικροοργανισμούς και τους μεταβολίτες τους, παρουσιάζουν πρακτικό πλεονέκτημα όσον αφορά τη θερμική και οξειδωτική σταθερότητα κατά τη διάρκεια της σφαιροποίησης των ζωοτροφών και την μακροχρόνια αποθήκευση, καθιστώντας τα πρόσθετα νέας γενιάς για βιομηχανική χρήση (Waqas et al., 2024). Παρόλο που έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις όσον αφορά την ειδικότητα των στελεχών, τη βελτιστοποίηση της δόσης και τη βιωσιμότητα των προβιοτικών κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παραγωγής, ενώ η βάση τεκμηρίωσης για τα λειτουργικά πρόσθετα των πτηνών συντροφιάς είναι σημαντικά πιο περιορισμένη, σε σύγκριση με τα πουλερικά.

Συγχρόνως, τα προβιοτικά, τα φυτογενή πρόσθετα ζωοτροφών και οι πρωτεΐνες με βάση τα έντομα αποτελούν αποτελεσματικές και βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις σε σχέση με τις τυπικές πηγές πρωτεϊνών στη διατροφή των πτηνών, με ορισμένες επιφυλάξεις. Σύμφωνα με τους Aminullah et al. (2025), τα φυτογενή πρόσθετα ζωοτροφών είναι ευεργετικά μέσω τουλάχιστον τεσσάρων συμπληρωματικών μηχανισμών.

Η αντιμικροβιακή τους δράση λειτουργεί διαταράσσοντας τις βακτηριακές μεμβράνες, η αντιοξειδωτική τους προστασία περιλαμβάνει τόσο την εξουδετέρωση των ελεύθερων ριζών όσο και τη ρύθμιση των ενδογενών ενζύμων, ενισχύουν την έκκριση των πεπτικών ενζύμων και έχουν θετικές επιδράσεις στην εντερική μορφολογία. Τα ευρήματα της μετα-ανάλυσης επιβεβαιώνουν γενικά ότι η φυτογενής συμπλήρωση δύναται να βελτιώσει την ανάπτυξη και τις βιοχημικές παραμέτρους των πουλερικών (Aminullah et al., 2025).

Σε μοριακό επίπεδο, η διατροφική γονιδιωματική ανάλυση υπογράμμισε ότι τα δοκιμασμένα πρόσθετα ρυθμίζουν τη σηματοδότηση των υποδοχέων toll-like, καθώς και τις οδούς MAPK-απόπτωσης και PI3K-Akt-mTOR κατά μήκος του εντέρου των ορνίθων κρεατοπαραγωγής. Επιβεβαιώθηκε ότι τα ευεργετικά αποτελέσματα αυτών των προσθέτων προκύπτουν ως αποτέλεσμα τουλάχιστον μερικού μεταγραφικού επαναπρογραμματισμού (Paraskeuas & Mountzouris, 2019).

Ωστόσο, η σχέση δόσης-απόκρισης για τα φυτογενή προϊόντα είναι συχνά μη γραμμική και ελάχιστα τυποποιημένη μεταξύ των παρτίδων φυτικών προϊόντων, ενώ σχεδόν όλα τα δημοσιευμένα στοιχεία αφορούν εμπορικά είδη πουλερικών, τα οποία απαιτούν επί του

παρόντος υποθετική εξάπλωση στα κατοικίδια πτηνά. Οι πρωτεΐνες εντόμων είναι μία από τις πιο ελπιδοφόρες εξελίξεις στον τομέα των ζωοτροφών.

Οι προνύμφες της μαύρης μύγας (BSF) περιέχουν 40-44% ακατέργαστη πρωτεΐνη, με προφίλ αμινοξέων αντίστοιχο με αυτό του ιχθυαλεύρου. Δοκιμές διατροφής αποδεικνύουν ότι το άλευρο BSFL μπορεί να αντικαταστήσει το 50-100% της πρωτεΐνης του σογιάλευρου σε ποσοστά προσθήκης έως 10-15% της διατροφής, χωρίς επιζήμια αποτελέσματα στην απόδοση των ορνίθων κρεατοπαραγωγής (Salahuddin et al., 2024).

Η πεπτικότητα των αμινοξέων του άλευρου *Tenebrio molitor* είναι υψηλότερη σε σύγκριση με την *Hermetia illucens*, υποδηλώνοντας τη βιοδιαθεσιμότητα των αμινοξέων του άλευρου αυτού (De Marco et al., 2015). Μετά την έγκριση μέσω του Κανονισμού (ΕΕ) 2021/1372 των επεξεργασμένων ζωικών πρωτεϊνών από έντομα για χρήση σε ζωοτροφές πουλερικών, έχουν πραγματοποιηθεί σημαντικές εμπορικές επενδύσεις στον τομέα (IPIFF, 2024).

Οι μικροάλγες, ιδίως η σπιρουλίνα (55-70% ακατέργαστη πρωτεΐνη) και η χλωρέλλα, έχουν προστεθεί στον κατάλογο των εναλλακτικών πρωτεϊνών. Οι μικροάλγες δεν παρέχουν μόνο πρωτεΐνες, αλλά και βιοδραστικές ενώσεις με αντιοξειδωτική και ανοσοδιεγερτική δράση (Ogbuewu και Mbajiorgu, 2025; Sugiharto, 2020).

Σύμφωνα με τον Ledbetter (2025), οι ζύμες και τα βακτήρια μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία μονοκύτταρων πρωτεϊνών που δεν απαιτούν καλλιεργήσιμη γη ή ειδικές κλιματολογικές συνθήκες για την ανάπτυξή τους. Για το σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν βιομηχανικά υποστρώματα όπως η μεθανόλη και το μεθάνιο.

Παρόλα αυτά, το κόστος παραγωγής τους είναι υψηλότερο από αυτό της σόγιας σε τρέχουσες κλίμακες, ενώ είναι πιθανό ότι η καλύτερη μέθοδος είναι ο στρατηγικός συνδυασμός περισσότερων εκ του ενός συστατικών που πληρούν τις διατροφικές προδιαγραφές του συστήματος και είναι οικονομικά βιώσιμοι. Η διατροφή ακριβείας μπορεί να θεωρηθεί ως το φυσικό τελικό σημείο μιας μακράς περιόδου εξέλιξης στη σύνθεση των ζωοτροφών.

Αυτή η εξέλιξη περιλαμβάνει τη μετάβαση από το παραδοσιακό πρόγραμμα τριών έως πέντε φάσεων, μέχρι την καθημερινή αλλαγή στη σύνθεση της διατροφής, προκειμένου να προσαρμοστεί στις μεταβαλλόμενες διατροφικές ανάγκες. Τα πειραματικά ευρήματα καταδεικνύουν ότι τα συστήματα διατροφής ακριβείας μπορούν να βελτιώσουν το βάρος

σφαγής και τις χονδρικές αποδόσεις (περίπου 1,30 δολάρια Αυστραλίας ανά πτηνό ή 32.500 δολάρια Αυστραλίας ανά κύκλο κοπαδιού με 25.000 πτηνά), κυρίως μέσω της βελτίωσης της σωματικής σύνθεσης και όχι της αύξησης του ζωντανού βάρους (Moss et al., 2021).

Η συγχώνευση των αυτόματων συστημάτων ανάμειξης ζωοτροφών, της παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο με βάση το IoT και των προγνωστικών μοντέλων ανάπτυξης της Timeman διευκολύνει την εφαρμογή σε εμπορικό επίπεδο (Moss et al., 2021). Τα περιβαλλοντικά επιχειρήματα για μια διατροφή με χαμηλότερη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες δεν είναι λιγότερο πειστικά.

Η μείωση της ακατέργαστης πρωτεΐνης στη διατροφή, κατά λιγότερο από δύο ποσοστιαίες μονάδες, μειώνει το άζωτο των απορριμμάτων κατά 18%, το οποίο με τη σειρά του μειώνει τις εκπομπές αμμωνίας και τη ρύπανση των υπογείων υδάτων. Ωστόσο, το οικονομικό εμπόδιο που δημιουργούν οι απαιτήσεις κεφαλαιουχικών επενδύσεων έχει περιορίσει μέχρι στιγμής την πρόσβαση σε αυτή την προσέγγιση για τους μικρούς και μεσαίους παραγωγούς.

Επιπλέον, αυτή η προσέγγιση έχει επικυρωθεί σχεδόν αποκλειστικά στην παραγωγή ορνίθων κρεατοπαραγωγής. Η εφαρμογή της σε όρνιθες ωοπαραγωγής, γαλοπούλες και είδη πτηνών συντροφιάς δεν έχει ακόμη διερευνηθεί. Όσον αφορά τον τομέα της διατροφογενομικής έχει ανοίξει έναν εντελώς νέο δρόμο στη διατροφή των πουλερικών.

Η ικανότητα της τεχνολογίας αλληλούχισης RNA να παρακολουθεί χιλιάδες αλλαγές στην έκφραση γονιδίων, που συμβαίνουν ταυτόχρονα ως απόκριση σε μια διατροφική παρέμβαση, έχει βοηθήσει στον προσδιορισμό συγκεκριμένων αλληλεπιδράσεων θρεπτικών συστατικών-γονιδίων.

Ειδικότερα, έχει αποδειχθεί ότι η συμπλήρωση με ωμέγα-3 λιπαρά οξέα ρυθμίζει πάνω από 1.300 ηπατικά γονίδια σε όρνιθες ωοπαραγωγής (Khodaei et al., 2023), η κOURKOURMÍNH ρυθμίζει τα γονίδια αντιοξειδωτικής άμυνας σε όρνιθες κρεατοπαραγωγής που εκτίθενται σε αφλατοξίνη και τα λυσοφωσφολιπίδια αλλάζουν την έκφραση γονιδίων που σχετίζονται με αλληλεπιδράσεις εξωκυτταρικής μήτρας και σηματοδότηση MAPK.

Τα διατροφογενετικά προφίλ των πτηνών συντροφιάς είναι εντελώς αχαρακτήριστα, γεγονός που αντιπροσωπεύει ένα κρίσιμο κενό γνώσης. Η απουσία κατάλληλης ερευνητικής υποδομής και ειδικής χρηματοδότησης παρεμποδίζει την πρόοδο όσον αφορά τους τρόπους με τους οποίους οι δίαιτες τροποποιούν τη γονιδιακή έκφραση σε παπαγάλους, ωδικά πτηνά

και απειλούμενα είδη και το πώς οι διατροφικές παρεμβάσεις μπορούν να βελτιώσουν την αναπαραγωγική επιτυχία και τη μακροζωία στην αναπαραγωγή, για σκοπούς συντήρησης (Jarman et al., 2024).

Η διατροφή των πτηνών συντροφιάς παραμένει προβληματική λόγω της συνεχιζόμενης διατροφής με βάση τους σπόρους, η οποία είναι πτωχή σε απαραίτητα αμινοξέα, ασβέστιο, βιταμίνη Α και βιταμίνη D₃. Αυτό προκαλεί παχυσαρκία, ηπατική λιπιδίωση, αθηροσκλήρωση και μεταβολική οστική νόσο, που είναι οι πιο συχνές παθήσεις στην πτηνολογία (Hoppe, 2024).

Ωστόσο, το οικολογικό αποτύπωμα της συμπληρωματικής σίτισης σε κλίμακα τοπίου δεν πρέπει να υποτιμάται. Για παράδειγμα, οι εισροές φωσφόρου από συμπληρωματική τροφή για πτηνά στο Ηνωμένο Βασίλειο είναι περίπου 2,4 γιγαγραμμαμάρια ετησίως (Abraham et al., 2024).

Η περιβαλλοντική βιωσιμότητα είναι σημαντική σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού λόγω της φύσης των πουλερικών. Η παραγωγή ζωοτροφών αντιπροσωπεύει το 50-80% του συνολικού περιβαλλοντικού αντίκτυπου της παραγωγής κρέατος πουλερικών και αυγών (Sustell, 2024).

Η χρήση εναλλακτικών πηγών πρωτεϊνών, η ακριβής διατροφή και οι αρχές της κυκλικής οικονομίας είναι ο πιο βιώσιμος τρόπος για να αποσυνδεθεί η παραγωγή πουλερικών από τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης στη σύνθεση των ζωοτροφών και η ανάπτυξη προβιοτικών ακριβείας για τα είδη ξενιστών και το στάδιο παραγωγής θα επιταχύνουν περαιτέρω την πρόοδο (Mahdi et al., 2025).

Ο σύγχρονος τομέας της διατροφής των πτηνών είναι εγγενώς διεπιστημονικός και οι πρόοδοι θα εξαρτηθούν από την έξυπνη αλληλεπίδραση ποικίλων στρατηγικών. Σύμφωνα με μια έρευνα του 2016, οι κορυφαίες προτεραιότητες για την επόμενη δεκαετία θα πρέπει να είναι η κάλυψη του χάσματος γνώσεων μεταξύ των πουλερικών και άλλων ειδών πτηνών, μέσω μιας στενότερης συνεργασίας μεταξύ ζωολογικών κήπων, ιδρυμάτων διατήρησης, ερευνητικών ομάδων πανεπιστημίων και της βιομηχανίας ζώων συντροφιάς.

11. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Abdel-Hafeez, H. M., et al. "Effects of Probiotic, Prebiotic, and Synbiotic with and without Feed Restriction on Performance, Hematological Indices and Carcass Characteristics of Broiler Chickens." *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, vol. 30, no. 5, 2017, pp. 672–682. doi:10.5713/ajas.16.0535.
2. Abdel-Wareth, A. A. A., et al. "Algae as an Alternative Source of Protein in Poultry Diets for Sustainable Production and Disease Resistance: Present Status and Future Considerations." *Frontiers in Veterinary Science*, vol. 11, 2024, article 1382163. doi:10.3389/fvets.2024.1382163.
3. Abdelli, N., D. Solà-Oriol, and J. F. Pérez. "Phytogenic Feed Additives in Poultry: Achievements, Prospective and Challenges." *Animals*, vol. 11, no. 12, 2021, article 3471. doi:10.3390/ani11123471.
4. Abraham, A. J., et al. "Supplementary Bird Feeding Involves Globally Significant Transfers of Nutrients into Garden and Countryside Environments." *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 22, no. 5, 2024, article e2756. doi:10.1002/fee.2756.
5. Achilonu, M., et al. "Phytochemical Benefits of Agroresidues as Alternative Nutritive Dietary Resource for Pig and Poultry Farming." *Journal of Chemistry*, vol. 2018, 2018, article 1035071. doi:10.1155/2018/1035071.
6. Adisseo. "Feed Efficiency in Poultry Production." Adisseo, 2024, www.adisseo.com/eu/challenge/poultry-feed-efficiency. Accessed 9 Feb. 2026.
7. Adjei-Mensah, B., et al. "Antibacterial Activities of Garlic (*Allium sativum*) in Broiler and Laying Hens Production." *World's Poultry Science Journal*, vol. 79, no. 2, 2023, pp. 269–286.
8. Ali, Q., et al. "Microbial Short-Chain Fatty Acids: A Bridge between Dietary Fibers and Poultry Gut Health — A Review." *Animal Bioscience*, vol. 35, no. 10, 2022, pp. 1461–1478. doi:10.5713/ab.21.0562.
9. Aminullah, N., et al. "Phytogenic Feed Additives as Alternatives to Antibiotics in Poultry Production: A Review." *Veterinary World*, vol. 18, no. 1, 2025, pp. 141–154. doi:10.14202/vetworld.2025.141-154.
10. Applegate, T. J. *Protein and Amino Acid Requirements for Poultry*. Purdue University Extension, 2008. AS-584-W.

11. Asiamah, C. A., et al. "Transcriptomic Analysis of Broiler Chickens Reveals Metabolic Adaptations to a Reduced Crude Protein Diet." *Poultry Science*, vol. 104, no. 4, 2025, article 104920.
12. Atuahene, D., et al. "Probiotics, Prebiotics, and Synbiotics in Pigs and Poultry." *Animals*, vol. 15, no. 11, 2025, article 3199. doi:10.3390/ani15113199.
13. Bandyopadhyay, S. "Systemic Clinical and Metabolic Diseases." *Pet Bird Diseases and Care*, Springer, 2017, pp. 225–266. doi:10.1007/978-981-10-3674-3_8.
14. Belhadj Slimen, I., et al. "Insects as an Alternative Protein Source for Poultry Nutrition: A Review." *Frontiers in Veterinary Science*, vol. 10, 2023, article 1200031. doi:10.3389/fvets.2023.1200031.
15. Boontiam, W., B. Jung, and Y. Y. Kim. "Effects of Lysophospholipid Supplementation to Lower Nutrient Diets on Growth Performance, Intestinal Morphology, and Blood Metabolites in Broiler Chickens." *Poultry Science*, vol. 96, no. 3, 2017, pp. 593–601.
16. Brightsmith, D. J. "Nutritional Levels of Diets Fed to Captive Amazon Parrots: Does Mixing Seed, Produce, and Pellets Provide a Healthy Diet?" *Journal of Avian Medicine and Surgery*, vol. 26, no. 3, 2012, pp. 149–160. doi:10.1647/2011-025R.1.
17. Cloft, S. E., M. Jia, and E. A. Wong. "Research Note: Intestinal Morphology and Gene Expression Changes in Broilers Supplemented with Lysolecithin." *Poultry Science*, vol. 100, no. 7, 2021, article 101192.
18. Cox, D. T. C., and K. J. Gaston. "Urban Bird Feeding: Connecting People with Nature." *PLoS ONE*, vol. 11, no. 7, 2006, article e0158717. doi:10.1371/journal.pone.0158717.
19. De Marco, M., et al. "Nutritional Value of Two Insect Larval Meals (*Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens*) for Broiler Chickens: Apparent Nutrient Digestibility, Apparent Ileal Amino Acid Digestibility and Apparent Metabolizable Energy." *Animal Feed Science and Technology*, vol. 209, 2015, pp. 211–218. doi:10.1016/j.anifeedsci.2015.08.006.
20. DEFRA. "Indicator 7: Poultry Sector – Feed Conversion Ratio." *Agri-climate Indicators*. Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2020.
21. Dunislawska, A., et al. "Interaction between Early In Ovo Stimulation of the Gut Microbiota and Chicken Host – Splenic Changes in Gene Expression and Methylation." *Journal of Animal Science and Biotechnology*, vol. 12, 2021, article 73. doi:10.1186/s40104-021-00592-2.

22. Dunislawska, A., et al. "Pre-hatching and Post-hatching Environmental Factors Related to Epigenetic Mechanisms in Poultry." *Journal of Animal Science*, vol. 100, no. 1, 2022, article skab370.
23. Edwards, J., et al. "16S rRNA Gene-Based Microbiota Profiles from Diverse Avian Faeces Are Largely Independent of DNA Preservation and Extraction Method." *BMC Microbiology*, vol. 23, 2023, article 206. doi:10.1186/s12866-023-02940-w.
24. EUFIC. "Is Eating Soy Bad for the Environment?" European Food Information Council, 2024, www.eufic.org. Accessed 9 Feb. 2026.
25. Fadl, S. E., et al. "Impact of Dietary Mannan-Oligosaccharide and β -Glucan Supplementation on Growth, Histopathology, *E. coli* Colonization and Hepatic Transcripts of TNF- α and NF- κ B of Broiler Challenged with *E. coli* O78." *BMC Veterinary Research*, vol. 16, 2020, article 204. doi:10.1186/s12917-020-02423-2.
26. Ferrante, V., et al. "Incorporating Whole Insect Larvae into Poultry Diets: State of the Art and Future Perspectives." *Italian Journal of Animal Science*, vol. 23, no. 1, 2024, pp. 44–61. doi:10.1080/1828051X.2023.2283083.
27. Ferraris, F., et al. "Food Industry Byproducts as Starting Material for Innovative, Green Feed Formulation: A Sustainable Alternative for Poultry Feeding." *Molecules*, vol. 27, no. 15, 2022, article 4735. doi:10.3390/molecules27154735.
28. Flees, J. J., B. Ganguly, and S. Dridi. "Phytogenic Feed Additives Improve Broiler Feed Efficiency via Modulation of Intermediary Lipid and Protein Metabolism–Related Signaling Pathways." *Poultry Science*, vol. 100, no. 3, 2021, article 100963.
29. Gholami-Ahangaran, M., et al. "Thymol and Carvacrol Supplementation in Poultry Health and Performance." *Veterinary Medicine and Science*, vol. 8, no. 1, 2022, pp. 267–288.
30. Gidenne, T., et al. "Experimental Validation of a Precision Feeding Strategy to Reduce Feeding Cost and Nutrient Excretion in Broilers." *Feed-a-Gene Project Proceedings*, 2018, www.feed-a-gene.eu/. Accessed 9 Feb. 2026.
31. Griela, E., and K. C. Mountzouris. "Nutrigenomic Profiling of Reduced Specification Diets and Phytogenic Inclusion Effects on Critical Toll-like Receptor Signaling, Mitogen-Activated Protein Kinase-Apoptosis, and PI3K-Akt-mTOR Gene Components along the Broiler Gut." *Poultry Science*, vol. 102, no. 6, 2023, article 102675. doi:10.1016/j.psj.2023.102675.
32. Hasan, M. S., J. M. Feugang, and S. F. Liao. "A Nutrigenomics Approach Using RNA Sequencing Technology to Study Nutrient–Gene Interactions in Agricultural Animals."

- Current Developments in Nutrition, vol. 3, no. 8, 2019, article nzz082. doi:10.1093/cdn/nzz082.
33. Hassan, F., M. Alagawany, and R. Jha. "Editorial: Interplay of Nutrition and Genomics: Potential for Improving Performance and Health of Poultry." *Frontiers in Physiology*, vol. 13, 2022, article 1030995. doi:10.3389/fphys.2022.1030995.
 34. Hauschild, L., et al. "Multiphase Feeding Program for Broilers Can Replace Traditional System." *Scientia Agricola*, vol. 72, no. 3, 2015, pp. 210–214.
 35. Hombegowda, G. P., et al. "Growth Performance, Carcass Traits and Gut Health of Broiler Chickens Fed Diets Incorporating Single Cell Protein Produced from *Methylococcus* Species." *Animal Bioscience*, vol. 34, no. 12, 2021, pp. 1951–1962. doi:10.5713/ab.21.0006.
 36. Hoppes, S. M. "Nutritional Diseases of Pet Birds." *MSD Veterinary Manual*, Merck & Co., 2024, www.msdsvetmanual.com. Accessed 9 Feb. 2026.
 37. Ibrahim, M., E. Grochowska, and K. Stadnicka. "Primordial Germ Cells as a Potential Model for Understanding (Nutri) Epigenetic – Metabolic Interactions: A Mini Review." *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, vol. 13, 2025, article 1576768.
 38. IPIFF. "EU Legislation — General Overview." *International Platform of Insects for Food and Feed*, 2024, ipiff.org/insects-eu-legislation-general/. Accessed 9 Feb. 2026.
 39. IPIFF. "EU Novel Food Legislation and Other EU Requirements Applicable to Edible Insects." *International Platform of Insects for Food and Feed*, 2025, ipiff.org. Accessed 9 Feb. 2026.
 40. IPIFF. "Insect Proteins in Poultry and Pig Feed Are Fully Authorised in the European Union." *International Platform of Insects for Food and Feed*, 2021, ipiff.org. Accessed 9 Feb. 2026.
 41. Jajić, I., et al. "Changes in the Chemical Composition of the Yellow Mealworm (*Tenebrio molitor* L.) Reared on Different Nutritional Substrates." *Journal of Animal and Feed Sciences*, vol. 31, no. 3, 2022, pp. 257–264. doi:10.22358/jafs/147848/2022.
 42. Jarman, A. K., M. E. Shaw, and C. E. Grueber. "Current Perspectives in Avian Nutrition: Domestic Animal Models and Their Role in Conservation Management." *Ibis*, vol. 166, no. 1, 2024, pp. 1–19. doi:10.1111/ibi.13289.
 43. Khalilzadeh Houjaqan, M., et al. "The Effective Treatment of Hepatic Lipidosis and Lipemia in an Ornamental Hen: A Case Report." *Journal of Poultry Sciences and Avian Diseases*, vol. 1, no. 4, 2023, pp. 32–37. doi:10.61838/kman.jpsad.1.4.6.

44. Khodaei, F., M. H. Shahir, and S. Zerehdaran. "A Nutrigenomics Approach to Study the Effects of ω -3 Fatty Acids in Laying Hens under Physiological Stress." *Frontiers in Physiology*, vol. 14, 2023, article 1198247. doi:10.3389/fphys.2023.1198247.
45. Klasing, K. C. "Avian Gastrointestinal Anatomy and Physiology." *Seminars in Avian and Exotic Pet Medicine*, vol. 8, no. 2, 1999, pp. 42–50. doi:10.1016/S1055-937X(99)80036-X.
46. Klasing, K. C. "Informal Nutrition Symposium: Overview of the Nutrient Requirements of Poultry." *Poultry Science*, vol. 104, no. 6, 2025, article 104814. doi:10.1016/j.psj.2025.104814.
47. Kleyn, R. *Chicken Nutrition: A Guide for Nutritionists and Poultry Professionals*. Context, 2013.
48. Korver, D. R. "Implications of Changing Immune Function through Nutrition in Poultry." *Animal Feed Science and Technology*, vol. 173, no. 1–2, 2012, pp. 54–64. doi:10.1016/j.anifeedsci.2011.12.019.
49. Koutsos, E. A., K. D. Matson, and K. C. Klasing. "Nutrition of Birds in the Order Psittaciformes: A Review." *Journal of Avian Medicine and Surgery*, vol. 15, no. 4, 2001, pp. 257–275.
50. Kouvedaki, I., et al. "Nutrigenomics of Natural Antioxidants in Broilers." *Antioxidants*, vol. 13, no. 3, 2024, article 270.
51. Kulshreshtha, G., et al. "Effect of Dietary Supplementation of Microalgae Spirulina and Chlorella on Growth Performance of Broiler Chicken at High Altitude." *Indian Journal of Animal Sciences*, vol. 92, no. 8, 2022, pp. 995–998.
52. Ledbetter, F. "Single-Cell Protein for Feed and Food." *EuroBiotech Journal*, vol. 9, no. 1, 2025, pp. 78–87. doi:10.2478/ebtj-2025-0010.
53. Lee, M. D., A. A. Pedroso, and J. J. Maurer. "Bacterial Composition of a Competitive Exclusion Product and Its Correlation with Product Efficacy at Reducing Salmonella in Poultry." *Frontiers in Physiology*, vol. 13, 2023, article 1043383. doi:10.3389/fphys.2022.1043383.
54. Li, J. L., et al. "Effect of In Ovo Feeding of Folic Acid on the Folate Metabolism, Immune Function and Epigenetic Modification of Immune Effector Molecules of Broiler." *British Journal of Nutrition*, vol. 115, no. 3, 2016, pp. 411–421.
55. Li, L., et al. "Effects of Thymol and Carvacrol Eutectic on Growth Performance, Jejunal Morphology, and Nutrient Absorption and Transport in Broilers." *Animals*, vol. 13, no. 14, 2023, article 2337.

56. Li, Y., et al. "Nutritional Composition of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens* L.) and Its Potential Benefits for Animal Feed — A Review." *Animals*, vol. 12, no. 19, 2022, article 2576. doi:10.3390/ani12192576.
57. Liu, S. J., et al. "Effects of Natural Capsicum Extract on Growth Performance, Nutrient Utilization, Antioxidant Status, Immune Function, and Meat Quality in Broilers." *Poultry Science*, vol. 100, no. 9, 2021, article 101301.
58. Mahdi, A. A., et al. "Impact of Probiotics on Chicken Gut Microbiota, Immunity, Behavior, and Productive Performance — A Systematic Review." *Frontiers in Animal Science*, vol. 6, 2025, article 1562527. doi:10.3389/fanim.2025.1562527.
59. Martin, V. Y., and E. I. Greig. "Young Adults' Motivations to Feed Wild Birds and Influences on Their Potential Participation in Citizen Science: An Exploratory Study." *Biological Conservation*, vol. 235, 2019, pp. 295–307. doi:10.1016/j.biocon.2019.05.009.
60. Martinez, D. A., C. L. Ponce-de-Leon, and C. N. Coon. "Exploring the Potential of Artificial Intelligence in Feed Formulation to Advance Poultry Health and One-Health." *German Journal of Veterinary Research*, vol. 4, no. 4, 2024, pp. 1–3. doi:10.51585/gjvr.2024.4.0104.
61. Moss, A. F., et al. "Precision Feeding and Precision Nutrition: A Paradigm Shift in Broiler Feed Formulation?" *Animal Bioscience*, vol. 34, no. 3, 2021, pp. 354–362. doi:10.5713/ab.20.0630.
62. National Research Council (NRC). *Nutrient Requirements of Poultry*. 9th rev. ed., National Academies Press, 1994.
63. Nouzarian, R., et al. "Effect of Turmeric Powder on Performance, Carcass Traits, Humoral Immune Responses, and Serum Metabolites in Broiler Chickens." *Journal of Animal and Feed Sciences*, vol. 20, no. 3, 2011, pp. 389–400.
64. Ogbuewu, I. P., and C. A. Mbajjorgu. "Unlocking the Feed Supplement Potentials of Blue-Green Alga (*Spirulina*) in Broiler Nutrition: A Comprehensive Review." *Tropical Animal Health and Production*, vol. 57, no. 7, 2025, article 364. doi:10.1007/s11250-025-04587-1.
65. Okanlawon, O. O., et al. "Probiotics, Prebiotics, and Synbiotics in Pigs and Poultry." *Animals*, vol. 15, no. 21, 2025, article 3043. doi:10.3390/ani15213043.
66. Oni, A. I., and O. E. Oke. "Gut Health Modulation through Phytochemicals in Poultry: Mechanisms, Benefits, and Applications." *Frontiers in Veterinary Science*, vol. 12, 2025, article 1616734.

67. Opazo, R., et al. "Formulation Strategies of Probiotics in Broilers." *Frontiers in Animal Science*, vol. 6, 2025, article 1679614. doi:10.3389/fanim.2025.1679614.
68. Osuch, B., et al. "The Potential of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens* L.) Larvae in Chicken and Swine Nutrition." *Journal of Animal and Feed Sciences*, vol. 33, no. 4, 2024, pp. 355–369. doi:10.22358/jafs/192511/2024.
69. Paraskeuas, V. V., and K. C. Mountzouris. "Modulation of Broiler Gut Microbiota and Gene Expression of Toll-like Receptors and Tight Junction Proteins by Diet Type and Inclusion of Phytogenics." *Poultry Science*, vol. 98, no. 5, 2019, pp. 2220–2230.
70. Peng, S. "The Sustainability of Keeping Birds as Pets: Should Any Be Kept?" *Animals*, vol. 11, no. 2, 2021, article 582. doi:10.3390/ani11020582.
71. Putman, B., et al. "Life-Cycle Analysis of Soybean Meal, Distiller-Dried Grains with Solubles, and Synthetic Amino Acid-Based Animal Feeds for Swine and Poultry Production." *Animal Feed Science and Technology*, vol. 268, 2020, article 114607. doi:10.1016/j.anifeedsci.2020.114607.
72. Rahman, I. "Dietary Polyphenols Mediated Regulation of Oxidative Stress and Chromatin Remodeling in Inflammation." *Nutrition Reviews*, vol. 66, suppl. 1, 2008, pp. S42–S45.
73. Ravindran, V. *Poultry Feed Availability and Nutrition in Developing Countries*. FAO Poultry Development Review, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013.
74. Ritchie, B. W., G. J. Harrison, and L. R. Harrison. *Avian Medicine: Principles and Application*. Updated ed., Wingers Publishing, 2023.
75. Roura, E., et al. "Developmental Programming in Chickens Including Transgenerational Nutrition, Chemosensory Mechanisms and In Ovo Essential Oils, Organic Acids, and Pre- Pro- Syn-biotics; Role of Epigenetic Modifications." *Poultry Science*, vol. 104, no. 11, 2025, article 105857.
76. Rudkowska, I., et al. "Omega-3 Fatty Acids Regulate Gene Expression Levels Differently in Subjects Carrying the PPAR α L162V Polymorphism." *Genes & Nutrition*, vol. 4, no. 3, 2009, pp. 199–205.
77. Salahuddin, M., et al. "Flight toward Sustainability in Poultry Nutrition with Black Soldier Fly Larvae." *Animals*, vol. 14, no. 3, 2024, article 510. doi:10.3390/ani14030510.
78. Samanta, I., and S. Bandyopadhyay. "Diagnostic Techniques." *Pet Bird Diseases and Care*, Springer, 2017, pp. 73–93. doi:10.1007/978-981-10-3674-3_4.

79. Sarangi, N. R., et al. "Effect of Dietary Supplementation of Prebiotic, Probiotic, and Synbiotic on Growth Performance and Carcass Characteristics of Broiler Chickens." *Veterinary World*, vol. 9, no. 3, 2016, pp. 313–319. doi:10.14202/vetworld.2016.313-319.
80. Stanford, M. "Significance of Cholesterol Assays in the Investigation of Hepatic Lipidosis and Atherosclerosis in Psittacine Birds." *Exotic DVM*, vol. 8, no. 4, 2006, pp. 28–34.
81. Sugiharto, S. "Nutraceutical Aspects of Microalgae Spirulina and Chlorella as Potential Feed Additives for Broilers." *Livestock Research for Rural Development*, vol. 32, no. 6, 2020, article 84.
82. Sustell. "Progress and Opportunity for Sustainable Poultry." Sustell, 2024, www.sustell.com. Accessed 9 Feb. 2026.
83. Teng, P.-Y., et al. "Effects of Combination of Mannan-Oligosaccharides and β -Glucan on Growth Performance, Intestinal Morphology, and Immune Gene Expression in Broiler Chickens." *Poultry Science*, vol. 100, no. 12, 2021, article 101483. doi:10.1016/j.psj.2021.101483.
84. Waqas, M., et al. "Advantages of the Use of Postbiotics in Poultry Production: A New Concept." *Brazilian Journal of Poultry Science*, vol. 26, no. 3, 2024, article e1845. doi:10.1590/1806-9061-2024-1845.
85. Warren, W. A., and J. L. Emmert. "Efficacy of Phase-Feeding in Supporting Growth Performance of Broiler Chicks during the Starter and Finisher Phases." *Poultry Science*, vol. 79, no. 5, 2002, pp. 764–770.
86. Wise Guy Reports. "Wild Bird Feed Market Research Report 2035." Wise Guy Reports, 2025, www.wiseguyreports.com. Accessed 9 Feb. 2026.
87. Wu, S., et al. "Paternal Chronic Folate Supplementation Induced the Transgenerational Inheritance of Acquired Developmental and Metabolic Changes in Chickens." *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 286, no. 1910, 2019, article 20191653.
88. Yarru, L. P., et al. "Effects of Turmeric (*Curcuma longa*) on the Expression of Hepatic Genes Associated with Biotransformation, Antioxidant, and Immune Systems in Broiler Chicks Fed Aflatoxin." *Poultry Science*, vol. 88, no. 12, 2009, pp. 2620–2627.

